



# 应对气候变化

## 生态农业如何助力？

颜炯 陈雪 卢红雁 唐薇



# 声明

四川大学土壤活力研究与提升实验室为本报告的合法著作权所有人。  
本报告仅代表研究团队观点，与研究委托机构及作者供职单位无关。

本报告用于政策参考、信息共享和环保公益目的。为保护受访者隐私，报告第四章中所涉及受访农场及农人均为化名。

因研究团队能力所限，报告难免存在疏漏。恳请读者提出宝贵意见，  
以便改进完善。



概要 .....	1
一、引言 .....	3
1.1 全球气候危机与农业所面临的挑战 .....	3
1.1.1 全球气候变化的严峻形势 .....	3
1.1.2 气候变化对农业的多维冲击 .....	4
1.2 中国农业碳减排的迫切需求 .....	5
1.2.1 碳源还是碳汇？农业在气候变化中的双重角色 .....	6
1.2.2 粮食增产和固碳减排的平衡难题——化学农业面临的困境 .....	8
1.2.3 提升农田土壤固碳能力——国家层面的减排固碳行动 .....	9
1.3 气候友好的农业模式——生态农业 .....	10
1.3.1 什么是生态农业？ .....	10
1.3.2 生态农业在中国的起源和发展 .....	12
1.3.3 生态农业的不同技术体系 .....	14
1.3.4 生态农业和化学农业的区别 .....	15
1.4 报告目的 .....	16
1.5 报告的数据与信息来源 .....	16
1.6 报告的分析方法/框架 .....	16
1.6.1 文献筛选及梳理 .....	16
1.6.2 农户定性访谈分析方法 .....	17
二、减缓气候变化——生态农业如何助力？ .....	19
2.1 土壤如何储存碳？ .....	19
2.2 生态农业和化学农业的土壤固碳能力有无明显差异？ .....	21
2.2.1 固碳能力对比 .....	21

2.2.2 碳足迹对比 .....	22
2.3 结构性短板：化学农业土壤“留不住碳”的原因 .....	22
2.4 哪些生态农业管理方式有助于减缓气候变化？ .....	23
2.4.1 秸秆还田、有机肥和堆肥替代化肥——自建“有机质补给站” .....	24
2.4.2 用生物防治代替农药——构建“生态防火墙” .....	26
2.4.3 建立多样化种植系统——“天然肥料工厂” .....	29
2.4.4 地表覆盖——给土地披上“绿色地毯” .....	30
2.4.5 免耕/少耕——“不翻土的智慧” .....	32
2.4.6 优化水资源管理方式——节水减排双赢 .....	34
2.5 不同农田管理措施的减排固碳机制 .....	35
2.6 生态农业如何减缓气候变化：从农田管理到碳汇政策 .....	36
2.7 关于免耕/少耕对土壤碳封存贡献的不同观点 .....	37

### 三、适应气候变化——生态农业如何提升农业气候韧性？ ..... 39

3.1 什么是农业气候韧性？ .....	39
3.2 生态农业和化学农业的气候韧性有无明显差异？ .....	39
3.3 生态农业如何提高气候韧性？ .....	40
3.3.1 强化土壤健康：筑牢水分与养分韧性根基 .....	40
3.3.2 推行多样化种植：稳定产量与生物多样性 .....	43
3.3.3 选育常规品种：增强遗传适应力 .....	44
3.3.4 构建生态水系：提升水资源韧性 .....	45
3.4 化学农业气候韧性不强的原因 .....	47

### 四、气候变化中的农业——成都农人访谈发现 ..... 49

4.1 为什么关注成都平原？ .....	49
4.2 受访农场有什么特征？ .....	50
4.3 农友怎么看气候变化？ .....	51
4.3.1 气候变化：从科学概念到农友的认知 .....	51
4.3.2 土壤碳封存：农友的认知空白 .....	52
4.3.3 天气、农时与收成：农友眼中的气候变化 .....	52
4.4 农友怎样了解天气？ .....	59
4.5 农友怎样应对极端天气挑战？ .....	60
4.5.1 生态种植农友和常规种植农友都普遍采取的措施 .....	60
4.5.2 生态农友采取的其他应对措施 .....	61
4.5.3 应对措施的挑战：资金、劳动力、技术和认知等多重因素的制约 .....	64
4.6 思考 .....	65

## 五、生态农业的多元路径——四个实践案例的经验与挑战 ..... 67

5.1 案例1：侯光炯院士的自然免耕实践 .....	68
5.1.1 为什么要免耕? .....	68
5.1.2 如何做到自然免耕? .....	69
5.1.3 自然免耕的成功案例 .....	71
5.1.4 免耕农业未成为主流模式的原因剖析 .....	71
5.1.5 总结 .....	72
5.2 案例2：印度安得拉邦的社区主导自然农法 .....	74
5.2.1 安得拉邦社区主导自然农法的起源和现状 .....	74
5.2.2 安得拉邦社区主导自然农法的主要原则和措施 .....	74
5.2.3 APCNF自然农法的成效 .....	77
5.2.4 APCNF自然农法的未来与挑战 .....	78
5.2.5 印度与中国自然免耕实践对成都平原生态农业的启发 .....	79
5.3 案例3：恩斯特·戈茨的农林协同演替农业的理论与实践 .....	83
5.3.1 农林协同演替系统的理论基础 .....	83
5.3.2 实践方法与典型案例 .....	84
5.3.3 农林协同演替农业推广的挑战 .....	86
5.3.4 总结 .....	87
5.4 案例4：美国印第安纳州里克·克拉克农场的再生农业实践 .....	88
5.4.1 从传统农业到再生农业的转型 .....	88
5.4.2 农业的经济与生态收益 .....	91
5.4.3 挑战与解决方案 .....	92
5.4.4 总结 .....	92

## 六、建议与思考 ..... 93

6.1 生态农业具备减缓与适应气候变化的双重潜力 .....	93
6.2 面向未来，生态农业需要走向更系统、更本土的深化探索 .....	93
6.3 政策支持应明确生态农业在气候应对中的战略地位 .....	94
6.4 结合成都平原生态农业转型路径，推动多方协作的农业气候韧性提升机制 .....	95
6.4.1 建立以社区为核心的农业气候韧性示范项目 .....	95
6.4.2 自然免耕的再激活与生态转型结合 .....	95
6.5 针对生态农业未来的研究方向建议 .....	95
6.5.1 聚焦农业碳汇：构建生态农业的气候融资路径 .....	95
6.5.2 构建生态农业的社会支撑系统研究 .....	96
6.6 打通科学研究与农田实践之间的“最后一公里” .....	96

## 七、致谢 ..... 98

八、参考文献 .....	99
--------------	----

九、附录 .....	106
------------	-----

附录1 相关概念说明 .....	106
附录2 附表1 生态农业及相近农业模式对比 .....	107
附录3 农友访谈大纲 .....	108
附录4 附表2 受访农户信息 .....	110

# 概要

---

在全球气候危机日益加剧的背景下，农业既是气候变化的“受害者”，也是温室气体排放的重要“来源”与潜在的“解决方案”。作为农业大国，中国在“双碳”目标引领下，如何推动农业绿色转型、探索气候友好型发展路径，正成为粮食安全、生态安全与可持续发展的关键议题。

本报告聚焦生态农业在应对气候变化中的角色，结合文献综述、田野调研、国际案例与政策分析，构建“科学机制—田野实践、本土调查—国际经验”的多维分析框架，内容共分六章：

## 一、气候危机与农业转型

分析气候变化对全球农业的系统性冲击，指出中国农业在“双碳”背景下面临的减排压力与适应挑战，阐述生态农业的气候友好潜力。

## 二、减缓气候变化——生态农业如何助力？

阐释土壤固碳的核心机制，重点分析秸秆还田、有机肥替代、生物防治、多样化种植、覆盖免耕、水资源管理等措施的减排固碳效应。

## 三、适应气候变化——生态农业如何提升农业气候韧性

从土壤蓄水、作物抗逆性和生物系统稳定性等方面，论述生态农业如何通过覆盖作物、生态沟渠等手段，提高农业系统应对极端气候的能力。

## 四、气候变化中的农业——成都农人访谈发现

基于深度访谈，呈现成都农人对气候变化的感知、应对行为及现实挑战，揭示科学知识与实践之间的传播壁垒与认知断裂。

## 五、生态农业的多元路径——四个实践案例的经验与挑战

分析中国“自然免耕”、印度“自然农法”、巴西等国的“农林演替农业”、美国再生农业等典型案例，总结其成效、挑战与可借鉴经验。

## 六、建议与思考

提出推动生态农业系统化、本土化的政策路径，打通科研到田间的“最后一公里”，强化多方协同，构建可持续的生态农业体系。

基于上述多维分析与案例研究，报告总结出生态农业在气候变化背景下的五项核心发现，具体如下：

### 1. 生态农业具有系统性的减缓温室气体排放和提升土壤碳汇的能力

生态农业通过减少化肥、农药与能源使用，降低温室气体排放；同时，通过提升土壤有机质和生

生物多样性，增强土壤碳汇能力。关键机制包括：减少化学氮肥投入，优化施肥结构，降低氧化亚氮（ $N_2O$ ）等温室气体排放；通过作物轮作、绿肥还田、有机堆肥等方式增加土壤碳储存；推广多年生作物配置和农林复合系统，延长土壤的碳驻留时间；通过免耕、少耕等措施兼顾减排与固碳效益。

多项实证研究显示，生态农业系统单位面积的碳排放显著低于常规化学农业，土壤固碳能力更强，其在“双碳”战略中具备可量化、可复制的贡献路径。

## 2. 生态农业显著提升农业系统的气候适应力

面对气候的不确定性，生态农业展现出更强的抗逆与恢复能力：如土壤结构改良提升蓄水保水能力，减缓干旱冲击；多样化种植与生物共生机制（如农林混作、轮作间作）增强系统稳定性；生态水系（如沟渠、湿地、塘堰）有效调节小气候、减缓暴雨洪涝；常规种与本地种的保留提升农户自主种源能力。研究显示：在干旱年份，有机农田产量平均高出常规农田35%~96%；在暴雨环境中，生态农田的地表径流与侵蚀量分别减少22%与26%。生态农业通过土壤—水—生物的综合调适，构建了多维韧性系统。

## 3. 在地农户具备经验性适应能力但科学认知不足

成都平原访谈显示，本地农人已感受到气候变化的冲击，短时天气异常、农时变化、作物生长状况以及收成波动，是他们感知气候变化的直观途径，并形成一系列经验性应对策略（如调整播种期、选育耐热品种、优化水资源管理等），但对“气候变化”、“土壤固碳”等科学术语及其机制认知有限。具体问题包括：缺乏气候—农业机制的系统理解；知识获取渠道零散，依赖个人经验与同伴交流；应对措施受到资金、技术、认知等多重因素的制约；农业科研成果难以转化为通俗语言和可行操作建议；政策引导与技术服务体系尚未充分下沉至基层。

这一认知落差限制了生态农业的潜在气候贡献转化为行动成果，需建立“科学—经验”之间的知识互译体系。

## 4. 国内外典型案例提供多元实践路径

报告精选四个具有代表性的生态农业案例：中国案例——自然免耕技术结合“小三化”“大三化”，强调土壤生态功能恢复；印度案例—安得拉邦社区主导农法实现大规模零化学投入农业；巴西等国案例——演替型农林系统通过模拟自然演化构建生态稳定性；美国案例——再生有机免耕农场实现生态与经济双赢。

这些案例表明，生态农业具有高度的地域适应性与可持续性潜力，关键在于构建“技术—组织—制度”三位一体的支持系统。

## 5. 当前生态农业推广受制于政策瓶颈与激励机制不足

尽管生态农业成效显著，但仍未被纳入主流农业政策体系，存在以下瓶颈：缺乏针对生态农业的小农支持机制与长期激励政策；政策重机械化、规模化，忽视生态过程与小规模多样系统；缺少科学化生态绩效的评估体系，难以嵌入碳市场与补贴框架；乡村基层推广队伍和农民组织能力薄弱，难以实现知识共享与协作实践。

要推动生态农业成为主流，必须在政策引导、财政支持、知识传播和制度设计上实现根本性转变。

# 一、引言

## 1.1 全球气候危机与农业所面临的挑战

### 1.1.1 全球气候变化的严峻形势

世界气象组织2025年发布的报告指出，2024年是全球有记录以来最热的一年，全球平均气温比工业化前（1850~1900的平均值）高出约1.55℃；此外，过去十年均跻身最热年份前十，形成了一连串破纪录的温度异常现象。而在未来更极端的情况下，全球气温可能会升高2℃（IPCC，2018）。全球极端天气事件如热浪、洪水、干旱和飓风等变得更加频繁和严重，不仅导致了巨大的经济损失，还对人类健康和生态环境造成了严重威胁。

2024年，全球气候变化带来的极端事件非常频繁且严重，主要表现为以下几个方面。

1) **全球气温持续上升**。2024年多地遭遇破纪录的高温天气，如全球多地经历了有记录以来最炎热、最干旱的一年。高温热浪在全球范围内广泛出现，导致了持续的热浪、干旱和森林火灾等极端天气现象。例如，北美的加利福尼亚州和墨西哥部分地区经历了极端高温，导致数百万人面临生命威胁。

2) **极端降水和洪水**。气候变化加剧了降水模式的变化，导致了全球多地的极端降水事件频发。例如，撒哈拉沙漠地区罕见地出现了强降雨，引发了数十年未见的洪水。此外，亚洲、欧洲和美洲等地也经历了多次严重的洪灾事件，如孟加拉国、美国东南部和欧洲多国都遭受了严重的洪涝灾害。

3) **飓风和风暴**。气候变化显著增加了飓风和风暴的强度和频率。例如，2024年9—10月美国东南部遭遇了飓风“海伦妮”和“米尔顿”的袭击，造成了重大人员伤亡和财产损失。

4) **干旱和野火**。由于高温和降水模式的改变，全球多地出现了严重的干旱现象。例如，南亚、中东地区以及希腊等地都经历了历史性的干旱，引发了大规模的森林火灾。

5) **复合型极端事件的出现**。近年来，复合型极端事件（如高温与干旱的同时发生）开始出现，这类事件可能给生态系统、农业生产和人类健康带来更复杂和深远的影响。随着大气中温室气体的含量不断升高，极端气候事件的时空分布和强度变化日渐复杂，气候系统的变异性不断增大，未来气候预测难度将逐渐加大。

### 1.1.2 气候变化对农业的多维冲击

温室气体排放量的增加会导致全球气温上升，进而引发一系列连锁反应，如冰川融化、海平面上升、极端天气事件频发等。这些变化将对农业生产和生态系统造成严重影响，威胁粮食安全和生态安全。全球气候变化对农业生产的系统性冲击已在多维度显现。基于全球的普遍观察，气候变化对农业的常见影响包括以下几个方面。

#### 1) 农作物减产

气候变化对农业最明显的影响之一是农作物产量下降。气温升高和降雨模式变化会导致干旱、洪水和热浪，所有这些都对农作物生长产生不利影响。极端旱、涝都会导致作物授粉不利甚至无法授粉。此外，干旱会导致植物枯萎死亡，而洪水会淹没田地并淹没农作物。热浪还会导致热应激和植物受损，从而导致产量和质量下降。根据IPCC的研究，全球平均气温每升高1℃都将造成主要农作物产量的大幅下降，例如小麦（下降 $6.0 \pm 2.9\%$ ）、水稻（下降 $3.2 \pm 3.7\%$ ）、玉米（下降 $7.4 \pm 4.5\%$ ）和大豆（下降3.1%）等（图1.1）。预计到本世纪末，世界上56%的玉米产区产量将会下降（Anderson, 2020）。近几年，我国因气候变化引起的极端降水事件明显加剧，总体上呈现为南涝北旱，且灾害面积在不断增加，导致区域内作物生长严重受阻，甚至出现绝收现象。另外，由全球气候的极端变化引发的低温冷害、热害等气候灾害也时有发生，总体上呈现东北/华北地区的霜害持续存在、冻害加重，华南地区的热害持续存在、寒害频发的趋势，甚至部分地区受灾害的影响导致水稻大量减产，严重影响我国粮食主产区的粮食生产安全（中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，2014）。

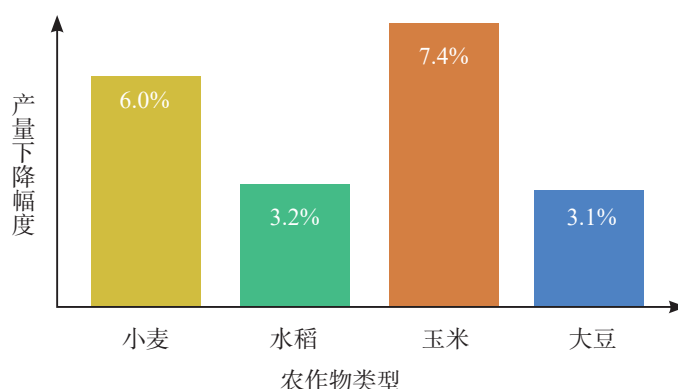


图1.1 全球平均气温每升高1℃对农作物产量的影响

#### 2) 作物生长周期紊乱

气候变化正在改变许多作物的传统生长季节，使农民难以规划和预测最佳种植和收获时间。气温升高和降雨模式的变化会导致生长季节的长度和时间发生变化。这种干扰会影响作物的生长并降低产量，因为植物可能没有足够的时间发挥其全部潜力。农民需要通过调整种植日历和探索更适应气候变化的新作物品种来适应。随着气候条件的变化，如异常炎热或寒冷天数的变化，不同作物的最佳种植区域也可能改变，作物管理和品种的选择、选育必须跟上这些变化。调整包括作物的改变，例如在干旱多发地区扩大高粱等耐旱作物的种植，以及培育更能适应环境变化的作物新品种（Anderson, 2020）。全球气候变化加快了部分受影响区域内原有作物的生育进程，缩短了生育期，减弱了抵御气候波动的能力。特别是我国华东地区的大麦、小麦和油菜等作物，该地区种植的作物品种大多是早熟品种，随着冬季气候的变暖，作物越冬期也相应的缩短，作物返青拔节或抽苔的时间也随着气候的变

暖而提前发动，从而减弱了植株的抗寒能力，使作物更易遭受冻害的侵袭，导致作物产量严重受损，这为种植制度的调整提出了新的挑战。

### 3) 病虫害数量变化

气候变化可能导致农业系统中病虫害的发生率和严重程度增加。气温升高和降雨模式变化为病虫害的生存和繁殖创造了更有利的条件。这可能导致更高的侵染率、作物质量下降和农药使用量增加。植物病原体和害虫已经表现出因气候变化而导致的纬度分布变化，并且区域气候条件的变化预计会改变植物病原体的毒力和感染率，加剧产量损失。有些时候，病虫害可能会“暂时减少”。但病虫害的数量变化导致整体的、系统性的紊乱使很多动植物难以适应而消亡。

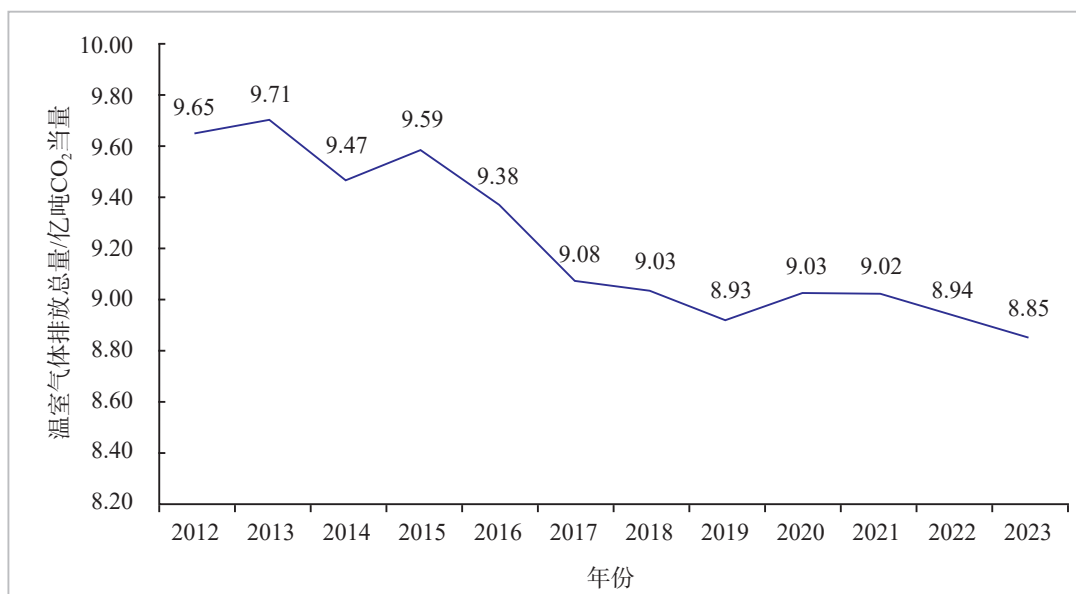
### 4) 土壤养分流失

气候变化促使地表温度升高，加速了土壤有机质和氮的流失。极端降水还将造成土壤侵蚀等问题，削弱农业生态系统抵御自然灾害的能力。《2023中国生态环境状况公报》显示，2022年，全国水土流失面积为265.34万平方千米，约占耕地总面积的28%。在具体区域上，东北黑土区、西南山区和黄河流域、长江流域等地区是土壤侵蚀较为严重的区域。土壤侵蚀导致表层土壤流失严重，每年造成约250—400亿吨表土流失，从而降低土壤肥力、减少养分和水分，影响作物产量（郑粉莉，2019）。并且，土壤养分流失也意味着可能会增加化肥用量才能保住产量，导致恶性循环。

## 1.2 中国农业碳减排的迫切需求

2020年9月，中国明确提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”战略目标。这是国家层面的重大决策，也是中国应对全球气候变化的庄严承诺。为实现这一目标，需要全社会、全行业的深度参与。农业作为国民经济的基础产业和重要的温室气体排放源，其减排行动至关重要。农业排放不仅加剧气候变化，也与土壤退化、面源污染等环境问题交织。同时，气候变化引发的极端天气频发又直接威胁粮食生产的稳定性，形成恶性循环。在保障14多亿人口粮食安全的刚性需求下，中国农业面临着“既要增产保供，又要固碳减排”的双重压力。

1996—2016年的20年间，中国是农业生产排放温室气体最多的国家，其次是印度、巴西和美国。这四个农业排放大国合计占全球农业生产排放总量的37%（World Economic Forum, 2019）。从人均和单位面积的排放量来看，中国的人均农业温室气体排放居全球第8，单位面积农业温室气体排放为全球第5。《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》显示，2021年中国农业活动温室气体排放量为9.31亿吨CO<sub>2</sub>当量，其中甲烷排放量为2427.9万吨，氧化亚氮排放量为94.9万吨。根据European Commission's Directorate-General for Joint Research Centre的统计数据，绘制中国2012年—2023年农业温室气体排放量变化曲线，如图1.2所示。2015年以来，中国农业温室气体排放量整体呈逐年下降的趋势，在2019~2021年有轻微上升，2021年之后继续下降，但在2023年，农业温室气体排放仍有8.85亿吨CO<sub>2</sub>标准当量，减排潜力依然很大。



(注：数据来源于European Commission's Directorate-General for Joint Research Centre)

图1.2 2012—2023年中国农业温室气体排放量

### 1.2.1 碳源还是碳汇？农业在气候变化中的双重角色

一方面，农业作为全球主要的温室气体排放源之一，对气候变化有重要贡献；另一方面，土壤是陆地系统最大的碳库，因此，农业也是重要的碳汇。

全球农业温室气体排放占人为温室气体排放总量的23%（IPCC，2019）。在中国，农业温室气体排放量占全国温室气体排放总量的6%—10%（具体比例因统计口径和计算方法而异），是继能源活动和工业生产过程之后的第三大温室气体排放来源。

农业活动排放的温室气体主要包括甲烷（CH<sub>4</sub>）、氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）和二氧化碳（CO<sub>2</sub>）。其主要排放来源有以下几大类：

#### 1) 动物反刍和畜禽粪便管理

**动物反刍：**牛、羊、山羊等反刍动物在消化食物（尤其是粗饲料）的过程中，胃中的微生物发酵会产生CH<sub>4</sub>，主要通过打嗝（嗝气）排放出来。

**畜禽粪便管理：**在收集、储存和处理畜禽粪便的过程中会产生温室气体。粪便在厌氧条件下（如储存在粪池、粪坑中）分解时会产生CH<sub>4</sub>；粪便中的氮素在好氧和厌氧交替条件下（如堆肥、粪便施用到土壤后）发生硝化和反硝化作用时会产生N<sub>2</sub>O。

#### 2) 水稻种植

在水稻生长季节，稻田长期处于淹水状态（厌氧环境），使得土壤中的有机物在微生物作用下分解，产生大量CH<sub>4</sub>并释放到大气中。

#### 3) 农资及农用设备的生产和使用

化肥、农膜、农药、农用机械等农资和设备在生产、运输、使用的过程中都会直接排放温室气体。化肥在生产和使用过程中会产生氧化亚氮（N<sub>2</sub>O），其全球变暖潜能值（GWP）是CO<sub>2</sub>的220~290倍，且在大气中的停留时间长（约109年）（IPCC，2021），对气候变化的影响显著。而过

量施肥、施肥时机不当、土壤类型（如排水不良）、气候条件（如降雨后）都会显著增加N<sub>2</sub>O排放。农用机械的生产、运输和作业、灌溉等过程中都会消耗化石能源，直接产生CO<sub>2</sub>排放。随着农业机械化水平的提高，能源消耗带来的CO<sub>2</sub>排放将逐渐增加。

#### 4) 农业废弃物处置

农业废弃物（如作物秸秆等）处理不当会排放大量温室气体。例如，在田间直接焚烧农作物残留物（如秸秆）或动物粪便会释放CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>等多种温室气体。

#### 5) 耕作过程中的土壤有机碳流失

耕作方式不当可能导致土壤结构破坏、影响土壤微生物生长，使土壤中储存的碳以CO<sub>2</sub>的形式释放到大气中，并降低土壤的固碳能力。例如，耕地的高强度开发、频繁翻耕、农用机械的频繁使用、大量使用农药/化肥、地表常年裸露等。

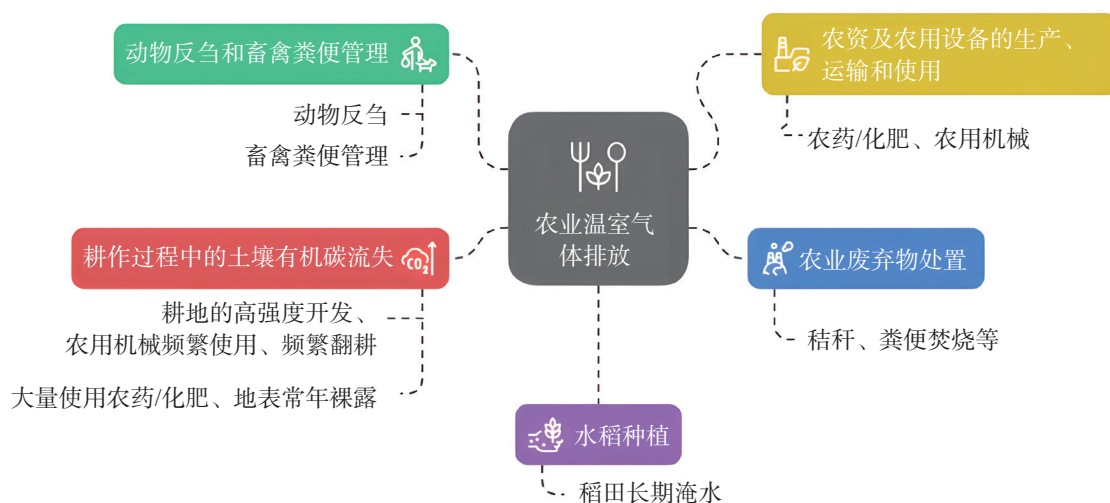


图1.3 农业温室气体排放的主要来源

如上所示，农业是温室气体的重要贡献源，但另一方面，农田土壤在全球碳循环中发挥着重要作用。全球陆地系统超过80%的碳存储在土壤里。全球土壤（1m深度以内）有机碳库储量约为15000亿吨，是大气碳库的2倍，陆地植物碳库的3倍。全球土壤碳固存潜力估计为20~50亿吨/年（采用现有最佳保护管理实践），若考虑前沿技术，最高可达80亿吨/年（Paustian等，2019）。

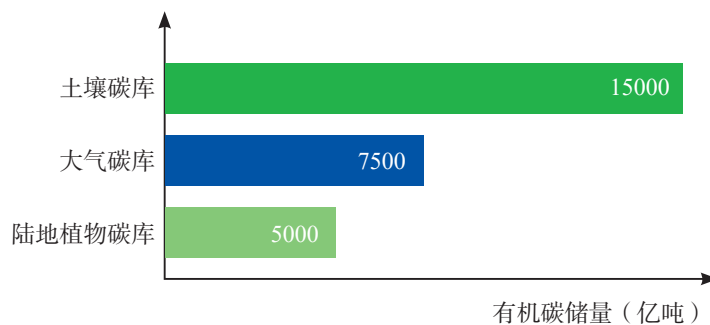


图1.4 全球碳库有机碳储量比较

法国国家农业研究院（INRA，2017）分析数据显示，如果全球土壤表层40厘米内的碳储量（8600亿吨C）每年平均能增加0.4%，就相当于约125亿吨CO<sub>2</sub>/年。假设目前海洋和陆地碳汇保持完整，这一水平的CO<sub>2</sub>净吸收量将抵消目前大气中年度增量（158亿吨CO<sub>2</sub>/年）的大部分。Zomer等（2017）研究估计，如果管理得当，全球农田每年可以额外储存18.5亿吨碳，相当于全球交通运输部门每年的碳排放量。此外，一些科学家认为，土壤可以将碳持续封存数十年甚至上百年，直至饱和。增加土壤有机碳储量对于提高作物产量、改善土壤结构和水资源管理能力至关重要。据估计，通过在全球土壤上增加1‰的有机碳储存量，可至少增产1.5亿吨粮食（Ma等，2023）。

### 1.2.2 粮食增产和固碳减排的平衡难题——化学农业面临的困境

保障粮食增产需求与应对气候变化的固碳减排责任，在当代农业发展中构成了一对尖锐矛盾。化学农业模式以其显著的增产效果支撑了全球人口增长的食物需求，但同时也加剧了生态环境压力，在“增产”与“减排”之间陷入难以调和的困境。

#### 1.2.2.1 增产依赖：化学农业的成就与代价

1) **高效增产的核心引擎：**以合成化肥、农药、除草剂为核心的化学农业体系，通过直接、快速地补充土壤养分和高效控制病虫害，显著提高了单位面积产量。自20世纪中叶“绿色革命”以来，这种模式对保障全球粮食安全发挥了不可替代的作用，支撑了数十亿人口的生存。

#### 2) **生态健康的隐性透支：**

**土壤退化：**长期过量施用化肥导致土壤酸化、板结，有机质含量持续下降。

**农业面源污染：**化肥（尤其是氮肥）的低效利用（全球平均利用率仅约50%）造成大量养分流失，并且导致水体富营养化，污染水体。农业源总氮（TN）、总磷（TP）占水污染物排放总量的比例分别为46.52%、67.22%（《第二次全国污染源普查公报》，2017）。

**生物多样性锐减：**广谱性农药和除草剂无差别地杀伤害虫、益虫、土壤微生物及野生植物，破坏了农田生态系统平衡和自然调控能力，削弱了农业生态的系统韧性。

**温室气体排放：**化肥生产（尤其是高耗能的氮肥）是农业领域重要的直接碳排放源。农田过量施用氮肥在土壤微生物作用下产生强效温室气体N<sub>2</sub>O。

#### 1.2.2.3 平衡困境：多重压力的交织

1) **人口增长与粮食安全刚性需求：**全球人口持续增长以及对食物数量要求的提高，对粮食总产量构成刚性压力，使得短期内难以放弃依赖化学投入品带来的高产保障。

#### 2) **路径依赖与技术锁定：**

**农民惯性：**农民已形成对化学投入品简单、快速见效的依赖，改变耕作习惯需要学习新知识、承担转型风险（如初期可能减产）。

**基础设施与市场体系：**当前农业科研、推广、农资供应、农产品收购体系均围绕化学农业模式构建，转向生态友好型农业面临系统性障碍。

**政策补贴：**地方政府对缓释肥、农药等化学投入品仍有补贴，客观上维持了其价格优势，抑制了可持续替代品的推广。

**短期与长期目标的冲突：**追求当季高产（依赖化肥农药）与追求长期土壤健康和固碳能力（需要减少扰动、增加有机质）在实践中往往存在时间尺度上的矛盾。在保障粮食安全的压力下，长期生态目标常被置于次要位置。

### 1.2.3 提升农田土壤固碳能力——国家层面的减排固碳行动

为贯彻落实“双碳”目标，推进农业农村绿色低碳发展，农业农村部、国家发展改革委于2022年5月发布了《农业农村减排固碳实施方案》。

该方案设定的农业农村减排固碳目标为：

- 1) 到2025年，农业农村绿色低碳发展取得积极成效，种植业、养殖业单位农产品排放强度稳中有降，农田土壤固碳能力增强，农业农村生产生活用能效率提升；
- 2) 到2030年，农业农村减排固碳与粮食安全、乡村振兴、农业农村现代化统筹推进的合力充分发挥，农田土壤固碳能力显著提升，农业农村发展全面绿色转型取得显著成效。

提升土壤碳封存能力，需要转变现有的常规耕作方式。该方案中明确，为实现农业农村减排固碳目标，计划推进十项重要行动。其中，与农田管理相关的有：

- 1) **稻田甲烷减排行动**。以水稻主产区为重点，强化稻田水分管理，因地制宜推广稻田节水灌溉技术，提高水资源利用效率，减少甲烷生成。
- 2) **化肥减量增效行动**。推进有机肥与化肥结合使用，增加有机肥投入，替代部分化肥。
- 3) **农机绿色节能行动**。因地制宜发展复式、高效农机装备和电动农机装备，培育壮大新型农机服务组织，提供高效便捷的农机作业服务，减少种子、化肥、农药、水资源用量，提升作业效率，降低能源消耗。加快侧深施肥、精准施药、节水灌溉、高性能免耕播种等机械装备推广应用，大力示范推广节种节水节能节肥节药的农机化技术。
- 4) **农田碳汇提升行动**。推广有机肥施用、秸秆科学还田、绿肥种植、粮豆轮作、有机无机肥配施等技术，构建用地养地结合的培肥固碳模式，提升土壤有机质含量。实施保护性耕作，因地制宜推广秸秆覆盖还田免少耕播种技术，有效减轻土壤风蚀水蚀，增加土壤有机质。推进退化耕地治理，重点加强土壤酸化、盐碱化治理，消除土壤障碍因素，提高土壤肥力，提升固碳潜力。加强高标准农田建设，加快补齐农业基础设施短板，提高水土资源利用效率。
- 5) **秸秆综合利用行动**。坚持农用优先、就地就近，以秸秆集约化、产业化、高值化为重点，推进秸秆综合利用。持续推进秸秆肥料化、饲料化和基料化利用，发挥好秸秆耕地保育和种养结合功能。推进秸秆能源化利用，因地制宜发展秸秆生物质能供气供热供电。



图1.5 农业农村固碳减排重要行动

化学农业在增产上的巨大成功，是以透支土壤健康、牺牲生物多样性和加剧气候变化为代价的。面对日益紧迫的粮食安全与气候危机双重挑战，其面临的困境暴露无遗。实现粮食安全与固碳减排的“双赢”，已非修修补补的改良所能达成，必须推动一场深刻的农业生态转型。唯有将农田视为有生命的生态系统而非工厂流水线，尊重并利用自然之力，从“依赖外部化学投入”转向“激发生态系统服务功能”，才能筑牢沃土丰产与气候稳定的双重根基。农业的未来，在于与自然和解，而非无休止的征服。

### 1.3 气候友好的农业模式——生态农业

生态农业作为一种深刻践行“基于自然的解决方案”（Nature-based Solutions, NbS）理念的实践模式，在应对全球气候变化的严峻挑战中扮演着至关重要的角色。其核心在于摒弃工业化农业对化学投入品的高度依赖和对生态系统的粗暴干预，转而模仿并强化自然生态系统的内在规律与功能。

#### 1.3.1 什么是生态农业？

##### 1.3.1.1 不断发展演变的定义

联合国粮食及农业组织（粮农组织）将生态农业定义为：一种着眼于整体的综合性方法，将生态学和社会学的概念和原则同时应用于可持续农业和粮食体系的设计和管理。生态农业的目的是改善植物、动物、人类和环境之间的关系，同时促进粮食体系的社会公平性，让人们可以选择吃什么，以及所吃的食物如何生产，在哪里生产。同时，生态农业也是一门科学，是一整套做法，是一场社会运动，过去几十年来其概念外延不断扩大，从着眼于农田和农场，逐渐发展到包含整个农业和粮食体系。如今的生态农业是一个跨学科领域，包含粮食体系从生产到消费的各个环节，涉及生态、社会文化、技术、经济、政治等各方面内。

从这个定义可以看出，生态农业具有很强的包容性，并且涉及的范围很广。在此定义的基础上，联合国粮农组织制定了“生态农业十大要素”框架，这十大要素相辅相成，其核心就在于“协同”，让土、植物、人、动物和环境互相配合，互相照应。

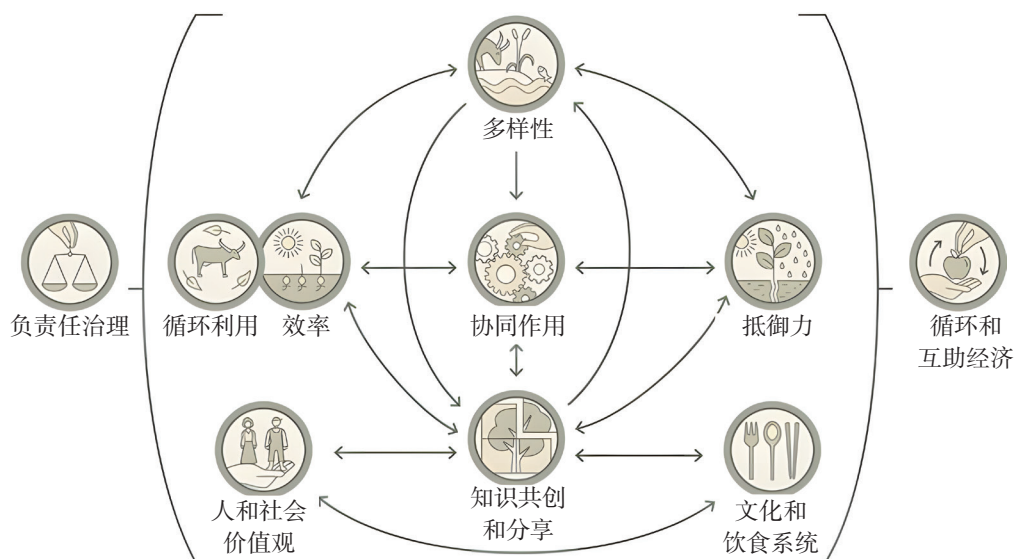


图1.6 生态农业十大要素的相互作用

不同学者或农业实践者对生态农业的理解有所区别。本报告基于公开发表的文献资料和部分实践者的总结，梳理了国内不同学者和生态农业从业者对生态农业的理解，详见表1.1。

表1.1 不同学者和生态农业从业者对生态农业的理解

提出者	概念或定义	核心技术原则	来源
马世骏等	因地制宜应用生物共生和物质再循环原理及现代科学技术，结合系统工程方法而设计的综合农业生产体系。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 生物共生</li> <li>2) 物质再循环</li> <li>3) 现代科学技术的应用</li> <li>4) 系统工程方法</li> <li>5) 多产业融合</li> <li>6) 多功能农业</li> <li>7) 传统知识与现代技术的融合</li> <li>8) 减少对化学品的依赖</li> </ol>	李文华等，2010
覃龙华等	运用生态学、生态经济学原理及系统工程方法，把现代科学技术同古代农业的精华结合起来，指导和组织农业的生产建设，以建成良性循环、持续发展、三效益（经济、生态、社会效益）统一，高产、优质、高效的现代化农业生产体系。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 生态效益与经济效益统一</li> <li>2) 生物与环境协同进化</li> <li>3) 生物之间链索式的相互制约</li> <li>4) 能量多级利用与物质循环再生</li> <li>5) 结构稳定性与功能协调性</li> </ol>	覃龙华等，2006
Dahao Guo 等	核心目标包括减少对外部投入的依赖，提高内部投入的质量和效率，通过持续的经验积累、实验和研究，不断改进，以适应和缓解气候变化，同时不损害生态系统。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 减少化学投入</li> <li>2) 水资源管理</li> <li>3) 土地保护</li> <li>4) 生物多样性保护</li> <li>5) 资源循环利用</li> <li>6) 有机农业实践</li> </ol>	Guo等，2023
蒋高明等	利用生态学原理设计的新型农业产业模式，在种植或养殖全过程中，不使用化肥、农药、除草剂、地膜、激素与转基因种子（六不用）或仅使用少量化肥（五不用）。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 物理+生物法控制虫害</li> <li>2) 秸秆资源化利用</li> <li>3) 有机管理技术：有机肥肥田、秸秆覆盖替代地膜等</li> <li>4) 林禽互作技术</li> <li>5) 有机堆肥技术</li> <li>6) 杂草综合防治：采取种源切断、生态位占领、旱季人工除草、机械除草、养禽除草、生物菌肥提苗、种植豆科牧草压制杂草、与草共生等</li> </ol>	蒋高明等，2024
袁勇		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 多样化种植（即生物多样性原则，是最基本、最重要的原则）</li> <li>2) 不耕地（转换期可以浅耕，之后即完全免耕）</li> <li>3) 不使用大棚、地膜（即不搞反季节，顺应季节自然生长）</li> <li>4) 不使用化肥（包括磷肥）、商品有机肥及各种名目的生物肥、激素和生长调节剂</li> <li>5) 不使用除草剂，合理留草（只控制遮光并影响作物光合作用的杂草）</li> <li>6) 不使用任何农药（包括土农药和生物农药）</li> <li>7) 不使用转基因产品和技术，尽量不使用杂交种（遵循自然规律）</li> </ol>	袁勇，2024

续表

提出者	概念或定义	核心技术原则	来源
贾波		1) 不用肥料（包括化肥、堆肥、酵素肥等有机肥或微生物肥料） 2) 不用农药（包括生物农药，植物性和矿物性农药等也不用） 3) 不杀虫防虫 4) 不用激素 5) 不用菌剂 6) 不用地膜 7) 不用大棚 8) 不用转基因种子，尽可能保护老品种 9) 不耕地 10) 不除草	贾波口述逗豆乐农场所采用的“十不用”自然农法实践

从表1.1可以看出，不同学者/生态农业实践者对生态农业的定义和解读各有侧重：1) 马世骏等人对生态农业的技术阐述，更多地偏向原则性框架，如注重物质循环再生、生物共生、生态效益与经济效益相协调等，对技术细节的要求比较宽泛；而蒋高明、袁勇、贾波等人对生态农业的技术原则做了更细化的补充，从“六不用”到“七不用”再到“十不用”，结合具体的农田管理措施对生态农业的边界做了限定。2) 不同定义对于化学品的投入限制不同，在马世骏和Dahao Guo等人的定义中，农药、化肥等化学品为“减少使用”而非完全限制使用；在袁勇和贾波等人的定义中，则明确定义为“不使用”。3) 不同学者/生态农业实践者对于耕作方式和覆盖方式的要求也存在差异。在马世骏等人的定义中，并未提及免耕、覆盖等措施；而在蒋高明等的定义中，提到了用秸秆覆盖替代地膜，而袁勇和贾波在强调合理留草、不除草的基础上还加上了“不耕地”。从整体上看，生态农业的概念是原则性框架，其优点在于包容性很强，充分允许各农场因地制宜，自由发挥。

### 1.3.2 生态农业在中国的起源和发展

在中国，农业实践者自古就遵循保护自然的优良传统，并在长期的农业实践中积累了朴素而丰富的经验，中国生态农业的理念可追溯至古代农耕文明中的传统生态智慧（如桑基鱼塘、稻鱼共生等）。目前，中国已有19项传统农业系统被联合国粮农组织（FAO）认定为“全球重要农业文化遗产”（GIAHS），包括：云南元阳哈尼稻作梯田系统、浙江丽水古堰画乡稻鱼共生系统、江西婺源茶—桑—蚕—纸生态循环系统、贵州从江侗族稻鱼鸭系统、河北涉县旱作石堰梯田系统、云南普洱古茶园生态系统、广东潮州嵌田鱼塘系统等。这些系统展现出若干共同特征：

- 1) 复合生态系统设计，强调农林水牧的立体配置与共生；
- 2) 就地水资源的智慧管理，通过因地制宜建构水梯田、水塘、石堰与沟渠系统，注重小流域和微湿地治理，提升雨水利用效率；
- 3) 知识的代际传承与社区治理机制，如“水会”“鱼塘会”“祭山节”等社群制度，体现了对水权、土权、养殖权等生态资源的协商共治。

这些传统农业遗产构成了一个高度复杂且成熟的“生态—水文—农林—村社—文化”复合系统。其中所蕴含的生态智慧和丰富经验是中国生态农业发展值得高度重视的宝库。

中国的生态农业从朴素的经验和实践上升到明确的理论构建始于20世纪80年代。1981年，马世骏先生在农业生态工程学术讨论会上提出了“整体、协调、循环、再生”生态工程建设原理，并在后续

多年中不断发展（覃龙华等，2006；李文华等，2010）。1982年，叶谦吉教授在银川农业生态经济学学术讨论会上发表“生态农业—我国农业的一次绿色革命”一文，正式提出了中国的“生态农业”这一术语。1991年5月，马世骏和边疆共同拟定了中国生态农业的基本概念：生态农业是因地制宜应用生物共生和物质再循环原理及现代科学技术，结合系统工程方法而设计的综合农业生产体系（李文华等，2010）。经过数十年的发展，生态农业的概念也被不断丰富。

生态农业在中国的发展历程可以划分为表1.2所示的5个阶段，每个阶段都有其独特的社会背景、政策支持和实践特点。20世纪70年代末—1980年代初为萌芽阶段，改革开放初期化学农业生态问题显现，国际理念传入，学术界引入“生态农业”概念并开展小规模试验；1980年代中期—1990年代中期为试点与推广阶段，农村改革深化，生态问题受重视，政府主导试点，推广“四位一体”等模式，建成约2000个示范点；1990年代末—2010年代初为快速发展阶段，入世后竞争加剧，政策法规完善，技术升级，试点县超500个，有机认证面积达230万公顷；2012—2017年为政策支持与系统化阶段，生态文明成国家战略，“两山理论”提出，顶层设计强化，中国成为全球有机农业面积第三大国；2018年至今为高质量发展与多元化创新阶段，乡村振兴战略实施，“双碳”目标提出，科技赋能，电商崛起，模式多元化。

表1.2 生态农业在中国的发展历程

阶段	时间范围	背景	特点	成果/标志性事件
萌芽阶段	20世纪70年代末—1980年代初	改革开放初期，化学农业生态问题显现；国际生态农业理念传入中国	学术界引入“生态农业”概念；小规模试验（沼气、有机肥）；政府政策空白，自发探索	1981年，马世骏先生在农业生态工程学术讨论会上提出“整体、协调、循环、再生”生态工程建设原理
试点与推广阶段	1980年代中期—1990年代中期	农村经济体制改革深化；生态问题受重视，粮食安全压力缓解	政府主导试点（如51个试点县）；推广“四位一体”（太阳能温室、沼气池、畜禽舍、蔬菜大棚有机整合）、“猪—沼—果”模式；国际合作加强	1990年代末建成约2000个生态农业示范点
快速发展阶段	1990年代末—2010年代初	加入WTO后农业国际竞争加剧；可持续发展上升为国家战略	政策法规完善（如2002年《全国生态保护纲要》）；技术升级（生物防治、有机认证）；产业融合（乡村旅游）	2010年生态农业试点县超500个；有机认证面积达230万公顷
政策支持与系统化阶段	2012—2017年	生态文明建设成为国家战略；“两山理论”提出	顶层设计强化（“资源节约型和环境友好型社会”写入规划）生态补偿机制落地（退耕还林）规模化经营探索	2016年中国成为全球有机农业面积第三大国
高质量发展与多元化创新阶段	2018年至今	乡村振兴战略实施；“双碳”目标提出	科技赋能（智慧农业、区块链）政策深化（“十四五”绿色规划）多元化模式（CSA、田园综合体）	2021年《“十四五”农业绿色发展规划》发布；生态农产品电商销售崛起



图1.7 生态农业在中国的发展历程

### 1.3.3 生态农业的不同技术体系

在生态农业的包容性框架下，农田实践如何实施，不同的国家、企业、流派和农业实践者，往往衍生出不同的技术细则。本报告对生态农业和与之相近的几种农业模式（有机农业、自然农法、生物动力农业、活力农耕、朴门永续农业、CSA社会生态农业、再生农业、保护性农业）的理念、技术原则（耕地与否、覆盖与否、对草的管理、对肥的施用、对化学投入品的态度）等进行了梳理，对比结果见附录2附表1。

从附录2附表1可知，以上9种农业模式核心理念存在相似性，不同农业模式的相似点在于：

- 1) **坚持生态学理念**。以生态学的各项原则设计农业生态系统，模仿自然生态系统。
- 2) **注重多样化种植**。通过种植多种作物、轮作和混作等方式来增加生物多样性，从而提高生态系统的稳定性和生产力。
- 3) **强调资源循环利用**。强调资源的最大化利用和循环使用，如农作物秸秆等有机废弃物的回收利用。
- 4) **重视用生态方式替代化学输入**。充分利用系统内的养分循环，尽可能减少对外部化学品的依赖，甚至不用，通过自然方法控制病虫害和维持土壤健康。在肥料投入上大多以有机肥/堆肥为主。
- 5) **顺应天时，遵循自然发展的规律**。顺应二十四节气，不做反季节种植；尽量使用自然进化的常规种。
- 6) **尽量减少对土壤扰动**。大多采用免耕/少耕、适度耕作。
- 7) **鼓励使用地表覆盖**。通过秸秆覆盖或种植绿肥、自然生草。

从实践来看，生态农业不是非黑即白的教条，而是从化学依赖向自然共生渐进的光谱。在逐渐摆脱化学依赖的过程中，不同的农业模式所处的阶段可能有所差异。在技术原则上，以上9种模式可能对于耕地频率、覆盖方式、草的管理等细节存在细微差别，甚至部分模式对化学投入品的态度是允许少量和有限使用，但它们的核心目标都是朝着降低农业资源消耗、降低农业对环境的负面影响、减缓土壤恶化的状况、让土壤向更健康的方向发展，因此都可以视为广义的生态农业实践范畴。而生态农业所包含的技术体系远不只附表1所列出的9种模式，四位一体生态农业、六不用/七不用/十不用农业、绿色农业以及现有化学农业的技术改良等，这些有利于生态平衡、农业可持续发展，对人的身心健康有促进作用的都可以纳入广义的生态农业的范畴。不同的流派、模式、技术体系，是基于各自不同的

社会背景，农业哲学理论、实践认知与条件下，在不同层面和不同程度下的产物，可以视为生态农业的不同阶段。

### 1.3.4 生态农业和化学农业的区别

化学农业以短期产量最大化为导向，系统性依赖合成化学品（化肥提供矿质营养、农药控制生物胁迫、除草剂管理杂草）进行单向养分输入，种植品种较为单一，主张人工干预和控制生态系统

生态农业是以生态系统长期平衡稳定为根本目标，通过资源循环利用（如生物防治、有机肥料、种养结合）和生物多样性维护（如轮作、间作等）构建自维持生产系统，禁止或严格限制合成化学品（农药/化肥/除草剂）的使用，强调模仿自然生态系统、多物种协同共生。

本报告对生态农业下了一个比较宽泛的定义，把有机农业、自然农法、生物动力农业、活力农耕、朴门永续农业、CSA社会生态农业、再生农业、保护性农业等多种农业模式都视为广泛意义上的生态农业的范畴，主要是因为在本报告所讨论的“气候变化”这一主题下，这些农业模式的能量来源和常规化学农业有本质区别，前者是太阳能驱动，而后者是化石能源驱动。

表1.3列出了生态农业与常规化学农业的核心理念、常用技术手段的区别。

表1.3 生态农业与化学农业的核心理念、常用技术手段对比

维度		化学农业	生态农业
核心理念	生产目标	短期产量最大化	生态系统长期稳定性与可持续性
	自然观	自然为生产服务，通过人工干预控制生态系统	模仿自然生态系统，强调协同共生
常用技术手段	土壤管理	合成化肥补充养分深耕翻土	使用有机肥/堆肥免耕/少耕覆盖
	草的管理	除草剂除草	人工/机械除草 粮草间作、自然生草
	病虫害防治	化学农药喷洒单一品种连作	生物防治 作物轮作/间作
	种子选择	高产杂交/转基因品种	传统/地方适应性品种 遗传多样性保存
能量来源		化石能源驱动 (合成化学品、农机燃油)	太阳能驱动 (光合作用→生物质循环)
养分循环		线性输入 (化肥补充→作物生长→作物移除→ 化肥补充)	闭合循环 (作物生长→废弃物→堆肥→土壤→ 作物生长)

生态农业的核心是与自然和谐共生，多渠道增加食物来源。与依赖化肥、农药和单一作物种植的工业化农业（化学农业）不同，生态农业更注重土地的健康、物种的多样性以及生态系统的平衡，通过轮作、间作、养分循环和自然防控病虫害等手段，不仅可以获得高质量的农产品，还能保护土壤、减少污染。

——蒋高明，2024

## 1.4 报告目的

本报告旨在为气候变化背景下的成都平原农业生态转型提供多维度的科学与实践参考。首先，基于近30年来国内外相关文献的系统梳理，揭示气候变化对农业造成的系统冲击，分析加快向生态农业模式转型的紧迫性与必要性。重点评估生态农业通过减少化肥农药投入、多样化种植、资源循环利用等路径，在减缓碳排放、促进土壤固碳方面的积极作用。

其次，从气候适应的视角出发，探讨生态农业如何通过增加生物多样性、水土资源优化配置以及生态系统服务功能的强化，有效提升农业系统对极端气候事件（如干旱、热浪、暴雨等）的应对能力。

再次，依托对成都平原19个生态农场和6个常规农场的1-2轮深度访谈与田野调查，了解农友对气候变化和土壤碳封存等关键科学概念和知识的了解程度，梳理农友通过生产实践观察到的气候变化现象及特点，探究农友应对极端天气的策略与影响因素。通过系统分析上述问题，解析农友个人传统经验与科学认知的距离，尝试从农友视角出发，探讨经验—科学—政策的良性互动机制。

最后，通过对印度安得拉邦的自然农法模式、侯光炯院士的自然免耕理论与实践、恩斯特·戈茨的农林协同演替农业模式，以及美国印第安纳州克拉克农场再生农业模式等典型国内外案例的分析，提炼出具有借鉴意义的技术经验与管理模式，为中国生态农业的深化与本土化探索提供参考。

本研究通过融合理论分析与模式提炼，旨在为政策制定者提供农业碳中和路径规划的科学依据；为相关科研人员和农业技术推广部门提供系统化的学术框架与案例素材。对于农业生产者和普通公众，本报告可作为普及生态农业与气候变化关系的知识库，为二次传播与科普活动提供可靠素材。通过兼顾不同使用群体的需求，本研究力求推动农业生产系统向绿色低碳、韧性适应与持续创新并行的可持续发展范式转型，为成都平原乃至更广区域的农业生态转型提供兼具理论深度与实践价值的解决方案。

## 1.5 报告的数据与信息来源

### 1) 文献资料：

中文文献主要来自中国知网数据库、英文文献主要来自Web of Science数据库，各类研究报告来自相应机构的官方网站，如联合国粮农组织等。

### 2) 调研数据：

为了了解农户对土壤固碳以及气候变化的关注程度与认识水平、气候变化对农业生产带来的挑战，以及农户的应对情况，研究团队于2024年1月-10月对成都及周边的18家生态农场、1家绿色产品农场、6家常规化学种植的农场、2位生态农产品销售平台创办人、1位基层农业专家开展了1-2轮的半结构式深度访谈。

## 1.6 报告的分析方法/框架

### 1.6.1 文献筛选及梳理

区别于传统的荟萃分析，本报告并未对海量文献进行全盘解读，而是基于本报告的主要目的，在文献梳理过程中进行有针对性的筛选，筛选过程主要侧重以下方面：

1) 重点关注农田实践得出的研究结果：在方法层面，重点考虑基于真实农田实践的研究结果，其次是大田对照试验，再次是模型模拟的研究结果。

2) 重点关注生态农业领域有影响力的研究团队/机构：侯光炯+西南大学研究团队、保护性耕作研究所、中国科学院生物所蒋高明团队、联合国粮农组织、欧洲农业生产力 and 可持续创新合作伙伴关系等机构的研究成果。

3) 本报告的重点关注区域为四川盆地与成都平原，因此在文献检索阶段，优先聚焦于研究范围涵盖该区域的论文。然而，检索结果显示，针对四川盆地和成都平原的相关研究数量相对有限，难以充分支撑对生态农业与土壤碳封存等议题的深入论证。基于此，在资料收集过程中，研究区域范围被适当扩大，来自全球不同地区的相关文献研究均被纳入考量范畴。

基于上述原则，共获取了200余篇国内外文献资料。需要说明的是，所有的文献研究都有特定的实验条件、研究边界和有限的应用场景，本报告在引用文献研究时将尽可能客观、全面地呈现文献研究的边界条件和应用场景，读者在应用特定文献的研究成果时应当仔细阅读。

文献梳理过程，重点关注生态农业中涉及的不同农田管理措施对碳减排、土壤碳封存和农业韧性的贡献。具体而言，涵盖的农田管理措施包括：1) 有机肥和堆肥替代化肥；2) 生物防治代替农药；3) 建立多样化种植系统；4) 地表覆盖；5) 免耕/少耕；6) 水资源管理等。在梳理过程中，用量化的数据呈现生态农业对碳减排、土壤碳封存和农业韧性的贡献，挖掘不同农田管理措施影响土壤碳封存能力的机理、提炼提升农业韧性的可靠经验或建议。

### 1.6.2 农户定性访谈分析方法

对成都平原农户的访谈采用半结构式访谈信息作为基础资料，结合扎根理论和Nvivo软件工具，对农户在气候变化背景下的感知、农业影响及应对策略进行系统分析，力求从第一视角还原农户在真实生产环境中的观察与判断。具体方法如下：

#### 1) 数据整理与预处理

在数据准备阶段，首先依据访谈内容的主题性质，将资料划分为三大板块：气候变化感知、农业生产影响及应对策略。为确保数据的可溯性和情境还原性，所有内容均按时间顺序和具体地点进行标注。在内容筛选过程中，剔除冗余信息（如寒暄、偏离主题的对话），重点提取带有经验判断、观察描述或行动反应的关键句段，为后续编码分析提供素材。

#### 2) 编码分析步骤

本研究采用扎根理论中的三级编码策略，对访谈内容进行逐层抽象与分类：

➤ 开放编码：逐句审阅文本，识别并标注访谈中的核心概念，形成初步分析节点。例如在“气候变化感知”中标注“夏天连续高温干旱”、“连续暴雨”等描述；在“农业影响”中提取“全部旱死了”、“苗子受不住”等反馈；在“应对策略”中归纳如“补种”、“改种耐旱品种”等行动。

➤ 轴心编码：开放编码中得到的节点按照内在逻辑进行聚类，归纳为“对气候变化这一科学概念的认知”、“农户眼中的气候变化”、“天气信息的来源方式”、“农户的应对方式”等主要类别。各类别下再细化出子类别，如“高温干旱”、“暴雨洪涝”、“农时失效”、“产量下降”、“田间管理”等。

➤ 选择性编码：在整合全部编码结果的基础上，提炼出核心范畴“气候变化对农户的影响及其应对策略”，进一步分析受影响差异、农户对策选择等。

### 3) 原话呈现原则

为真实还原农户对气候变化的主观感受和经验表达，报告撰写过程中尽可能保留受访者的原始语言，尤其在引用典型观点、观察和经验描述时，避免学术语言对其“技术化”或“中性化”的处理。农民的直白语言往往携带对气候变化最直接的体感与判断，如“地里干得裂口子”、“暴雨有时候一夜之间能把刚种的苗子全部冲走”、“以前的农时很规律，现在完全跟不上了”——这些语言不仅承载信息，更承载着地方性知识与生活经验，反映了农民基于长期农耕实践所形成的独特认知方式。

因此，农户“原话”的引用不只是语言表达的选择，更是一种研究方法上的态度，强调“从田间地头出发理解气候变化”的实践导向，也有助于让政策制定者与技术推广者更贴近农户的认知方式与决策逻辑。

## 二、减缓气候变化—— 生态农业如何助力？

### 2.1 土壤如何储存碳？

土壤可以通过植物、微生物和矿物从大气中吸收、转化、存储 $\text{CO}_2$ 。土壤就像地球的“隐形碳银行”，通过自然与生物的协作将大气中的 $\text{CO}_2$ 转化为有机质并长期固定。土壤有机质是土壤中碳的主要形式，占全球陆地碳库的65%~75%。土壤有机质包括新鲜的植物残体、半分解物质和长期积累的腐殖质。这些有机质在土壤中逐渐稳定下来，成为土壤碳库的重要组成部分。植物先通过光合作用将 $\text{CO}_2$ 转化为有机物质，然后有机质里的碳通过根系分泌物、死根系或者残枝落叶的形式进入土壤，并在土壤中微生物的作用下，转变为土壤有机质存储在土壤中，形成土壤碳汇，黏土矿物和金属氧化物会将一部分有机碳包裹成稳定结构并封存在土壤中。微生物在呼吸过程中会产生 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等温室气体排放。土壤固碳原理如图2.1所示。当碳输入大于碳排放则实现了土壤固碳，而当碳输入小于碳排放，则会造成土壤碳流失。

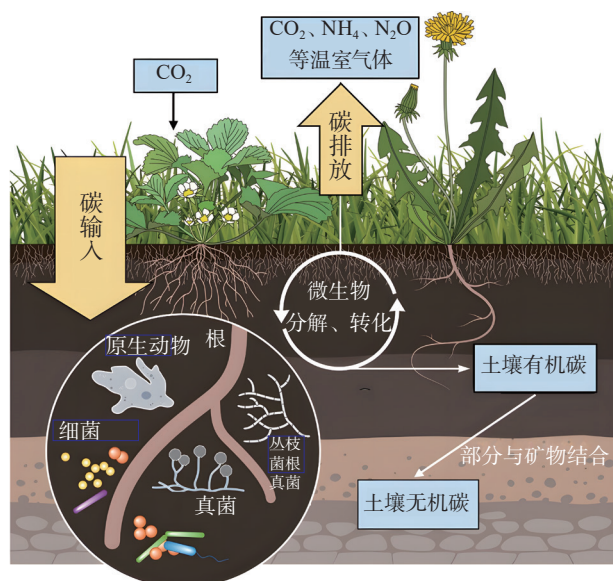


图2.1 土壤固碳原理（翻译改编自Beattie等，2024）

### 1) 碳的“搬运工”：植物与根系

植物通过光合作用吸收CO<sub>2</sub>，将碳元素储存在根、茎、叶中。其中一部分碳会通过根系分泌物或残枝落叶进入土壤。这些有机质经过微生物分解后，部分转化为稳定的土壤有机碳（SOC）。

### 2) 碳的“守护者”：微生物与矿物

土壤中的细菌、真菌等微生物将易分解的有机物转化为自身生物量，死亡后残体被“锁定”在土壤中。这一过程像“碳工厂”，通过体外修饰（分解大分子）和体内周转（合成代谢）持续积累碳。例如：草原土壤中，微生物残体可能比木质素更主导长期碳储存。植物的根系分泌物为生活在地下的微生物（细菌、真菌、原生动物和线虫）提供养分。植物呼吸时，会将一些CO<sub>2</sub>返回大气，并通过植物的根将一些碳以糖类物质的形式排出。土壤中的微生物（如细菌和真菌）分解植物残体、根系分泌物和死亡的微生物，将其转化为更稳定的有机碳或无机碳。其中一部分碳被微生物吸收作为生物量，另一部分则转化为稳定的土壤有机碳。黏土矿物和金属氧化物（如铁铝氧化物）通过吸附、共沉淀或催化聚合作用，将部分有机碳包裹成矿物结合态有机碳，显著提升其稳定性。此外，硅酸盐矿物经风化溶解后，释放的金属阳离子（如Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>）与CO<sub>2</sub>衍生的碳酸根离子结合生成碳酸盐矿物（无机碳），实现地质封存。无机碳不易被微生物直接分解，通常较为稳定，其平均驻留时间可达从几百年到数百万年不等。

## 土壤微生物在土壤固碳中的贡献

有观点认为，土壤有机质主要来源于地上植物凋落物，但Clemmensen等（2013）通过建模研究发现瑞典北方森林岛屿中50~70%的储存碳其实来自根系和与根相关的微生物，而非传统认为的地上植物凋落物。许多研究认为，土壤中微生物呼吸作用会产生大量CO<sub>2</sub>，加速了土壤有机碳（SOC）的分解，从而不利于SOC的积累，在其死亡后身体中的碳才会被“锁定”在土壤中。但也有研究表明，土壤中活着的真菌也是重要的碳库。土壤食物网学校基于40多年的理论和实践研究表明，真菌是碳氮比极高（C:N高达100:1）的微生物，其细胞壁可储存大量的碳，在其呼吸过程中仅释放非常少量的碳，大部分的碳被储存在身体中。并且，真菌的直径和长度随寿命增加而不断增大，当土壤中有丰富的真菌并且不被扰动，真菌能活得足够久时，土壤碳储存的能力也会不断增加。Hawkins等（2023）通过分析近200个数据集，估算了植物向菌根真菌菌丝体分配碳的量。结果表明，每年约有131.2亿吨CO<sub>2</sub>当量的碳由陆生植物固定并暂时分配给菌根真菌的地下菌丝体，相当于当前化石燃料年排放量的36%。Frey（2019）指出，真菌菌丝可通过物理缠绕和化学吸附作用促进土壤团聚体的形成，从而保护土壤有机碳免受分解。

## 影响土壤碳储存的关键因素有哪些？

土壤有机碳封存率受土壤质地和结构、降雨量、温度、耕作系统和土壤管理方式等多种因素的影响（Lal，2004）。不同类型的土壤（如沙土、黏土、壤土等）对碳的储存能力差异显著。例如，湿地和森林土壤通常具有较高的碳密度（Xu等，2018）。不同植被类型对土壤碳垂直分布的影响也不同（Wright等，2020）。气候条件（如温度、降水）和植被类型对土壤碳储存有显著影响。例如，在湿润地区，植被生长旺盛，土壤有机碳含量较高；而在干旱地区，土壤有机碳含量较低。土壤管理方式（如耕作、施肥、作物轮作）可以通过改善土壤结构和增加有机质输入来提高土壤碳储存能力。例如，减少耕作扰动、增加覆盖和使用有机肥可以显著提升土壤有机碳含量。

## 2.2 生态农业和化学农业的土壤固碳能力有无明显差异？

### 2.2.1 固碳能力对比

#### 2.2.1.1 整体固碳能力对比

德国多个研究机构组成的跨学科团队发布研究报告（Sanders等，2018），基于1990—2018年全球的528项研究从多个角度对比了生态农业和化学农业的环境效益。该研究发现：与化学农业相比，生态农业土壤的有机碳含量平均高10%。该报告还指出，多项长期试验（部分试验长达20年，涵盖作物包括谷物、豆科作物等）的平均结果显示，生态农业土壤的有机碳含量比化学农业多198gC/m<sup>2</sup>。

罗代尔研究所（Rodale Institute）在美国宾夕法尼亚州的试验地进行了为期40年的大田试验，对比了生态农业和化学农业的土壤有机质含量，结果显示，2019—2020年生态农业土壤的平均有机质含量为4.5~5.5%，而同期化学农业土壤有机质含量仅为2.5~3.0%。该研究指出，生态农业通过提升土壤有机质、促进微生物活动和减少合成投入，展现出更强的固碳能力和更低的碳排放潜力。相比之下，化学农业依赖高能耗投入和破坏性耕作，不仅固碳效率低，还可能加剧温室气体排放。

#### 2.2.1.2 关键固碳指标对比

生态农业与化学农业在土壤固碳能力方面存在显著差异，主要体现在土壤有机质含量、微生物量碳、固碳速率及碳库稳定性等关键指标上。生态农业通过有机肥施用、秸秆还田和绿肥种植等措施，可显著提升土壤有机质含量。由表2.1可以看出，生态农业模式下土壤有机质含量长期（3~16年）可提高0.6%~0.8%，甚至达到化学农业的2~5倍；而化学农业因过度依赖化肥导致土壤有机质流失，含量常低于2%（姜达炳等，2003；Schmidt，2024）。在土壤微生物量碳方面，长期定位试验（16~20年）发现，生态农业通过免耕和有机肥输入使表土层微生物量碳增加25%~45%；而单施化肥的化学农业模式抑制微生物活性，其微生物量碳仅为有机肥处理的50%~70%（徐阳春等，2002；Azerbaijan等，2021）。

从固碳速率来看，荟萃分析与模型模拟（3~37年）表明，生态农业通过秸秆还田可实现年均固碳速率0.58~0.67g/(kg·a)，且长期效果稳定；而化学农业单施化肥的固碳速率仅为0.08~0.38t/hm<sup>2</sup>·a，需依赖有机无机配施才能显著提升（齐宏运等，2025）。此外，实验显示，生态农业的土壤碳库以稳定态腐殖质为主，周转周期较长，而化学农业的碳库以活性碳为主，易分解流失（Schmidt，2024）。环境效益方面，生态农业的固碳作用与减少土壤侵蚀（70%~90%）和提高生物多样性协同，而化学农业可能因氮肥施用增加N<sub>2</sub>O排放，导致固碳与温室气体排放的权衡（陈能场，2018）。

造成生态农业和常规化学农业的固碳能力存在明显差异的原因有：1）生态农业通过多样化碳输入（如秸秆、有机肥）促进有机质积累，而化学农业因长期施用化肥农药会加速团聚体破坏和有机质矿化；2）生态农业的微生物群落多样性增强碳固定能力，化学农业则因养分单一化抑制微生物功能；3）生态农业固碳效果随年限递增，而化学农业需持续投入维持低水平固碳。但研究仍存在局限性，如多数实验周期较短（3~5年），难以反映长期潜力，且微生物量碳测定方法缺乏标准化（周旦等，2021）。

基于文献研究和实践案例的梳理，本报告对生态农业和常规化学农业的土壤固碳能力进行了对比，结果见表2.1。

表2.1 生态农业和化学农业土壤固碳能力对比

关键指标	研究方法	实验时间	生态农业和常规化学农业差异	资料来源
土壤有机质含量	大田实验、文献综述	3~16年	生态农业：通过有机肥、绿肥等措施显著提高有机质（平均提高0.6%~0.8%，长期可达2~5倍）。 化学农业：依赖化肥导致有机质流失，含量常低于2%。	吕晓英，2024；姜达炳等，2003；Schmidt，2024
土壤微生物量碳	长期定位试验	16~20年	生态农业：免耕和有机肥施用显著提高微生物量碳（表土层增加25%~45%）。 化学农业：单施化肥抑制微生物活性，微生物量碳仅为有机肥处理的50%~70%。	徐阳春等，2002；Azerbaijan研究团队，2021；周旦等，2021
土壤固碳速率	荟萃分析、模型模拟	3~37年	生态农业：秸秆还田年均固碳速率0.58~0.67g/(kg·a)，长期可持续。 化学农业：单施化肥固碳速率仅0.08~0.38t/hm <sup>2</sup> ·a，需有机无机配施才显著提升。	张千禧等，2023；齐宏运等，2025
土壤碳库稳定性	实验室分析	未明确	生态农业：腐殖质结构更稳定，碳库周转周期长。 化学农业：碳库以活性碳为主，易分解流失。	Schmidt，2024
环境效益关联性	文献综述	长期研究	生态农业：固碳与减少侵蚀（70%~90%）、提高生物多样性协同。 化学农业：固碳能力与温室气体排放（如N <sub>2</sub> O）存在权衡。	陈能场，2018；Schmidt，2024

### 2.2.2 碳足迹对比

Yuttitham (2019) 采用生命周期评价方法，计算了生态农业和化学农业在芥蓝种植过程中的碳排放。数据显示，从单位产量的碳排放来看，化学农业碳足迹为 $0.402 \pm 0.47\text{kgCO}_2$ 当量/kg，是生态农业（ $0.195 \pm 0.122\text{kgCO}_2$ 当量/kg）的两倍。从排放源来看，农业高排放主因是化学肥料（占51%）及耕作、农药施用等化石燃料消耗所带来的排放较高；生态农业的碳排放主要来自运输（占81%）和有机肥料（占12%）

## 2.3 结构性短板：化学农业土壤“留不住碳”的原因

化学农业主要是化石能源驱动，从化石燃料开采到化肥、农药生产，再到农业机械的广泛使用，整个化学农业链条高度依赖外部不可再生能源投入，直接贡献了大量碳排放。

健康的土壤是巨大的陆地碳库。然而，化学农业的耕作方式会严重削弱土壤固碳能力，造成土壤碳库的持续流失：

**有机质输入不足：**过度依赖化肥，忽视有机肥（如秸秆、绿肥、粪肥）还田，导致土壤缺乏新鲜有机质输入，无法维持或增加土壤有机碳含量。

**破坏土壤结构：**频繁的翻耕（如犁地）破坏土壤团聚体结构，加速土壤有机质的氧化分解，将长期封存的碳以二氧化碳形式释放到大气中。

**生物活性降低：**农药和土壤退化抑制了土壤微生物和动物的活力，而这些生物是分解有机质形成稳定土壤碳的关键驱动者。

不当的农田管理方式容易导致土壤侵蚀、退化和结构破坏，并将土壤由碳汇转为碳源。例如，长年翻耕、地表裸露、过量施用化肥/农药、农用机械不当使用、地膜/大棚的过量使用等。研究发现，过量的农业耕作会加剧土壤侵蚀，造成土壤有机碳的氧化以及土壤结构质量的下降。在中国，耕作土壤的有机碳损失量估计约为15吨/公顷（郑聚锋等，2021）。东北黑土区由于过度耕作和土壤退化，土壤有机质含量大幅下降。受不合理开垦、耕作、施肥方式等的影响，黑土层平均厚度已从20世纪50年代60~80cm下降到目前的20~40cm（郑粉莉，2019）。数据显示，2011年东北典型黑土区海伦市农田平均有机碳含量与1980年相比下降了4.0g/kg，表土层和厚土层有机碳含量下降幅度分别为12%和22%（中国科学院，2021）。每年仅因土壤侵蚀造成的全年粮食减产高达14.7%，严重威胁中国粮食安全和生态安全（郑粉莉，2019）。不合理的水管理，尤其是在水稻田中的长期淹水灌溉，会在土壤中形成厌氧环境，抑制碳的稳定固存，促进甲烷的产生与排放，从而削弱土壤的碳封存功能。此外，水分过饱和还会干扰土壤团粒结构和微生物碳循环机制，进一步加剧碳流失。因此，提升土壤碳汇潜力不仅需要耕作方式的改良，还需综合考虑水资源管理策略。

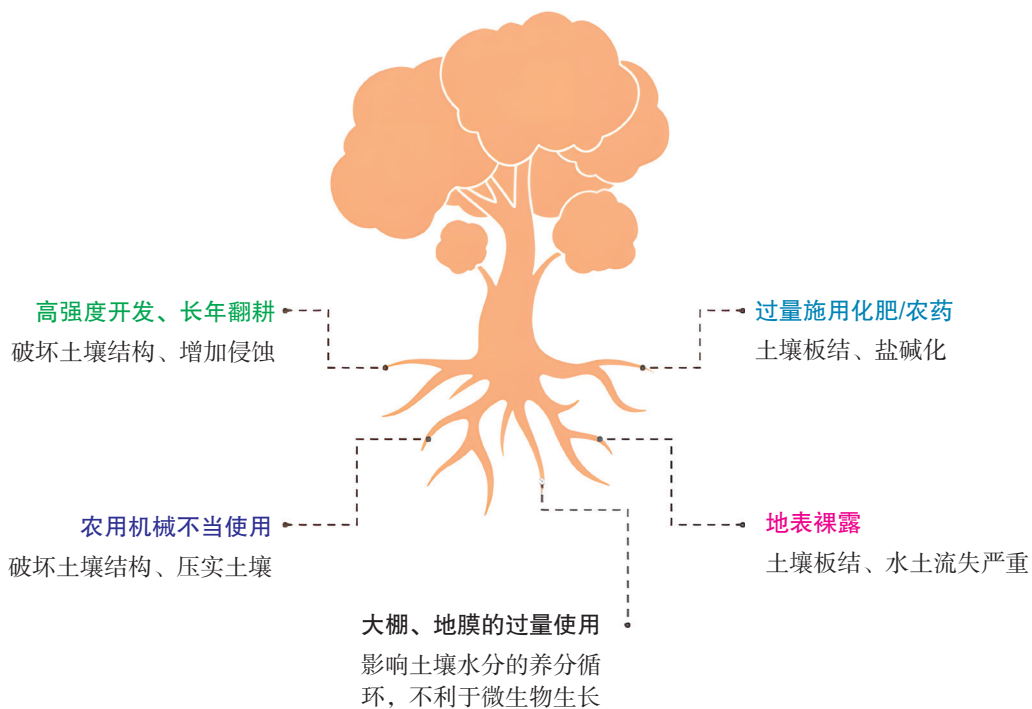


图2.2 不可持续的农业实践导致的土壤退化

## 2.4 哪些生态农业管理方式有助于减缓气候变化？

生态农业是应对气候变化的一种基于自然的解决方案。如本文第1.3节所述，其核心特征包括：以生态系统原理为指导，遵循物质循环、能量流动、生物多样性和生态平衡等自然规律开展生产；减少或避免使用外源有害投入，优先利用农场内部或可再生资源；多样化与系统化管理，如作物多样化、农林牧结合、管理措施形成闭环；生态服务与生产目标并重，在产出食物、纤维的同时，提供土壤固碳、水资源涵养、授粉等生态系统服务；面向长期可持续性，降低环境外部性，确保土地和生态系统可在代际间稳定利用。

在实现这些特征的过程中，生态农业体系常会综合采用一系列农田管理措施，例如免耕/少耕、秸秆还田、种植绿肥、自然生草、作物覆盖、有机肥替代化肥、粮豆轮作等。需要明确的是，这些措施并非生态农业所独有，在部分常规化学农业体系中也可能出现。但生态农业的特点在于将这些措施系统性整合，贯穿整个生产过程，并与生物多样性保护、土壤健康提升和生态系统恢复等目标协同推进。这种长期、全面、协同的实施方式，使其在气候减缓上表现出更稳定、可持续的效果。

因此，在分析免耕、农林协同等单项措施的减碳效益时，本文将其置于生态农业的整体框架下理解——并非因为这些措施“专属于”生态农业，而是因为它们在生态农业体系中，它们通常更全面、更持久地应用，并与其它生态管理手段形成协同，从而放大其对土壤固碳和温室气体减排的贡献。”

#### 2.4.1 秸秆还田、有机肥和堆肥替代化肥——自建“有机质补给站”

化肥的使用是中国农业碳排放的重要来源，化肥使用带来的碳排放占农业总碳排放的60.74%（李亚宁等，2024）。例如，生产1吨合成氮肥约排放4~6吨当量CO<sub>2</sub>。中国化肥过度使用是行业共识。为了减少化肥用量，原农业部于2015年发布了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》。该方案实施期满后，农业农村部又于2022年发布了《到2025年化肥减量化行动方案》（邹金浪等，2024）。方案的实施对于化肥减量有显著效果。2008~2014年间，中国化肥使用碳排放总量由7185.11万吨增加到8462.78万吨，增幅为17.78%；2014~2020年间，化肥使用逐渐减少，到2020年化肥使用碳排放总量为7004.40万吨，较2014年减少了17.23%（邹金浪等，2024）。但中国的化肥用量仍须进一步减少。2019年中国化肥的施用强度为513.34kg/hm<sup>2</sup>，远超出发达国家公认的安全警戒线（225kg/hm<sup>2</sup>），如果中国化肥使用量达到安全警戒线，则至少可以减少碳排放量2121.17万吨（李亚宁等（2024），对降低农业碳排放具有重要作用。2020—2023年，中国化肥用量呈逐年缓慢降低的趋势，2023年化肥总用量为5021.7万吨（《中国农村统计年鉴2024》）。

在生态农业中，常采用秸秆还田、有机肥和堆肥施用等方式替代化肥，通过“自建有机质补给站”，促进资源循环利用，减少化肥过量使用带来的碳排放。

##### 1) 秸秆还田

秸秆还田是将农作物秸秆直接或经过处理后归还到农田土壤中的农业措施，包括直接粉碎还田和整株还田等。例如，在农作物收获后，使用秸秆粉碎机将秸秆直接粉碎成小段（一般长度在5厘米以下），均匀地撒在田间。部分农业实践者会通过犁耕、旋耕等方式将粉碎的秸秆翻埋入土，但这种方式可能会扰动土壤，并且短期内难以腐烂，影响作物生长。秸秆还田可以降低秸秆露天焚烧带来的CO<sub>2</sub>高排放。石祖梁等（2017）基于卫星监测数据估算得出，2015年全国秸秆露天焚烧量约为8110万吨，占全国秸秆总量的7.8%，焚烧产生的碳排放量约为3450万吨。这一数据较2010年（5430万吨）和2008年（4460万吨）有所下降，主要得益于秸秆禁烧力度的加强和综合利用水平的提高。而随着政策管控和秸秆资源化利用的程度加大，秸秆露天焚烧量进一步减少，但仍未完全实现资源化利用。《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》显示，2021年中国秸秆田间焚烧产生的温室气体排放为547.7万吨二氧化碳当量。

#### 秸秆还田可通过改善土壤结构促进土壤固碳

刘晓雨（2013）基于田间试验的结果指出，将秸秆转化为生物质炭还田，可在维持作物产量的同时显著提高土壤有机碳储量（增幅达35.5%）并降低氧化亚氮排放（降幅达16.7%）。Kan等（2020）基于2012—2019年的田间试验结果发现，免耕的同时秸秆还田显著提高了0~10厘米土壤深度的土壤

有机碳（SOC）含量，并且促进了大团聚体的形成和团聚体稳定性，有助于SOC的积累和固存。随着保护性耕作持续时间的延长，SOC积累的优势将更加明显。Liu等（2023）基于荟萃分析的方法，全面分析了全球806个不同耕地类型的实验结果，研究表明，秸秆还田有助于提升粮食产量和增加土壤碳储量。秸秆还田增加了土壤碳储量，尤其是表层土壤（0~20厘米），其碳储量增加了8%~13%。

## 2) 有机肥施用

有机肥广义上包括动物源有机肥和植物源有机肥。动物源有机肥主要为各类畜禽粪便，如牛粪、猪粪、鸡粪等。植物源有机肥包括绿肥（将苜蓿、紫云英、田菁等绿色植物体的一部分或全部翻压入土中作为肥料）、堆肥（各类农作物秸秆、落叶、杂草等为主要原料，经过堆制发酵而成）、沼肥（沼气池内发酵后的残留物，包括沼液和沼渣）等。本报告所提及的有机肥多为动物源有机肥。

## 有机肥促进土壤固碳的同时增加作物产量

刘晓雨（2013）基于中国南方6个水稻田（四川遂宁、湖南望城、江苏吴江、江苏望亭、江西进贤、福建福州）约30年（1981~2011年）的田间试验，采用4种不同施肥方式进行对比，结果表明，与单独施用化肥相比，在施化肥的同时施用秸秆或畜禽粪便可提高土壤有机碳含量。中国科学院植物研究所（Cen等，2020）针对山东某果园2014~2016年开展了田间试验，设置有机管理和常规管理两种模式，有机管理组使用兔粪和鸡粪作为肥料，常规管理组使用化学肥料。确保两种管理方式的总氮、磷、钾投入量相等。有机管理组使用生物农药控制害虫，杂草通过割草控制。结果表明，在总氮、磷、钾施用量相同的情况下，有机管理显著提高了苹果产量和年度净产出，分别增加了30%和504%。与常规管理相比，有机管理显著改善了土壤pH值、土壤有机碳和全氮、磷、钾的含量，增加了土壤的透气性，改善了土壤结构。

蔡彬仪等（2020）基于成都平原的农田实验对比了不同施肥方式对土壤有机碳含量的影响，结果表明，与只施用化肥相比，在施用化肥的基础上增施不同量的有机肥（1500kg/hm<sup>2</sup>、3000kg/hm<sup>2</sup>、4500kg/hm<sup>2</sup>），土壤有机碳含量分别增长4.06%、6.01%、7.45%。郑玉婷等（2024）对云南省普洱市不同管理方式下的茶园土壤有机碳含量进行了分析，结果表明，在每年翻耕一次的情况下，施用有机肥配合人工除草、生物防虫的管理方式比常规管理（使用化肥、除草剂、杀虫剂）的茶园土壤有机碳高52.09%~62.86%。Dersch等（2001）的研究显示，施用有机肥21年后土壤碳储量增幅是施用无机氮肥的2.6倍左右。

## 3) 堆肥

堆肥指将农作物秸秆、动物粪便、果皮菜叶等按照一定比例混合后由微生物分解并转化为天然有机肥料的过程。分解过程中，真菌、细菌等微生物会大量繁殖，分解堆肥中的有机物质，将其转化为可被植物吸收的养分。堆肥中含有大量的有机物质和各种营养元素，为土壤微生物提供了丰富的食物来源。同时，堆肥中的各种微生物也会带入土壤中，增加土壤微生物的种类和数量，提高土壤微生物的丰富性。与覆盖物或干粪肥不同，堆肥是受控嗜热过程的最终产品，微生物通过该过程将有机材料分解成适合施用于土壤的形式。管理良好的堆肥过程有充足的氧气，经过高温阶段，加速有机材料的自然生物降解，产生由碳和氮组成的稳定形式的有机物，含有重要营养成分，而不携带有害病原体。重要的是，堆肥中的氮类型为有机氮，与合成肥料中的氮（无机氮）不同。从气候角度来看，堆肥具有“三赢”作用。它既增加了土壤的碳封存（将大气中的碳吸收到土壤中），又减少了其他来源的排放（填埋、焚烧或让有机材料在池塘或坑中腐烂，释放出强大的短寿命温室气体甲烷、氧化二氮和黑碳以及无机肥生产过程中的碳排放），还增强了土地对极端天气（洪水和干旱）的抵御能力。研究

表明，使用粪肥和堆肥可提高土壤生产力，并形成可在土壤中保留数十年的稳定碳。在加利福尼亚的草原上，施用堆肥后3年内土壤碳储量分别增加了0.5~3.3tC/公顷（Paustian等，2019）

参照邹金浪等（2024）的估算方法，以中国2020年化肥使用碳排放总量（7004.40万吨）为基准，如果将10%、30%、50%常规农业转换为不使用化肥的生态农业，每年可实现化肥碳减排量分别为700.4万吨、2101.3万吨和3502.2万吨。

#### 2.4.2 用生物防治代替农药——构建“生态防火墙”

2022年中国农药总使用量为224717吨，位列全球第五，仅次于巴西、美国、印度尼西亚和阿根廷（见图2.3、2.4）。尽管总量较高，但与耕地面积相比，中国每公顷农田的平均农药使用量为1.76公斤/公顷，低于许多农药密集型国家，如韩国和哥伦比亚。从趋势来看，中国农药使用总量自1990年以来逐步上升，在近年略有下降，显示出农药减量行动的成效。然而，考虑到农药生产、运输和使用带来的温室气体排放，以及对生物多样性、农民健康及土壤微生物的潜在负面影响，未来中国仍需进一步减少农药用量。

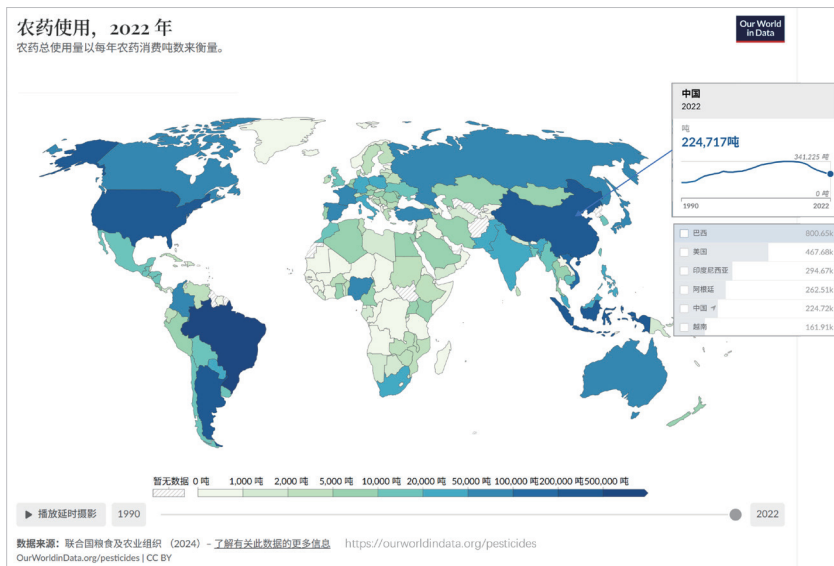


图2.3 2022年中国农药使用总量

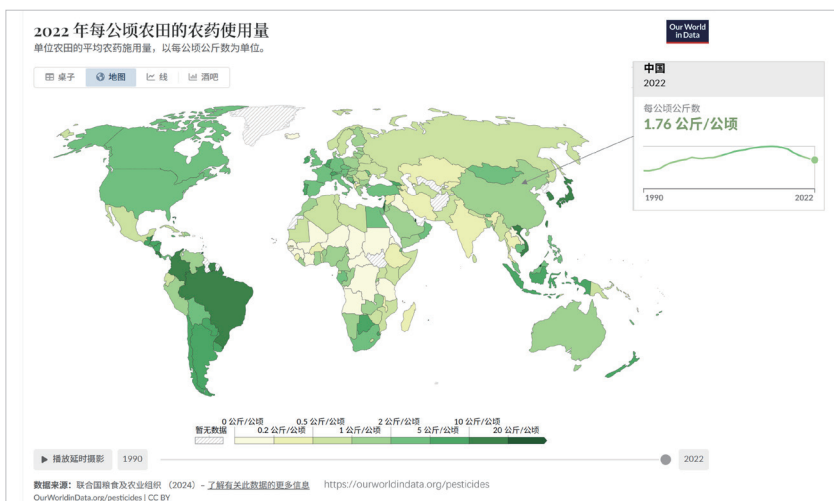


图2.4 2022年中国每公顷农田的农药使用量

生态农业强调充分利用自然界的捕食关系，用生物防治替代农药，可以从以下几个方面减少碳排放：

1) **减少化学农药的生产、运输和使用。**化学农药（如杀虫剂、除草剂、杀菌剂）的生产依赖化石能源（石油化工原料），其制造过程释放大量CO<sub>2</sub>和氮氧化物。例如，生产1公斤草甘膦排放4.3公斤CO<sub>2</sub>。农药喷洒依赖燃油机械（如拖拉机），会直接产生CO<sub>2</sub>；部分农药（如熏蒸剂）含强效温室气体（如甲基溴，其温室效应是CO<sub>2</sub>的5倍）。而生物防治通过引入天敌，如捕食性昆虫或寄生虫，可以有效减少对化学农药的依赖，从而减少农药生产和使用带来的碳排放。

2) **促进生态平衡。**生物防治有助于维持生态系统的平衡。通过引入自然捕食者，可以增强生态系统的自我调节能力，减少害虫的爆发。这种生态平衡的维持不仅有助于提高作物的健康和产量，还能减少因害虫泛滥而导致的额外碳排放。生态平衡不仅体现在食物链上，还体现在微生物、水、热、气、光、肥等的平衡上；生态系统健康可以让作物本身健康生长、少生病或不生病。

3) **提升土壤健康。**生物防治方法通常伴随着可持续农业的实践，有助于提升土壤健康。健康的土壤能够更好地储存碳，减少CO<sub>2</sub>的释放。通过采用生物防治，农民可以实现土壤的可持续管理，从而在长期内降低农业活动的碳排放。

4) **增强生物多样性。**生物防治促进了生物多样性的保护。多样化的生态系统能够更有效地吸收和储存碳。通过保护和引入多种捕食者，农业生态系统的复杂性和稳定性得以增强，从而有助于减少温室气体的排放。

5) **提高农作物的抗逆性。**采用生物防治的作物通常表现出更强的抗逆性，能更好地适应气候变化和环境压力，不仅提高了作物产量，还减少了因气候变化导致的农业损失，从而间接降低碳排放。



图2.5 生物防治减少农业碳排放的原理

生物防治通过以下几个方面促进土壤固碳：

1) **改善土壤结构：**生物防治可以增加土壤中有机质的含量，改善土壤的团粒结构，提高土壤的水分保持能力和通气性，从而促进植物根系的生长和微生物的活动。

2) **增加土壤微生物活性：**化学农药会杀死土壤中的大部分微生物，抑制土壤微生物活性，而生物防治不会干扰甚至可以促进土壤微生物的生长和繁殖，这些微生物在分解有机物的过程中，能够将碳固定在土壤中，形成稳定的有机碳。

3) 促进植物生长：通过控制病虫害，生物防治提高了植物的生长健康，增加了植物的生物量，植物在光合作用中吸收的二氧化碳最终转化为土壤中的有机碳。



图2.6 生物防治促进土壤固碳的原理

此外，有研究表明，生物防治在控草、减碳方面取得了良好成效。通过种植黑麦草抑制杂草，替代除草剂，可减少草甘膦使用。Poepplau等基于实验表明，高生物量的覆盖作物能有效控制杂草，所有测试的覆盖作物处理的杂草密度均显著低于未处理的对照组，降幅在65%—96%之间（Poepplau, 2015）。

有学者通过生物防治替代60%化学农药，结合免耕和绿肥间作，使茶园单位面积碳排放降幅达43%（颜鹏等，2023）。根据碳排放交易网的信息（2024），广州一荔枝生态果园采用生物防治综合技术后，农药用量减少50%，化肥替代率40%，且示范园区年固碳量增加200吨，净碳排放下降35%。

以李来来等（2021）和李亚宁等（2024）对农药碳排放当量的估算结果为基准，如果将我国10%、30%、50%常规农业转换为完全不使用农药的生态农业，每年可带来的农药碳减排量分别为355~450万吨、1065~1350万吨和1775~2250万吨。

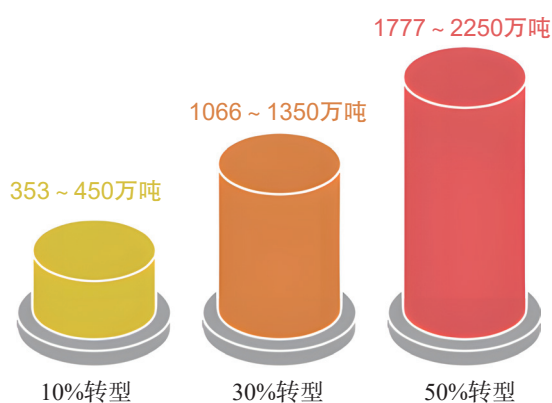


图2.7 常规农业转换为不用农药的生态农业带来的农药碳减排量

简阳生态农业专家袁勇老师建议：生物防治、物理防治虽然与农药、除草剂相比对土壤和生态系统的危害更小，但建议仅在生态恢复平衡前的转换期使用，而在生态平衡恢复以后，就尽量减少人为的干预，哪怕是人为引入“天敌”，也是一种外部力量，都会破坏自然本身的平衡，都是短暂的平衡。大自然本身的平衡也是动态的，且比人为控制的难度更小，也更稳定。

在杂草管理的过程中要注意度的把握，过度抑制杂草可能带来负面效应，如地表裸露可能导致土壤被暴晒或雨水冲刷。防治病虫害更重要的是要找到病虫爆发的根源，而爆发的根源一般是养分和环境失衡，而养分的失衡又与土壤本身的健康有关。环境的失衡就是因为人为干预太多。所以，病虫害的防治关键在于保持土壤的健康，增强作物自身的抵抗力。

关于如何与杂草和病虫害“和谐共处”，适度管理，可以扫描下方二维码查看生态农业实践者袁勇老师分享的经验：



袁勇老师推文——小草立大功



袁勇老师推文——与病虫共舞

#### 2.4.3 建立多样化种植系统——“天然肥料工厂”

在生态农业中，常采用间作、套作或轮作等方式增加种植多样性，提高生态系统稳定性。

**间作：**在同一地块、同一生长期内，按一定比例或规律种植两种或多种作物。作物间通过互补关系（如光照、养分、空间）提高资源利用率。作物共生期长，需生态位互补（如高秆与矮秆、深根与浅根）。如玉米与大豆间作，玉米为高秆作物，需强光照；大豆为矮秆豆科作物，耐阴且能固氮。

**套作：**在前一作物生长后期（未收获时），在其行间或株间播种后一作物，形成前后茬交替生长。利用作物生长周期差异，延长土地生产时间。如华北平原小麦套种棉花：小麦秋季播种，次年5月成熟前，在小麦行间套种棉花幼苗；南方稻田水稻套种紫云英（绿肥）：水稻收割前20—30天，将紫云英种子撒播于稻田。

**轮作：**在同一块田地上，有顺序地在季节间或年度间轮换种植不同作物或复种组合的一种种植方式，是一种用地养地相结合的生物学措施，有利于均衡利用土壤养分、改善土壤理化性状、减轻病虫害和杂草危害等，从而实现农业的可持续发展和提高作物产量与品质。常见的轮作方式有小麦—玉米轮作、水稻—小麦轮作、玉米—大豆轮作、茄果类—叶菜类—豆类轮作等。例如，玉米与大豆轮作模式下，玉米根系较深，生长过程中会从土壤深层吸收一些养分，且其根系分泌的一些物质有利于某些特定微生物的生长。大豆是豆科作物，具有能固氮的根瘤菌，增加土壤中的氮素含量。将玉米与大豆轮作，能为土壤微生物提供多样化的生存环境和养分来源。在玉米生长后，土壤中会留下一些适合分解禾本科植物残体的微生物；而大豆生长时，根瘤菌以及与豆科植物共生的其他微生物会大量繁殖。这样在轮作过程中，不同种类的微生物相继生长繁殖，土壤微生物的丰富性得以提高。通过种植固氮豆类作物、绿肥和覆盖作物，可以显著减少 $N_2O$ 等温室气体排放。

**通过多样化轮作系统种植不同的作物可以提高农田生产力和适应性，促进土壤碳封存**

Yang等（2024）在中国科学院栾城农业生态系统站开展了6年的试验期间田间试验，评估华北平原传统小麦—玉米的轮作模式下分别加入红薯/豆科植物/花生等进行三作物轮作后对作物产量、土壤健康与碳封存能力的影响。结果表明，甘薯→冬小麦→夏玉米轮作比传统的冬小麦→夏玉米双作显著提高农田产量，同时土壤固碳和碳利用效率等也有显著影响。花生→小麦→玉米轮作系统的土壤固碳速

率达到2.03吨/公顷/年，是传统轮作的3倍，0—90cm土层的碳储量6年净增8%。这一过程与根系分泌物和残体输入密切相关：豆科作物的深根系将亚表层养分带至表层，而甘薯的匍匐茎增加地表覆盖，共同促进有机碳积累。同时，土壤微生物多样性的提升加速了碳循环效率，形成“碳输入—微生物转化—碳封存”的良性循环（Yang等，2024），微生物多样性的提升不仅增强了土壤生态系统的稳定性，还通过菌根网络促进了作物对磷和微量元素的吸收，减少了肥料需求。

多样化轮作系统提高了土壤固碳，促进了土壤微生物生长，提高了碳利用效率。轮作和种植多种作物，特别是那些根系较深的作物，如多年生植物，可以为土壤增加更多的有机质，从而增加更多的碳（Cho，2018）。

不同的轮作制度对土壤有机碳的固定有显著影响。例如，张宏玲（2013）在成都平原（成都新都区 and 郫都区）的研究表明，小麦→水稻轮作的土壤有机质含量均值为52.21吨/公顷，显著高于油菜→水稻（45.41吨/公顷）和水稻→蔬菜轮作（41.52吨/公顷）。

张开（2015）基于四川安岳县69个乡镇农田土壤的碳密度实测数据研究表明，各乡镇近5年平均碳密度为5.57~9.06吨/公顷，碳密度最大的乡镇是最低乡镇的1.72倍。而耕地利用率排名与各乡镇的农田作物植被年平均碳密度次序整体一致。在相同耕作面积的情况下，作物密度越高碳密度就越大。

通过农林复合系统实现“立体碳捕获”

研究表明，农林间作系统可以将土壤中的碳含量提高10%—20%（Saja等，2017）。Cavalieri-Polizeli（2014）基于5种农业系统（农田、畜牧业、林业、畜牧—林业和作物—畜牧—林业的对比实验，发现相较于单一耕作系统（如耕地或畜牧业），综合耕作系统（如畜牧业—林业综合）提高了土壤有机碳的储量，特别是在土壤表层。综合耕作系统通过增加土壤生物多样性、改善土壤结构（如提高土壤团聚体稳定性和孔隙度），可能显著改善了土壤的结构质量，增强了土壤的抗侵蚀能力和水分保持能力。通过果树与牧草间作，如在果园中种植牧草（白三叶等），可以通过树木根系促进土壤深层碳储存。果树根系分布较深，主要利用土壤深层的养分和水分，而牧草根系相对较浅，主要在土壤浅层吸收养分和水分。这种空间上的分层利用，使得不同深度的土壤环境都能有适宜的微生物生存。同时，牧草的枯枝落叶以及根系分泌物能为土壤微生物提供丰富的有机物质，吸引更多种类的微生物。例如，一些分解纤维素的微生物会在牧草残体上大量繁殖，而与果树根系相关的一些菌根真菌等也能在果树根系周围生长，从而增加了土壤微生物的丰富度。

#### 2.4.4 地表覆盖——给土地披上“绿色地毯”

地表覆盖主要包括秸秆覆盖和作物覆盖两种方式。

**秸秆覆盖：**指将农作物秸秆均匀地铺盖在农田土壤表面，以达到改善土壤环境、促进农作物生长等目的。

**作物覆盖：**又称“活体覆盖”，通过自然生草、种植绿肥等覆盖作物或利用间作、套种等方式，让作物在生长过程中对土壤表面进行覆盖。其中，自然生草能最大限度地增加生物多样性。同时，杂草覆盖土壤、保护土壤，防止水土流失的效果可能优于人工种植的作物。人为种植的绿肥虽然也能起到覆盖的作用，但生物多样性较为单一，不利于平衡生态系统的建立，相对自然生草，更容易暴发病虫害。

## 地表覆盖如何帮助土壤固碳？

### 1) 减少土壤侵蚀

研究表明，雨滴打击和径流侵蚀是引起坡面侵蚀的主要动力。黑土坡面雨滴打击作用对坡面侵蚀的贡献可达到72%~96%；而不同区域的类似研究结果表明，黄土区雨滴打击对坡面侵蚀的贡献占35%~61%；红壤坡面雨滴打击对坡面侵蚀的贡献为27%~76%（郑粉莉，2019）。大多数农作物都是一年生植物，因此收获后，田地常处于裸露状态，容易造成土壤碳的流失。将农作物残渣留在地里或种植不收割的覆盖作物，可以将更多的碳注入土壤来补偿耕作造成的碳损失（Cho，2018）。野外原位模拟降雨试验表明，当黑土坡面秸秆覆盖量仅为2kg/m<sup>2</sup>即可减少87%的坡面侵蚀量（郑粉莉，2019）。而适当覆盖作物、减少土壤裸露也可有效降低土壤侵蚀的风险。DeVincentis等（2022）基于2016~2019年在美国多个试验点的田间实验结果，发现冬季覆盖作物在短期内可通过改善渗透和雨水截留、控制土壤侵蚀、减少蒸散发损失、露水截留等方式影响农田的水量平衡，并且通过覆盖秸秆可增加土壤有机质含量。基于数十项研究的整合分析数据显示，大多数（77%）的土地因覆盖作物让土壤“存”的碳明显增加，增幅可达58%~85%（Hao等，2023）。

### 2) 固碳效果与覆盖方式有关

秸秆覆盖带来的土壤固碳效果与覆盖方式及覆盖厚度等有关。中国科学院植物研究所研究团队（Qin等，2022）2019—2020年在山东临沂平邑县的有机葡萄园进行实验，通过设置不同厚度（0、2、4、6厘米）的玉米秸秆覆盖处理，发现在2、4、6厘米覆盖厚度下，土壤有机质分别提升了2.4%、3.0%、2.3%。6厘米的覆盖虽在部分指标上有改善，但会导致氮素流失、成本增加和管理难度上升，且关键指标（如团聚体稳定性、容重）的改善效果未随厚度线性增长。因此，综合考虑土壤有机质含量、土壤团聚体结构改善效果和管理成本，4厘米是适宜该地区的兼顾生态效益和经济可行性的最优选择。东北师范大学研究团队（Kou等，2020）在吉林省梨树县保护性耕作研究站开展了不同覆盖方式的对比实验。通过设置4种不同的覆盖处理（每年覆盖33%秸秆（高频低量）、每年覆盖67%秸秆（高频高量）、每三年周期第一年覆盖100%秸秆（低频低量）、每三年周期前两年覆盖100%秸秆（低频高量）），实验点进行了为期10年的免耕实验，探究在免耕条件下不同秸秆覆盖量和频率对土壤固碳的影响，结果表明，在免耕系统中，秸秆覆盖的频率而非数量对土壤微食物网的分解路径有更显著的影响。在相同覆盖量下，低频处理的土壤有机碳（SOC）值比高频处理更高，并且低频覆盖有利于真菌生长，而真菌在土壤固碳中发挥着重要作用。

### 3) 自然生草的固碳效益

多项基于果园自然生草的研究（谷艳蓉等，2009；付学琴等，2015；杨乐等，2024；贺雨轩等，2025）表明：1）自然生草相比不留草会让土壤有机质含量、持水能力有明显提升；2）相比于不留草的果园，自然生草的果园土壤真菌含量更高；3）与人工种绿肥（黑麦草）相比，自然生草的情况下土壤中长出的草种类更丰富、土壤中线虫的丰度也更高。自然生草可提高土壤有机质、增强微生物活性及改善土壤结构，显著提升固碳效益。例如，南丰蜜橘园自然生草8年后，土壤有机质含量较对照地增加196.4%（付学琴等，2015）。

## 2.4.5 免耕/少耕——“不翻土的智慧”

### 免耕/少耕指的是什么？

**免耕：**是保护性耕作最彻底的形式，强调“零翻耕”与“高覆盖”，仅在播种时通过开沟器或专用播种机进行局部土壤扰动（如开窄缝播种）。同时，保留秸秆或残茬覆盖地表（覆盖率通常 $\geq 30\%$ ），减少土壤裸露。核心在于最大限度减少对土壤结构的破坏，避免破坏表层土壤团粒结构和微生物环境。

**少耕：**针对异常板结，不进行疏松则影响播栽的土壤进行的过渡性或适应性策略，与常规耕作（多次翻耕、耙地）相比，显著减少耕作频率和强度。可以采用浅耕、凿式犁等工具替代翻耕，保留部分残茬覆盖。可根据土壤条件和作物需求选择适度的耕作方式，如深松但不翻土。

免耕/少耕均以“减少扰动、增加覆盖”为核心，但少耕的覆盖比例可能低于免耕，二者技术实施强度和适用条件存在差异。

侯光炯院士基于多年的农田实践经验提出，自然免耕是通过营造良好的地上地下生态系统，以生物代耕，通过作物根系穿插、土壤微生物和动物的活动等来实现让大自然替代人力耕作，减少人为对自然系统的破坏。免耕不是种“懒”庄稼，也不是不要耕作，而是要免除不必要的耕作。凡是减少耕作强度和耕作次数的耕作方法，都可统称为免（少）耕。

关于侯光炯院士自然免耕理论的介绍，可以扫描查看土壤活力实验室撰写的微信推文“免耕就是“懒”人农法吗？”



土壤活力实验室推文—免耕就是“懒”人农法吗？

### 免耕/少耕如何帮助土壤固碳？

#### 1) 通过减少土壤侵蚀降低土壤碳流失

《鲜活的土壤》一书中指出，中国土壤0~20厘米深度的有机碳储存量约为340亿吨，约为0~100厘米深度有机碳储存量的40.02%（0~100厘米的有机碳储存量约为860亿吨），因此减少土壤侵蚀、保住土壤表层的碳十分重要。免耕或少耕时，土壤中的碳暴露在空气中的次数大幅减少，土壤团聚体得到保护，从而有效减少土壤中的碳流失。Langdale等（1979）研究表明，免耕可显著减少土壤侵蚀，免耕系统的土壤侵蚀量相比常规耕作系统可减少90%以上。Ghidey等（1998）基于1983—1994年间28个自然降雨侵蚀地块的观察数据对比分析了免耕和常规耕作方式下的土壤侵蚀量。结果表明，免耕能大幅降低土壤流失，免耕下的土壤侵蚀量是常规耕作方式的七分之一。许多实地研究和综述表明，少耕和免耕后土壤有机碳（SOC）会增加，但增加量因土壤质地和气候会有所不同。例如，Ogle等（2005）估算结果显示，在20年间，从常规耕作转为免耕，热带湿润气候下土壤有机碳储量增加了23%；热带干旱气候下增加了17%；温带湿润气候下增加了16%；温带干旱气候下增加了10%。Sainju

(2016) 基于荟萃分析, 评估了耕作方式对温室气体排放的净影响, 发现与常规耕作系统相比, 免耕系统的全球变暖潜势 (GWP) 低66%、每单位产量的温室气体排放量低71%。免耕促进土壤碳储量增加的主要机制为免耕条件下土壤大团聚体稳定性显著增强, 因而微团聚体中的有机碳更加稳定 (Six等, 2014)。美国某试验期为43年的玉米试验田结果表明, 免耕土地土壤表层30cm储存的碳比常规耕作土地多77%左右 (Ussiri等, 2009)。

#### 2) 通过多样化的碳转化促进土壤碳固存

Zhu等 (2022) 研究了1985—2019年小麦—玉米轮作条件下不同耕作方式和秸秆还田方式下农田土壤有机碳 (SOC) 的组成, 包括不同活性组分的土壤碳和化学组成。结果表明, 免耕与常规耕作相比, 显著提高了耕层有机碳储量, 秸秆还田提高了易氧化有机碳含量。特别是, 与常规耕作相比, 免耕导致更多样化的碳转化, 从而促进有机碳固存。此外, 免耕还降低了有机碳分解程度。因此, 保护性耕作通过多样化的碳转化促进了土壤碳固存。在采用免耕并保留作物残留物的条件下, 土壤有机碳含量为  $118 \times 10^3 \text{kgC/公顷}$ , 比耕作或免耕但移除残留物的实践每年高出约  $40 \times 10^3 \text{kgC/公顷}$  (Jat等, 2016)。

#### 3) 通过改善土壤结构促进土壤固碳

采用免耕、少耕等保护性耕作方式, 减少对土壤的扰动, 可改善土壤团粒结构。稳定的土壤结构有助于减少有机碳的分解和流失, 提高土壤的固碳能力。

West和Post利用全球67个长期的农业试验的数据分析土壤固碳差异, 结果表明, 将常规耕作方式转换为免耕后, 土壤有机碳储量每年平均增加  $57 \pm 14 \text{gC/m}^2$ ; Ussiri等基于在美国俄亥俄州的长期试验研究长期的不同耕作方式对土壤有机碳库量和 $\text{CO}_2$ 排放量的影响, 结果表明在表层0—30cm免耕的土壤有机碳库量最大为  $80.0 \pm 3.7 \text{tC/公顷}$ , 而常规耕作方式的土壤有机碳库量仅为  $45.3 \pm 1.7 \text{tC/公顷}$ 。仇开莉 (2013) 对沱江流域 (内江段) 农田土壤有机碳 (SOC) 特征与固持机制进行了研究, 通过野外调研统计分析, 揭示SOC空间分布规律及驱动因素。结果表明, 耕作制度对SOC含量影响显著。其中, 免耕可以减少土壤有机碳的分解速率, 从而提高土壤有机碳的固持能力。具体数据表明, 免耕土壤的有机碳含量比常规耕作土壤高出约20%。Zanella等 (2018) 在意大利的农田实验表明, 采用免耕的农田在5年内每年可以储存约3.2吨/公顷的土壤有机碳, 而少耕的农田每年可以储存约2.1吨/公顷的土壤有机碳。

#### 4) 免耕可降低温室气体排放

Shahrear等 (2009) 通过田间试验, 对比4种不同的耕作方式 (无耕作无施肥、常规耕作无施肥、无耕作复合施肥、常规耕作复合施肥) 带来的温室气体排放差异, 发现免耕可以有效减少中国中部稻田的温室气体 ( $\text{CH}_4$ ) 排放。在不施肥条件下, 免耕处理的累积 $\text{CH}_4$ 排放通量比常规耕作低29%。在施肥的条件下, 免耕处理的累积 $\text{CH}_4$ 排放通量比常规耕作低28%。

免耕在增加固碳的同时还可以有效减少人力投入。有研究表明, 和常规耕作相比, 采取免耕等再生农业管理方式, 每亩地包含除草在内的整地劳动时间可以减少一半左右, 并且给农户带来更高的作物产量 (Mahdi等, 2020)。刘天奇等 (2022) 在湖北潜江的稻田实验表明, 与常规稻作模式相比, 免耕的稻田可使总碳排放量降低16.7%, 其中劳动力投入碳排放比常规稻作模式降低了46.5%。

重庆合初人农场的主理人朱艺老师基于15年的实践认为，自然覆盖免耕，是很适合小农的种植方式，而且可以充分吸纳其他生态农耕方式和技术的优势，并能很好地承续中国自古就有的免耕传统和其他农耕文化传统。扫描下方二维码便可查看朱艺老师创作的合初人农场自然覆盖免耕经验和农场实验的纪录片。



微信推文：一切为了土壤自然生产力的可持续！——合初人自然覆盖免耕一三五法则（上篇）



微信推文：一切为了土壤自然生产力的可持续！——合初人自然覆盖免耕一三五法则（下篇）



视频：合初人自然覆盖免耕实验纪录片

## 2.4.6 优化水资源管理方式——节水减排双赢

### 2.4.6.1 干湿交替降低稻田甲烷排放

稻田的甲烷排在农业温室气体排放总量中占比较大，稻田甲烷排放量与淹水时长有关。淹水条件下稻田土壤氧化还原电位较低，产甲烷菌大量繁殖，导致甲烷排放较高。减少稻田甲烷排放的关键是改变适宜甲烷菌存活和发挥活性的环境条件。常规水资源管理模式需保持稻田3—10 cm水层至成熟期，导致土壤长期厌氧环境，水资源浪费严重，其温室气体排放较高。而通过干湿交替（如间歇灌溉、浅湿交替）可减少淹水时间，调节土壤氧化还原状态，抑制产甲烷菌活性，减少稻田甲烷排放，并且还能提高水分利用效率。

间歇灌溉是根据水稻需水规律，以生长前期淹水、中期晒田、后期干湿交替为特征的稻田水分管理方式。在水稻分蘖期排水晒田，可以提高土壤氧化还原电位，避免稻田土壤过强的还原性抑制水稻根系生长，促进光合产物向地下输送，抑制无效分蘖，对提高水稻产量和氮肥利用效率、减少甲烷和氧化亚氮排放具有积极作用。与持续淹水相比，在一季中稻地区采用间歇灌溉方式，一般可减少稻田甲烷排放量60%左右（四川省农业科学院，2021）。陈松文等（2021）指出，和常规淹灌相比，间歇灌溉降低 $\text{CH}_4$ 排放46.4%~66.3%，减少增温潜势42.7%~54.6%。刘天奇等（2022）2015—2017年在湖北潜江的田间试验结果表明，间歇灌溉比传统稻作模式降低11.7%的总间接碳排放；相对于常规管理模式，间歇性节水灌溉技术降低了31.5%劳动力投入、28.8%防治投入和34.2%机械燃料所产生的间接碳排放。

### 2.4.6.2 建设生态沟渠系统提升农田储碳能力

生态沟渠系统通过种植挺水植物、优化基质配置、促进微生物活动等方式，能够有效提升底泥中的碳储量，同时减少氮磷排放，从而实现碳汇和污染物削减的双重目标。江苏省农业农村厅（2024）发布的《高标准农田生态沟渠建设规范》中提到，生态沟渠系统应结合植物配置和基质选择，以提高系统的碳汇能力。例如，沟底可种植多年生的景观型挺水植物如梭鱼草、鸢尾等，这些植物不仅具有高效的氮磷吸收能力，还能通过根系分泌物促进土壤有机碳的积累。

### 1) 湿地植物对氮磷的吸收与土壤碳储量的提升

张慧慧等（2024）的研究指出，生态沟渠中种植的菖蒲、美人蕉、铜钱草、水芹、黑麦草等植物，不仅对氮、磷污染物有良好的去除效果，植物根系在生长过程中也会固定更多的碳，而且植物根系分泌的有机物能够促进微生物代谢，从而增强土壤有机碳的积累。

### 2) 生态沟渠对碳排放的间接控制

生态沟渠通过减少水体富营养化，间接降低了因藻类暴发导致的碳排放。挺水植物对氮磷等污染物具有较高的去除率，从而减少了水体中氮磷浓度，降低了藻类暴发的风险，进而减少了因藻类代谢产生的间接碳排放。

侯光炯院士提出的“自然免耕”技术体系中，所强调的“大三化”措施中，渠网化与生态水系建设相辅相成。其中对“渠网化”结构的优化设计，以及耕作过程中“土壤连续浸润、连续垄作”的技术措施，恰好与当前稻田碳减排目标相契合，可为区域推广生态农业与低碳稻作提供技术支撑。关于侯光炯院士“自然免耕”技术体系的介绍详见报告第5章。

## 2.5 不同农田管理措施的减排固碳机制

秸秆还田通过分解释放有机质，直接补充土壤碳库，同时刺激微生物增殖，其代谢产物（如腐殖质和胞外多糖）可黏结土壤颗粒，促进稳定团粒结构的形成，而孔隙度的增加进一步提升了土壤通气性和保水能力，为有机碳的长期储存创造物理屏障。有机肥施用则通过补充有机质，增加微生物活性，改善土壤团粒结构，缓解土壤紧实问题，改善深层土壤的通透性，结合深根系作物的种植，可将有机碳输送至分解速率较低的深层土壤，显著提高碳储量。多样化种植通过不同作物根系分泌物的差异，吸引多样化的微生物群落，增强土壤生物活性，同时根系穿插作用能有效打破板结层，维持孔隙结构的稳定性，减少土壤退化风险。禁用农药化肥避免了化学物质对微生物群落的伤害，保护其代谢功能，从而促进有机质积累与团聚体形成；地表覆盖（如秸秆或覆盖作物）通过减少水土流失和机械侵蚀，保护团聚体免受破坏，同时为微生物提供遮阴保湿的微环境，维持其活性，保留杂草既可以起到土壤覆盖的作用，又增加了绿色植物的光合作用，增加二氧化碳的固定；免耕或少耕则最大限度减少翻耕对土壤结构的物理扰动，保护微生物栖息环境及原有孔隙网络，避免有机碳因暴露而加速分解。稻田干湿交替灌溉则通过抑制产甲烷菌活性，减少稻田甲烷排放。生态沟渠建设通过减少氮磷排放、增加土壤有机质积累促进减排固碳。

值得注意的是，这些措施并非孤立存在，而是通过交叉作用形成综合效益。例如，有机肥与多样化种植结合时，既能通过外源碳输入直接增加土壤碳含量，又能利用不同作物根系的穿插效应改善深层土壤结构；免耕与地表覆盖协同应用，既能减少侵蚀对团聚体的破坏，又能通过减少耕作扰动维持微生物群落的稳定性。此外，禁用农药化肥与秸秆还田的结合，可在保护微生物多样性的同时持续补充有机质，形成“碳输入-结构优化-微生物固定”的良性循环。最终，这些策略共同构建了“土壤-微生物-有机碳”三位一体的固碳体系，通过增强土壤碳汇功能，不仅提升了农业生态系统的可持续性，也为应对气候变化、实现碳中和目标提供了切实可行的技术路径。

提升土壤碳封存能力的代表性措施及固碳机制如图2.8所示。

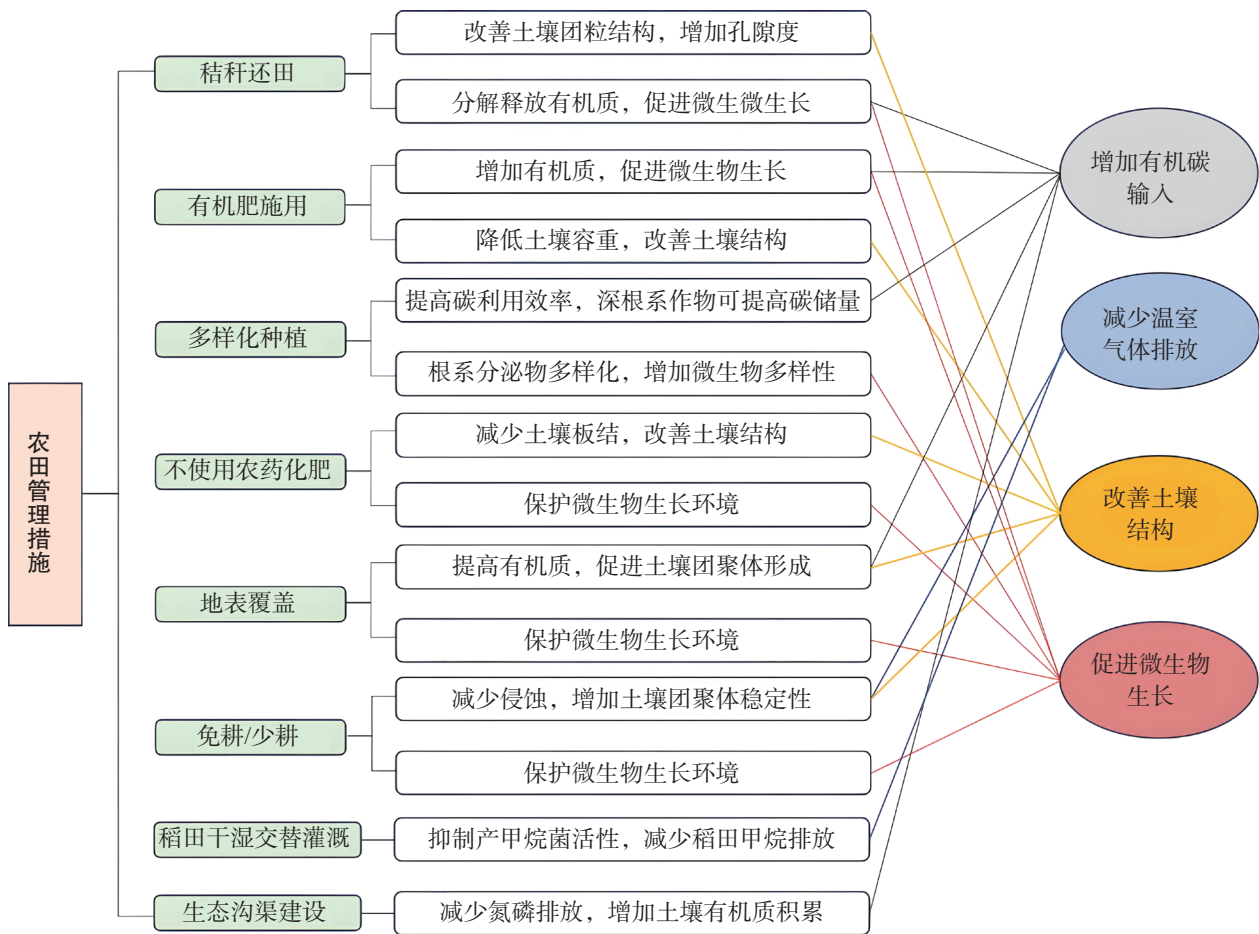


图2.8 提升土壤碳封存能力的代表性措施及减排固碳机制

## 2.6 生态农业如何减缓气候变化：从农田管理到碳汇政策

前文的分析比较了生态农业与常规农业在土壤固碳方面的表现差异，明确生态农业在碳储能力上具有系统性优势。在此基础上，农业碳汇为生态农业打开了一个新的政策入口。

农业碳汇指通过农业活动（如土壤管理、植被恢复、种植技术创新等）主动吸收并固定大气中CO<sub>2</sub>的过程与机制。其核心是将碳长期储存在植物生物量、土壤有机质及农业生态系统中（金书秦等，2023）。农业碳汇的核心路径与技术体系有碳减排技术、碳增汇技术和针对性温室气体管控。碳减排技术包括农机节能、节水农业、秸秆资源化和农业废弃物循环等。碳增汇技术有土壤碳封存（免耕/少耕、提升土壤有机质、增加覆盖作物等）、生物强化固碳（农林混合、高光效作物育种等）以及生态修复增汇（退耕还林/还草、盐碱地修复等）。针对性气体管控包括稻田甲烷减排和反刍动物管理。农业碳汇项目通过监测并量化土壤新增碳储量，生成可交易的碳信用额度，进入自愿减排市场（如CCER），实现“生态投入—碳收益”的转化。

最近几年，我国涌现出一些探索性的农业碳汇项目，带来了技术整合与新增碳汇收益的双赢机会。农业碳汇项目将土壤的新增固碳量转化为碳信用出售，通过碳交易市场获得额外收益，让农户的生态投入有机会转化为经济收益。如贵州湄潭县推出“茶园碳票”，茶农增收30%以上。低碳认证农产品（如夹江生态茶）获“绿色标签”，市场价格提升15%–20%，消费者对环保农产品的支付意愿持

续上升。此外，碳汇项目带动“农业+文旅”融合。例：四川夹江县茶园开发茶文旅项目，年接待游客超10万人次，综合收入大幅提升。

这些探索性农业碳汇项目的发展离不开国家层面不断出台相关政策，农业碳汇项目的受重视程度也持续攀升，部分政策文件的核心内容详见表2.2。

表2.2 国家层面与农业碳汇相关的政策

年份	政策文件	核心内容
2010	《国家农业可持续发展规划（2015—2030年）》	提出耕地资源保护、农业污染控制、生态恢复三大任务，要求减少化肥使用并推动废弃物资源化
2021	《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》	首次将农业碳汇纳入国家战略，明确“提升生态农业碳汇能力”，实施黑土地保护工程
2021	《2030年前碳达峰行动方案》	要求“巩固生态系统碳汇能力”，推广节地技术，强化农田固碳作用
2022	《农业农村减排固碳实施方案》	部署十大行动：稻田甲烷减排、化肥减量增效、农田碳汇提升、监测体系建设（量化农业碳汇）等
2023	《温室气体自愿减排交易管理办法》	重启CCER交易市场，将农业碳汇项目纳入自愿减排体系
2024	《碳排放权交易管理暂行条例》	法律层面确认农业碳汇项目参与CCER交易的合法性

农业碳汇的监测、报告与核算（MRV）体系也在逐步建立。2025年，生态环境部土壤中心等联合研究编制的《农田土壤碳汇项目监测核算通则》（T/CSES 190-2025）团体标准正式发布，明确了统一的监测指标、方法流程和数据质量要求，为农业碳汇的标准化核算奠定基础。此外，中国学者与相关技术机构也在持续推动农业碳汇技术规范体系建设，围绕土壤固碳潜力评估与减排增汇措施，陆续制定了一系列国家与地方标准，包括：《气候智慧型农业作物生产固碳减排监测与核算规范》（国家标准，强调作物生产体系的碳汇监测方法）；以及《农田土壤固碳核算技术规范》（DB11/T 1562-2018，北京市地方标准，提供区域尺度的土壤碳汇核算流程与参数建议）。这些标准为农业碳汇项目的项目设计、核算认证和交易进入碳市场提供了基础工具，有助于提高碳汇量的可比性与可信度。

尽管如此，农业碳汇政策在落地过程中，仍面临着多重系统性挑战，这些挑战相互交织，制约着行业的规模化发展。相较于发展成熟的林业碳汇方法学，农业碳汇因作物类型多样、土壤差异显著，仅10%的试点项目能满足国际认证标准，严重制约了规模化推进。同时，额外性论证的高门槛也让小农户望而却步——项目需证明“若非碳汇资金支持则不会实施”，而单个项目平均8万元的认证成本，远超小农户的承受能力。其次，碳汇项目认证需要规模化的土地才可能有经济性，带来了土地整合的挑战；而集体林地、耕地权属的复杂性，使得碳汇收益分配易引发纠纷。国内部分农业碳汇项目存在“首笔交易即终结”的现象，需要探索长效机制让项目更具可持续性。生态农业，尤其是生态小农如何有效参与农业碳汇交易还需要更多的创新和探索。

## 2.7 关于免耕/少耕对土壤碳封存贡献的不同观点

近年来，土壤碳封存被视为应对气候变化的重要手段，引发广泛关注。许多研究表明，采用免耕、少耕等保护性耕作措施，有助于提升土壤有机碳（SOC）含量，增强农田固碳能力。然而，部分研究也对这一结论提出了质疑，指出部分实验设计可能存在高估固碳效果的风险。

大部分研究肯定了保护性耕作的多重益处：不仅能减少土壤侵蚀、改善土壤结构，还可降低作业成本、减少机械投入与化石能源消耗，是推动可持续农业的重要路径。但在“是否显著提升土壤碳储量”这一问题上，学术界仍存在分歧。

例如，Moinet等（2022）认为，土壤中封存的碳并非永久固定，可能因氧化或土地利用变更而重新释放为温室气体，这恰恰说明土壤碳库需要持续管理与保护。Baker等（2007）在对多项文献进行综述后指出，尽管保护性耕作有诸多好处，但关于其促进碳封存的证据仍不充分，其中一个关键问题是采样深度普遍偏浅，可能导致碳储量被高估。

Baker等（2007）汇集了多项实证研究来进一步印证这一担忧：

➤ West和Post基于全球140个样本比较免耕与常规耕作的SOC变化，指出多数研究采样深度不足30cm，可能遗漏了深层土壤碳的变化；

➤ VandenBygaart等（加拿大）将样本按采样深度分组后发现，30cm以内的土层中，82%的免耕处理SOC高于常规耕作；但在30cm以下的深层土壤中，69%的免耕处理反而SOC较低。原因在于免耕残茬多留于表层，而常规耕作将有机质翻入深层，促进了深层碳输入；

➤ Baker和Griffis（明尼苏达州）在两个相邻田块（玉米/大豆轮作）上对比条耕与常规耕作，经过2年监测后，未发现保护性耕作的碳汇优势，两块地均为小的净碳源；

➤ Verma等（内布拉斯加州）在3块免耕田（包括灌溉和旱地）中测量净生态系统CO<sub>2</sub>交换（NEE值<sup>①</sup>），同样发现碳收支基本为零，难以称为有效碳汇；

➤ Jordon等（2022）基于30篇论文的荟萃分析显示：免耕和少耕能分别增加0.06和0.09gC/100g SOC，草田轮作每增加一年SOC提升0.05gC/100g，但覆盖作物对SOC无显著影响；在产量方面，这三种措施整体未显示出显著提升，尤其草田轮作在无作物产出期还会影响经济效益。

这些质疑表明，固碳效应可能受多个因素影响而被夸大，主要包括：

1) 采样深度不足，忽略了深层土壤对有机碳的真实响应；

2) 实验周期较短，如多项研究仅持续两年，而土壤碳库变化通常呈现非线性、缓慢积累的趋势；

3) 土地利用变更和耕地历史差异，如从多年生草地转为一年生作物，会因土壤裸露期延长而影响碳同化；

4) 作物类型、施肥方式与管理强度等变量控制不足，容易混淆耕作方式带来的实际差异。

此外，当前大多数研究聚焦于单一农田管理措施的效果，而现实中的生态农业实践更强调多措施的协同管理。例如，免耕、覆盖作物、有机质投入等措施在时间与空间上的配合，可能产生协同增效，但也可能因操作冲突而相互抵消。现有研究在揭示这类复杂机制方面仍显薄弱，尤其对不同措施在土壤剖面中的作用差异、技术实施的时序与耕作深度匹配等方面缺乏深入探讨。

综上，尽管保护性耕作在减少侵蚀、提高土壤健康和节约资源方面具有明确优势，但其固碳效应仍需通过更长期、系统化、深层次的研究加以验证。在推进碳农、生态农业等政策实践中，不能仅凭初期正面数据作出过早结论，而应从整体农业生态系统的角度出发，结合长期监测、机制研究和多技术集成，才能更科学地评估其在碳封存方面的真正潜力与局限。

<sup>①</sup> NEE（净生态系统碳交换量）表示生态系统与大气之间的净碳交换量，是衡量碳汇或碳源的重要指标。若NEE为负，表示生态系统吸收二氧化碳，是碳汇；为正则表示释放碳，是碳源。常用于评估农田固碳能力。

# 三、适应气候变化—— 生态农业如何提升农业气候韧性？

在应对气候变化的过程中，生态农业既在减缓温室气体排放方面发挥积极作用，也在提升农业气候韧性方面展现出巨大潜力。因此，从“减缓”与“适应”两个维度综合审视生态农业的气候功能，是当前相关研究的重要路径。前一章聚焦于生态农业如何通过提升土壤碳汇、减少农业投入依赖等方式，助力减缓气候变化；而本章将进一步探讨生态农业在面对气候不确定性和极端天气事件时，如何增强农业系统的稳定性与恢复力。

值得说明的是，生态农业的减缓与适应功能在机制上往往相辅相成，因而相关研究文献在论述时常有交叉。例如，涵养土壤有机质既能固碳，又可提升土壤保水保肥能力，对抗干旱与洪涝风险。本章中部分文献与前章有所重叠，正是因为这些研究在揭示生态农业复合效益的过程中，涵盖了减缓与适应的双重维度。为保持论述的完整性与逻辑连贯性，相关内容在不同语境下将以不同重点加以呈现与分析。

## 3.1 什么是农业气候韧性？

农业气候韧性是指农业系统在气候变化及其相关风险（如极端天气、降水模式改变、温度波动等）影响下，通过主动适应和减缓措施，维持农业生产稳定性、可持续性 & 功能完整性的综合能力。农业气候韧性可以通过生物多样性、土壤健康、水分利用效率、抗洪/涝能力、产量稳定性、种植结构稳定性、养分自给能力等多个维度进行评价。

## 3.2 生态农业和化学农业的气候韧性有无明显差异？

基于已发表的文献资料，生态农业在极端高温、干旱、暴雨及洪涝灾害中整体表现出优于化学农业的气候韧性。

### 土壤保水能力与抗旱性

报告指出，生态农业通过增施有机肥、作物残体还田等措施提升土壤有机质含量，显著增强土壤持水能力。例如，美国罗代尔有机农场试验显示，干旱年份有机种植的玉米和大豆产量比化学种植高

35%—96%（联合国粮农组织，2019）；暴雨期间，有机农田蓄水量是化学农田的2倍（Lotter等人，2003）。德国多个研究机构组成的跨学科团队发布的研究报告（Sanders等，2018）显示，和化学农业相比，生态农业土壤入渗能力高出137%，使得土壤侵蚀和地表径流减少，分别降低22%和26%。

### 生物多样性增强抗逆性

生态农业的多样化种植（如间作、混种）通过物种互补提升系统稳定性。例如，埃塞俄比亚半干旱地区混种玉米在干旱年的产量比单一种植高60%；马拉维玉米与豆科树木间作，土壤持水量比单一种植高50%，且土壤肥力更稳定。此外，生态系统中丰富的微生物（如菌根真菌）与植物形成共生关系，增强耐旱性，如与特定真菌共生的番茄和辣椒可在干旱中多存活24—48小时（联合国粮农组织，2019）。

### 灾后恢复能力

生态农业在极端事件中表现出更强的恢复能力。例如，1998年，中美洲飓风“米奇”后，采用梯田、覆盖作物和农林业的生态农场比常规农场水土流失更少、经济损失更低，说明其在极端气候事件后恢复更快（联合国粮农组织，2019）；墨西哥恰帕斯咖啡农场通过增加植被复杂性（生物多样性和冠层结构），减少暴雨引发的滑坡风险（绿色和平，2010）。

## 3.3 生态农业如何提高气候韧性？

### 3.3.1 强化土壤健康：筑牢水分与养分韧性根基

#### 3.3.1.1 减少土壤扰动，改善土壤结构

保护性耕作兴起于北美地区，已在美国、加拿大等70多个国家推广应用，面积突破1.8亿公顷，占世界耕地总面积的12.5%。20世纪80年代，美国将保护性耕作定义为“为减少土壤侵蚀，任何能保证在播种后地表作物秸秆残茬覆盖率不低于30%的耕作和种植管理措施都称为保护性耕作”（中国科学院，2024）。保护性耕作的核心内容就是减少土壤扰动和增加地表覆盖，因其降低侵蚀、蓄水保墒、培肥地力、固碳减排、节本增效的显著效果而备受推崇。

为了有效遏制东北黑土地退化，中国科学院、中国农业大学和梨树县农业推广部门等进行了多年的研究，最终研发了适合东北玉米种植的“梨树模式”（梨树县泉眼岭乡人民政府，2024），采用免耕播种、秸秆还田等技术措施，减少对土壤的扰动，改善土壤结构，增加土地肥力和保水能力，实现了减化肥、省人工、保产量的效果。“梨树模式”通过秸秆全覆盖免耕技术，使土壤风蚀量减少45%以上，水分利用效率提高15%~17%。经济分析显示，该技术在中国一年两熟区平均节本增效101元/亩，玉米单产提升4.5%~18.7%。

Sun等（2024）在西北农林科技大学进行5年田间试验，并与荟萃分析相结合，研究了不同降雨类型下耕作方式对夏玉米产量的影响。试验采用常规耕作、免耕、垄作免耕和冬小麦常规耕作后夏玉米免耕4种耕作方式。实验期间经历了正常降雨年（2018、2019、2021年）、丰水年（2020年）和干旱年（2022年）。结果表明，相比常规耕作，免耕显著提高了旱季有效土壤储水量，平均提高19.7%。

此外，采用保护性耕作，可以通过增加旱季土壤持水能力，以及提高作物在强降雨期间的抗倒伏能力来保持作物产量的稳定性。

### 3.3.1.2 施用有机肥与堆肥，提升土壤健康水平

Cen等（2020）针对山东某果园2014~2016年开展了田间试验，设置有机管理和常规管理两种模式，有机管理组使用兔粪和鸡粪作为肥料，常规管理组使用化学肥料。结果表明，与常规管理相比，有机管理显著改善了土壤pH值、土壤有机碳和全氮、磷、钾的含量，并增大了土壤孔隙度。美国环保署（EPA，2025）的研究报告表明：堆肥施用能使土壤有机碳含量增加20%–200%；可使土壤密度降低6%–35%，提升土壤孔隙度，增强透气性与透水性。并且土壤的持水能力可提升35%–57%，黏土的人渗速率最高能提升183%，有效缓解土壤板结问题，增强土壤抗侵蚀能力，减少水土流失达97%；堆肥改良后的土壤在抗旱、防洪方面表现更佳，可降低极端天气对农业和城市的影响，如减少暴雨径流体积达35%–67%。

有机肥和堆肥施用可以通过以下途径提升土壤健康水平：

1) **提高土壤有机质含量，提升产量**：显著增加土壤有机质含量，为作物提供充足的养分，促进作物生长，从而提高产量。

2) **改善理化性质和土壤结构**：有机肥和堆肥施用能改善土壤的物理和化学性质，如降低土壤容重、提高团聚体稳定性，从而改善土壤结构，增强土壤的保水保肥能力，减少土壤侵蚀，提高土壤的抗逆性。

3) **增强土壤生命力**：有机肥和堆肥能为微生物生长提供营养物质，能够促进土壤微生物群落的恢复，增强酶活性，从而提高土壤的生命力，促进养分循环。

### 3.3.1.3 粮草间作、自然生草—固氮的同时改良土壤结构

在湖南祁阳，种粮大户发现连续多年采用“绿肥+水稻”的“低碳”种植模式耕作的稻田，越来越好种，施用的肥料少，禾苗长势却更好。中国农科院祁阳红壤站的研究表明，种植绿肥能够减少40%的化肥用量，减少农药使用量，促进粮食增产10%–20%，更重要的是培肥了地力（湖南省发展改革委，2023）。紫云英等绿肥作物具有发达的根系，能够钻透犁底层，改善土壤结构，防止土地板结，使土壤变得疏松透气，利于后续农作物的生长。除此之外，紫云英还能够吸收空气中的氮，并将其固定于土壤中，增加土壤的肥力。每亩紫云英可固氮6—8公斤，相当于13—17公斤尿素的肥效，可以帮助农户有效地减少化肥的使用量，提升粮食品质（峡江县人民政府，2025）。

苏培玺（2004）基于田间实验对比了河西走廊黑河中游地区不同种植方式对春季土壤风蚀和水分保持的影响，结果表明，粮草间作苜蓿带的土壤蓄水量显著高于春耕裸露农田。文雪等（2024）在黑龙江的田间试验结果表明，较常规耕作，粮草间作和覆盖免耕的作物田间耗水量分别减少14.18%和9.26%，而水分利用效率分别提高48.51%和26.22%。有学者在中低产黑土区为期3年研究发现，粮草间作较单作土壤孔隙度更高，田间持水能力增加；也有学者在松嫩黑土区的长期研究发现，免耕覆盖并未显著增加土壤孔隙度，但提高了土壤结构稳定性，增加土壤蓄水保水能力，尤其可提高作物播种期表层土壤含水量（文雪等，2024）。

粮草间作、自然生草可通过以下途径提升土壤健康水平：

1) **物理保护**：防止地表裸露，减少土壤侵蚀和土壤板结，保护土壤微生物的生长环境，促进微生物生长。

2) **生态位互补与资源高效利用**：粮食作物和牧草作物（如深根与浅根搭配、高秆与矮秆组合）在生长过程中对资源的需求不同，不同作物的根系深度差异能够促进地下养分的多层次吸收，能够实现资源的互补利用。例如，豆科牧草可以固定大气中的氮素，为谷物提供养分，而谷物则通过其根系改善土壤结构，为牧草提供良好的生长环境。

3) **改善土壤质量和养分循环**：间作能够促进土壤养分的均衡分布，增加土壤有机质含量，改善土壤结构。例如，豆科牧草与禾本科作物的间作体系中，豆科植物通过生物固氮作用为土壤提供氮素，从而减少化肥使用量。

4) **增强抗逆性和稳定性**：间作体系中不同作物间的竞争和互补作用能够降低单一作物种植的风险。例如，玉米与豆科牧草的间作可以提高作物对病虫害的抵抗力，减少农药使用量。



图3.1 粮草间作、自然生草提升土壤健康水平

#### 3.3.1.4 地表覆盖提升土壤健康水平

覆盖作物能够增加土壤的水分渗透率，减少养分流失，并提高土壤持水能力。地表覆盖在增加土壤有机质的同时改善土壤结构，从而提升土壤肥力和稳定性，在保护土壤入渗能力的同时也能阻止径流，可以把更多的雨水蓄留在耕层。地表覆盖物可阻挡阳光的照射，减少土壤水分蒸发；在干旱时，可将保存在耕层中的水分及时的补充给作物，延缓旱情。

刘庆等（2024）在甘肃的农田试验表明，通过秸秆带状覆盖处理，土壤上层（0~60cm）、中层（60~120cm）和下层（120~200cm）较对照组土壤贮水量分别提高了10.5%、12.2%和11.3%。Chakraborty等（2022）基于3个作物生长季的田间实验，测定土壤水势并通过模型模拟土壤水势和含水量，揭示了冬季覆盖作物对免耕玉米和大豆系统中土壤水分动态的影响。结果表明，在特定土壤深度（15、30、45厘米）下，覆盖作物相比无覆盖，能够显著提高土壤水势，减少水分张力，从而有助于维持和提高土壤的水分储存能力。DeVincentis等（2022）2016~2019年在美国多个试验点的田间实验结果也表明，冬季覆盖作物在短期内可通过改善渗透和雨水截留、控制土壤侵蚀、改变实际蒸散发损失、露水截留等方式影响农田的水量平衡。

地表覆盖对土壤健康水平的提升体现在：

- 1) **防止土壤侵蚀**：覆盖作物通过其根系固定土壤，减少风蚀和水蚀，从而保护土壤结构。
- 2) **增加土壤肥力**：覆盖作物通过残茬分解为土壤提供有机质，促进土壤肥力提升。
- 3) **改善土壤结构**：通过提高有机质含量和微生物活性，可有助于形成稳定的土壤团粒结构，提高土壤的保水能力和透气性。

- 4) **减少土壤板结**：种植豆科等固氮植物作为“活覆盖”能够将大气中的氮气转化为植物可利用的氮素，减少化肥使用，减少土壤板结。

- 5) **提高水分渗透和保持能力**：覆盖作物能够增加土壤的水分渗透率，减少养分流失，并提高土壤持水能力。

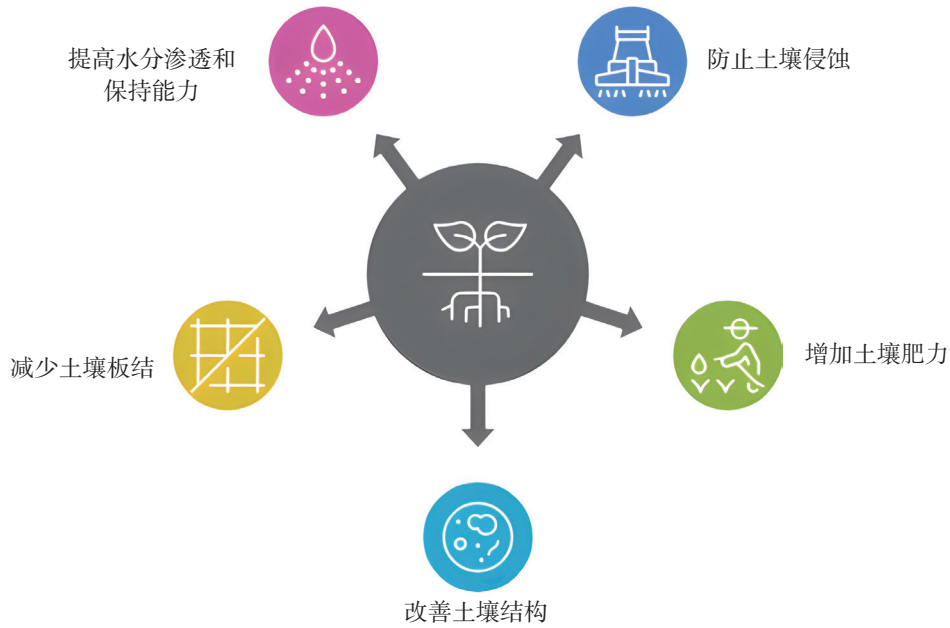


图3.2 地表覆盖提升土壤健康水平

### 3.3.2 推行多样化种植：稳定产量与生物多样性

在气候变化加剧、生物多样性丧失和土壤退化的背景下，单一化种植模式的局限性日益凸显。近年来，多项研究表明，多样化种植（包括作物轮作、间作/套种、农林复合系统等）能够在提高产量的同时，增强生态系统韧性，降低环境风险。本报告综合分析了非洲、北美、中国等地的长期实验数据，系统阐述多样化种植在提升极端天气下的产量稳定性、提升抗病虫害能力、提升土壤健康、提升生物多样性等方面的多维效益，为可持续农业发展提供理论依据和实践参考。

与单一种植相比，多样化种植系统在极端天气下的产量更高

多样化种植系统通过优化水、碳循环和增强抗逆性，显著提升农业气候韧性。在干旱应对方面，北美大平原的研究表明，复杂轮作系统（如玉米→燕麦→三叶草→高粱→大豆），在2012年大旱期间可比单一化种植系统减少14.0%—89.9%的产量损失，其深层根系（可达1.5m）的水分吸收能力是单一作物的1.8倍（Bowles等，2020）。类似地，非洲的农林复合系统通过树木冠层截留降雨，使入渗率提高3倍，地表径流减少约80%，在雨季降低水土流失风险，旱季通过深层吸水维持作物生长（Kuyah等，2019）。绿色和平（2010）研究报告中的案例显示，埃塞俄比亚半干旱地区混种玉米在干旱年比单一种植产量高60%；马拉维玉米与豆科植物Gliricidia（篱笆豆）间作，土壤持水量比单一种植高50%，同时改善土壤肥力。

多样化种植系统在极端气候事件中的缓冲能力尤为突出。北美研究发现，包含3种以上作物的轮作，在热浪年份的产量稳定性比单一系统高24%，这与土壤有机碳提高带来的保水能力增强有关——每增加1%的SOC，土壤持水量可提升0.5%—1.0%（Bowles等，2020）。在非洲的半干旱地区，这种缓冲效应使农林复合系统在降雨量年际变异达30%的情况下，作物产量变异系数维持在15%以下，显著低于单一系统的28%（Kuyah等，2019）。

### 与单一种植相比，多样化种植系统抗害虫能力更强

多样化种植可以减少单一作物病虫害大规模爆发的风险，增强农业系统对病虫害的抵抗力。有研究指出，与单一种植相比，多样化系统的虫害发生率降低40%—60%（Kuyah等，2019）。也有研究表明，间作农田的病虫害发生率比单一作物种植的农田约低30%（Saja等，2017）。Zhu等（2000）于1998—1999年在中国云南多个乡镇开展稻田实验。结果显示，与单作优质稻相比，多水稻品种混作间作对稻瘟病的防效达81.1%~98.6%，可减少农药使用量60%以上，并且每公顷增产630~1040kg。

多样化种植的气候韧性优势主要与改善土壤健康和提升生物多样性有关

#### 1) 改善土壤健康

作物多样化对土壤生态系统的改良作用体现在物理结构、养分循环和微生物活性三个维度。在撒哈拉以南非洲的农林复合系统中，与单一作物系统相比，土壤有机碳（SOC）含量提高12%，全氮增加11%，有效磷提升12%，且大团聚体（>2mm）比例显著提高，增强了土壤保水能力和通气性（Kuyah等，2019）。这种改善在长期实验中更为明显，例如肯尼亚的有机农场经过10年经营，土壤微生物数量是常规农场的2-3倍，其中固氮菌和解磷菌的富集促进了养分转化效率（Kuyah等，2019）。

土壤酸碱度的调控是多样化系统的另一重要效益。非洲的研究（Kuyah等，2019）表明，农林复合系统通过有机物料输入（如绿肥、秸秆还田），使土壤pH值维持在适宜作物生长的范围（6.5—7.0），而化学农场因长期使用硫酸铵等酸性肥料，土壤pH平均下降0.4个单位。

#### 2) 提升生物多样性

多样化种植系统为生物群落提供了栖息地和资源网络，显著提升农田生态系统的生物多样性。在全球43项研究的764对观测中，23%的案例实现了生物多样性与产量的“双赢”，其中温带森林生物群落的协同效应最显著，概率是单一系统的3.55倍（Jones等，2023）。具体而言，欧洲的间作系统中，鸟类物种数增加35%，传粉昆虫丰富度提高26%，而杂草的多样性也被适度保留。非洲的“公园林”系统（如合欢树与粟类作物间作）中，树木的遮荫效应为喜阴昆虫提供微栖息地，同时落叶分解输入的有机物质增加了土壤动物（如蚯蚓）的生物量，其种群数量是单一农田的1.9倍（Kuyah等，2019）。

### 3.3.3 选育常规品种：增强遗传适应力

为适应不断严峻的高温、干旱天气，可从自然变异品种中筛选出多个实用品种（绿色和平，2010）。例如：国际玉米小麦改良中心培育的玉米品种“ZM521”，利用原生品种的抗旱基因，在干旱条件下比传统品种增产30%—50%，且为开放授粉品种，农民可留种复用；澳大利亚联邦科学与工业研究组织培育的小麦品种“Drysdale”和“Rees”，通过提升水分利用效率，在干旱区产量比常规品种高10%—20%，极端干旱时达40%。此外，孟加拉国春小麦品种BARI Gom-28（常规种）在高温环境下产量达3.59吨/公顷，比常规品种增产16%，且遗传稳定性强，续种表现良好，成为南亚干旱热区的重要选择。印尼耐涝水稻Inpara 5（常规种）的推广使农民收入提高35%，成为东南亚小农经济抗灾转型典范（Sikka等，2016）。王春虎等（2020）通过气候室模拟高温条件从14个水稻品种中筛选出两种耐高温水稻，其综合耐热指数达2.5以上，在日平均气温30—32℃下仍能维持75%以上的育性率，可用于商业化生产。

杂交育种也是常见的育种方式，可通过亲本互补，培育出在抗高温、干旱、病虫害等方面表现出

显著优势品种。例如：某些向日葵杂交种具有“抗旱、抗病、耐盐碱、耐瘠薄”的特性，比常规品种适应更恶劣环境。还有一些水稻杂交种因“根系发达、光合作用强、养分利用率高”，在低温或高温胁迫下仍能维持较高产量。但杂交种的局限性也很明显，主要体现在：杂交优势主要体现在第一代后代，若杂交种继续留种，后代会出现性状分离（高产基因、抗性基因丢失）导致抗性无法稳定遗传。若环境压力持续（如连年高温），需每年更换新种以保证抗性。

简阳生态农业专家袁勇老师指出，作物的杂交品种可能有优于亲本的性状表现，但其通常性状很不稳定（杂交的特性），只能用一代，第二代其所谓的优良性状就会严重退化，产量也会大幅降低，也就是大家常说的“不能留种”。“好种子”并非仅指高产，还需兼顾口感、营养、适应性与自主性。与杂交种相比，自然进化而来的常规种可自然留种、性状稳定、抗逆性强且环境友好，能承载地方文化；杂交种虽可能高产，但需依赖种子公司，且适应性相对弱、成本较高。袁勇老师呼吁优先选择常规种，以守护农业生产的自主性与可持续性，详见袁勇老师创作的微信推文——“系”谈生态农业之六：还原种子的生命力。



袁勇老师推文——还原种子的生命力

### 3.3.4 构建生态水系：提升水资源韧性

农田生态水系指在农田区域构建的“点-线-面”立体水网，通过自然水体（河流、湖泊）与人工设施（塘堰、湿地、沟渠）的有机连接，形成集水资源调控、生物栖息、污染净化于一体的动态系统。

表3.1 农田生态水系的常见组成

组分	实例	生态功能
“点”状设施	蓄水塘堰、雨水收集池	调蓄雨水，旱季供水
“线”状廊道	生态沟渠、植被缓冲带	输水排水+生物迁徙通道
“面”状结构	田间湿地、透水田埂	净化径流、补充地下水
自然基底	河道、湖泊	区域水循环枢纽

表3.2 生态沟渠和传统硬化沟渠的区别

特征	传统硬化沟渠	生态沟渠
底部结构	混凝土硬化	天然土质或碎石透水层
边坡处理	光滑陡坡	缓坡+植被覆盖
水流动力学	快速排涝	缓流控污
生物相容性	无生物栖息空间	种植沉水/挺水植物（如芦苇）

农田生态水系建设是提升农业气候韧性的重要支撑措施，对于强化农业系统应对极端气候事件的能力、保障粮食安全和农业可持续发展具有显著意义。通过系统布局塘堰、沟渠、湿地、植被缓冲带等自然与人工相结合的水系统，生态水系在水资源调节、微气候优化及生态系统稳定性维护等方面展现出多重功能。

一方面，生态水系具有显著的水资源时空调节能力。通过拦蓄雨水、构建蓄水池和雨水收集系统，可有效缓解旱季灌溉压力；同时，生态沟渠和湿地缓冲带能减缓暴雨径流过程，降低农田内涝风险，增强农业系统对干旱与洪涝的应对能力。另一方面，水系本体及其沿岸植被对于农田小气候具有调节作用，有助于降低极端高温条件下的地表温度、提升空气湿度，并通过防风护田减轻风蚀和作物倒伏损失，改善作物生长环境。

此外，生态水系作为农业生态系统的重要组成部分，能够发挥生态系统“稳定器”作用。透水性水体设施有助于补给地下水、维持区域水文平衡；同时，以水体为核心的生态廊道为农业有益生物提供了良好栖息条件，强化了自然控害机制，降低了病虫害爆发概率，有助于减少农药使用，推动绿色农业发展。

综上所述，农田生态水系不仅是传统灌排体系的绿色升级路径，更是农业适应气候变化、提升韧性水平的系统性解决方案。以云南哈尼梯田为代表的传统山地农耕系统，是农田生态水系建设与农业实践高度融合的典范。

### 通过立体生态水系提高气候韧性——云南哈尼梯田的实践

哈尼梯田由世居于云南省南部、东南部的哀牢山脉和元江流域地区的哈尼族以及其它民族人民群众所创造，集中分布于云南红河哈尼族彝族自治州红河南岸的红河、元江、绿春、金平4县，总面积达5.47万 $\text{hm}^2$ （杨京彪等，2018）。哈尼梯田不仅以其壮观的大地雕塑景观闻名于世，而且成功抵御了2009—2011年期间中国西南地区发生的持续干旱天气（又称西南大旱），在降水相比历史同期减少50%~70%的情况下，云南大部分地区受灾严重，但哈尼梯田的粮食产量未受明显影响，证明了其对极端干旱天气具有极高的适应能力及其稳定性和可持续性（杨京彪，2015）。

已有的大量研究从自然科学或社会科学等多种视角进行研究，一致认为哈尼梯田农业生态系统维持稳定性和可持续性的关键因素在于对水资源合理有效的管理，并构建了如下框架：

哈尼梯田复合生态系统中，森林、村寨、梯田、水系依海拔梯度自高到低“四素同构”，对雨水的分层截留、梯级利用与循环灌溉，构建了一个稳定高效的农业生态系统。天然林截留降水，森林涵养水源；村寨控制水资源分配和利用；沟渠与分水系统确保水资源在不同梯级间合理分配；梯田本身则具有强大的蓄水抗旱与调温功能；梯田和河谷蒸发水汽再度形成降水，形成一个完整的水系循环。这一系统历经千年延续，不仅有效应对了气候波动带来的挑战，也展现出生态农业在提升气候韧性方面的巨大潜力，

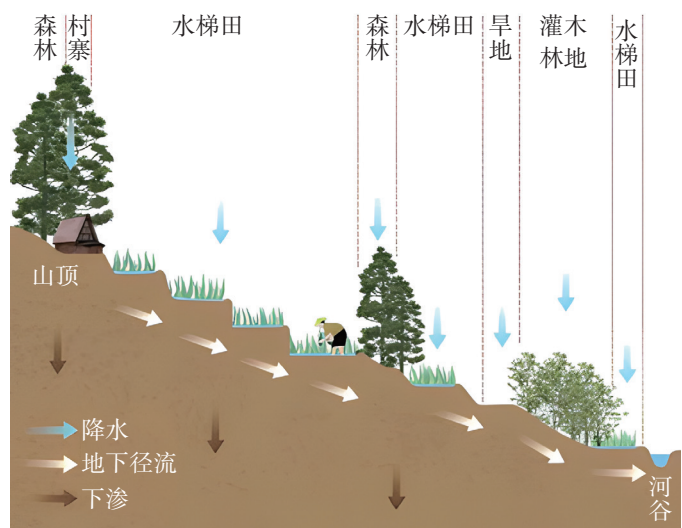


图3.3 哈尼梯田的立体生态水系（人民日报，2025）

具有重要的示范价值与借鉴意义。（杨京彪等，2018）。

哈尼梯田既是典型的农林复合生态系统，又是典型的人工湿地系统。其水源涵养主要包括三种形式：森林涵养、水库池塘蓄水、梯田保水。其中，哈尼梯田农业生态系统的森林土壤平均蓄水容量达 $2589\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，土壤滞留贮水量达 $739\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。哈尼族社区在森林内部或边缘筑坝修建大量的池塘，用以蓄水，并作为鱼苗的繁育基地。此外，哈尼梯田本身即是一座巨大的隐形水库，雨季蓄积水源，截流地表径流，防止山洪暴发；旱季则提供水（杨京彪等，2018）。

哈尼梯田的生态水系设计（“森林—村寨—梯田—水系”垂直循环）虽根植于山地环境，但其核心生态智慧在成都平原等非山地区域仍有重要借鉴价值，主要体现在以下可迁移的生态逻辑和技术模块：

#### 1) 水源涵养层保护技术

- 在农田上游重建生态林带，通过森林截留雨水；
- 推广田间微型林地（如每50亩农田配置1亩混交林，树种可选择深根系乡土树种）

#### 2) 水流延时调控技术

- 生态沟渠+串联塘堰：将直线排水渠改为蜿蜒草沟，沟底铺设砾石层；
- 田间微地形改造：在农田中构建蜂窝状蓄水洼地，雨季蓄水，旱季渗出

哈尼梯田的精华在于仿生水循环设计思维，而非具体形态。在平原区应重点提取其水管理逻辑，通过微地形改造和生物工程实现“平原版梯田效应”。

### 3.4 化学农业气候韧性不强的原因

化学农业的气候韧性显著弱于生态农业，核心原因在于相比化学农业，生态农业构建了更为复杂的生态系统，拥有更丰富的生物多样性，能够在遭遇极端气候灾害等外部冲击时，保持抵抗力和恢复力。

表3.3 化学农业和生态农业生态韧性对比

维度	化学农业	生态农业
生物多样性	作物种类较为单一	通常为多物种共存（作物、树木、杂草、昆虫、土壤微生物等）
土壤结构	土壤团粒结构通常较差	土壤团粒结构相对较好
抗干扰能力	相对较低（如病害可全田蔓延）	相对较高（物种间形成天然屏障）
水分利用效率	相对较低（土壤保水性差，需大量灌溉）	相对较高（健康的土壤像海绵储水）
洪涝应对	地表径流强，加剧内涝	雨水下渗快，减少积水
干旱应对	灌溉依赖度高，缺水即减产	深层土壤水分可支撑作物

德国多个研究机构组成的跨学科团队发布的研究报告（Sanders等，2018）显示，和化学农业相比，生态农业的表层土壤中，有机碳含量和团聚体稳定性分别比常规农业高26%和15%。

和化学农业相比，生态农业通有更好的生物多样性（Sanders等，2018），主要体现在以下维度：

**农田植物多样性：**生态农业对农田植物多样性有积极影响。有机管理下的农田植物物种数量平均（中位数）比常规农业高95%，农田种子库物种数量高61%，田边植被物种数量高21%。在一些研究

中，有机农田中能发现更多种类的野生植物，而常规农田因使用除草剂等原因，植物种类相对较少。

**鸟类多样性：**生态农业中鸟类的物种丰富度和绝对丰度更高，物种丰富度平均（中位数）比常规农业高35%，绝对丰度高24%。例如在一些有机农场，为鸟类提供了更多的食物来源和栖息环境，使得鸟类的种类和数量明显增加。

**昆虫多样性：**对于访花昆虫（如野生蜜蜂、蝴蝶等），生态农业的物种丰富度和绝对丰度也更高，分别比常规农业高23%和26%。生态农业不使用化学农药，为昆虫提供了安全的生存环境，有利于昆虫的繁衍和生存。

因此，化学农业在应对气候变化时，存在以下劣势：

### 土壤退化与保水能力弱

化学农业依赖化肥和农药，导致土壤有机质下降、结构破坏，持水和渗透能力减弱。长期使用化肥会降低土壤微生物多样性，破坏土壤团粒结构，干旱时易出现水分流失，暴雨时易引发水土流失。

### 单一化种植导致抵抗力差

化学农业常采用单一种植模式，物种多样性低，一旦遭遇干旱、病虫害等胁迫，易导致大面积减产。例如，单一作物对特定病虫害抗性一致，爆发时损失更严重；而生态农业的多样化种植可分散风险。

### 生态系统功能受损

化学农业中农药和化肥的过度使用会杀死传粉的昆虫、土壤有益微生物等关联生物，削弱授粉、病虫害防控等功能，进一步降低系统对气候变化的适应能力。

### 高度依赖对外部投入

化学农业依赖灌溉、化肥等外部投入维持产量，在气候变化导致水资源短缺或化肥成本上升时，系统稳定性易受冲击；而生态农业通过内部资源循环（如有机肥、生物固氮）减少外部依赖，更能适应资源波动。

## 四、气候变化中的农业—— 成都农人访谈发现

在前两章中，基于国际与国内的研究文献，报告分别从“减缓气候变化”与“适应气候变化”两个维度，系统梳理了生态农业在应对气候变化中的理论机制与实践路径，展现了生态农业的多重功能与系统价值。然而，从科学研究到田间实践的转化，并非线性推进的过程，尤其在气候变化这一高度复杂的系统议题中，更容易出现“知识落差”与“传播断层”。因此，理解农户在具体生产情境中如何感知、诠释并回应气候变化，成为打通“科学认知—在地实践”路径的关键环节。

从宏观的科学认知到微观的在地实践，需要更深入的衔接与探索。本章从宏观文献综述转向微观的在地访谈，聚焦成都平原生态农人的气候感知与应对行为。在地访谈的目的不在于验证前述理论框架的适用性，而是试图深入了解农户对气候变化相关科学知识的接触程度与理解方式，从中识别知识传播中的断点与桥梁，为构建兼容科学认知与农户经验的支持体系提供基础依据。

### 4.1 为什么关注成都平原？

作为“天府之国”的核心腹地，成都平原长期受益于温润气候、丰沛水源与肥沃土壤，孕育出延续千年的精耕农业传统。当前，这一区域不仅是四川省粮油主产区和“天府粮仓”建设的重点区域（《四川省国土空间规划（2020—2035年）》），也是我国生态农业发展最为活跃的地区之一。成都平原是社区支持农业（CSA, community support agriculture）在中国的发源地，四川的生态农场与相关平台数量位居全国首位（社会生态农业CSA网络，2024），在推动绿色转型与农业创新方面具有代表性。

然而，近年来成都平原也面临日益严峻的气候压力。区域升温趋势显著，旱涝交错加剧，极端高温事件频发。气象监测数据显示，四川自1961年以来平均气温以每10年0.18℃的速度上升，高温日数明显增加（《四川省适应气候变化行动方案》，2023）。作为典型的季风农业区，温度和降水格局的变化已对农作物产量与农业稳定性造成实质性影响（Chen & Pang, 2020）。更值得关注的是，这些冲击对以小规模经营为主的农户群体尤为突出。据估算，占农户总数逾80%的小农户（户均耕地面积小于0.5公顷）在资源、信息和风险承受力方面更为脆弱（Pickson等，2022）。成都平原在农业上的重要地位、生态农业的活跃性以及日益突出的气候挑战，使其成为一个具有研究价值的区域，能够深入探究农友应对气候变化的相关问题。

农户既是气候变化的直接承受者，也是农业应对策略的第一响应者。其对气候变化的认知与应对方式，不仅影响自身生计和土地利用方式，同时通过生产实践反作用于区域生态系统与气候系统。因此，农户行为的研究不仅具有微观意义，更具备生态和政策层面的系统价值。

为深入理解在地农人如何“解码”气候变化，如何看待自身与气候系统之间的互动，研究团队于2024年开展了对成都平原25个生态农场的实地调研，并对2位生态农产品销售平台创办人及1位基层农业技术专家进行了1至2轮深度访谈。访谈围绕三个核心议题展开：一是农户对气候变化与土壤固碳等相关科学概念的理解程度；二是农户对气候变化的实际感知与观察经验；三是面对极端天气等挑战时所采取的应对策略及其背后的影响因素。

通过对这些问题的系统性梳理，我们希望解析农友个人传统经验与科学认知的距离，并尝试从农友视角出发，探讨经验-科学-政策的良性互动机制，构建支持性策略体系，从而将农友的在地智慧有效转化为气候行动的实际力量。

## 4.2 受访农场有什么特征？

25家受访农场的基本情况见表4.1。

表4.1 25家受访农场的基本情况

特征类别	分类指标	数量	占比	备注/补充说明
种植方式	生态农场	18	72%	转型时长：2-22年
	绿色产品农场	1	4%	使用绿色产品标准许可的投入品
	常规种植农场	6	24%	其中2家为高标准农田农场
地形特征	平原地带	14	56%	
	浅丘/丘陵地形	9	36%	
	山地地形	2	8%	
经营规模	微型农场（<10亩）	6	24%	
	小型农场（11-50亩）	11	44%	
经营规模	中型农场（60-300亩）	3	12%	
	大型农场（300-1400亩）	5	20%	
种植结构	多元化种植	20	80%	蔬菜、粮食、水果及豆类等
	单一作物种植	6	24%	2家专营水稻和小麦，4家专营水果
	种养结合	8	32%	种植+家禽家畜养殖，形成生态循环
灌溉水源	地表水灌溉	15	60%	河水、池塘、雨水、灌渠等
	混合水源灌溉	10	40%	地表水与地下水结合

**种植方式：**受访的25家农场中，18家农场（72%）为生态农场，在种植过程中不使用农药化肥除草剂杀菌剂等，转型为生态种植的时间最短的有2年，最长的有22年。一家农场为绿色农业农场，使用绿色农业标准许可的肥料、农药和杀菌剂。6家农场（24%）是常规种植型农场，使用化肥、农药、除草剂、杀菌剂等化学品，常规种植的6家农场里，有2家是高标准农田农场（详见表1及附件表1）。

**农场地形：**25家农场分布在成都平原东南西北的各个方向，这些农场中，14家农场的耕地在平原地带，9家农场的耕地位于浅丘/丘陵地形，2家农场的耕地属于山地。

**农场规模：**从占地面积看，6家农场的面积在10亩以下，11家农场的面积在11亩-50亩之间，3家农场的面积在60亩-300亩之间，5家农场的面积在300亩-1400亩之间。

**种植作物：**20家农场种植多种蔬菜、粮食、水果及豆类等，2家农场只种植水稻和小麦，4家农场只出品水果；其中8家农场还在进行家禽和家畜养殖，形成一定的种养循环。

**灌溉水来源：**15家农场的灌溉水源主要来自地表水，如河水、池塘、雨水或灌渠等，有10家农场的灌溉水需要地表水和地下水抽取相结合。

## 4.3 农友怎么看气候变化？

### 4.3.1 气候变化：从科学概念到农友的认知

从访谈来看，农友对气候变化的认知水平可以分为以下三类：

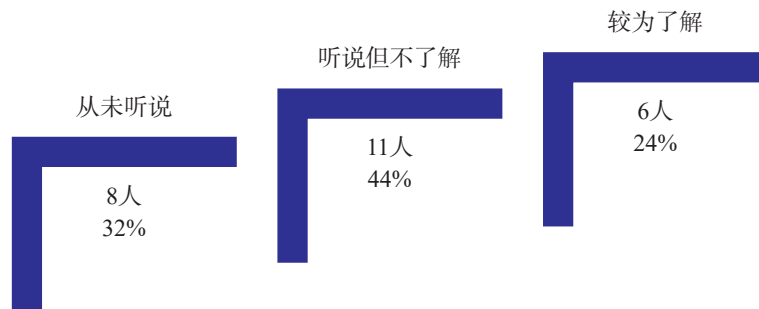


图4.1 受访农友对气候变化的认知水平

#### 从未听说（8人，32%）：

这部分农友从未接触过“气候变化”这个术语。原因主要有两种：一是缺乏信息来源和日常交流渠道；二是可能接触过该术语，但由于完全无法理解，未能留下任何印象。

#### 听说但不了解（11人，44%）：

这部分农友听说过“气候变化”，但对其具体含义缺乏了解。少数农友将气候变化与近年来的极端天气事件（如干旱、暴雨）联系起来，用“气候变化”一词描述天气异常，但无法进一步解释其科学原理。

#### 较为了解（6人，24%）：

这部分农友不仅听说过气候变化，还能解释部分科学原理。例如，他们知道化石能源的使用是气候变化的根源，二氧化碳等温室气体的排放是导致气候变化的主要原因。

总体而言，农友对气候变化的认知水平参差不齐。尽管大多数农友（17人，68%）听说过气候变化，但他们的理解较为表面，以直观感受为主，主要集中在气候异常（如极端气温、降雨模式变化）对农业的影响上。农友们对气候变化的科学概念和机制（如温室气体效应、气候与天气的区别）了解有限，通常将气候变化简单等同于天气异常，而未能将其与二氧化碳排放等具体因素联系起来。只有少数农友（6人，24%）对气候变化有相对深入的理解，能够提及化石燃料的影响以及气候变化与极端天气增加的关系。四川简阳生态农业专家袁勇也指出，农友对气候变化的认知较为碎片化，大多数农

友关注的是天气变化对农业生产的影响，但对气候变化的长期影响和应对措施了解有限。

### 4.3.2 土壤碳封存：农友的认知空白

关于土壤碳封存的相关知识，绝大多数农友（23人，92%）完全不了解土壤中含有有机碳和无机碳，也不清楚土壤具有固碳作用及其对温室气体减排的潜在贡献。仅有以下例外：

- 1) 1位农友知道土壤中含有有机碳，因为曾使用过碳肥。
- 2) 1位农友听说过土壤具有固碳功能。

土壤碳封存对农友来说是一个陌生的科学概念。绝大多数农友不了解土壤中的有机碳和无机碳的存在及其作用，对土壤的固碳作用及其在减缓气候变化中的潜力缺乏基本认知。只有极少数农友通过使用碳肥或偶然接触相关信息，对土壤中的有机碳或固碳功能有所了解。

### 4.3.3 天气、农时与收成：农友眼中的气候变化

虽然气候变化和土壤碳封存等科学概念对农民来说较为抽象，但他们通过日常的田间劳作，对气候变化的影响有着切身的体会。天气异常、农时变化、作物生长状况以及收成波动，都是他们感知气候变化的直观途径。

农友们观察到的气候变化的主要现象，集中在以下几个方面（见图4.2）。他们普遍认为近年来气候变化的突出表现是极端高温、降水异常和季节变化的不稳定性。

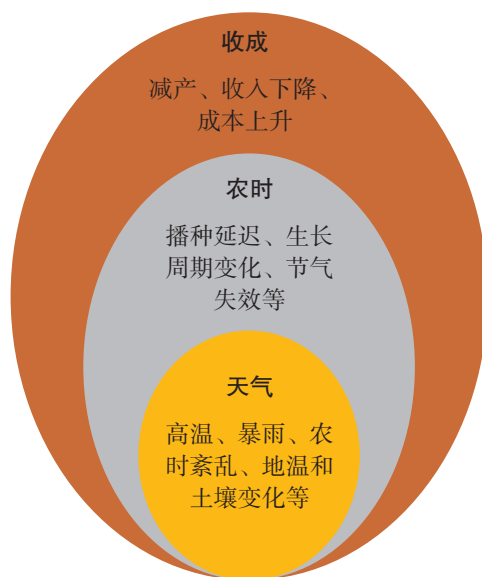


图4.2 受访农友眼中的气候变化

#### 4.3.3.1 极端高温与干旱

近年来，四川盆地频繁遭遇极端天气，其中高温与干旱成为农民反映最突出的气候挑战，在农友的观察中，高温不仅来得早、温度屡破纪录，且持续时间更长；干旱情况也愈发严峻，对农作物的生长周期、病虫害防治及农民的管理成本造成了深远影响。

高温和干旱的主要特点如下：

- 1) **高温提前、持续时间更长**：过去，成都的高温天气主要集中在7-8月，现在春季（3-4月）就已出现35℃以上的高温（详见下文访谈原文摘录），而入秋后的9月高温仍未退去。

其次，高温峰值持续攀升，过去37-38℃已属极端天气，现在40℃的极限屡屡突破，2024年成都部分地区更是高达42-43℃，且连续高温超过10天。

2) 极端高温+干旱同步发生，农业生产受重创

➤ 高温不仅提升气温，也导致地温、水温飙升，加剧空气与土壤水分蒸发，使作物快速失水，影响正常生长。

➤ 灌溉时水温过高，甚至产生“蒸煮效应”，直接烫死作物。

➤ 蜜蜂数量减少，导致授粉困难，瓜果类作物结果率下降。

➤ 病虫害爆发，害虫繁殖加快，农业产量进一步下滑。

3) 土壤恶化，耕作难度加大

➤ 高温加剧土壤水分流失，田间露水消失，影响作物生长。

➤ 土地盐碱化加重，地表土变粉状，地下土层硬化，耕作变得更加困难。

4) 水资源短缺，灌溉压力陡增

➤ 农友被迫增加灌溉投入，但水源日益枯竭，且打井成本高昂，也难以缓解缺水危机。



图4.3 高温下的芋头（拍摄：唐亮）



图4.4 高温下的生姜（拍摄：唐亮）

◎ “以前高温天气只是七八月份有，现在从春天就开始了。去年（2023年）三四月气温就飙到37、38度，不浇水作物就活不下来”——成都JQ农场农友

◎ “去年（2023年）干到玉米都结不了粒，整个山上的地，差不多10亩地就跟荒地一样，完全没法种……今年（2024年）的高温比前几年更猛，持续时间也更长。2022年虽然也干，但温度没今年这么高。7月持续降雨，8月进入极端高温期，今年我们这儿最热的时候有42、43度，持续了10来天。9月局部下雨，但土壤仍然干燥，地面裂缝大到能把一只脚塞进去。今年的情况比2022年还要糟糕，高温持续时间更长，温度更高。……地上的土都是粉状的，地下的土就像石块一样硬，作物根系完全吸收不到水分，红苕的苗子都干死了。”——成都ZL自然农场农友

◎ 去年（2023）的高温天太长了，丝瓜、南瓜、黄瓜一上架，过三天就焉了，叶菜根本种不活，连蜜蜂都不见了，授粉都成问题……今年（2024年）的天气特别极端，8月到9月空气温度达38~39度，地表温度更高。9月还是有36、37度，导致苗子难以成活。”——成都XM农场农友

◎ “以前高温三十七八度算高的，现在四十多度是常态。”——成都LX农场农友

◎ “以前高温天气只是七八月份有，现在从春天就开始了。今年（2024年）6月初就已经35度了，往年要到7月才这样。”——成都JY农场农友

◎ “22年秋天特别干旱，柑橘叶子都卷起来了，连浇水都抽不到水，那时候常规果园的果子晒得没光泽。”——成都AG生态示范合作社农友

◎ “我们这边今年雨水特别少，往年1-6月就会进入雨季，但今年6月中旬了，地里还是干得裂口子。”——成都LY农场农友

◎ “今年7~9月特别干旱，育苗的时候最难熬，种子发芽后被高温晒死，天干得浇水，结果水都是烫的，浇下去直接把苗烫死。”——成都WJ农场农友

◎ “过去种地主要是看人工，现在得靠天吃饭。前两年干得厉害，作物根本没长出来，莲藕、辣椒、红薯几乎全军覆没。”——成都YJ农场农友

◎ “春天和秋天越来越干，前几年春旱特别严重，我们不得不打井抽地下水灌溉，否则完全没法种。”——成都TL农场农友

◎ “去年（2023年）干旱特别严重，我们的水源地都抽不到水，灌溉成本大幅上升。”——成都ZY农友

◎ “今年干旱时间太长了，很多作物直接死掉了，尤其是浅根系的农作物，连补救的机会都没有。”——成都ZD农场农友

◎ “高温一来，水的蒸发量大，土壤盐分就上升，藤藤菜的根系就会受影响，像被腌萝卜一样，水分全被抽走了。”——成都QT农场农友

◎ “干旱不仅让作物减产，病虫害也加重了，原来20天繁衍2-3代的虫，现在能繁衍4-5代，农药的使用频次也翻倍。”——成都QT农场农友

◎ “过去天晴的时候早晨都会有露水，现在天晴了，早晨去采菜，叶子上是干的，说明晚上没有露水……有露水的时候，庄稼长得更好些。现在露水少了，影响比较大……才栽的小苗，如果接到两晚上遇到大露水，它自己就立起来，好像露水把植物在往上提”——成都CW农场农友

◎ “我们那里以前暴雨比较多，雨水顺着山冲下来，梯田都塌方。现在反而没那么多暴雨了，地势高的地方甚至开始干旱。”——成都WX农场农友

## 4.3.3.2 暴雨、洪涝和雨后高温的叠加

农友们观察到的极端降水模式有以下变化：

- 暴雨更频繁、强度更大，往往短时间内降水过量，导致农田积水、作物受损、病害增加。
- 降水分布极端不均衡，某些地区长时间干旱，一旦降雨又是集中暴雨，给农田管理带来极大挑战。
- 传统排水方式难以应对爆发性降雨，抗洪防涝设施投入成本高，农业负担加重。
- 暴雨后紧接着的高温进一步加剧作物损害。许多农户提到“雨后高温”对作物的影响甚至超过暴雨本身。



图4.5 暴雨后的菜地（拍摄：胡雪梅）

◎ “过去暴雨是几年一遇，现在几乎每年都有，豇豆锈病成了常态。”——成都LY农场农友

◎ “7月份（2024年）雨水过多，夜晚暴雨，白天出太阳，种下去的菜全部腐烂，到了8月又是连续20多天的高温，幼苗完全扛不住……遇到水涝的情况下，只能人工去抽水。但如果连续暴雨3天、5天，就只能放弃挣扎。”——成都XM农场农友

◎ “去年夏秋（2023年）暴雨特别多，雨量是往年的好几倍，豇豆锈病、辣椒和番茄的病害明显增加。”——成都CY农场农友

◎ “以前暴雨多，现在好像更明显了，有时候一场大雨能把田埂冲垮，地里的水排不出去……”——成都ZY农场农友

◎ “水比以前多了，温度也高了，土壤有时候特别容易积水，容易发生水涝……大雨多了，土壤反而更容易变硬，种子种下去容易泡烂。”——成都ZD农场农友

◎ “暴雨不像以前那种绵绵地下，现在都是一下子下很多，很快就积水，很多地势低的地方根本没办法排水……有时候雨水大，机器都没办法进地里，只能等。”——成都AM农场农友

◎ “雨水不均衡，要么一直下，要么一直不下，导致作物减产严重。”——成都YJ农场农友

◎ “过去30年前种菜根本不用打药，但现在气候变化导致病虫害多，暴雨冲刷土壤后，肥力下降，土地容易板结……暴雨有时候一夜之间能把刚种的苗子全部冲走。”——成都ZX农场农友

◎ “以前下雨还是比较规律的，现在就是忽然暴雨，去年（2023年）种的花生因为连着几天暴雨，地里直接泡烂了。今年花生收获季节，天天下雨，导致泥土特别黏，拔花生特别费劲。”——成都ZX农场农友

◎ “雨水还是多，但是特别不均衡，要么特别干，要么暴雨一下子就下一个月。2023年7月到8月底连续下雨，地里庄稼全部泡水，很多玉米、花生直接坏死……雨水一旦集中，根本没法及时排水，很多稻谷都是在地里被泡坏的。”——成都ZL农场农友

◎ “今年高温+暴雨交替，大棚设施损坏严重……暴雨带来的土壤盐碱化加剧，影响作物生长。”——成都QT农场农友

◎ “7月份一直下雨，7月中旬以后进入持续高温期，9月份偶尔暴雨，但基本上没下什么有用的雨。前期水分过多，导致生姜根系受损，减产70%~80%。8月份高温持续，胡萝卜种子发芽困难，很多种子没发出来……整体来看，今年的气候比往年更极端，高温和雨水不均衡交替，影响了作物的生长”——成都TL农场农友

◎ “7月份连着下了三周雨，紧接着又是一个月的干旱……导致李子裂果，影响销售。”——成都ZH农场农友

◎ “近几年雨水分布变得更不稳定，水稻收割期受到很大影响……以前9月中旬就能收完作物，现在种植面积大了，加上天气变化，收割期拖长，导致雨水影响更大。”——成都JH农业合作社农友

◎ “今年（2024年）前期雨水太多，影响水稻授粉，导致结实率下降……如果水稻生长周期内累积温度不到3000度，产量就会减少，去年的温度好，能到3400度，今年雨水太多，估计会减产。”——成都FP种植合作社农友

◎ “今年7月份雨水特别多，天天下雨，影响水稻授粉，导致稻谷结实率下降。农科院建议打药，但我们知道问题出在气候……8月高温来得快，导致谷子成熟提前，稻谷收割期缩短。”——成都WX农场农友

◎ “去年5月开始，白天不敢浇水，温度太高，浇了水就等于把植物煮熟。今年情况反过来，7月到现在雨太多，几乎不用浇水……极端天气对作物是灭绝性的，尤其是我们做生态农业的，不能用大棚保护，暴雨之后紧接着高温，根部就像被蒸笼蒸一样，直接死掉。”——成都JQ农场农友

“过去一年之内它可能就是单一的一种极端气候，在简阳最多的是干旱，但是它一年可能只有干旱。但是近几年我们发觉就是在同一年内它极端气候的种类多了，它有可能干旱，但同时伴随高温，甚至可能干旱结束了之后，马上就是洪涝灾害种类越来越多，然后这种干旱的程度总体趋势应该是越来越干旱了。以前是偶尔一两年碰上特别干的，今年是一年之内极端干旱和暴雨交替出现。”——简阳农业专家

#### 4.3.3.3 异常天气常态化与传统农时失效

农友们普遍认为，过去偶发的极端天气事件（如高温、暴雨、干旱）正在变得频繁和常态化，并且持续时间更长，导致传统的农业种植节奏受到严重冲击。原本相对稳定的农时安排，如春播、夏管、秋收、冬藏，正被不断变化的气候模式打乱，传统经验不断遇到挑战，种植规划难以执行，农户不得不调整种植计划，甚至被迫放弃部分作物。

◎“从2018年开始，我们明显感觉到气候变化，2020年后更加剧烈。以前高温天气只是偶尔出现，现在每年夏天都有持续高温，玉米根本扛不住。”——成都DF农场农友

◎“高温不再是夏天的‘客人’，而是‘常客’，藤藤菜每年都因为高温减产。”——成都QT家庭农场农友

◎“现在的整个气候是越来越没得规律了，老百姓自己也晓得，过去明显的感觉是一年四季，现在我们开玩笑说的，节约成一年两季了，甚至有可能一天都是两个季节，早晨是冬季，下午就是夏季，温差变化很大”——简阳农业专家

◎“暴雨和大风每年都来，大棚维修成了固定开支。”——成都XM农场农友

◎“春天低温、夏天高温、秋天暴雨，这些异常天气已经成了每年的‘标配’。”——成都TL农场农友

◎“过去是偶尔高温，现在每年农忙时都要提防极端天气。22年、23年、24年都是持续高温，到了秋天都没缓过来，作物生长期全打乱了。”——成都CW农场农友

◎“极端天气对农业的影响已成常态，需要通过调整种植方式应对。”——成都ZH农场农友

◎“极端天气变化很明显，既有极寒的倒春寒，也有极端暴雨带来的水涝灾害。”——成都LX农场农友

◎“过去下雨还能预测，现在完全不准，云来了也不一定下，去年有一段时间人工降雨都没用，玉米还是干死了。”——成都DF农场农友

◎“现在遇到的不是‘正常的热’，而是‘极端高温+干旱+暴雨交替’的恶劣天气。雨一来就是暴雨，干旱时一点水都没有，中间没有缓冲。”——成都JQ农场农友

◎“现在的天气越来越不规律，以前冬天冷、夏天热，现在整个季节都在变，极端化越来越严重。”——成都ZD农场农友

◎“今年中秋下雨反常，老话不灵了。”——成都JY农场农友

◎“我们总感觉今年气候跟不上农时，授粉期温度太低，导致果树结果率下降。”——成都ZY农场农友

◎“以前的农时很规律，现在完全跟不上了，该下雨的时候不下，等苗子都长好了才开始下。”——成都ZL农场农友

#### 4.3.3.4 收益下降与投入增加：极端天气下的双重压力

越来越常态化的高温、干旱、暴雨等气候变化现象给农业生产带来了多重挑战。通过农民的实际反馈，我们可以清晰地看到经济损失、收成损失、农业投入增加这三个方面的显著影响。

➤ **收成损失：**高温、干旱、暴雨等极端天气导致作物减产，作物大面积减产，甚至绝收，特别是蔬菜、果树、水稻等受影响最严重。

➤ **经济损失：**农业经营风险加剧，极端天气让农产品收成和品质下降，种植收益减少，甚至出现亏损，部分农民难以维持生计。

➤ **投入增加：**农资、种子、病虫害防治、人工和灌溉成本不断上升，进一步加重农民的经营负担。

◎ “今年（2024年）7月持续三周左右的下雨，我们卖李子的时候只能趁着中间间隔两天赶紧收，不然就会掉果、裂果，价格非常低……李子最终收购价只有两块钱一斤，3000多斤才卖了6000块钱，基本上没有利润……我们农场一年下来，收入基本只能持平，稍微有点盈利，但农业收入养不起一个家庭。”——成都ZH农场农友

◎ “今年（2024年）干旱导致水井抽水灌溉增加，但地下水温太低，作物吸收不良，灌溉效果不佳……叶菜类小苗一晒就死，浇水水温太高会烫死，不浇水又干死，今年很多菜都没种成……今年干旱严重，为了减少水分蒸发，我们尝试增加秸秆覆盖，但这需要额外的人工和时间。”——成都WJ农场农友

◎ “今年（2024年）7月连续20多天的降雨，高湿度让叶菜全部腐烂，8月育的苗全部被高温晒死，9月20日重新育苗，但长势依然不好……8月高温高湿，导致枯萎病和其他病害增加，农场防治成本上升……9月暴雨导致茄子、丝瓜、黄瓜受损，收成减少，卖给客户的产品质量下降。”——成都XM农场农友

◎ “今年（2024年）8月回农场后发现，之前种的苗全部死光，白菜、叶菜类、豆类基本全军覆没。”——成都AM农场农友

◎ “今年（2024年）的水稻因为高温和雨水的影响，稻谷灌浆不充分，收成明显下降……今年的雨多和日照不足导致水稻结穗率下降，像我们种植大户，我们就只有补肥，补肥，想办法去补救一下，每亩地的肥料投入比去年多了50元以上，但产量还下降了。”——成都FP种植合作社农友

◎ “2023年和2022年的干旱几乎让农场颗粒无收，所有作物都受到了影响……去年玉米完全绝收，今年因为有两场雨，勉强有收成，但仍损失一半。蔬菜受损最严重，几乎无法生长。”——成都DF农场农友

◎ “这几年天气变化太大了，种植模式跟以前完全不一样，成本高了很多，但收入没见增加……以前还能存点钱，现在基本上全投进去了……有时候种下去的菜，全被高温干死了，只能重新买种子再种一遍，成本一下子翻倍。”——成都LX农场农友

◎ “为了对抗极端天气，需要投入更多资金用于农田排水、灌溉、病虫害防治，但收益却越来越低……今年（2024年）为了应对干旱，我们每天抽水灌溉，不抽水作物就活不了，但中午太热的时候不能抽，因为电力负荷太大，而且高温水浇到作物上也会伤害根系。成本太高，农民压力很大……今年育苗时，高温干旱导致种子晒死，不得不多次补种，又增加了种子和人工成本。”——成都CY农场农友

◎ “22年连续高温干旱，姜长了一半就死了，三天时间地就干裂了，完全没得救……去年（2023年）夏天，整整一个月40度以上，高温持续得太久，作物长不出来……今年（2024年）春天特别干旱，每天都在抽水，电费高得吓人……我们种的姜7亩地，死了40%-50%，减产70%-80%，本来正常年份一亩产2000来斤，今年估计最多只有500斤……”——成都TL农场农友

◎ “我今年的梨子，开花时情况还不错，结果挂果后全掉光了，完全没得收成。”——成都JY农场农友

◎ “去年玉米长到一半就干死了，今年的温度更高，我们已经不敢多种了……现在土壤坏了，容易长虫，成本高，现在的人吃的菜容易有病，但是我们打不起进口药，国家的药效果不好，种地的成本高了，收入反而低了。”——成都ZD农场农友

◎“现在种地还是好种，但成本比以前高多了，投入比以往高。一亩地光肥料就要1000多块钱，加上其他费用，一亩地要投入2000块左右……如果请人，人工费也贵，一天工钱要一百多块钱。”——成都ZY农场农友

◎“去年（2023年）和前年（2022年）连着两年严重干旱，玉米、红薯、辣椒减产70%以上，蔬菜几乎全军覆没，只有莲藕受影响较小……2023年种的油菜因为太干，雨水少，发芽都受影响，最后严重减产。今年（2024年）雨水过多后突然高温，要不让你干死，要不让你涝死。”——成都YJ农场农友

◎“今年的天气太反常了，春天很干旱，夏天又是暴雨和高温交替，农作物病害严重，损失惨重。”——成都JH农业合作社农友

◎“今年夏天的高温比往年更严重，高温和干旱情况导致我们的叶菜类、瓜果类作物都受到了很大影响，产量减少一半以上……今年夏天喷药频率增加，每亩地的病虫害防治成本增加了50-100元……农业现在要上规模才有经济回报，但极端天气让种植变得越来越难，成本高，利润低。”——成都QT农场农友

#### 4.4 农友怎样了解天气？

受访农友关注天气以短期预测为主：通常会查看1-15天左右的天气动态，其中提前一天或当天了解天气预报最为常见。

受访农友获取天气信息有三种途径：通过手机天气预报查看天气是最普遍方式，所有农友通常通过手机查看天气预报。此外，在灾害天气到来前，农友也会收到手机短信或微信提醒。

不过，不少农友提及：天气预报覆盖区域较广，但具体到当地可能出现偏差（如局部降雨等），不一定准确。

3位农友在手机天气预报之外，会进行“在地校准”：依赖长期积累的经验、请教当地老农或了解农谚帮助自己判断农场所在的微气候，对天气预报的信息进行更精细化的“解读”。

有一位农友安装了能够观察卫星云图的手机软件，帮助自己判断农场所在地的气象信息，以更好地安排生产。

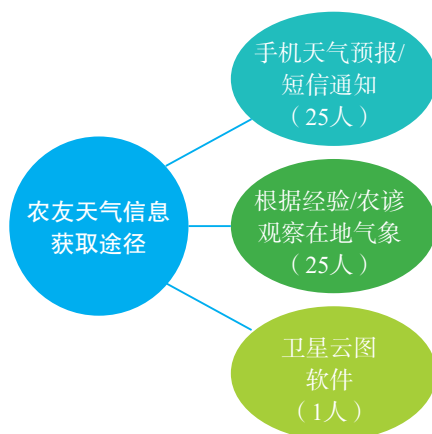


图4.6 受访农友天气信息获取途径

## 4.5 农友怎样应对极端天气挑战？

面对日益频繁的极端天气，农民采取了多种措施来适应和应对高温、干旱、暴雨等挑战，这些措施涵盖了农田管理、水资源利用、种植方式的调整以及生态农业的实践。从访谈来看，农友的应对措施有如下的特点：

- 常见措施“碎片化”：生态种植和常规种植的农友会普遍采用的措施以应对问题为导向，具有依赖经验、成本低、易操作、适应性强的特点；
- 生态种植农友更多采用长期提升农业韧性的措施：例如恢复农场的生物平衡，提升土壤品质等；
- 农友的应对措施受到资金、劳动力、技术和认知等多重因素的制约。

### 4.5.1 生态种植农友和常规种植农友都普遍采取的措施

这些措施在多个访谈中被不同农民提及，具有一定的普及度，说明它们是农民应对极端天气的主要手段，具有成本低、易操作、适用性较强的特点。

#### 4.5.1.1 水资源管理

**夜间或早晚浇水，减少水分蒸发和避免烧苗**

例如：

“我们基本上是下午或者晚上浇水，因为白天太阳一出来就会把水分蒸发掉，植物根本吸收不到。”——成都JY农场农友

“今年的高温持续时间更长，幼苗抗不住，我们采取早晚浇水的方式降低损失……我们早上5点过就开始浇水，晚上要等到8点过后才能浇，因为地表温度太高。”——成都XM农场农友

“白天温度太高，浇水就等于是把植物‘煮熟’了。夏天我们必须早上6点浇到8点，晚上6点以后再浇。”——成都JQ农场农友

#### **人工抽水或排水，缓解干旱/暴雨影响**

如前文章节3所引用的信息，面对暴雨和高温的极端天气，农友采取的措施例有抽水灌溉，打井灌溉，以及旱情初起时及早灌溉；或者暴雨时加高田埂、挖排水沟、用抽水泵排水。

但这些措施在极端天气的冲击下，正面临越来越严峻的挑战：如地下水水位下降，即使打井抽水，部分地区已经抽不到水，灌溉成本剧增。有些地区面对连续大暴雨时，排水沟、抽水泵都无法解决农田被淹的状况。

#### 4.5.1.2 田间管理

**起垄种植：**起垄是农友种植时普遍采用的做法，能够提高土壤的透气性和排水能力，通过改善土壤环境、调控温度、方便管理等多种方式，为作物生长创造有利条件。为了应对暴雨，有农友特别采用了“花台式”的高垄做法：

“沟垄种植能减少水淹时的损害，我们起垄35公分，这样水淹到35公分以下不会影响作物生长。”——成都JQ农场农友

“因为我们那片地其实水位线还挺矮的……对比下来其实高垄反而会好一点，就是应对病虫害，包括应对天气那些就好很多……高垄它其实更容易打理的”——成都AG生态示范合作社农友

**根据天气调整农事活动时间：**在安排重要的农事活动，如种植、收获、打药等，注意避开极端高温和降雨时段。不过农友也提到，因为天气变化不确定性增加，计划执行有一定的挑战。

**使用遮阳网或大棚，减少高温/暴雨影响：**使用遮阳网、大棚等方式减少高温对作物的直接影响。然而，在极端高温（地温过高）情况下，这些措施仍然难以奏效。同时，大棚等设施需要资金投入建设和维护，对农友造成经济负担。例如：

“我们大棚外加了遮阳网，降低温度，防止作物晒伤。”——成都QT农场农友

“我们用遮阳网减少高温对作物的影响，但地温太高，还是会伤害植物。”——成都JQ农场农友

“我们家用遮阳网和小拱棚来减少高温对作物的影响，但温度太高的时候，地温还是会过高，直接把植物‘烧死’。”——成都XM家庭农场农友

“大棚对我们种葡萄非常重要，要不然一场雨下来就没得收了……大棚最怕大风，风一来就吹烂了，我们以前年年都要更换大棚的塑料布……我们现在用的以色列的塑料布很好，虽然贵，但是已经用了3年没换了。”——成都FQ农场农友

**扩大耐旱作物种植：**高温天气下，越来越多的农友开始尝试种植耐旱性强的作物，以适应水源减少的环境。例如：

“今年干旱比前几年更严重，我们后面可能会种更多的红薯和玉米，这两样相对来说耐旱一些……我们正在保育老品种，比如老红薯、老玉米，它们比外面的杂交品种更适应本地气候，耐旱能力更强。”——成都DF农场农友

“种莲藕要好点，莲藕它要耐旱一点……我会把莲藕那个板块适当再增大一些，起码让农场有一个平衡点，你不求赚好多钱，但至少要能生存下去。”——成都YJ自然农场农友

“我现在在试种旱稻，因为后面可能水资源会更紧张，农业局也支持这个想法。”——成都WX农场农友

“种甘蔗比种蔬菜轻松，因为它种下去后，中途只需要管理几次，水分需求也相对较少。”——成都WJ农场农友

“种柑橘比种粮食更适应现在的气候，果树耐旱，人工管理也相对轻松。”——成都AG生态示范合作社农友

## 4.5.2 生态农友采取的其他应对措施

### 4.5.2.1 轮作和多样化种植

**轮作和多样化种植：**通过种植多种作物，减少天气变化对单一作物的严重影响，预防病虫害。例如：

“病害也是相对的，如果你的生物多样性不够。所以我种的时候里面就是乱种，这块是种十字花科的，那边种的是禾本科的，他就岔起种，每一轮都种不一样，然后你看别人说你这一厢种了玉米，这一厢种了白菜，这一厢种了辣椒”——成都JQ农场农友

“我们本身不用药，好多人到我们园子看了之后说就没看到种什么菜，但事实上我们只是说不太会把同一个品种（集中在一起种），比如这一块是黄瓜，这一块是玉米，不会这样种，我们可能相同的品种就会把它分散，分散的好处是，因为每一个地块它的小环境都不一样的。”——成都LY农友

“我从开始做农业到现在都没遇到过虫的灾难。因为我懂得一个原理，大自然里面它万物是和谐共生的，本来是相生相克的，所以在我的宗旨理念里头，我从进农业的时候我就没得杀虫的概念。”——成都YJ农场农友

“我们的蔬菜地里都会留草，青蛙和虫子躲在草里，生态平衡好一点，病虫害就少一点。”——成都TL农场农友

“一般病害你如果是采取轮种的情况下，病害都不是很严重。”——成都CY家庭农场农友



图4.7 间种的菜地（拍摄：胡雪梅）

#### 4.5.2.2 秸秆或植草覆盖土壤

秸秆或植草覆盖土壤：在田间使用秸秆覆盖，或者种植覆盖性植物，以减少土壤水分流失，提高土壤保水能力，同时减少暴雨对土壤的冲刷。例如：

“生态种植（保留）的（自然杂）草可以保护土壤，它的根和作物的根相连，不仅能保持水分，还能改善土壤质量。”——成都DL农场农友

“在土壤养护上，我们会做一些覆盖，比如夏天草疯长的时候，就直接割了覆盖在地面上，不做其他处理。这样可以保湿，同时减少外来污染源。”——成都DF农场农友

“水稻的秸秆必须回田，否则土地的肥力会下降，我们一直在做秸秆还田，蔬菜区也是这样。”——成都LY农友



图4.8 留草覆盖与秸秆覆盖（拍摄：唐亮）



图4.9 秸秆覆盖（拍摄：唐亮）

#### 4.5.2.3 使用堆肥、沼液、酵素等改良土壤

部分农民采用堆肥、有机肥、沼液和酵素等投入品，以及减少耕作改善土壤质量，增强土壤的抗旱能力。例如：

“我们家是做堆肥的，主要是用堆肥修复土地，改善土壤里面的微生物环境。”——成都XM农场农友

“我们果园虽然也经历了2022年的干旱，但树叶没有严重卷曲，主要是生态种植时间长了，果园的土壤不去扰动它，根系扎得深。”——成都AG生态示范合作社农友

“人不去干扰它就是对土地最好的保护。”——成都YJ自然农场农友

“我们用了两年有机肥，确实觉得土变好了，果树也变好了，要更扛得住旱了……土也变得泡沙泡沙的，很舒服。”——成都AG生态示范合作社农友

#### 4.5.3 应对措施的挑战：资金、劳动力、技术和认知等多重因素的制约

在应对极端天气的过程中，农友们尝试采取多种措施，以减少不利气候对农业生产的影响。然而，这些措施的实施往往受到资金、劳动力、技术条件及土地类型等多重因素的制约，导致其推广程度不一。

首先，滴灌和水管灌溉被部分农友采用，以提高水资源的利用效率。滴灌相比传统大水漫灌用水更少，并且能够让作物更有效地吸收水分。例如，成都JQ农场的农友和成都TL农场的农友都指出：“滴灌比传统大水漫灌用水少，作物吸收得更好”。“滴灌的水能渗透到根部，不浪费”。然而，滴灌系统的投入成本较高，部分农友虽然想要安装，但难以承担这笔支出，限制了滴灌的广泛应用。

其次，农业设施如大棚，被认为是未来稳定农业生产的重要手段。例如，不止一位农友反馈：现在生态农业如果要做好，未来可能离不开设施农业，比如滴灌系统、大棚，这样可以稳定生产。然而，大棚在应用过程中也暴露出一些弊端。例如，大棚需要不断追加维护成本；高温天气时大棚内温度很高，有时需要使用鼓风机降温；以及大棚会带来土壤退化。成都QT农场的农友观察到：“像这种设施棚对土壤的影响很大，主要是啥子影响？就是我刚说的盐分，因为露天土壤要经过雨水不断的冲刷，它会把盐分这些不好的一些东西沉降到土壤下层，不影响耕作层，但是棚里面就不一样了，它没有受到雨水冲刷，耕作层土壤盐碱化的问题就出来了。”这表明，大棚虽然能够在一定程度上防范极端天气，但也可能导致费用、配套设施和土壤盐碱化等问题，需要综合考量其长期影响。

再次，采用什么样的应对措施，与农友的认知和经验密切相关。简阳农业专家袁勇提出，面对极端天气时，要重视观察自然，向大自然学习，不要急于用常规方式解决问题。例如，干旱天气时作物的叶子一般都长得不好。这是因为“植物在努力把根扎下去，它能够抗旱，而它的养分都用在根上了，它上面的叶片它自然长得不好，因为叶片长好了，更不利于它抗旱，所以植物自己有智慧，它在自救。但常规的做法是一旦探测到土壤的水分不足的时候，好我就给你灌水，水灌了好久，然后叶子长起来了，对作物来说不见得有利”。袁勇老师也建议农田管理中要合理留草和免耕。留草和免耕能够有效降低土壤温度和抗旱，也是应对暴雨的好办法。在土壤裸露的农田里，大暴雨很容易把土壤打板结，水土流失也比较严重。在免耕的情况下要覆盖秸秆和留草，能够在一定程度上减轻暴雨对这种土壤的影响，秸秆和杂草也会帮助吸收一部分水分。部分农友认为这些建议与自己的经验不吻合，在实践中很难落实和坚持。但长期开展覆盖免耕的重庆合初人农场的朱艺老师反馈，袁勇老师的建议与农场的实践经验是一致的。

除了基础设施和技术措施，也有农友提出应对气候变化的根本之道在于恢复农场的在地生态系统韧性，形成本地的“微气候”和“小循环”。通过构建生物多样性的种植模式、合理搭配豆科等固氮作物，恢复昆虫和微生物生态链，在大环境中形成稳定的微气候，从而减缓天气剧变对作物的直接影响。例如，有农友观察到，在进行杂草覆盖和多层次种植后，土壤肥力得到了明显改善，昆虫群落的恢复也促进了土壤健康。此外，完整的生态链还能缓解部分水土流失和温度极端变化的问题，提升农场整体的抗逆能力。不过，这样的实践仍然是个案，农场要能够形成一定的“微气候”，需要具备至少上百亩的土地规模，对于只有几亩或几十亩土地的小农来说，如何提升农场整体的抗逆能力，仍需要更多的实践和探索。

从农友的反馈中，可以看到农场规模大小（是否能够形成在地生态系统）、农场自身的地理位置（如附近水源是否充足）以及是否更有资金实力采用多样化措施（例如兴修农田水利工程、喷灌设施）等，在农场应对极端天气冲击时发挥更重要的作用。5位常规化学种植的农友提到农场长期使用化

学品，造成土壤、虫害等多方面的挑战，希望加大土壤有机质的投入，改良土壤。但是受困于土地租赁期限以及营收压力，无法做长久规划和投入。

总的来看，面对极端天气，农友们积极采取多种措施进行应对，但由于资金、劳动力、技术及土地条件等因素的限制，这些措施的推广程度和应用效果仍存在差异。因此，在未来农业发展中，如何平衡设施投入与农业可持续性，如何结合不同地域和作物特点优化应对策略，仍然是值得进一步探讨的问题。

#### 4.6 思考

本研究发现，受访农友对气候变化的整体趋势及土壤碳封存等概念缺乏系统性认知，气候科学话语与其日常经验之间存在显著割裂。尽管如此，他们在日常生产中已展现出高度的适应意愿和实践能力，通过经验积累采取多种应对极端天气的方式。然而，这些应对行为多为碎片化反应，且在资金、劳动力、技术手段和信息获取等方面受到明显制约。

这一现象提示我们：如果缺乏切实可行的参与机制与制度支持，再科学的适应和减缓策略也难以落地生根。当前以科学话语主导的气候政策与碳汇机制，往往难以触达农友视野，也难以激发其参与热情。政策制定者需要更多引入参与式方法，纳入农友的实践知识，使政策更贴近现实，更具可操作性。科学研究亦需探索与农友共建知识体系的路径，推动经验知识、制度创新与技术进步的有机融合。

国内和国际经验表明，提升农村社区气候适应力的有效路径，往往基于“社区主导、科研支撑、政策引导”的多方协作机制（赵惠燕等，2015）。例如：

➤ 中国云南红河的生计与生态共构实验则展现出地方政府、科研机构与农民群体协同构建规则与制度的潜力，例如通过村规共识重建轮作与山林管理制度，并尝试引入碳计量与生态补偿机制，实现了生态治理与生计改善的统筹兼顾（联合国粮农组织，2010）。

➤ 菲律宾 PCRVA 项目通过组织村民绘制气候风险地图，唤醒了社区对洪涝、高温、土地侵蚀等气候风险的认识，同时推动了“村庄气候适应行动计划”纳入地方预算体系，实现了知识传播、社区共识与政策协同的结合（IIRR，2020）；

➤ 印度的“气候智能型村庄”计划建立了以农民参与为核心的技术试验平台，农户在“边试边学”的过程中反馈适应技术的实际成效，科研人员再对技术包优化迭代，推动了科学与实践的双向耦合（CCAFS，2017）；

这些案例共同强调了三点：一是农民的在地经验是应对气候变化不可忽视的资源；二是技术推广必须以社区需求为起点；三是制度设计应为农户留出参与和表达的空间。唯有通过这种共建共治共享的路径，气候适应行动才能真正具备可持续性与弹性。

因此，建议未来在气候适应与减缓的政策与项目设计中，重点推进以下方向：

- 1) 发展“农民参与式气候适应规划”机制，让农民在政策制定中拥有发声空间；
- 2) 建设“气候适应型乡村实验社区”，以村为单位探索适宜技术与制度路径；
- 3) 鼓励农民参与气候风险地图绘制，明确在地风险、资源与优先行动项；
- 4) 推动农民主导的生态技术试验田，结合“边试边学”机制优化适应策略。

总之，农友不只是气候变化的受体，更是未来生态转型中的关键行动者与知识合作者。唯有打通知识、制度与行动之间的桥梁，才能真正释放他们在气候应对中的潜力与主体性。

## 参考文献

- [ 1 ] 赵惠燕等 ( 2015 ). 陕西农村适应气候变化状况及脆弱性评估与分析. 气候变化研究快报, 4, 160–170。
- [ 2 ] IIRR (2020). Participatory climate risk mapping: Building local adaptation capacities. A case from Ivisan, Capiz, Philippines. International Institute of Rural Reconstruction.
- [ 3 ] CCAFS (2017). Climate-Smart Villages: An AR4D approach to scale up climate-smart agriculture. Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security. 2017-05 [2025-06-29]. <https://ccafs.cgiar.org/climate-smart-villages>.
- [ 4 ] 联合国粮农组织 (2010). Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) Programme. 2010-05 [2025-06-29]. [https://www.fao.org/fileadmin/templates/giahs/PDF/Hani\\_Rice\\_Terraces.pdf?utm\\_source](https://www.fao.org/fileadmin/templates/giahs/PDF/Hani_Rice_Terraces.pdf?utm_source)

## 五、生态农业的多元路径—— 四个实践案例的经验与挑战

---

全球农业正面临气候变化、土壤退化、化学投入依赖和资源枯竭等多重挑战。为应对这些危机，世界各地的农民、研究者和实践者积极探索创新农业模式，以提升土地生产力、恢复生态平衡，并实现经济与环境的双赢。

本案例集选取了四个各具特色的国内外实践，展示了生态农业在不同气候与社会背景下的多样化路径。这些案例涵盖中国的自然免耕农业、印度安得拉邦的社区主导自然农法、巴西—秘鲁—越南等国的农林协同演替农业，以及美国印第安纳州克拉克农场的再生农业体系。

在前文的生态农业管理措施框架中，免耕/少耕、秸秆还田、作物覆盖、有机肥替代化肥、农林协同、轮作复种、多样化种植等，是实现气候适应与减缓的核心路径。这四个案例均因地制宜地系统性整合了这些措施，在气候适应与减缓方面表现出积极成效。

中国自然免耕农业（侯光炯院士主导，20世纪80–90年代）：提出“小三化”（结构化、腐殖化、细菌化）和“大三化”（渠网化、林网化、复种化）的技术体系。通过长期免耕和有机物管理，减少土壤扰动（减缓作用），同时增强保墒能力和作物抗旱性（适应作用）。

印度安得拉邦社区主导自然农法：在结构化、腐殖化和微生物接种等方面积累了丰富经验，大幅减少化学品投入（减缓作用），并提升土壤生物多样性和作物韧性（适应作用）。

农林协同演替农业（巴西、秘鲁、越南等）：深度实践林网化与复种化，构建多年生木本与作物的多层系统，增加长期碳汇（减缓作用），同时提供遮阴、涵养水源、减少极端天气对产量的冲击（适应作用）。

美国克拉克农场再生农业实践：二十余年持续推进结构化、腐殖化与复种化，最终实现全面免耕。通过作物覆盖、多样性种植和高密度种植等措施提高土壤有机碳含量，逐步淘汰化学品投入（减缓作用），同时显著提升农田生物多样性（适应作用）。

尽管这些案例的地理和生态背景各异，但它们共同遵循减少外部投入、免耕或少耕、增强土壤健康、提升生态韧性等原则，并通过系统整合多项生态农业管理措施，形成了兼具气候适应与减缓效益的农业模式。通过分析这些实践，我们旨在为政策制定者、研究人员和农业从业者提供多元化的生态农业经验，从而推动农业向可持续和气候友好的方向转型。

## 5.1 案例1：侯光炯院士的自然免耕实践

侯光炯（1905—1996）是中国杰出的土壤学家、教育家和农业科学家，中国科学院学部委员，全国劳动模范。他长期致力于土壤地理学、土壤分类和土壤肥力研究，并在20世纪70年代后提出了“土壤肥力的生物热力学”观点，为中国土壤科学和农业生产做出了重要贡献（四川省科学技术委员会，1987）。这一理论指出，土壤不仅是一个物理化学体系，更是一个具有生理代谢功能的动态生态系统，其肥力水平取决于水、气、热、养分等要素的协调程度。侯光炯认为，土壤是“活”的，具有自我调节的功能，而传统耕作方式破坏了土壤的稳定性，使其易受侵蚀和贫瘠化（侯光炯，1987）。

因此，他提出自然免耕法，其核心目标如下（图5.1）：

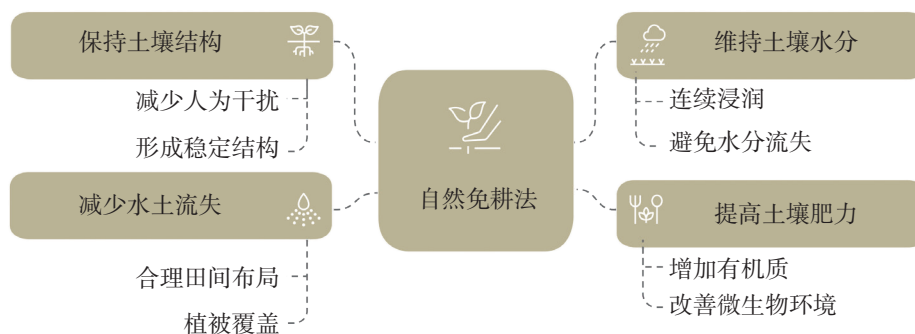


图5.1 自然免耕的目标

- **保持土壤结构**：减少人为干扰，使土壤形成稳定的物理结构；
- **维持土壤水分**：通过连续浸润保持土壤水势梯度，避免水分过度流失；
- **提高土壤肥力**：增加土壤有机质和腐殖质，改善土壤微生物环境；
- **减少水土流失**：通过合理的田间布局和植被覆盖，减少土壤侵蚀。

20世纪80年代，侯光炯院士提出的“水田自然免耕”技术在全国10多个省份推广，取得了显著的生产和生态效益。然而，尽管免耕农业在实践中取得了一定的成功，但在推广过程中仍面临诸多挑战，最终未能成为主流农业技术。

本文将从免耕的必要性、实施方法、成功案例及其面临的困境四个方面展开探讨，旨在总结免耕农业的发展经验，并为未来农业可持续发展提供有益的借鉴。

### 5.1.1 为什么要免耕？

传统农业耕作方式，如深翻、犁耕等，虽然在短期内能够改善土壤透气性、抑制杂草生长，但从长期视角来看，这些措施会对土壤生态系统造成诸多负面影响。侯光炯（1987）指出，传统耕作会破坏土壤结构，进而引发水土流失，同时导致土壤有机质含量下降、肥力衰退。谢德体等（1994）的研究进一步表明，翻耕行为会加速土壤微生物对有机质的分解，造成土壤碳库损失，威胁农业的可持续发展。

免耕农业以减少对土壤的干预、维持土壤自然结构为核心目标，旨在保障土壤水、气、热、肥的动态平衡。研究成果显示，免耕模式能够有效降低土壤侵蚀程度，提升水分利用效率，增加土壤有机质含量，同时还能削减机械操作与燃料成本。尤其在干旱和半干旱地区，免耕能够显著提高土壤的持水能力，缓解旱灾的影响（谢德体等，1989）。

### 1. 自然免耕对土壤结构的影响

自然免耕能够保持土壤结构的稳定性，提高土壤的透水性、通气性和养分供给能力。研究表明，采用自然免耕后，土壤中的水稳性团聚体增加30%–50%，腐殖质含量提升10%–20%，微生物活性也得到增强。由于自然免耕土壤的孔隙度较高，能够维持合理的固、液、气三相比例，因此在持水保肥方面表现出色。此外，长期免耕有助于改善土壤团粒结构，使土壤更加疏松，为植物根系生长创造有利条件（谢德体等，1991；谢德体&曾觉廷，1990）。在水田环境中，自然免耕模式构建起适合水旱作物复种轮作，以及鱼、萍、鸭周年共生的稻田生态系统，有效促进了土壤内、外部环境间的物质、能量和信息交换，实现水、热、气、肥的协调统一，增强土壤的自调能力（谢德体&魏胡富，1994）。

### 2. 自然免耕对水土流失的影响

侯光炯（1987）认为，水土流失的主要原因是土壤干燥导致表层土壤结构破坏，进而加剧侵蚀。自然免耕通过增加地表植被覆盖、减少翻耕扰动，以及保持土壤内部水分平衡，有效抑制径流形成，大幅降低土壤侵蚀率。谢德体和曾觉廷（1989）的研究发现，在自然免耕农田中，毛管水主导的水势梯度得以形成，土壤贮水能力提高20%–30%，降水利用率也随之提高。余忠明（2008）的研究显示，在相同气候条件下，免耕田的水土流失量仅为传统耕作田的5%左右，水土保持效果十分显著。

### 3. 自然免耕对作物产量的影响

自然免耕模式在保持土壤水分、优化土壤结构的基础上，显著提升了作物的生长效率。研究发现，自然免耕能够为作物创造稳定的生长环境，增强根系活力与养分吸收能力，从而实现水稻、小麦等作物的增产（谢德体，1989）。在实际推广应用中，采用自然免耕的水稻田产量提高了10%–30%，再生稻的生长也得益于免耕环境的稳定性（谢德体 & 魏胡富，1994）。

### 4. 自然免耕的经济效益

自然免耕不仅能够提高作物产量，还能有效降低农业生产成本。由于减少了耕作次数，在节约燃油和劳动力成本的同时，还降低了对化肥和农药的依赖，进而显著提升经济收益。相关研究表明，20世纪80年代自然免耕技术累计推广面积达2000万亩，农户生产投入降低20%–30%，作物增产10%–30%，山区稻田单产提高50–70kg/亩。此外，稻田生态系统形成的鱼–萍–鸭或稻–鱼共生模式，使净收益增加15%–25%（谢德体，1989）。

### 5. 自然免耕的生态效益

推广免耕技术有助于推动农业生态系统的可持续发展。通过减少土壤翻耕和外部投入，能够降低农业生产对环境造成的负面影响，包括减少化肥流失对水体的污染，以及降低温室气体排放等。同时，免耕模式还能改善生物多样性，为土壤微生物和有益生物营造更为稳定的生存环境（谢德体&魏胡富，1994）。

综上所述，自然免耕技术在改善土壤结构、防治水土流失、提高作物产量、降低生产成本，以及促进生态环境可持续发展等方面成效显著。这些研究成果充分验证了侯光炯院士提出的自然免耕理论的实践价值，也为未来农业可持续发展提供了坚实的科学依据。

#### 5.1.2 如何做到自然免耕？

自然免耕不仅仅是不翻耕，而是一套完整的土壤管理体系，必须事先进行充分的土壤改良，以确保免耕的长期稳定性（侯光炯，1987）。“小三化”和“大三化”是侯光炯院士提出的免耕准备工作核心概念（宜宾自然免耕研究所，2023）。



图5.2 免耕技术中的“小三化”与“大三化”

(1) 小三化：改善土壤内部结构

小三化指的是在免耕前对土壤进行结构化、腐殖化、细菌化处理，以增强土壤的稳定性和生物活性（侯光炯等，1987；中国农业土壤概论编委会，1982）。

➤ **结构化**：通过施用有机肥、深耕改良和秸秆覆盖，促进土壤团粒结构的形成，提高透水性和保水性，水稳性团聚体 $\geq 40\%$ ，减少板结。

➤ **腐殖化**：利用绿肥种植、秸秆覆盖和还田，以及有机肥施用，提高土壤有机质含量，腐殖质含量 $\geq 3\%$ ，增强土壤养分供应能力。

➤ **细菌化**：通过不翻耕的方式，促进土壤微生物的繁殖，使有益菌群占据优势，微生物量碳 $\geq 450\text{mg/kg}$ ，提高土壤的自我修复和养分转化能力。

(2) 大三化：优化农田生态系统

大三化是指在免耕实施过程中，需要采取林网化、渠网化、复种化等措施，以确保土壤水肥气热的稳定（宜宾自然免耕研究所，2023）。

➤ **林网化**：在农田四周种植防护林，减少风蚀和蒸发，提高局部小气候的稳定性。

➤ **渠网化**：建立完善的田间水利系统，使水分能够均匀分布，并减少水分流失。

➤ **复种化**：通过不同作物的轮作和间作，优化土壤养分循环，提高土地的生产力。

(3) 自然免耕的技术关键：“四连续四不要”

水田自然免耕技术以连续免耕不要翻、连续垄作不要平、连续浸润不要干、连续植被不要荒为核心，通过垄沟微地形构建（如垄作增厚耕作层、扩大土体表面积），优化土壤水热气肥的运移（侯光炯，谢德体，1987；谢德体，曾觉廷，1990）。

表5.1 自然免耕的技术关键

水田自然免耕的技术关键	做法	目的
连续免耕的技术不要翻	不翻耕土壤或减少不必要的耕作	通过土壤结构保护、生物活动替代机械扰动和系统自维持能力构建，摒弃传统翻耕对土壤的破坏性干预，保持土壤通气性和水分储存能力
连续垄作不要平	永久性垄沟地形构建与土壤结构动态维护	通过地形改造替代耕作干预，通过垄沟地形扩大毛管水浸润范围，构建具有自维持能力的土壤生态系统
连续浸润不要干	通过垄沟地形设计、覆盖保墒和微生物协同构建的自维持水文系统	保持土壤湿润，利用毛管水持续供给土壤水分，减少地表蒸发和径流损失
连续植被不要荒	种植多物种作物和覆盖作物残茬	实现农田全年植被连续覆盖，避免土壤裸露导致的土壤退化

### 5.1.3 自然免耕的成功案例

中国在20世纪80年代和90年代进行了一系列的免耕试验，取得了显著的成果。1980年代以来，全国累计推广自然免耕超过2000万亩，增产幅度达10%–30%。其中，水田自然免耕是最为成功的案例之一。以侯光炯院士为代表的科学家团队，在四川、贵州等地进行了水田免耕试验，结果表明，在免耕条件下，水稻和小麦的产量都有不同程度的提高，同时土壤有机质含量显著上升，水分利用效率提高，减少了农业投入（侯光炯，1987–2）。其主要成果如下：

表5.2 自然免耕农业的成效

主要成果	详情
水稻增产效果	免耕水田比传统耕作田增产10%–30%，每亩水稻增产50–90公斤（谢德体等，1994）
小麦增产增收效果	小麦免耕试验在冬水田中推广200万亩，总增收4亿公斤（谢德体等，1989）
旱地免耕连作模式增产效果	在四川丘陵区推广“麦–稻–玉”免耕连作模式，通过连续作物覆盖和秸秆还田，实现高效的土壤养分循环和水分保持。试验地年三熟合计亩产达到了1091公斤，突破传统旱地作物产量限制（谢德体等，1995）
节水效果	连续浸润免耕农田的水分利用效率为1.2–1.5kg/m <sup>3</sup> ，明显优于传统淹灌的0.8–1.0kg/m <sup>3</sup> ，以及旱作灌溉的0.5–kg/m <sup>3</sup> 。利用垄沟系统实现“滴水归田”。降雨时，垄面径流迅速汇入沟内储存，干旱时通过毛细作用回润垄体，形成“土壤水库”效应（侯光炯，1987–3，谢德体等，1990，谢德体等1994，张磊，2002）
土壤有机质增量	连续浸润免耕农田的有机质含量为25–30g/kg（年增0.3–0.5g/kg），而传统淹灌农田的有机质含量为15–20g/kg（年减0.1–0.2g/kg），旱作灌溉农田的有机质含量为10–15g/kg（基本稳定）。（谢德体&陈绍兰，1987；谢德体等，1994，张磊，2002）
稻田CH <sub>4</sub> 排放	连续浸润免耕农田的CH <sub>4</sub> 排放是120–150kg/ha，比传统淹灌稻田的排放少一半（传统淹灌稻田为300–400kg/ha）。（谢德体等，1994，张磊，2002）
劳动力投入	连续浸润免耕农田的劳动力投入为15–20人日/ha，传统淹灌农田则为30–35人日/ha，旱作灌溉农田是25–30人日/ha。（谢德体&陈绍兰，1987；谢德体等，1994，张磊，2002）

### 5.1.4 免耕农业未成为主流模式的原因剖析

尽管免耕农业在20世纪80至90年代的中国取得显著成效并实现局部推广，但最终未能发展为主流农业技术。这一现象的形成，是技术局限性、社会经济发展以及政策变化等多重因素交织作用的结果，具体分析如下：

#### 1. 机械化农业发展与免耕技术的适配性矛盾

20世纪末以来，随着中国农业现代化进程加速，大型机械化耕作迅速普及，深翻、旋耕、犁耕等耕作方式占据主导地位。现代农业机械的广泛应用，使常规机械化耕作在作业效率和便捷性上远超免耕模式。免耕农业强调减少土壤扰动，需要配套特定的播种与管理机械，如免耕播种机。然而，在免耕技术推广初期，中国农业机械化水平有限，适配的免耕机械设备供给不足，导致农民实际操作困难重重（宜宾自然免耕研究所，2023）。即便后续免耕播种机有所发展，但其价格高昂、维护成本高，且操作技术门槛高，这些都成为农民广泛使用的阻碍。

此外，机械化农业依赖犁耕、旋耕作业实现破除土壤板结、均匀施肥与播种，这与免耕农业减少土壤扰动的核心原则相悖，致使大部分现有农机无法直接应用于免耕模式。对于已投资农机设备的农

户而言，转向免耕不仅意味着改变种植管理模式，还需额外购置专用设备，显著增加了经济负担（侯光炯，1987）。

### 2. 劳动力成本攀升下传统翻耕方式的管理方便性更具优势

20世纪90年代后，伴随中国农村劳动力大规模向城市转移，农业人口锐减，劳动力成本攀升。免耕农业虽能减少部分机械作业量，但田间管理环节却对人力投入要求更高：一方面，因不进行翻耕作业，杂草防控只能依赖人工拔除或化学除草剂，导致人工成本居高不下；另一方面，免耕模式需精准把控水分与养分供给，以维持土壤水气热肥的动态平衡；此外，秸秆覆盖还需额外开展收集、堆放与管理工作，进一步提升了操作复杂度（谢德体等，1994）。

反观常规深耕翻耕模式，高度契合机械化作业需求，农民借助大型拖拉机即可快速完成整地、播种、施肥等一系列流程，操作相对简易。在劳动力成本持续走高的背景下，免耕需要更细致的管理，对劳动力的额外需求，使得农民更倾向于选择管理更便捷、更易规模化操作的传统耕作方式（余忠明，2008）。

### 3. 免耕初期产量波动动摇农民信心

免耕农业具备提升土壤肥力、增加有机质等优势，但这些效益往往需要数年时间才能充分显现。在实施初期，由于土壤结构重构与微生物群落调整，作物产量可能出现波动甚至下滑（侯光炯，1987）。这种短期内收益不显著的状况，严重削弱了农民对免耕技术的信心。

相比之下，常规深耕翻耕模式尽管从长远来看可能导致土壤退化，却能在短期内保障相对稳定的产量。对于以农业为生、追求短期收益确定性的农民而言，免耕技术需要长期投入才能收获回报的特性，远不及传统耕作方式更符合他们维持生计的迫切需求（宜宾自然免耕研究所，2023）。

### 4. 政策导向转变削弱免耕推广动力

在免耕技术推广初期，政府通过设立专项试验项目、发放补贴资金等方式，积极鼓励农民尝试免耕技术（谢德体等，1991）。然而，随着农业现代化战略重心向大型机械化耕作倾斜，政策导向逐渐发生偏移。政府对常规机械化农业的扶持力度不断加大，而对免耕技术的补贴持续缩减，削弱了免耕技术对农民的经济吸引力。

在南方地区，水田种植对精细水管理的要求高，进一步加剧了免耕技术的推广难度（余忠明，2008）。与此同时，部分地方政府将农业机械化水平提升作为政绩指标，而免耕农业的技术路径与常规机械化耕作模式存在明显冲突。这种政策导向与技术路径的矛盾，不断压缩免耕技术的推广空间，使其未能成为主流农业模式之一（宜宾自然免耕研究所，2023）。

## 5.1.5 总结

免耕农业作为中国农业可持续发展探索中的重要技术路径，曾在局部实践中展现出显著成效，其通过减少土壤扰动、促进生态循环的创新理念，为农业绿色转型提供了新思路。然而，在向全国范围推广过程中，受多重因素制约，免耕技术逐渐淡出主流耕作体系。

技术适配层面，免耕农业与现代机械化农业存在根本性矛盾。随着大型农机具普及，常规深耕、旋耕模式在作业效率上占据绝对优势，而适配免耕的专用设备因技术门槛高、购置维护成本昂贵，难以大规模推广；经济与管理维度，农村劳动力大量外流导致人力成本攀升，免耕模式在杂草防控、秸秆处理、水肥精准管理等环节对人工投入要求更高，相比之下，常规翻耕机械化作业的高效便捷更受农户青睐；此外，免耕初期土壤生态系统重构引发的产量波动，与农户追求短期稳定收益的诉求相悖，叠加政策支持重心向机械化农业倾斜，进一步压缩了免耕技术的发展空间。

尽管当前我国的免耕农业未能广泛普及，但其“减少人为干预、恢复土壤自然功能”的核心理念，依然是农业可持续发展的重要理论基石。在农业加速向低碳减排模式转型的时代背景下，免耕技术的价值亟待重新审视与发掘。

免耕农业的推广，不仅需要全社会对土壤碳库功能形成系统性认知，更依赖政府相关支持政策的针对性调整。在现代农业科技蓬勃发展的当下，若能将精准灌溉系统、生物多样性保护技术、智能农机装备与生态补偿机制有机整合，解决免耕模式现存的技术瓶颈与经济短板，免耕农业有望突破发展桎梏，重新成为推动农业绿色转型、实现生态与经济效益双赢的核心路径。

## 参考文献

- [1] 侯光炯. (1987-1). 论中国式的水土保持自然免耕法. 《水土保持学报》.
- [2] 侯光炯等 (1987-2). 水田自然免耕技术综合研究报告. 《西南农业大学学报. 自然科学版》. S2.
- [3] 侯光炯. (1987-3) 大力推行“自然免耕”技术在经济上和科学上的重大意义 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 1987 (S2).
- [4] 四川省科学技术委员会 (1987). “水田自然免耕技术”成果鉴定意见 [J]. 西南农业大学学报. 自然科学版》. S2.
- [5] 侯光炯, 谢德体. (1987) 水田自然免耕技术规范 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), S2.
- [6] 谢德体, 陈绍兰. (1987) 试论水田自然免耕与稻田资源的合理开发利用 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 1987 (S2).
- [7] 谢德体等. (1989). 水田自然免耕土壤水分特征研究. 《西南农业大学学报. 自然科学版》. S2.
- [8] 谢德体, 曾觉廷. (1989) 水田自然免耕土壤水分特征研究 [J]. 西南农业大学学报, 1989, (1): 7-12.
- [9] 谢德体. (1989) 水田自然免耕技术的应用推广经验 [J]. 山区开发, 1989, (4): 40-42.
- [10] 谢德体, 曾觉廷 (1990). 水田自然免耕土壤肥力特征的研究 [J]. 中国农业科学, 1990, (1): 37-44.
- [11] 谢德体等. (1991). 水田自然免耕土壤有机质变化特性研究. 《西南农业大学学报. 自然科学版》.
- [12] 谢德体等. (1994). 水田自然免耕土壤代谢特征研究. 《西南农业大学学报. 自然科学版》.
- [13] 谢德体, 魏胡富. (1994). 自然免耕下的稻田生态系统 [J]. 应用生态学报, 1994, 5 (4): 415-421.
- [14] 谢德体等 (1994). 水田不同耕作方式下土壤酶活性及生化特性的研究 [J]. 土壤通报, 1994, (5): 196-198.
- [15] 余忠明. (2008). 自然免耕技术在水土保持中的作用分析. 《中国水土保持科学》.
- [16] 宜宾自然免耕研究所. (2023). 推进免耕所科研创新能力建设的对策和建议. 《宜宾科技》.
- [17] 中国农业土壤概论编委会. (1982). 《中国农业土壤概论》. 农业出版社.
- [18] 张磊. (2002) 稻田自然免耕体系土壤微生物及有机质周转研究 [D]. 西南大学, 2002.

## 5.2 案例2：印度安得拉邦的社区主导自然农法

农业是印度国民经济的重要支柱，贡献了全国18%的国内生产总值（GDP），并吸纳了43%的劳动力就业。印度安得拉邦位于印度东南部，农业是该邦最重要的经济部门，约62%的人口从事农业，农业占国内生产总值的28%。安得拉邦被誉为“印度的米粮仓”，拥有800万公顷耕地，其中140万公顷用于园艺作物种植，是印度最大的水果、禽蛋和水产养殖产品生产州（Thallam & Renduchintala, 2020）。

近年来，印度的常规化学农业生产模式正面临严峻挑战：土壤退化、生物多样性锐减、温室气体排放加剧以及水资源过度消耗等问题日益突出。具体而言，长期过度耕作和化肥、农药施用导致土壤结构破坏、微生物群落减少；同时，频发的极端气候事件（如持续干旱、极端热浪和突发性洪水）进一步加剧了农业生产困境，造成作物减产、地下水资源枯竭等连锁反应。这些因素共同推高了农业生产成本，压缩了农民利润空间，致使大量农户陷入债务恶性循环。

为应对这一系列挑战，安得拉邦政府于2016年在全州推行“社区主导自然农法”（Andhra Pradesh Community-managed Natural Farming, APCNF）计划。该计划制定了明确的发展目标：到2031年，引导600万农民从化学农业转型至可持续的自然农法体系，预计覆盖耕地面积达600万公顷（Galab et al., 2024），成为全球最大的生态农业项目。这一大规模农业转型项目不仅着眼于生态环境修复，更致力于重建农业经济的可持续发展模式。

### 5.2.1 安得拉邦社区主导自然农法的起源和现状

2016年，安得拉邦政府农业部启动了一项名为“安得拉邦零预算自然农法”（A.P Zero Budget Natural Farming）的计划。该计划是在邦政府2004至2014年间实施的“安得拉邦社区管理可持续农业（A.P Community Managed Sustainable Agriculture）”项目基础上发展而来。安得拉邦社区主导自然农法（APCNF）项目现由非营利性公司农民赋权组织RySS（Rythu Sadhikara Samstha, 英文译名为Farmer Empowerment Organization）负责实施。该机构的主要目标是减少对化学投入品的依赖、推广可持续农业实践、改善农民福祉。

RySS通过示范农场、农民培训、妇女自助小组（Self-Help Groups, SHGs）等方式，整合传统农业知识与现代生态农业实践，促进生态农业技术的推广与应用。项目初期主要侧重于非化学方式的病虫害管理，后期则逐步引入了土壤改良和水资源保护等干预措施。同时，该机构还开展政策研究与数据监测，为政府制定可持续农业政策提供科学依据。

截至2023年10月，APCNF已覆盖26个地区的3730个村庄，吸引85.1万农户参与，推广面积达27.8万公顷，其中90%的参与者为小农或边缘农户（GIST（Global Impact and Sustainability Trust）Impact 2023报告）。这一计划在印度国内外获得了广泛认可，不仅致力于确保当地社区能够获得健康、安全且价格合理的食物，并被视为全球范围内应对气候变化和粮食安全挑战的成功案例（Thallam & Renduchintala, 2020, Tezkhabin, 2024）。

### 5.2.2 安得拉邦社区主导自然农法的主要原则和措施

APCNF自然农法倡导与自然合作，而非对抗自然，强调利用自然生态过程解决人类活动引发的农业问题。该模式主张通过本地资源（如牛粪、尿液、植物残留物等）制作天然肥料和农药，避免化

学投入，降低农业成本并恢复生态平衡。根据每一块土地的生态条件，逐步建设和改善，改进的“配方”是模仿自然界的运作过程。APCNF自然农法遵循九大原则，以确保农业生产的生态可持续性：



图5.3 APCNF自然农法九原则

1. **全年土壤覆盖**：土壤应全年365天被活根作物覆盖。始终让土壤被作物覆盖（活根原则）可以最大化光合作用，而光合作用能够驱动土壤微生物的活动，使更多碳通过根系分泌物进入土壤。

2. **作物多样化**：在农场或更广阔的田地范围内，应种植多样化作物（15 – 20种），包括树木和食物。作物的多样性越高越好，这有助于构建更加稳定和健康的生态系统。

3. **最小化土壤扰动**：应尽量减少翻耕，以保护土壤结构。推荐采用免耕或浅耕的方式，这样可以避免对土壤造成过度破坏。

4. **农牧结合**：将动物纳入农业体系，构建综合种养体系，这对于促进自然农业至关重要。增加投入土壤有机质的数量和多样性非常重要，包括作物残茬、牛粪、堆肥等。这些有机质能够为土壤提供丰富的养分，促进土壤的肥力提升。

5. **生物接种剂应用**：用生物接种剂来激活或增强土壤生物活动。健康的土壤微生物群落是保持和增加土壤有机质的关键，它们对于土壤健康、植物健康，进而对动物和人类健康都至关重要。生物接种剂有多种制作方式，在印度，最常见的方法是利用动物粪便、尿液和未污染的土壤发酵而成。

6. **作物残茬覆盖**：即使在没有活体植物的时期，土壤也不应裸露，否则会导致土壤微生物缺乏食物。在无法种植的期间，至少应覆盖作物残茬作为覆盖物，以此保护土壤，维持土壤微生物的生存环境。

7. **优先使用本土种子和农民自有种子**：这些种子更适应当地的环境和气候条件，能够更好地发挥其生长优势，减少对外部种子的依赖，同时也保护了当地的农业生物多样性。

8. **生态病虫害管理**：害虫管理应通过生态措施（如病虫害综合管理）来实现，必要时可以使用植物源农药。这种方式更加环保、可持续，避免了化学农药对生态环境的破坏，同时也能有效控制病虫

害的发生。

**9. 杜绝化肥、农药和除草剂：**禁止使用合成肥料和其他化学杀虫剂、除草剂等投入品，因为这些化学物质会破坏农业的再生过程，干扰自然生态系统的平衡，影响土壤的健康和肥力。

APCNF自然农法的这些原则，也是再生农业的通用原则。在安得拉邦的实践中，这些原则不仅能够有效降低生产成本，还能显著提升农业系统的韧性和可持续性，为农业的长期发展奠定坚实基础。

在APCNF自然农法的实践过程中，依托本地资源以及农民的实验探索，成功开发了7种纯天然生物制剂（见表1）。这些生物制剂广泛应用于土壤肥力提升、病虫害生态防控以及种子健康保障等多个关键环节，极大地减少了对外部投入品的依赖，彻底消除了对合成投入品的需求。通过这种方式，帮助农民们构建起闭环农业生态系统，培育出成本更低、环境负担更小、气候适应性更强的农业生产模式。

表5.3 APCNF自然农法项目推荐的生物制剂

类型	制剂名称	核心功效	关键成分
微生物激活剂	Jeevamrutham	土壤微生物群落培育	牛粪+牛尿+豆粉+红糖+土壤+水
生物肥料	Panchagavya	多营养素生物肥料	牛粪+牛尿+红糖+牛奶+酸奶+牛酥油+椰子水+香蕉
生物农药	Dashapama Kashayam	广谱抑菌防病	10种药用植物叶+牛尿+水
植本杀虫剂	Nemastra	预防和控制虫害	印度楝叶+水+牛尿
草本杀虫剂	Agniast	预防和控制虫害	印度楝叶+水+牛尿+烟草+青辣椒+大蒜
固态缓释肥	Ghanajeevamrutham	长效土壤改良	牛粪+牛尿+豆粉+红糖+土壤
种子处理剂	Beejamrutham	种子消毒+促萌发	石灰+牛粪+牛尿+水

备注：详细制作方法，见本节附件表5.1。

这些生物制剂的制作充分依赖本地生物资源，其原料主要来源于农场废弃物（如牛粪、牛尿）或农民能够方便获取的物品，完全摒弃了化学肥料、农药和转基因种子的使用。其制作过程简单易行，农民可以结合自身的经验与创新，将这些方法灵活地应用到自己的田地和作物种植中。

下文是一个视频资料：视频中讲述了一位农民的故事。他曾经在城市务工，后来回到家乡。在APCNF项目的指导下，他采用自然农法、间作种植以及纯天然生物制剂等农业技术。通过这些方法，他成功地降低了农业生产成本，同时提高了作物产量，并获得了稳定的收入。他的案例极具示范效应，吸引了越来越多的农民加入这一行列。



图5.4 安得拉邦社区主导自然农法（APCNF）视频案例



扫码查看翻译后的视频

链接：<https://pan.baidu.com/s/10rlhiYo0A2YUzHj0hcNeMA?pwd=z2yw> 提取码：z2yw

### 5.2.3 APCNF自然农法的成效

瑞士的GIST Impact 2023报告（GIST Global Impact Solutions Today）对安得拉邦社区主导自然农法的真实成本效益进行了综合评估。研究团队在13个地区通过作物收割实验评估产量，并于2020年至2022年间，在安得拉邦三个不同农业生态区内的十二个选定村庄，针对不同类型农户开展的大规模入户调查，对自然农法农户和其它农业体系的农户进行了多维度的对比研究。报告的主要发现包括：

#### 产量与收入提升：

自然农法农民的作物种类更为多样，整体产量有所增长。投入成本大幅下降，77%的自然农法农场报告种植成本减少，67%的农场表示收入增加。与传统农业相比，自然农法农民的每公顷净收入几乎翻倍，尤其以克里希纳-戈达瓦里三角洲地区增长最为显著。

2022年出版的《自然农法成功案例汇编》显示，通过访问安得拉邦全州范围内采用自然农法（CNF）和非自然农法（化学农业）的农户，并通过3,152次作物收割实验（其中自然农法农户1,979次）系统评估自然农法的成效。结果显示，自然农法显著降低了农药和化肥等投入成本（平均每户节省约780元人民币），总支出成本减少约550元。虽然整体产量与化学农业相当，但在玉米、鹰嘴豆、番茄等作物上，自然农法产量更高；在水稻、花生、辣椒等作物上，销售价格更优。综合来看，自然农法每公顷净收益比化学农业高出约1,530元，增长幅度达27%。此外，自然农法农户的年农业收入平均为15,470元，比化学农业农户高出约1,360元，增幅约10%。总体来看，自然农法不仅降低了生产成本、提高了收益，改善了农户的经济状况与生活福祉。

#### 土壤碳储存与气候变化适应能力提升：

在气候适应方面，APCNF通过覆盖作物技术增强了土壤抗旱能力，有效保持土壤水分，减少了极端降雨对作物的影响（RySS, 2021）。与单一作物种植相比，多样化种植体系提升了农业生态系统的稳定性，降低了极端气候事件对产量的冲击（FAO, 2024）。APCNF还强调使用本地种子品种，减少对化学投入品的依赖，从而提升作物的抗病虫害能力和适应气候变化的稳定性（Agroecology India, 2023）。

在碳储存方面，APCNF倡导农林复合经营与植树造林，采用豆科固氮树种和深根系树种间作，不仅提升了生物量碳储量，还改善了土壤肥力（FAO, 2024）。此外，免耕和覆盖作物减少了土壤扰动，防止碳流失，进一步增强了农业生态系统的稳定性。

#### 健康状况改善：

自然农法农民的健康风险明显降低。相比之下，自然农法农民因疾病损失的工作日平均为121天，

而传统农民则为189天。此外，自然农法家庭的饮食多样性提高，更易获得本地种植的水果和蔬菜，而传统农户更多依赖外部市场。

### 社区凝聚力增强：

自然农法村庄的社会凝聚力明显增强，小农户群体受益尤为显著。农民更积极参与合作组织，社区整体参与度较传统农业村庄更高，显示出更强的集体行动能力。

### 环境效益显著：

自然农法促进了土壤微生物多样性和土壤有机质积累，采用覆盖作物和再生农业实践减少了灌溉需求。化学投入品使用减少，降低了温室气体排放，并提高了土壤碳储存能力。

### 市场依赖性降低：

自然农法农民更多依靠本地销售和自给自足，较少受外部市场价格波动影响，而传统农民则对外部市场依赖较高。

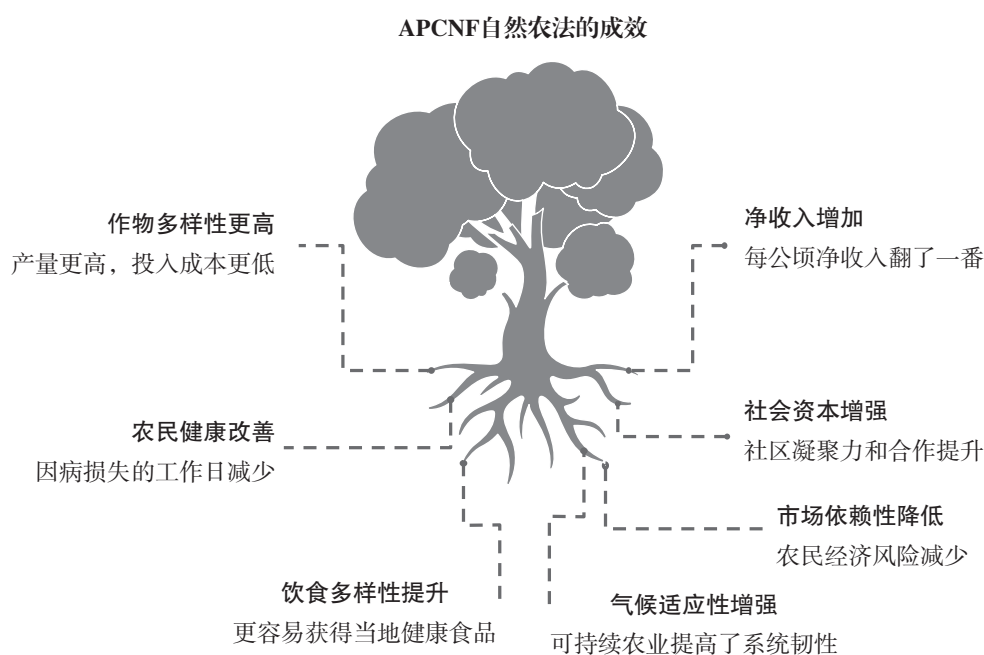


图5.5 APCNF自然农法的成效（GIST Impact 2023报告）

## 5.2.4 APCNF自然农法的未来与挑战

凭借丰富的实践经验和显著的成效，APCNF自然农法已在印度国内外获得广泛关注。RySS被指定为印度国家支持机构（National Support Organization, NSO），负责协助其他邦推广自然农法，目前已拓展至中央邦（Madhya Pradesh）、拉贾斯坦邦（Rajasthan）、梅加拉亚邦（Meghalaya）和奥里萨邦（Odisha）等地。

国际层面上，联合国粮农组织（FAO）、德国国际合作机构（GIZ）等组织正在研究RySS的模式，并考虑在其他国家推广类似的自然农法项目。2022年，印德全球农业生态研究与学习学院

（IGGAARL）正式成立。该学院由RySS与德国政府、安得拉邦政府合作设立，作为项目的执行机构，专注于农业生态领域的研究，通过培训和能力建设向农民传播知识。

APCNF展现了自然农法在改善农民生计、恢复生态环境和保障粮食安全方面的潜力。印德农业生态学院（IGGAARL）未来计划培养数千名“农民科学家”，并在每个农民支持中心为每五名农民科学家配备一名导师，以建设“气候适应型村庄”，进一步扩大自然农法的影响力。

在政策支持和市场拓展的推动下，APCNF有望成为全球生态农业发展的典范。然而，根据Galab等（2024年）的研究，APCNF在推广过程中仍面临若干挑战：

- **资源供给不足：**牛粪资源和微生物接种剂供应有限，影响了自然农法核心投入物的可持续使用。

- **自然农法全面转型率低：**目前仅有2.5%的农民完全采用自然农法耕作，还有16%的农民部分依赖化学农业，转变需长期教育。

- **培训与推广资源有限：**自然农法需要精细化管理，部分农民因技术复杂或短期收益不明显而放弃，全面转型需要持续的支持和引导，现有的教育和推广体系尚不足以满足大规模转型需求，需进一步加强农民培训与持续指导。

- **市场体系不完善：**自然农法产品缺乏统一认证标准，溢价销售困难，多数仍与传统农产品混销，农民收入提升受限。

- **资金支持需求大：**政府计划到2031年将自然农法推广至600万农民，当前资金支持仍不足，需要更多投入以确保目标顺利实现。

总体来看，虽然APCNF已取得显著成效，并展现出良好的扩展潜力，但要实现长期可持续发展，仍需在资源保障、农民转型、市场机制建设和政策资金支持等方面持续发力。

### 5.2.5 印度与中国自然免耕实践对成都平原生态农业的启发

安得拉邦自然农法推广项目（APCNF）为生态农业的系统化转型提供了多维度启示。该项目构建了“政策驱动—技术赋能—社区实操”的闭环机制：由政府提供政策与资金支持，社会组织和专业机构承担组织与培训职能，社区则在项目设计与执行中发挥主导作用。更为关键的是，项目强调融合传统农业知识与现代生态技术，避免技术外来化和“去本土化”倾向，从而增强了农户对生态农业的认同感与持续参与动力。此外，APCNF整合农业、科研、市场等多方力量，形成“政策—技术—市场”协同联动的跨部门合作网络，有效提升了项目的推广效率与系统韧性。

对于正在探索农业绿色转型路径的成都平原而言，APCNF的经验不仅具备现实借鉴意义，也与本地农业文化和生态基础形成高度互补。一方面，成都平原拥有丰富的林盘—稻田—灌渠复合农田景观，其背后蕴含着以林网化、渠网化为核心的“大三化”农业思想体系，正如侯光炯院士所提出的那样，这是适合西南地区农业发展的重要基础性资源。另一方面，自然免耕技术路径，特别是连续免耕、连续复种模式，在提升土壤健康、减少温室气体排放方面有显著优势。此外，稻田减排被列为农业减排“十大行动”之一，为自然免耕的政策再聚焦与推广提供了机遇窗口。

基于此，若能将APCNF模式的“多元协同+社区主导”机制与成都平原的农业生态文化基础及自然免耕技术路径有机结合，或将为自然免耕推广开辟出一条更具地方性与可持续性的制度化发展路径。具体而言，可以尝试：

- 在自然免耕试点推广中引入社区参与式机制，让农户在方案设计、执行与评估中真正拥有话语权；

- 借助地方政府的政策引导与资金支持，推动“林网—水网—农田”系统的生态重构；
- 联合科研机构与社会，开展农民培训、田间试验与技术转化，形成“边试验、边优化”的本地化技术适配机制；
- 打通“传统知识—科学技术—社区行动”之间的路径关系，构建多元主体协同推进的知识—行动网络。

这种融合本地知识体系、生态农业科技与社区治理机制的探索路径，不仅有助于突破当前自然免耕推广中的制度障碍与认知瓶颈，也有望激活农户在生态农业与气候行动中的主体性与创造力，为成都平原乃至更广区域的农业可持续转型提供可复制、可扩展的范式。

## 参考文献

- [ 1 ] Andhra Pradesh Community Managed Natural Farming | APCNF <https://apcnf.in>
- [ 2 ] 联合国粮农组织的农业生态学案例数据库 Database | Agroecology Knowledge Hub | Food and Agriculture Organization of the United Nations ([fao.org](http://fao.org))
- [ 3 ] Dorin, B., Poisot, A-S., & Vijay Kumar, T. (2024). 《农业产业化 vs 农业生态化两种情景在安得拉邦2050年的宏观经济对比》 AGRO-INDUSTRY versus AGROECOLOGY? Two macroeconomic scenarios for 2050 in Andhra Pradesh, India AgroEco 2050-A Foresight Study- CIRAD, RySS, FAO - Andhra Pradesh Community Managed Natural Farming; Brief version: Re-thinking food systems in Andhra Pradesh, India. How natural farming could feed the future
- [ 4 ] Galab, S., Bhaskara Rao, G., Samba Murty, C., Sree Rama Raju, D., Prudhvikar Reddy, P., Ravi, C., & Ramu Naidu, J. (2024). *Assessing the Impact of APCNF: A Comprehensive Approach Using Crop Cutting Experiments - Final Report 2022-23*. Institute for Development Studies Andhra Pradesh (IDSAP). APCNF Impact Assessment Report 2022-23 | IDS Andhra Pradesh - Andhra Pradesh Community Managed Natural Farming
- [ 5 ] GIST Impact. (2023). Natural Farming Through a Wide-Angle Lens: True Cost Accounting Study of Community Managed Natural Farming in Andhra Pradesh, India. Switzerland, GIST Impact, Global Alliance for the Future of Food. [https://gistimpact.com/wp-content/uploads/Natural-Farming-Through-A-Wide-Angle-Lens\\_July-2023\\_Final-1.pdf](https://gistimpact.com/wp-content/uploads/Natural-Farming-Through-A-Wide-Angle-Lens_July-2023_Final-1.pdf) (31/07/2023)
- [ 6 ] Patel, N. et.al. (2022). Compendium of Success Stories of Natural Farming. NITI Aayog ISBN: 978-81-953811-4-2.
- [ 7 ] Thallam, V. K. & Renduchintala. S. (2020) Simple solutions to complex problems. [www.Rural21.com](http://www.Rural21.com).
- [ 8 ] Tezkhabin, K. (2024). Gulbenkian Prize 2024: Andhra Pradesh's Natural Farming Initiative Wins Global Recognition. <https://tezkhabin.com>.
- [ 9 ] Agroecology India. (2023). *Assessing the resilience of APCNF practices during extreme weather events*. Retrieved from <https://agroecologyindia.org>

- [ 10 ] Center for Study of Science, Technology and Policy (CSTEP). (2020). *Life cycle assessment of Zero Budget Natural Farming and conventional agriculture in Andhra Pradesh*. Retrieved from <https://apcnf.in>
- [ 11 ] Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). *The role of agroecology in climate adaptation and carbon sequestration*. Retrieved from <https://www.fao.org>
- [ 12 ] International Center for Research in Agroforestry (ICRAF). (2022). *Soil carbon enhancement through natural farming in Andhra Pradesh*. Retrieved from <https://www.cifor-icraf.org>
- [ 13 ] Rythu Sadhikara Samstha (RySS). (2021). *Building climate resilience through APCNF practices*. Retrieved from <https://apcnf.in>
- [ 14 ] A Critical Study on the Present Status and Scope of Natural Farming in the State of Andhra Pradesh, India, December 23, 2024 A Critical Study on the Present Status and Scope of Natural Farming in the State of Andhra Pradesh, India – Consortium for Agroecological Transformations
- [ 15 ] Agroecology and Climate Change rapid evidence review. Performance of Agroecological Approaches in low and middle income countries. -Consortium for Agroecological Transformations
- [ 16 ] Sinclair, F., Wezel, A., Mbow, C., Chomba, S., Robiglio, V., and Harrison, R. 2019. “The Contribution of Agroecological Approaches to Realizing Climate-Resilient Agriculture.” Rotterdam and Washington, DC. Available online at [www.gca.org](http://www.gca.org). The Contributions Of Agroecological Approaches.pdf

附表5.1



四川大学土壤活力研究与提升实验室

印度安得拉邦社区管理自然农业 (APCNF) 项目推荐的生物制剂  
旨在通过自然和可持续的方法提高土壤肥力, 促进植物健康, 并保护作物

制剂名称-->	1. Jeevamutham	2. Panchagavya	3. Dashapama Kashayam	4. Neemastra	5. Agniastra	6. Ghanajeevamutham	7. Beejamutham
原料 / 主要功效	提供有益微生物, 增强土壤肥力, 促进植物生长	作为富营养的生物肥料, 增强土壤肥力, 促进植物生长和提高作物产量	作为植物基生物农药, 控制预防害虫和疾病, 保护作物健康	基于印度楝的杀虫剂, 有效控制多种害虫, 保护作物不受虫害影响	作为草本杀虫剂, 利用多种草本成分, 控制和预防害虫, 保护作物	固态的Jeevamutham, 增强土壤肥力和有益微生物, 长期提供营养	用于种子处理, 保护种子免受土传病害和害虫侵害, 提高发芽率和作物健康
牛粪	10公斤	5公斤	-	-	-	100公斤	5公斤
牛尿	10升	3升	10升	10升	10升	3升	5升
红糖 (未精制的甘蔗糖)	2公斤	500克	-	-	-	2公斤	-
豆粉 (如鹰嘴豆粉)	2公斤	-	-	-	-	2公斤	-
土壤	1把	-	-	-	-	1把	-
水	200升	-	20升	100升	100升	-	20升
牛奶	-	2升	-	-	-	-	-
酸奶	-	2升	-	-	-	-	-
牛酥油	-	1升	-	-	-	-	-
椰子水	-	3升	-	-	-	-	-
熟香蕉	-	12根	-	-	-	-	-
十种不同植物的叶子	-	-	3公斤	-	-	-	-
印度楝叶	-	-	-	5公斤	3公斤	-	-
烟草叶	-	-	-	-	500克	-	-
青辣椒	-	-	-	-	500克	-	-
大蒜	-	-	-	-	500克	-	-
石灰	-	-	-	-	-	-	50克
来源: 印度安得拉邦社区管理自然农业 (APCNF) 项目 www.apcnf.in	1. 在一个大容器中彻底混合牛粪和牛尿 2. 加入红糖和豆类面粉并充分混合 3. 加入一把土壤并充分混合 4. 加入200升水并充分搅拌 5. 在阴凉处发酵48小时, 每天搅拌两次	1. 将牛粪和牛酥油混合在一个宽口的泥罐中, 保持3天, 每天搅拌两次 2. 第四天, 加入牛尿、牛奶、酸奶、红糖、嫩椰子水和捣碎的香蕉 3. 充分混合内容物, 并用干净的布覆盖	1. 将十种不同植物的叶子捣碎或切碎 2. 将叶子放入一个大容器中, 加入牛尿和水 3. 发酵10天, 每天搅拌 4. 发酵后, 过滤液体	1. 将印度楝叶捣碎, 并在牛尿中浸泡24小时 2. 浸泡后, 加入水混合 3. 发酵48小时, 偶尔搅拌 4. 使用前过滤液体	1. 捣碎印度楝叶、烟草叶、青辣椒和大蒜 2. 将捣碎的成分加入牛尿和水中 3. 发酵15天, 每天搅拌 4. 使用前过滤液体	1. 将牛粪、牛尿、红糖、豆类面粉和土壤彻底混合 2. 让混合物在阴凉处干燥, 直到达到半固态 3. 储存干燥的混合物, 根据需要应用于土壤	1. 将牛粪、牛尿、石灰和水彻底混合 2. 在播种前将种子浸泡在这种混合物中约30分钟
汇总编辑: 四川大学土壤活力研究与提升实验室 2024.06.22							

### 5.3 案例3：恩斯特·戈茨的农林协同演替农业的理论与实践

恩斯特·戈茨（Ernst Götsch）作为瑞士的一名遗传学家，早期深耕植物基因研究领域，致力于提升作物产量。然而，在研究过程中，他敏锐察觉到现代常规化学农业发展模式的弊端：过度依赖化学肥料和单一作物种植，不仅加速了土壤退化进程、加剧生态系统脆弱性，更使农民陷入对高价外部投入品的深度依赖。为寻求更科学、更可持续的农业发展路径，戈茨于20世纪80年代移居巴西，在退化的牧场上开启了再生农业的探索之旅。

通过对森林生态系统自然演替（Natural Succession）过程的长期观察与深入研究，戈茨发现森林生态系统具备强大的自我维持能力。在缺乏人工干预的情况下，森林不仅能够保持稳定的生态结构，还能持续维持较高的生产力水平。这一发现给予他极大启发，促使他基于森林生态原理，发展出农林协同演替系统（Syntropic Farming）这一创新农业方法。

农林协同演替系统突破了传统农业发展模式，其核心理念在于模仿自然生态系统的演替过程，构建能够自我维持的农业生态体系。该系统充分发挥不同植物层次间的互补优势，通过优化光合作用效率、促进土壤生物量积累等方式，实现高效、可持续的农业生产。目前，农林协同演替系统已在巴西、秘鲁、越南等多个地区成功应用，成为退化土地生态修复、增强农业生态韧性的有效实践（Schulz等，1994；Ramirez，2022；Truong等，2023）。

#### 5.3.1 农林协同演替系统的理论基础

农林协同演替系统的理论源自生态学的演替理论（Ecological Succession Theory），次生演替理论揭示，自然生态系统在遭受外界干扰后，会遵循特定规律经历一系列有序的生物群落更迭过程，逐步朝着稳定且高效的顶极群落状态发展。恩斯特·戈茨在长期研究中发现，森林生态系统具备强大的自我修复能力——即使历经火灾、风暴等严重破坏，也能通过自然演替机制，重新构建起结构复杂、功能完备的生态体系。基于此，他提出：农业系统若能模仿森林生态系统的演替过程，便有可能摆脱对大量外部投入的依赖，实现生产力与生态平衡的长期可持续发展（Rebello & Sakamoto，2024）。

农林协同演替系统的理论框架主要涵盖四大核心要素：植物分层种植（Stratification）、动态演替（Natural Succession）、光合作用优化（Photosynthesis Maximization）和生态自我调节（Self-Regulating System）。

在植物分层种植方面，该系统借鉴森林垂直结构，将不同植物依据其高度、光照需求和生态功能进行科学搭配。基于生态系统的自然演替规律，系统设计注重时间-空间分层和物种演替，把植物分为先锋、中间和次生阶段。通过种植不同演替阶段的植物（如快速生长的先锋物种与长期稳定的乔木），模拟森林的垂直分层结构，最大化光合作用效率和资源利用（Agenda Goetsch，2024）。例如，顶层的高大乔木能够为下层植物提供遮阴庇护，有效调节微气候；中层种植咖啡、可可等经济作物，它们在适度光照条件下生长良好；地表覆盖各类地被植物，不仅可以稳固土壤、减少水土流失，还能抑制杂草生长，维持土壤湿度。这种立体种植模式将不同生命周期和光照需求的植物种植在同一区域，形成多层次的植物群落，不仅提高了生物多样性，还促进了生态系统的稳定性和生产力（Andrade等，2020；Rebello & Sakamoto，2024）。

动态演替机制则通过先锋物种-中期过渡物种-长期稳定物种的组合推动系统向更复杂、稳定的阶段发展。通过种植先锋物种和次生森林物种来快速恢复土壤肥力，这种方法不需要化学肥料、农药或重型机械，而是通过自然过程促进植物生长和土壤改良。以固氮树种为例，这类先锋植物能够将空气

中的氮气转化为植物可吸收的氮素，改善贫瘠土壤的肥力状况，为后续高价值经济作物的生长创造有利条件。通过物种组合和高密度种植推动农林系统向更复杂、稳定的阶段发展。随着时间推移，不同阶段的植物群落有序更替，最终形成稳定且高产的农业生态系统，这种动态平衡使得系统在无需外部输入（如化肥）下实现自给自足（Agenda Goetsch, 2024, Rebello & Sakamoto, 2024）。

光合作用优化是农林协同演替系统提高生产力的关键路径。系统采用高密度种植策略，通过合理配置植物种类和种植密度，最大限度提升单位面积的光合利用率。这种方式不仅显著增加了生物量产出，还强化了系统的碳固定能力，有助于缓解气候变化（Andrade等, 2020; Pardon等, 2018, Rebello & Sakamoto, 2024）。

在生态自我调节层面，农林协同演替系统高度依赖生物间的相互作用。通过多样化种植，构建复杂的生物食物网，利用物种间的关系自然控制害虫数量；同时，丰富的土壤微生物群落能够加速有机物质分解，促进养分循环，实现生态系统的自我维持与动态平衡（Andrade等, 2020; Rebello & Sakamoto, 2024）。

### 5.3.2 实践方法与典型案例

在实际应用领域，农林协同演替系统依托一系列科学且行之有效的方法，构建起可持续发展的农林生态体系，其核心实践方法主要涵盖高密度种植、修剪与生物质管理、水资源优化和协同演替等四大系统，各方法相互配合、协同发力。

高密度种植（High-Density Planting）深度复刻森林生态系统的空间利用智慧，通过在同一地块上分层布局不同类型的作物，充分挖掘垂直空间资源，既实现了光合作用效率的最大化，又显著提升了生物多样性水平。比利时的研究发现，相较于传统单一种植方式，通过垂直分层光捕获，农林协同演替系统的光合作用效率提升达30-50%（Pardon等, 2018），这意味着更多的太阳能被转化为植物生长所需的能量。

高密度分层种植所产出的丰富生物质，为修剪与生物质管理（Chop-and-Drop）策略奠定了物质基础。修剪和生物质管理是免耕和土壤改良的前提。作为农林协同演替系统的关键环节之一，定期修剪以控制植物间的竞争，刺激新生长，并将生物量返还土壤：修剪与生物质管理将植物修剪后的残体直接覆盖于土壤表层，这些生物质在自然分解过程中，持续为土壤补充有机质，提升土壤的保水保肥能力，同时为土壤微生物创造适宜的生存环境，促进微生物群落的繁衍与活性提升。这一过程中，永久性植被覆盖减少侵蚀，修剪后的植物残体作为有机质还田，不仅减少了对外部有机肥的依赖，降低生产成本，更在无形中增强了土壤的碳储存能力，助力实现农业碳中和目标（Andrade等, 2020; Rebello & Sakamoto, 2024）。例如秘鲁Ucayali地区试验中，土壤腐殖质含量增加15%（Ramirez, 2022）。比利时的田间数据显示，因树木根系和覆盖物作用，土壤侵蚀减少30-50%，碳固存速率比单一农田高20-40%（Pardon等, 2018）。

在水资源管理方面，农林协同演替系统采用等高线种植（Contour Planting）、雨水收集和深根植物配置等多种技术手段。等高线种植通过沿等高线方向布置作物，有效减缓坡面水流速度，增加雨水下渗量；雨水收集系统则将降雨进行收集和储存，为干旱时期的作物生长提供水源保障；深根植物促进水分下渗和养分循环，深根植物凭借其发达的根系，能够深入土壤深处汲取水分，增强系统的抗旱能力。在恩斯特·戈茨主导的巴西退化牧场恢复项目中，通过综合运用等高线种植与树木遮阴技术，成功降低了地表水分蒸发速率，显著提升了土壤湿度。该项目实施后，原本断流的6条河流都恢复了常年流水，实现了区域水资源生态的良性循环（Agenda Goetsch, 2024）。

协同演替 (Synergistic Succession) 作为农林协同演替系统的核心驱动机制, 强调通过人为引导生态系统的演替进程, 实现农业生态系统从简单到复杂、从低效到高效的有序转变。在实践中, 恩斯特·戈茨会根据不同区域的土壤条件、气候环境和发展目标, 制定个性化的演替计划。植物品种选择上优先选择适应当地气候的植物品种, 以降低管理难度, 增强系统稳定性 (Schulz等, 1994)。首先引入先锋物种, 如固氮植物和耐贫瘠植物, 它们能够快速适应恶劣环境, 改善土壤结构和肥力。例如在巴西热带雨林的退化区域, 种植速生固氮树种可以快速增加土壤中的氮含量, 为后续植物生长提供养分基础。

随着先锋物种改善土壤条件, 中期会引入具有经济价值的过渡性作物, 如各类水果、蔬菜和纤维作物, 这些作物在相对改良的土壤环境中生长, 既能带来经济收益, 又能进一步促进土壤生态系统的发育。最终阶段则以长期稳定的多年生植物群落为主, 包括高大乔木、经济林木等, 形成类似原始森林的稳定生态系统结构。此时的农业生态系统不仅具备强大的自我调节能力, 能有效抵御病虫害和环境波动, 还能持续产出多样化的农产品, 实现生态效益与经济效益的双赢。在演替过程中, 农户定期修剪或砍伐部分植物以模拟自然演替过程, 促进养分循环。在戈茨位于巴西的实验农场中, 经过10余年的协同演替实践, 原本退化的土地不仅恢复了生态活力, 生物多样性显著增加, 农场的农产品种类和产量也远超传统农业模式, 成为协同演替成功应用的典范 (Agenda Goetsch, 2024, Rebello & Sakamoto, 2024)。

视频2介绍恩斯特-戈茨开创的农林系统演替耕作系统, 展现如何结合植被演替规律与食物生产, 实现高效农业和生态恢复。通过科学的剪枝手法, 植物生生不息; 修剪后的生物质回归土地, 滋养土壤, 土地越种越肥沃。



图5.6 农林协同演替农业模式



扫码查看翻译后的视频

视频链接: [https://pan.baidu.com/s/1nN\\_vWOch7BEr1vq5JTU9mg?pwd=y95r](https://pan.baidu.com/s/1nN_vWOch7BEr1vq5JTU9mg?pwd=y95r) 提取码: y95r

视频3介绍了果园+菜园的农林系统种植案例, 通过在同一区域多层次种植, 结合短期蔬菜、果树及多年生作物, 让土壤自然恢复, 提高产量, 无需施肥或喷洒农药, 实现生态平衡和可持续农业。



图5.7 农林协同演替农业模式应用案例（果园+菜园）



扫码查看翻译后的视频

视频链接：[https://pan.baidu.com/s/1qZ0CJC2kb5\\_Z2zqnxLZXNA?pwd=53rf](https://pan.baidu.com/s/1qZ0CJC2kb5_Z2zqnxLZXNA?pwd=53rf) 提取码：53rf

### 5.3.3 农林协同演替农业推广的挑战

尽管农林协同演替系统已在巴西、秘鲁和比利时等不同地区的农场有成功实践，但在迈向大规模推广的进程中，仍面临着一系列亟待突破的瓶颈。

技术与知识体系门槛高、管理复杂度高构成首要障碍。农林协同演替系统融合生态学、植物学、土壤科学等多学科知识，要求从业者精准把握植物分层配置、动态演替规划、生态自我调节机制等核心技术。例如，在设计种植群落时，需依据植物的光补偿点、根系分布深度等进行科学搭配。农民需掌握每种植物的生态角色（如抗剪性、演替阶段、伴生关系、根系类型等），而非仅关注经济价值，这对农民的专业素养提出了很高的要求，与传统农业的“配方化”思维形成冲突。当前主流农业培训体系仍以单一种植、化学投入为主导，导致新型技术推广缺乏适配的人才基础，多数农民难以在短期内掌握该系统的技术体系。例如，越南调查显示47%的农户因经验不足难以独立实施（Truong等，2023）。

初期投入高与经济回报欠缺也是推广障碍之一。由于系统建立初期需要时间恢复土壤并优化生态环境，需要同时准备多个演替阶段的林业和农业材料，同时大多数操作仍需手动完成，这些都会增加初期投入成本。短期经济效益的欠缺也会严重削弱推广动力。农林协同演替系统遵循自然生态演替规律，土壤改良与生态系统重建需要时间。Pardon（2018）等的研究表明，农林复合系统在前3年作物产量会降低15–43%，直到树木进入中年期（约7年后）系统生产力才开始超过单作农田，这种初期生产损失也是一种隐性投入成本。以戈茨在巴西的试点项目为例，前3年由于土壤微生物群落尚未成熟，作物产量仅为传统种植模式的40%–50%。这种前期收益锐减的现实，与农民追求快速回报的经济诉求形成尖锐矛盾。即使在5–7年后系统进入高产期，仍难以弥补前期的经济缺口，导致多数农民因缺乏持续的资金支持与经济激励，对该模式望而却步。

政策与市场支持不足也是一大挑战。目前的农业政策仍偏向支持传统大规模单一种植，而缺乏对农林复合系统的补贴和推广机制。此外，农林复合产品的市场渠道和认证体系不健全（如木材、果实、作物的协同销售），也对产品的市场价值体现形成挑战。而多样化小规模产出（如同时收获20+种作物）难以对接大宗商品市场，而本地销售渠道建设需要时间。

机械化难题限制了农林协同演替系统在大规模农业中的应用。由于该系统采用多层次、多物种种植，现有的大规模农业机械难以适应，导致推广受限。

#### 5.3.4 总结

农林协同演替系统通过模仿森林生态系统，实现农业生产与生态恢复的协同发展。其核心理念是通过植物分层、生态演替、光合作用优化和生物多样性管理，打造可持续的农业模式。然而，该系统的推广仍面临技术、经济、政策和机械化等多方面的挑战。未来，若能加强政策支持、推广教育培训，并推动适应性机械的研发，农林协同演替系统有望成为全球农业可持续发展的重要路径。

### 参考文献

- [ 1 ] José Fernando dos Santos Rebello & Daniela Ghiringhello Sakamoto. (2024). 《Syntropic Agriculture According to Ernst Götsch》. Independently published. ISBN-13: 979-8338712900
- [ 2 ] Agenda Goetsch (2024). Ernst Götsch's Syntropic Farming Official Website. <https://agendagotsch.com/en/>
- [ 3 ] Schulz, B., Becker, B. & Götsch, E. (1994). Indigenous knowledge in a 'modern' sustainable agroforestry system—a case study from eastern Brazil. *Agroforest Syst* 25, 59–69 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF00705706>.
- [ 4 ] Truong, T., Khuzaimah, K., Pham, H., Ho, S., Bui, T., & Ha, L. (2023). Attitude and perception of farmers toward agrobiodiversity in home garden. Case study: Buot billage. Chieng Yen Commune, Van Ho District, Son La Province. Vietnam. *Scientific Journal of Tan Trao University*, 9 (4). <https://doi.org/10.51453/2354-1431/2023/855>
- [ 5 ] Rojas Ramirez, Milenka (2022). Recuperación de la fertilidad y carbono orgánico total del suelo mediante la implementación del sistema de agricultura sintrópica en la región de Ucayali. <https://doi.org/10.21142/tl.2022.2519>
- [ 6 ] Andrade, D., Pasini, F., Scarano, F. R. (2020). Syntropy and innovation in agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, [J], 45, 20–24, 2020.
- [ 7 ] Mayara Grazielle Consentino Ferreira da Silva, Cristiane Pimentel Victório. (2023) Floristic diversity in agroforestry systems in the state of Rio de Janeiro. *Journal of Novos Cadernos NAEA*, 26(1), 373–392.
- [ 8 ] Pardon., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., De Frenne, P., De Smet G., Van Waes, C., Reheul, D. (2023). Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable Intercrops. *Agricultural Systems*, 166, 135–151.

## 5.4 案例4：美国印第安纳州里克·克拉克农场的再生农业实践

里克·克拉克（Rick Clark）是美国印第安纳州的第五代农民，在再生农业领域成绩斐然，其成功实践有力证明了农业可持续发展与盈利并行不悖的可能性。他经营的农场面积超2000公顷，已从依赖化学投入的传统耕作模式，全面转型为有机、再生、免耕的可持续农业系统。克拉克农场通过系统化的实验、数据收集，秉持对土壤健康的坚定承诺，构建起一套既能降低生产成本，又能提升生物多样性、增强农场长期抗风险能力的经营模式。

本案例主要根据里克·克拉克的公开演讲、视频和农场网站，分析他的农场从传统农业转向再生农业的历程，详细剖析其在土壤健康管理、覆盖作物应用、化学投入削减以及经济可持续性等方面的实践探索。

### 5.4.1 从传统农业到再生农业的转型

一场暴雨引发的严重水土流失，成为克拉克投身再生农业的转折点。这次事件让他深刻认识到传统农业模式的脆弱性，促使他开始探索如何有效保护和改良土壤。

2000年前后，克拉克开始对传统农业方式产生质疑，尤其关注其对土壤健康和农业持续性的影响，并尝试降低耕作强度。2012—2014年，他迈出关键转型步伐，引入覆盖作物以改善土壤结构、减少侵蚀，同时实践免耕农业，减少机械对土壤的扰动。2015—2016年，克拉克将覆盖作物与免耕技术深度融合，构建起核心农业系统，并开始重视土壤碳固存、水分保持及生物多样性等生态系统服务价值。2016—2018年，他开启从常规农业向有机认证农业的转型之路，开创性地在不翻耕条件下开展有机种植，搭建起生物性投入替代化学品的管理体系。自2019年起，农场实现全面的再生有机免耕体系，克拉克也投身再生农业推广事业，通过演讲、教育等方式传播理念，成为行业代表人物，积极倡导“农场生态系统的自我调节能力”，为再生农业发展提供实践范例。

克拉克农场在二十多年的转型过程中，主要采取了覆盖作物、推行免耕、逐步淘汰化学投入品、整合畜牧养殖和多元种植以及系统化的数据积累等关键措施。

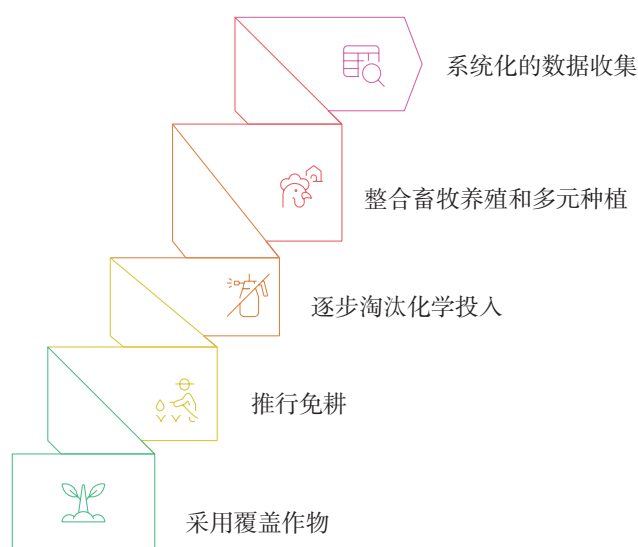


图5.8 克拉克农场的转型之路（2000—2025）

1) **采用覆盖作物和推行免耕**：覆盖作物在克拉克农场的再生农业实践中发挥着核心作用，具备抑制杂草生长、固氮、保持土壤湿度和改善土壤结构等多重功效。克拉克从小规模试验开始，逐步在整个农场推广覆盖作物。在覆盖作物的基础上，农场开始停止翻耕土壤，减少土壤侵蚀，土壤结构和微生物活性不断提升。克拉克农场已持续19年实施大豆免耕种植、14年玉米免耕种植、14年覆盖作物种植、12年生态种植，覆盖作物的具体做法如下：

- **高密度种植**：通过增加播种量，最大限度提高地面覆盖率和生物产量。
- **多样化种植组合**：从单一黑麦种植发展为12种作物的混播模式，丰富了农田生态系统。
- **物理滚压抑草替代化学除草剂**：采用滚压镇压技术终止覆盖作物生长，形成厚实的生物质覆盖层，有效抑制杂草。
- **豆科植物固氮**：以巴兰萨三叶草为例，每英亩可固定260磅氮素，显著减少对化学氮肥的依赖。凭借科学合理的覆盖作物应用，克拉克实现了无需除草剂的高效土壤管理。



Rick Clark 的农场免耕大豆与黑麦

备注：1) V2阶段：大豆的第二片复叶完全展开的阶段，  
2) 具体时间随时保持灵活性，以适应变化

2023 Soil Health Conference: Rick Clark-Benefits of Planting Green

图5.9 克拉克农场的免耕大豆与黑麦管理

2) **逐步淘汰化学品投入**：克拉克采用循序渐进的方式淘汰化学投入，并依据数据反馈动态调整策略。在长达 9 年的时间里，克拉克的农场始终坚持不使用基肥、杀菌剂、杀虫剂，未进行种子处理，也未施用磷、钾肥和农业石灰；近4年来，农场更是停止了氮肥的施用。经过逐步的转型和农场生态的不断改善，他完全停止使用化学肥料、除草剂和农药，转而依靠自然的养分循环，并收获了经济收入和土壤：

- **经济成本降低**：停止采购化学投入品后，每年可节省约270万美元。
- **燃油消耗减少**：免耕技术减少了农田作业次数，燃油使用量降低50%，进一步削减成本并减少碳排放。
- **土壤生态改善**：停用化学投入后，土壤微生物数量大幅增加，有效提升了土壤保水能力和养分

循环效率。这些成果表明，农业生产无需依赖昂贵的化学投入，也能实现经济效益与生态效益的双重提升。

### 3) 畜牧养殖和多元种植的有机整合：

克拉克农场已构建起多元作物种植系统，其中9种主要作物搭配1种附加作物，5600英亩（约2265公顷）土地已通过有机认证，其余土地也在逐步向有机种植转型。虽然Rick Clark的农场以种植为主，他仍高度重视牲畜在再生农业系统中的作用，并将其视为促进生态循环的“催化剂”。他通过与邻近养牛户合作，让牛群在种植覆盖作物的田地中放牧，采用轮牧和计划放牧等方式，实现土壤轻度扰动、粪尿还田、杂草抑制与生态系统活化的多重效益。他特别强调覆盖作物与牲畜放牧的结合，可以加速营养循环、提高土壤有机质，并推动农场朝向不依赖外部化肥与农药的生态闭环系统发展。尽管他的农场没有大规模养殖牲畜，但其农场已形成“作物-牧草-牲畜-土壤”之间的良性循环，为再生农业提供了切实可行的整合范例。

### 4) 系统化的数据收集：科学转型的核心支持

系统化的数据收集是克拉克农场实现成功转型的核心支柱。通过长期监测土壤测试数据、分析植物组织样本，并深入研究农田生产表现，农场团队得以精准洞悉土壤的自然养分循环机制，为再生农业实践提供坚实的科学依据。例如，通过数据收集，农场发现：

➤ **黑麦的养分固持效应：**数据显示，每英亩黑麦能够固定高达220磅的钾元素。这一发现不仅揭示了黑麦在养分管理中的关键作用，更帮助农场大幅降低了对外部钾肥的依赖，实现资源的高效利用。

➤ **土壤健康持续改善：**通过连续多年实施免耕法和覆盖作物种植，土壤测试数据直观呈现出有机质含量的稳步增长。这一趋势不仅反映了土壤肥力的提升，更标志着土壤碳固存能力的显著增强，为应对气候变化贡献力量。

➤ **产量稳定：**即使完全停止施用氮、磷、钾等化学肥料，农场作物产量依然保持稳定，部分田块甚至实现增产。这一实证数据打破了“化肥依赖才能高产”的传统认知，坚定了农场坚持再生农业的信心。

这些基于数据的实践成果，不仅为克拉克农场的转型提供了有力支撑，更为全球农业可持续发展提供了极具价值的参考范例。以下的视频为里克·克拉克在2023年土壤健康会议的报告视频。



图5.10 克拉克农场免耕播种大豆

翻译后的视频链接：<https://pan.baidu.com/s/1K6yYTXFJDZ11eKcOKI-vMA?pwd=b54w> 提取码：b54w



扫码查看翻译后的视频

原始来源：2023 Soil Health Conference: Rick Clark – Benefits of Planting Green 2023.3.15

### 5.4.2 农业的经济与生态收益

克拉克的农场经营理念突破传统，不以产量最大化为目标，而是将投资回报率（ROI）与农场长期可持续性置于首位。这种策略使其在经济与生态层面均取得显著成效：

#### 1. 经济收益

通过削减化学投入与优化生产模式，农场实现了显著的成本节约与利润增长。2023年数据显示，仅柴油、化肥（合成氮）和农药三项成本，每年即可节省约804.54万元人民币（折合），其中柴油费用减少43.4万元，化肥成本降低423.35万元，农药使用成本下降337.79万元。综合各项开支，农场年节约成本超1500万元。此外，凭借有机认证带来的产品溢价，农产品售价高于市场平均水平；较低的生产成本则增强了农场对化肥、农药价格波动的抗风险能力，确保盈利稳定性。

工序2：在生长中的苜蓿上免耕播种玉米



8月2日  
这是3道工序玉米系统的最终产出



Rick Clark 的农场免耕玉米与苜蓿

工序3：在玉米V2生长阶段滚压苜蓿



- 成本节省**
- 🔥 每年节省 43.4万元 柴油费用
  - 🔥 每年减少 423.35万元 化肥（合成氮）成本
  - 🔥 每年减少 337.79万元 农药使用成本
  - 🔥 总计每年节省约 1500万元
- 土壤健康指标**
- 🌱 灶水分渗透率：每小时 50厘米
  - 🌱 母蛭数量：每亩 9万—12万条
  - 🌱 以有机质增加量：每年 0.5% ~ 1%

备注：1) 工序V2看起来更难，需要玉米有强大的生长力完成这一挑战  
2) 工序3：滚压不会阻止苜蓿生长，但我们希望尽可能给玉米提供竞争优势

数据来源：2023 Soil Health Conference: Rick Clark-Benefits of Planting Green

图5.11 克拉克农场的经济与生态效益

## 2. 生态效益

再生农业实践重塑了农场生态系统：土壤有机质提升显著增强碳固存能力，助力缓解气候变化；改良的土壤结构使水分渗透率达到每小时50厘米，有效减少水土流失；停用农药后，蜜蜂、蝴蝶等传粉昆虫数量激增，生物多样性得以恢复。土壤健康指标同样亮眼：蚯蚓数量达每亩9万 - 12万条，有机质含量每年增长0.5% - 1%。

### 5.4.3 挑战与解决方案

尽管取得卓越成效，克拉克的再生农业模式仍面临现实挑战。主要集中在播种期推迟、害虫压力和杂草管理三个方面。针对播种期推迟问题，农场通过提升土壤蓄水能力，降低晚播对产量的影响；面对害虫压力，采用生物防治策略，依靠天敌控制虫害，并通过科学轮作减少风险；在杂草管理方面，结合高生物量覆盖作物与精准滚压技术，实现非化学手段的有效控草。

### 5.4.4 总结

克拉克不仅专注于自身农场经营，更积极投身再生农业推广。他通过参加行业会议、举办农场实地培训，向同行分享经验。他强调：“再生农业不是理想主义，而是现实的可盈利模式。”其成功案例有力证明，再生农业既能保障生态环境，又具备经济可持续性，为全球农业转型提供了兼顾生态、经济与社会效益的实践范本。

## 参考文献

- [ 1 ] 里克·克拉克的农场网站 <https://www.farmgreen.land>
- [ 2 ] RFK Jr. Podcast with Rick Clark: Rick Clark: A Legacy of Regenerative Farming and Hope for the Future
- [ 3 ] 2023 Soil Health Conference: Rick Clark-Benefits of Planting Green: Regenerative Organic Stewardship: A Sustainable Path Forward
- [ 4 ] How to Manage Weeds on a Large Scale with Farmer Rick Clark: Mastering Weed Suppression in Regenerative Organic No-Till Farming
- [ 5 ] Illinois Soil Health Week 2022 Kickoff with Rick Clark, Soil Health Week-Illinois Stewardship Alliance: Celebrating Soil Health: A Path to Regeneration and Sustainability

## 六、建议与思考

回顾过去三十年国内外相关研究文献可以发现，随着气候变化对农业系统构成日益严峻的挑战，生态农业在减缓温室气体排放、提升农业气候韧性、恢复土壤生态功能等方面展现出显著优势。这一路径已在多项研究与实践中得到广泛验证，逐步成为推动农业可持续转型的重要方向。在前文调研与案例分析的基础上，本文提出以下思考与建议：

### 6.1 生态农业具备减缓与适应气候变化的双重潜力

生态农业通过秸秆还田、有机肥替代、地表覆盖、生物防治代替农药、免耕/少耕、多样化种植等措施，通过不同机制减少农业温室气体排放，促进土壤固碳，有效提升土壤碳封存能力，且多种措施联合使用往往效果更佳。

同时，在面对干旱、暴雨、病虫害等气候极端事件时，生态农业展现出更好的适应性和韧性。国内外实证研究和农场实践均表明：多样化种植模式能提高抗病虫害能力，覆盖作物与粮草间作可增强土壤储水能力，土壤改良和肥力保持能提升农业系统恢复力，优化耕作方式有助于提高抗旱、抗倒伏能力，农林协同有助于形成农田生态系统的自我维持与动态平衡，增强农业系统的稳定性和恢复力，有效应对气候变化给农业带来的极限或超极限压力，是推动农业转型与实现“双碳”目标的重要抓手。

### 6.2 面向未来，生态农业需要走向更系统、更本土的深化探索

当前生态农业仍面临着诸多挑战。在应对气候变化方面，国内生态农业存在土壤固碳能力有待提升、气候韧性不足等问题。如果仅满足于“六不用”等标准，生态农业难以应对复杂的气候挑战。全球实践案例显示，真正具备气候适应力的生态农业往往具备以下特征：

以系统思维理解农业，将种植、养殖、森林、土壤、水体等要素整合；

从生命过程理解土壤和农作物，关注微生物活性、物种生态互作机制；

根据本地气候与资源条件因地制宜地设计生态系统，例如采用免耕、覆盖作物、农林复合等多重措施；

生态农业需持续创新，结合科学前沿与传统智慧，构建“土壤-作物-气候”协同优化的生产体

系，为气候治理与农业可持续发展探索本土化的解决方案；  
强调持续学习与自我更新能力，不断迭代农场管理策略。

因此，生态农业人才的跨学科学习，区域化的技术交流与学习网络，帮助农人走出“照搬标准”的误区，探索适合自身生态环境的实践路径。

### 6.3 政策支持应明确生态农业在气候应对中的战略地位

在我国现有的农业补贴体系和技术推广导向中，生态农业的贡献尚未得到制度化支持。农业政策仍倾向于扶持规模化、机械化程度高的集约型农业，生态农业因其多以小农户、手工劳动密集型为主，难以享受到相应的资源倾斜。

其次，生态农业在碳减排方面的贡献尚缺乏统一的量化指标与评估方法，导致其在农业气候政策中被边缘化。现有政策体系难以精准识别和扶持具备高生态价值的农业实践，这不仅限制了生态农业的规模化推广，也影响了生态农业从业者的积极性与长期投入信心。因此，建议政府从战略层面予以重视，具体包括：

将生态农业正式纳入气候变化应对与农业碳减排政策体系，通过设立专项财政资金，对采纳生态农业关键技术（如免耕、覆盖、生物防治、农林复合等）的农场给予直接补贴；

建立多层次、多类型扶持机制，既考虑大中型农业主体的转型，也充分支持以小农户为主体的生态实践，探索“合作社+农户”“农场+社区”等多样化生态农业组织形态；探索以村级组织（村委）推动合作社、家庭农场、农业公司等多种新型经营主体参与生态农业的模式。

支持生态农业碳减排及生态价值的量化研究，推动建立评估体系，发展适用于小农场的碳核算方法和生态绩效评价框架，为精准补贴和绿色认证提供技术支撑；

推出专项生态农业发展规划，在《“十四五”全国农业绿色发展规划》的基础上，在十五五和后续的五年规划中，以专项生态农业发展规划，构建我国农业多层次绿色发展的农业模式；

推动政策制定与科研评估的协同联动，设立“生态农业固碳监测与评估”科研专项，汇聚农业、生态、气候和经济多学科力量，推动理论与方法论的突破；

发挥乡镇党委政府的关键枢纽作用，乡镇党委政府在农业转型升级进程中，既是传递农技支持、推动政策落地村级的核心纽带，也是肩负乡村振兴战略实施的基层行政主体。生态农业与乡村振兴存在天然协同性，尤其在生态宜居与产业振兴领域，可通过系统性发展激活乡村生态价值与产业价值的双重升级。在生态农业建设实践中，需重点强化三类主体能力建设：提升乡镇领导干部的战略认知，使其成为生态农业规划的决策者与推动者；加强农技人员的专业技能培训，夯实田间地头的技术服务支撑；着重培养村“两委”（特别是村支书）的执行能力，使其成为政策落地与村民动员的关键节点。

加强公众认知与政策共识建设，通过培训、宣传与示范，提升全社会对生态农业在气候治理中不可替代作用的理解和认可。

只有当生态农业的气候功能被系统识别，其生态价值被合理量化，其组织形式被制度接纳，生态农业才能从“边缘化补充”走向“转型支柱”，为农业绿色低碳发展提供坚实支撑。

## 6.4 结合成都平原生态农业转型路径，推动多方协作的农业气候韧性提升机制

### 6.4.1 建立以社区为核心的农业气候韧性示范项目

可借鉴菲律宾等地的成功经验，探索“政府支持—多方协作—社区主导”的气候适应行动机制，在成都平原选点开展试点项目，具体目标包括：

**政策落地机制创新：**推动地方政府在乡村层级探索灵活、可复制的气候政策实施路径，如将气候适应计划纳入财政预算、村规民约或农业项目管理机制；

**知识共创与数据反馈机制：**组织科研机构和专业机构提供气候监测与预警信息，协助社区开展气候风险识别，并通过参与式过程收集和反馈在地数据，用于监测社区行动的碳减排和增汇成效；

**赋能社区与社会组织的协同机制：**支持有经验的社会组织深入社区，通过组织村民绘制气候风险地图、共创应对策略、开展能力建设等方式，将农民经验转化为气候适应行动力，并协同地方政府推动行动计划进入预算与实施体系。

### 6.4.2 自然免耕的再激活与生态转型结合

侯光炯院士提出的“自然免耕”体系，强调林网化、渠网化和稻田连续浸润、连续垄作在当前国家推进稻田减排与农业碳汇项目的背景下，具备极大的再生潜力：

**借鉴“社区主导+跨部门协作”模式开展示范：**以印度安得拉邦自然农法项目为参照，推动地方政府提供支持，由科研机构开展监测评价，社会组织 and 村集体协同推动实践落地，实现生态知识的整合与创新机制的培育。

**探索碳汇项目路径：**结合稻田碳汇项目开发与农业绿色金融工具，推动自然免耕与碳计量、碳信用机制对接。

将自然免耕纳入稻田减排十大行动：推动将其作为区域减排路径进行政策嵌入与标准制定。

## 6.5 针对生态农业未来的研究方向建议

建议拓展以下三个具有战略意义的研究方向，为生态农业的政策创新与制度保障提供理论支持：

### 6.5.1 聚焦农业碳汇：构建生态农业的气候融资路径

生态农业作为低碳、固碳的可持续农业方式，未来有望通过碳汇机制和碳汇补偿政策获得额外收益，推动其在更大范围内推广。因此，建议在以下方向开展更多研究：

**系统梳理与分析农业碳汇的现行政策、标准与方法学，**包括《农田土壤碳汇方法学》《稻田甲烷减排方法学》《秸秆还田方法学》等国内外实践；

**开展与微生物堆肥技术相关的碳减排与固碳潜力分析，**为未来进入碳交易市场做基础数据积累；

**研究碳汇交易机制与补偿制度，**评估碳汇项目可能为生态农业农户提供的收入机制、激励方式及其公平性；

**探索将生态农业项目与生态补偿、绿色金融、生态产品价值实现机制相结合的路径，**提升生态农业在政策体系中的制度合法性与经济可行性。

### 6.5.2 构建生态农业的社会支撑系统研究

生态农业的可持续推广，离不开相应的社会制度环境和文化土壤。建议结合成都平原的状况，从社会系统维度展开更系统的研究，包括：

推广机制研究：分析生态农业知识和技术如何在农民间传播、农户如何学习与采纳生态技术，探索更有效的在地知识传播与参与机制；

政策支持机制研究：评估现有政策对生态农业的支持强度、路径与盲点，探索政策制定过程中能否引入更多农户、科研人员与社区参与；

制度韧性研究：结合气候变化背景，分析当前制度体系如何支撑（或限制）生态农业作为适应策略的实施，寻找制度变革的关键突破点。

成都平原生态农业的社会-文化-制度支持系统研究：通过对成都平原本地农耕文化系统（如林盘聚落体系、水田-沟渠系统）与典型农业文化遗产的比较，可进一步提炼出具有借鉴意义的要素，思考如何在生态农业转型中，与农户、消费者、技术推广人员、政府、科研机构与社会组织等多方主体共同识别并凝练出成都平原生态农业的核心理念与价值观；如何创造和发展多样化的文化表达方式，推动生态文化理念的传播与共识构建，并逐步从小范围的社群扩展至更广泛的社会；以及如何使这些文化表达与农户的日常生产实践、城乡互动、技术推广、政策制定等形成有机耦合，构建生态农业的社会-文化-制度支持系统。

## 6.6 打通科学研究与农田实践之间的“最后一公里”

生态农业的推广正面临“研究成果难以落地、农户操作难以复制”的现实障碍。一方面，科研层面对生态农业在应对气候变化方面的研究仍不充分，相关研究多集中在理论建模、实验数据分析等层面，缺乏适配农田管理的技术转化路径；另一方面，现有科研成果在向农户传播过程中存在形式抽象、理解门槛较高、传播手段单一等问题，难以为一线农人真正理解和掌握。

此外，目前广大农户对“土壤固碳”“气候韧性”等科学概念尚缺乏基本认知。他们往往并不了解自己日常耕作活动在生态系统和气候体系中所扮演的角色，更不了解通过生态农业手段所带来的碳减排贡献。长期来看，这种认知缺口不仅限制了生态农业技术的落地实施，也削弱了农民自身参与绿色转型的动力和成就感。

因此，环保部门、农业主管部门、科研机构、农村基层组织和社会组织需通力合作，围绕“提升认知、转化技术、激发内生动力”三个维度构建完整的传播体系。建议如下：

### 建立“科研—推广—实践”的三位一体传播机制

将复杂的碳循环机制、气候韧性机理等科学成果转化为农民可理解、可操作的实践技术。通过实地培训、农田试验示范、农技人员下乡指导等方式，推动科学知识下沉到生产一线。

### 发展可视化、通俗化的知识工具

创作面向农户的图解手册、视频教程、互动课程等形式，使抽象知识具体化、生动化，真正做到“看得懂、用得上”。

### 系统提升农民对土壤固碳功能与气候效益的认知

将“农业不仅是受害者，也是贡献者”的理念纳入农民培训体系。让农民了解：通过生态种植提升土壤有机质含量，不仅能减缓气候变化，还能改善土壤结构、提升保水保肥能力，从而促进作物稳产增收，实现“生态收益”与“经济收益”的双赢。

### 鼓励农户、合作社等农业主体参与科研项目

推动“研究即实践、实践即数据”的互动模式，让农民不只是技术接受者，更是知识共同生产者，增强其对生态农业科学基础的理解与信任。

### 构建地方生态农业示范与交流的“团粒”结构

以“农人带农人”的方式，形成农人间的“团粒结构”，促进农人实践者与学者、与政府、与社会组织、消费者的交流与对话，形成不同层面的团粒结构，建立对话交流通道，建立“有共识、可模仿、能落地”的生态农业学习共同体，加速技术扩散。

只有当科研走出实验室、农户看懂气候逻辑、生态农业成为一种“有认知、有工具、有社区”的实践体系，生态农业才能真正发挥其在气候变化背景下的系统价值。

## 七、致谢

---

本报告在完成过程中得到了很多老师和农友的帮助与支持。我们要特别感谢所有参与访谈的农友，他们的田间观察和无私分享给研究团队带来很大的启发。感谢尹春涛、胡敏、袁勇、唐亮、朱艺和左智对完善报告所提出的宝贵意见，让我们对报告的写作逻辑、核心观点呈现进行了更深入的思考和修改。感谢许程程和张鸣与我们的坦诚交流。感谢社区伙伴的陈宇辉、宋燕波和李自跃对研究团队信任和支持，让我们能够满怀信心地展开对生态农业这个主题的探索。

## 八、参考文献

---

- [ 1 ] Altieri M A. Agroecology: principles and strategies for designing sustainable farming systems [ EB/OL ] (2000) [ 2024-12-29 ] . [https://www.agroeco.org/doc/new\\_docs/Agroeco\\_principles.pdf](https://www.agroeco.org/doc/new_docs/Agroeco_principles.pdf)
- [ 2 ] Anderson R, Bayer P E, Edwards D, Climate change and the need for agricultural adaptation, *Current Opinion in Plant Biology*, 2020, 56: 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526619301219>)
- [ 3 ] Azerbaijan, AZERBAIJAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES DIVISION OF BIOLOGICAL AND MEDICAL SCIENCES INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND AGROCHEMISTRY [ EB/OL ] 2021, [https://bim.edu.az/file/3046/aqrosenozun\\_torpaq\\_ekoloji\\_problemi\\_onun\\_helli\\_yolu.pdf](https://bim.edu.az/file/3046/aqrosenozun_torpaq_ekoloji_problemi_onun_helli_yolu.pdf)
- [ 4 ] 白帆, 杨晓光, 刘志娟, 孙爽, 张镇涛, 王晓煜, 高继卿, 刘涛. 气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响 [ J ] . *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(4): 480-491. DOI: 10.13930/j.cnki.cjca.190585
- [ 5 ] Baker, John M., et al. “Tillage and soil carbon sequestration-What do we really know?” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118 (1 - 4): 1 - 5.
- [ 6 ] Bannister, Daniel; Herzog, Michael; Graf, Hans-F; Hosking, J. Scott; Short, C. Alan. 2017 An assessment of recent and future temperature change over the Sichuan Basin, China, using CMIP5 climate models. *Journal of Climate*, 30 (17). 6701-6722. 10.1175/JCLI-D-16-0536.1
- [ 7 ] Beattie GA, Edlund A, Esiobu N, et al. 2025. Soil microbiome interventions for carbon sequestration and climate mitigation. *mSystems* 10: e01129-24. <https://doi.org/10.1128/msystems.01129-24>
- [ 8 ] 蔡榕仪, 孙娟, 谢丽红, 等. 不同施肥对小麦土壤碳氮含量和储量的影响 [ J ] . *四川农业科技*, 2020, (5): 49-51.
- [ 9 ] Cavalieri-Polizeli KM V, Filho O G, Romanoski V S, et al. Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality [ J ]
- [ 10 ] *Soil and Tillage Research*, 2024, 242: 106143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106143>.
- [ 11 ] Cen Y, Li L, Guo L, et al. Organic management enhances both ecological and economic profitability of apple orchard: A case study in Shandong Peninsula [ J ] *Scientia Horticulturae*, 2020, 265: 109201. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109201>.
- [ 12 ] 陈能场. 一篇文章读懂生态农业 [ EB/OL ] ( 2018-10-09 ) [ 2025-05-15 ]
- [ 13 ] <https://www.wywxwk.com/Article/sannong/2018/10/394484.html>

- [ 14 ] Clemmensen, K. E., Bahr, A., Ovaskainen, O. O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., Stenlid, J., Finlay, R. D., Wardle, D. A., & Lindahl, B. D. (2013). Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science*, 339(6127), 1615-1618. <https://doi.org/10.1126/science.1231923>
- [ 15 ] Chao Chen & Yanmei Pang (2020). Response of maize yield to climate change in Sichuan province, China. *Global Ecology and Conservation*, 22. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00893>.
- [ 16 ] 陈良碧, 周广洽, 李阳生, 等. 水稻抗灾减灾应用技术研究进展 [ J ] . 生命科学研究, 2000, 4(1): 91-94
- [ 17 ] Cho R.Can Soil Help Combat Climate Change? [ EB/OL ] (2018-02-21) [ 2025-01-22 ] <https://news.climate.columbia.edu/2018/02/21/can-soil-help-combat-climate-change/>
- [ 18 ] Dang Truong An. (2020). Shifting crop planting calendar as a climate change adaptation solution for rice cultivation region in the Long Xuyen Quadrilateral of Vietnam. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(4), 468. doi: 10.4067/S0718 - 58392020000400468
- [ 19 ] DeVincentis A, Solis S, Rice S, et al. Impacts of Winter Cover Cropping on Soil Moisture and Evapotranspiration in California’s Specialty Crop Fields May Be Minimal during Winter Months. [ J ] *California Agriculture*, 2022, 76 (1): 37–45. <https://doi.org/10.3733/ca.2022a0001>.
- [ 20 ] Dersch, G., Böhm, K. Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 49–55 (2001). <https://doi.org/10.1023/A: 1012607112247>
- [ 21 ] U.S.Environmental Protection Agency .Environmental Value ofApplying Compost: Improving Soil Health forStormwater Management.Contaminated Site Remediation.Ecosystem Restoration, Landscaping and Agriculture(2025-01) [ 2025-05-15 ] [https://spvsoils.com/wp-content/uploads/2025/01/U.S.EPA\\_EnvironmentalValueOfApplyingCompost\\_Jan2025.pdf](https://spvsoils.com/wp-content/uploads/2025/01/U.S.EPA_EnvironmentalValueOfApplyingCompost_Jan2025.pdf)
- [ 22 ] Frey, Serita D. “Mycorrhizal Fungi as Mediators of Soil Organic Matter Dynamics.” *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 50, 2019, pp. 237-259. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331.
- [ 23 ] 付学琴, 刘琚珥, 黄文新.南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响.土壤通报, 2015, 46(4): 931-938.
- [ 24 ] Gattinger A., Muller A., Haeni M., Skinner C., A. Fliessbach, N. Buchmann, P. Mäder, M. Stolze, P. Smith, N.E. Scialabba, & U. Niggli, Enhanced top soil carbon stocks under organic farming, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109 (44) 18226-18231, <https://doi.org/10.1073/pnas.1209429109> (2012).
- [ 25 ] Ghosh S, Saha A, Kumar S, et al. (2024). Regenerative Agriculture for Climate Change Mitigation and Food Security. In: Kumar S., Meena R S, Sheoran P, Jhariya M K. Regenerative Agriculture for Sustainable Food Systems [ M ] . Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-6691-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-97-6691-8_4)
- [ 26 ] Ghidey F, Alberts E. E. Runoff and soil losses as affected by corn and soybean tillage systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 53, 64–70.
- [ 27 ] 谷艳蓉, 张海伶, 胡艳红.果园自然生草覆盖对土壤理化性状及大桃产量和品质的影响.中国农业科学, 2009, 42(12): 4157-4163.
- [ 28 ] Guo D, Lin Y, Wang M, Huang Z. Spatial Distribution Pattern, Evolution and Influencing Mechanism of Ecological Farms in China. *Land*. 2023, 12(7): 1395. <https://doi.org/10.3390/land12071395>
- [ 29 ] Hawkins, H.-J., Cargill, R. I. M., Van Nuland, M. E., Hagen, S. C., Field, K. J., Sheldrake, M., Soudzilovskaia, N. A., & Kiers, E. T. (2023). Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. *Current*

- Biology*, 33(11), R560–R573. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.027>
- [ 30 ] Hao X. et al., (2023) Are there universal soil responses to cover cropping? A systematic review. *Science of The Total Environment*
- [ 31 ] 贺雨轩, 张钰杭, 张若冰, 等. 豫西黄土高原果园自然生草对土壤线虫群落及结构的影响. *草地学报*, 2025, 33(3): 798-805.
- [ 32 ] 胡志华, 李大明, 徐小林, 余喜初, 柳开楼, 叶会财, 周利军, 胡惠文, 黄庆海. 不同有机培肥模式下双季稻田碳汇效应与收益评估 [ J ] . *中国生态农业学报(中英文)*, 2017, 25(2): 157-165. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160725.
- [ 33 ] 湖南省发展改革委. “低碳” 种田模式促进粮食增产、农户增收 [ EB/OL ] (2023-06-07) [ 2024-05-15 ] [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/nyncjj/njxx/202306/t20230607\\_1357361\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/nyncjj/njxx/202306/t20230607_1357361_ext.html)
- [ 34 ] IPCC第六次评估报告(AR6)中的《气候变化与土地》特别报告(2019年)
- [ 35 ] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896
- [ 36 ] 姜达炳等, 三峡库区高效生态农业技术体系研究 [ J ] *中国生态农业学报*, 2003.
- [ 37 ] 蒋高明, 刘美珍, 赵建设. 试论生态农业的边界与科学技术原理 [ J ] . *中国农业大学学报*, 2024, 29(6): 8-18.
- [ 38 ] Kuyah, S., Whitney, C. W., Jonsson, M., Sileshi, G. W., Öborn, I., Muthuri, C. W., & Luedeling, E. (2019). Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>
- [ 39 ] Bowles, T. M., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderón, F., Cavigelli, M. A., Culman, S. W., ... Grandy, A. S. (2020). Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. *One Earth*, 2(3), 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>
- [ 40 ] Ryan, M. R. (2021). Crops better when grown together. *Nature Sustainability*, 4(11), 926–927. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00768-6>
- [ 41 ] De Boni, A., D' Amico, A., Acciani, C., & Roma, R. (2022). Crop Diversification and Resilience of Drought-Resistant Species in Semi-Arid Areas: An Economic and Environmental Analysis. *Sustainability*, 14(15), 9552. <https://doi.org/10.3390/su14159552>
- [ 42 ] 姜翠玲, 崔广柏(2002). 湿地对农业非点源污染的去效应 [ J ] . *农业环境保护*, 2002. [ 2002-10-30 ]
- [ 43 ] 江苏省农业农村厅. 高标准农田生态沟渠建设规范. [ S ] DB32/T 4633-2024
- [ 44 ] 金书秦, 马如霞(2023). 当前农业碳汇价值实现的主要途径和完善建议 [ J ] . *环境报告*, 03, 25-29/
- [ 45 ] Jones, S. K., Sanchez, A. C., Beillouin, D., Juventia, S. D., Mosnier, A., Remans, R., & Estrada Carmona, N. (2023). Achieving win-win outcomes for biodiversity and yield through diversified farming. *Basic and Applied Ecology*, 67, 1431–1442. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.12.005>
- [ 46 ] Yang, X., Xiong, J., Du, T., Ju, X., Gan, Y., Li, S., ... Butterbach-Bahl, K. (2024). Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 15(1), 198. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>
- [ 47 ] Kou X, Ma N, Zhang X, et al. Frequency of stover mulching but not amount regulates the decomposition pathways of soil micro-foodwebs in a no-tillage system. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 144: 107789.

- <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107789>
- [ 48 ] 对话蒋高明: 生态农业真的会饿死人吗? | 海湿·环境人物访谈(2) [ R ] , 2024, <https://www.toutiao.com/article/7450751446733111871/>
- [ 49 ] Lal R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. [ J ] *Science*, 2004, 304: 1623-1627. DOI: 10.1126/science.1097396
- [ 50 ] Langdale, G., Barnett, A., Leonard, R., and Fleming, W. (1979). Reduction of soil erosion by the no-till system in the Southern Piedmont. *Transact. ASAE* 22, 82-86. DOI: 10.13031/2013.34970
- [ 51 ] Liu, J, Fang, L, Qiu, T. *et al.* Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: a global meta-analysis [ J ] . *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43: 78. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00928-2>
- [ 52 ] 刘晓雨. 施用有机物料对农田固碳减排及生产力的影响: 田间试验及整合研究 [ D ] . 南京农业大学, 2013.
- [ 53 ] 刘庆, 马建涛, 柴雨葳, 柴守玺, 吕莹莹, 程宏波, 常磊. 覆盖栽培对旱地春玉米耗水特性的影响 [ J ] . 甘肃农业大学学报, 2024, 59(3): 145-153. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2024.03.017
- [ 54 ] 刘天奇, 胡权义, 汤计超, 李成芳, 江洋, 刘娟, 曹凑贵. 长江中下游水稻生产固碳减排关键影响因素及技术体系 [ J ] . 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 603-615
- [ 55 ] 李来来. 用生物农药替代化学农药势在必行. [ EB/OL ] (2021-08-20) [ 2025-01-08 ] . [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzU2NzI1NjkzNw%3D%3D&mid=2247540255&idx=3&sn=1ea6c679335a938c70e002e84d7acf69&chksm=fc9dec19cbea650f3756a8e91bb027857a8a6263b95fa4525c054aca975419b05508e4f98cc0&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzU2NzI1NjkzNw%3D%3D&mid=2247540255&idx=3&sn=1ea6c679335a938c70e002e84d7acf69&chksm=fc9dec19cbea650f3756a8e91bb027857a8a6263b95fa4525c054aca975419b05508e4f98cc0&scene=27)
- [ 56 ] 李亚宁, 吴秀芹. 中国三大粮食作物耕地生态系统碳足迹分析 [ J ] . 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60 (3): 575-584. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2024.026.
- [ 57 ] 李文华, 刘某承, 闵庆文. 中国生态农业的发展与展望 [ J ] . 资源科学, 2010, 32(6): 1015-1021.
- [ 58 ] 梨树县泉眼岭乡人民政府. 深度解读--“梨树模式” [ EB/OL ] (2024-03-12) [ 2025-05-14 ] [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzIxMTgwOTM1NA%3D%3D&mid=2247488008&idx=1&sn=359a5a54f0e5e7014198a8689ec1123d&chksm=974ef72da0397e3bf04f5274fd7cb259ff913bf9e246f0b74bc708a7e95231a02c89662ba215&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIxMTgwOTM1NA%3D%3D&mid=2247488008&idx=1&sn=359a5a54f0e5e7014198a8689ec1123d&chksm=974ef72da0397e3bf04f5274fd7cb259ff913bf9e246f0b74bc708a7e95231a02c89662ba215&scene=27).
- [ 59 ] Jordon, M. W., Willis, K. J., Bürkner, P. -C., Haddaway, N. R., Smith, P., & Petrokofsky, G. (2022). Temperate Regenerative Agriculture practices increase soil carbon but not crop yield-a meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 17(9), 093001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8609>
- [ 60 ] 吕晓英. 探究基于生态农业的蔬菜大棚可持续化种植 [ J ] . 农业工程技术, 2024, 44(29): 93-95
- [ 61 ] Ma Y., et al. (2023). Global crop production increase by soil organic carbon. *Nature Geoscience*.
- [ 62 ] Mahdi M. et al. (2020). Aligning science and policy of regenerative agriculture. *Soil Science Society of America Journal*
- [ 63 ] Ogle, S.M., Breidt, F.J. & Paustian, K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 2005, 72: 87-121. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0360-2>
- [ 64 ] 裴冬, 张喜英, 王峻. 高粱、谷子根系发育及其抗旱性研究 [ J ] . 中国生态农业学报(中英文), 2002, 10(4): 28-30. <https://www.ecoagri.ac.cn/article/id/2002408>
- [ 65 ] Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover

- crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- [ 66 ] Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. . Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, 2019, 1, 8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- [ 67 ] 仇开莉.沱江流域(内江段)农田土壤有机碳特征及固持能力测算 [ D ] .成都理工大学, 2014.
- [ 68 ] 齐宏运, 周传芳, 孙彦峰, 等.基于碳足迹的黑龙江省黑河市农田生态系统碳源/汇时序变化分析 [ J/OL ] .地质通报, 1-19 [ 2025-05-16 ] . <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20250115.1106.014.html>.
- [ 69 ] Qin T, Wang L, Zhao J, et al. Effects of Straw Mulching Thickness on the Soil Health in a Temperate Organic Vineyard. [ J ] *Agriculture*. 2022; 12(11): 1751. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111751>
- [ 70 ] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响 [ J ] . 农业工程学报, 2012, 28(6): 210-216.
- [ 71 ] 覃龙华, 王会肖. 生态农业原理与典型模式 [ J ] . 安徽农业科学, 2006, (11): 2484-2486. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2006.11.088.
- [ 72 ] Robert Becker Pickson, Ge He and Elliot Boateng (2022). The impacts of climate change and smallholder farmers' adaptive capacities on rice production in Chengdu, China: macro-micro analysis. *Environmental Research Communications*, Volume 4. DOI: 10.1088/2515-7620/ac7949
- [ 73 ] R. Lal, Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 2004, 304, 1623-1627. DOI: 10.1126/science.1097396
- [ 74 ] Skka A K., et al. Agricultural disaster management and contingency planning to meet the challenges of extreme weather events. *MAUSAM*, 67, 1 (January 2016), 155-168
- [ 75 ] Sanders, J., & Heß, J. (Eds.). (2018). *Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft* (FOEL-Bericht IV). Thünen Institute für Betriebswirtschaft, Braunschweig, Germany: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- [ 76 ] Sainju, U. M. A global meta-analysis on the impact of management practices on net global warming potential and greenhouse gas intensity from cropland soils. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0148527. doi: 10.1371/journal.pone.0148527
- [ 77 ] Saj, S., Torquebiau, E., Hainzelin, E., Pages, J., & Maraux, F. (2017). The way forward: An agroecological perspective for Climate-Smart Agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 250, 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.003>
- [ 78 ] Schmidt H-P. Humus or Famine? [ EB/OL ] (2025-05-15) <https://www.biochar-journal.org/en/ct/51-Humus-or-Famine->
- [ 79 ] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算 [ J ] . 中国农业资源与区划, 2017, 38 (9): 32-37.
- [ 80 ] 世界气象组织, 2025, WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.
- [ 81 ] 四川省农业科学院. 我省稻田温室气体减排的科技路径与政策建议. [ EB/OL ] (2021-09-03) [ 2025-0-07 ] <https://nynct.sc.gov.cn/nynct/c110427/2021/9/3/2e13faeab72e4608bb5ef0ea1aa345d7.shtml>
- [ 82 ] Six, J., and Paustian, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biol. Biochem*, 2014, 68: A4–A9. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.06.014

- [ 83 ] Soil food web. Soil Carbon Sequestration. <https://www.soilfoodweb.com/resources/animations-videos/?vID=372478833&h=7c10d53c26>
- [ 84 ] 苏培玺, 赵爱芬, 杜明武. 绿洲农业不同种植方式防止土壤风蚀和保持土壤水分的比较 [ J ]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1536-1540
- [ 85 ] Sun J. et al., 2024. Optimized tillage can enhance crop tolerance to extreme weather events: Evidence from field experiments and meta-analysis. *Soil & Tillage Research*
- [ 86 ] 田肖肖, 吕慎强, 张亮, 李娜, 孙晓, 景建元, 王林权, 李厚华. 免耕覆盖有效提高夏玉米产量及水氮利用效率 [ J ]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 606-614. DOI: 10.11674/zwf.16290
- [ 87 ] 碳排放交易网(2024) 广州从化区碳中和试点示范区建设典型案例. (2024-08-20) [ 2025-07-15 ]. [http://www.zcsvillages.com/\\_d3/c195/20240820/i117750.phtml](http://www.zcsvillages.com/_d3/c195/20240820/i117750.phtml).
- [ 88 ] 社会生态农业CSA网络(2024). 全国CSA地图。
- [ 89 ] Ussiri D A.N., et al.(2009) Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. *Soil and Tillage Research*
- [ 90 ] 王春虎, 穆麒麟, 王松, 田小海. 从现有商业品种中筛选耐高温水稻品种 [ J ]. 湖北农业科学, 2020, 59(20): 25-28.
- [ 91 ] 文雪, 温艳茹, 刘宝, 等. 黑土区不同耕作措施对土壤水分和玉米产量的影响 [ J ]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(8): 1447-1460.
- [ 92 ] Wright JL, Bomfim B, Wong CI, et al. Sixteen hundred years of increasing tree cover prior to modern deforestation in Southern Amazon and Central Brazilian savannas. [ J ] *Glob Change Biology*. 2020: 1–15. <https://doi.org/10.1111/gcb.15382>
- [ 93 ] 徐阳春等, 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [ J ], 土壤学报, 2002
- [ 94 ] Xu L, Yu G, He N, et al. Carbon storage in China’ s terrestrial ecosystems: A synthesis. *Sci Rep* 2018, 8: 2806. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20764-9>
- [ 95 ] 颜炯, 唐薇. 免耕就是“懒”人农法吗? [ EB/OL ] (2024-04-30) [ 2025-02-26 ] <https://mp.weixin.qq.com/s/BPldHrVg8ADNvZgZEx22nA>
- [ 96 ] 颜鹏, 吴碎典, 胡强, 等. 生态低碳茶园固碳减排技术研究 [ J ]. 中国茶叶, 2023, 45(9): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3150.2023.09.004.
- [ 97 ] Yang, X., Xiong, J., Du, T. et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 2024, 15: 198. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>
- [ 98 ] 杨京彪. 哈尼梯田传统农业管理适应气候变化的机制研究 [ D ]. 北京林业大学, 2015.
- [ 99 ] 杨京彪, 夏建新, 冯金朝, 等. 基于民族生态学视角的哈尼梯田农业生态系统水资源管理 [ J ]. 生态学报, 2018, 38 (09): 3291-3299.
- [ 100 ] 杨乐, 李文杨, 骆建莉, 等. 地膜覆盖和自然生草对桃园土壤养分、pH及水热的影响. 浙江农业学报, 2024, 36(12): 2719-2726.
- [ 101 ] 袁勇. “系”谈生态农业之一: 何谓生态农业 [ EB/OL ] (2024-05-09) [ 2024-12-29 ]. <https://mp.weixin.qq.com/s/LJDsgYpg30YJ-UoL7zKGmg>
- [ 102 ] Yuttitham, M. (2019). Comparison of Carbon Footprint of Organic and Conventional Farming of Chinese Kale. *Environment and Natural Resources Journal*, 17(1), 8–20. <https://doi.org/10.32526/ennrj.17.1.2019.08>

- [ 103 ] Zanella, A., Bolzonella, C., Lowenfels, J., Ponge, J. -F., Bouché, M., Saha, D., ... Minasny, B. (2018). Techno humus systems and global change—conservation agriculture and 4/1000 proposal☆. *Applied Soil Ecology*, 122(Part 2), 271 - 296. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.036>
- [ 104 ] 张宏玲.农田土壤有机碳库时空变异及主控因素研究 [ D ] .南京林业大学, 2013.
- [ 105 ] 张开.安岳县农田作物植被碳储量及固碳措施研究 [ D ] .四川师范大学, 2015.
- [ 106 ] 赵桂慎. 中国生态农业现代化: 内涵、任务与路径 [ J ] . 中国生态农业学报 (中英文), 2023, 31(8): 1171-1177. DOI: 10.12357/cjea.20230036
- [ 107 ] 张慧慧, 王瑶佳, 董月群等.生态沟渠对典型农业面源污染物去除性能及微生物机制研究 附视频 [ J ] .环境工程技术学报, 2024
- [ 108 ] 张千禧, 曹智, 王介勇. 双碳视角下乡村地域系统碳效应研究进展 [ J ] . 中国生态农业学报 (中英文), 2023, 31(8): 1256-1274
- [ 109 ] Zheng-Rong Kan, Catena, Characteristics of carbon mineralization and accumulation under long-term conservation tillage, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104636>
- [ 110 ] 周旦, 王欣, 郭小军, 等.长期有机培肥对红壤有机碳组分及水稻产量的影响 [ 1.福建农业学报, 2021, 36(8): 867-877.
- [ 111 ] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展 [ J ] . 应用气象学报, 2016, 27(5): 527-533.
- [ 112 ] Zhu K, Ran H, Wang F, et al.Conservation tillage facilitated soil carbon sequestration through diversified carbon conversions [ J ] *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 337: 108080.<https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108080>
- [ 113 ] Zhu, Y., Chen, H., Fan, J. *et al.* Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, (406): 718–722. <https://doi.org/10.1038/35021046>
- [ 114 ] Zomer, R J, Bossio D A, Sommer R, *et al.* Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Scientific Report*, 2017, 7: 15554. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>
- [ 115 ] 邹金浪, 刘陶红, 姚冠荣等. 中国化肥减量降碳效应评估 [ J ] . 中国环境科学, 2024, 44(1): 438-448
- [ 116 ] 郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点 [ J ] . 水土保持通报, 2019, 39 (4): 314-319. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.049.
- [ 117 ] 郑玉婷, 黄鑫慧, 李浩, 王彪, 李攀锋, 崔吉晓, 隋鹏, 高旺盛, 陈源泉. 有机和常规管理对茶园土壤固碳的影响——以林地为对照 [ J ] . 中国生态农业学报 (中英文), 2024, 32(1): 53-60. DOI: 10.12357/cjea.20230429
- [ 118 ] 中华人民共和国生态环境部. 《2023中国生态环境状况公报》 <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202406/P020240604551536165161.pdf>
- [ 119 ] 中华人民共和国国务院. 《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》 <https://www.eco.gov.cn/Uploads/ueditor/file/20250108/1736307372371450.pdf>
- [ 120 ] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所. 《气候变化与粮食安全》 <https://ieda.caas.cn/xwzx/kyjz/259169.htm>
- [ 121 ] 中国农村统计年鉴2024 [ M ] .北京: 中国统计出版社, 2024
- [ 122 ] 中国科学院. 东北黑土地保护与利用报告(2023年) [ EB/OL ] [ 2025-05-14 ] <http://igsnrr.cas.cn/publish/dbhtd/202504/P020250403577778914330.pdf>
- [ 123 ] 中国科学院, (2021)东北黑土地白皮书2020

# 九、附录

## 附录1 相关概念说明

**温室气体：**温室气体主要包括二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、甲烷（CH<sub>4</sub>）、氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）、氢氟碳化合物（HFCs）、全氟碳化合物（PFCs）和六氟化硫（SF<sub>6</sub>）等。这些气体能够吸收和重新辐射地球表面发射的红外辐射，导致地球表面和大气层下层温度升高，即所谓的“温室效应”。

**气候变化：**全球气候状态在统计意义上的长期显著变化，包括平均气温、平均降水量、最高气温、最低气温以及极端天气事件等的变化。

**碳汇：**从大气中清除二氧化碳等温室气体、气溶胶或温室气体前体的任何过程、活动或机制。简单来说，碳汇就像是一个“碳的吸收器”，能够将大气中的二氧化碳等温室气体吸收并储存起来，从而降低大气中温室气体的浓度，减缓全球气候变暖的趋势。

**碳库：**指碳的储存库，即在碳循环过程中，地球系统各个存储碳的部分。碳库通常包括地上生物量（如树木、植物等）、地下生物量（如根系、微生物等）、枯落物（如落叶、枯枝等）、枯死木和土壤有机质碳库等。这些碳库在地球碳循环中起着重要的作用，通过吸收、储存和释放二氧化碳等温室气体，影响着全球气候。

**碳封存：**将二氧化碳从大气中去除并以固体或液体形式保存或储存的自然或人工过程。在自然界中，植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳并将其作为碳储存在植物体内（树干、树枝、叶子、根）和土壤中。

**土壤碳封存：**通过将二氧化碳长期储存于土壤中，以减少大气中二氧化碳浓度，同时增加土壤有机质含量的农业实践。

**免耕：**是保护性耕作最彻底的形式，强调“零翻耕”与“高覆盖”，仅在播种时通过开沟器或专用播种机进行局部土壤扰动（如开窄缝播种）。同时，保留秸秆或残茬覆盖地表（覆盖率通常≥30%），减少土壤裸露。核心在于最大限度减少对土壤结构的破坏，避免破坏表层土壤团粒结构和微生物环境。

**少耕：**针对异常板结，不进行疏松则影响播栽的土壤进行的过渡性或适应性策略，与常规耕作（多次翻耕、耙地）相比，显著减少耕作频率和强度。可以采用浅耕、耩式犁等工具替代翻耕，保留部分残茬覆盖。可根据土壤条件和作物需求选择适度的耕作方式，如深松但不翻土。

## 附录2 附表1 生态农业及相近农业模式对比

附表1 生态农业及相近农业模式对比

模式	核心理念	耕地与否	覆盖与否	草的管理	肥的施用	对化学投入品的态度	代表性农场/机构
生态农业	资源永续利用、生态平衡、生物多样性、高效协同	适度耕作	部分覆盖（绿肥/秸秆）	保留杂草带，控制性除草	有机肥为主，少量矿物肥	严格限制或允许少量施用	中国弘毅生态农场
有机农业	拒绝合成化学物质，遵循认证标准	允许耕作	强调覆盖（秸秆/堆肥）	人工/机械除草	仅有机肥（堆肥/绿肥）	完全禁止	美国罗代尔研究所、德国诺曼有机农场
自然农法	零人为干预、生态模仿、土壤自愈	不耕地	自然覆盖（秸秆/杂草）	不除草	不施肥	完全禁止	日本福冈正信农场、泰国净土村
生物动力农业	宇宙能量与农业互动，农场为生命有机体	适度耕作（配合日历）	覆盖（秸秆/堆肥）	杂草用于制生物动力制剂	生物动力制剂（牛角粪/硅等）	完全禁止	奥地利塞肯多夫农场、美国陶米拉农场
活力农耕	宇宙能量整合、土壤生命力提升、拒绝化学输入	浅耕为主	强调覆盖（堆肥/绿肥）	杂草作绿肥或堆肥	牛角配方肥（生物动力制剂改良版）	完全禁止	瑞士哥德馆农场、新西兰生物动力研究中心
朴门永续农业	仿自然生态系统设计，资源循环利用	少耕/免耕	多层覆盖（活体/死物）	杂草资源化（覆盖/饲料）	堆肥/绿肥/生物炭	禁止合成成品	澳大利亚Tagari农场、台湾大地旅人
CSA社会生态农业	风险共担，产销信任重建、在地化食物系统、社区参与	依具体模式而定	依具体模式而定	依具体模式而定	多采用有机肥	多拒绝合成成品	美国安纳波利斯农场、北京小毛驴市民农园
再生农业	恢复土壤健康，提升碳汇能力、生态韧性	免耕/少耕	全覆盖（全年覆盖作物）	杂草与覆盖作物共生	堆肥/微生物肥/矿物肥	拒绝合成农药	美国布朗牧场、澳大利亚耶尔牧场
保护性农业	最小土壤扰动、永久土壤覆盖、作物轮作	免耕/少耕	强制覆盖（秸秆/作物残茬）	化学/机械除草	化肥+有机肥结合	允许合理使用	美国温斯洛农场

## 附录3 农友访谈大纲

### 农田管理与土壤碳储存潜力提升

#### 农户访谈大纲-川话版

#### 农户访谈框架

##### 访谈目标

- 了解农户对土壤固碳以及气候变化的关注程度与认识水平
- 了解农户在农田管理中采取什么有针对性的措施
- 为文献梳理提供指引，让文献梳理为农民服务
- 发现农户的语言，使用农户的语言
- 发现农户的需要，响应农户的需要

访谈开始时间：

访谈结束时间：

访谈地点：

访谈人：

##### 访谈提纲

#### 1. 自我介绍

大哥/姐/大爷/嬢嬢：我们是四川大学的老师，有些关于种地的事情，想请教一下，估计要个把小时，请问你有没有时间？等下我们摆龙门阵的时候，我需要录下音，因为回头要把摆龙门阵的内容打字打出来，录音可以帮忙，请问可以不？

2. 请问你有种地有好多年了？主要种植些啥子（话题引入，农户的背景和经验了解）？你家的田是平地、山地、丘陵地还是其他地？（农田的地形特点）

3. 那现在种地好种不？你觉得是啥原因呢？主要体现在啥子方面呢？种地上面最关心的是哪些事情？

（这些天气变化/天灾/极端气候给农业生产带来什么挑战？作物，品种，虫害，设施，管理）

4. 种地这些年来，你觉得近年来年份正常不正常？哪些方面觉得不正常？这种不正常是从什么时候开始的？你印象最深的是哪一次？

（农户观察到近些年的气候有什么变化？对气候风险有什么感知/观察？天气，自然灾害，减产，出行，温度/体感/健康，农事安排……）

5. 经历了过去几年的天气异常，你觉得以后的天气会不会有变化？对种地有啥子影响？那你准备咋办呢？

（是否有关注未来5年本地的气候变化趋势？是否有预估这些气候变化会对农业生产带来什么影响？）

6. 你家田里灌溉用水是哪里的水（地下水、河水等）？天干的时候，什么措施比较好？举个例子呢？暴雨的时候要做什么？雨多了又怎么办呢？病虫害呢？举个例子说一下呢？有没有买过农业保险？（为了应对这些变化，在农田管理/农事安排上做了什么？）

7. 今后几年你对田头的事情有啥子安排和计划？为啥子有这些安排计划？

（未来几年在农田管理/农事安排上有什么计划？）

8. 你们怎么判断好土和赖土（撒土）？你家田里的土是粘土、砂土还是啥子土？你关不关心地的好坏/肥力？你看到的哪些养地的做法比较好？你咋个晓得这种做法的效果好呢？养地有什么困难？

（是否关心土地的肥力质量？怎么判断土壤品质的好坏？怎么养护耕地土壤？觉得哪些土壤养护的方式效果更好？判断的标准是什么？现在养土和农田管理中，有什么困难和障碍？）

9. 你听说过气候变化没有？晓得是咋回事不？你给我讲一下呢？

10. 你了不了解好的土壤可以储存更多的碳，土里存更多的碳，空气里面的二氧化碳就可能减少，气候就可能变化的没有这么不正常？

11. 晓得这一点，你愿不愿意继续把地养好？你觉得哪些是容易做的？困难是什么？

（如果知道土壤对减缓气候变化的潜力和贡献，是否愿意在养土上继续坚持或投入更多？面临的困难是什么？）

12. 除了种地，生活中最关心的是哪些事情？

## 第二轮农户访谈提纲

访谈开始时间：

访谈结束时间：

访谈地点：

访谈人：

### 引入部分—开场白

大哥/姐/大爷/嬢嬢：我们上次请教过你关于种地和天气的一些问题，因为成都今年七八九月的天气对农业生产很不好，所以想补充了解一些情况，估计在二十分钟左右，你看方便吗？

### 问题

1. 请问你们农场7-9月遭遇的异常天气灾害有哪些？和往年比有什么特点？

2. 这些天气灾害给农场带来什么损失？农场有没有摸索出有效的应对方法？今后有什么计划来应对类似的天气灾害吗？

3. 农场开展农业生产时，要提前看天气吗？一般提前多久？通过什么途径了解天气？

## 附录4 附表2 受访农户信息

附表2 受访农户信息

序号	农场名称	农场面积	农场地形	种植类型	主要作物/产品	主要农田管理方式
1	成都DL农场	300余亩	平原	自然农法	蔬菜、大米等	免耕、覆盖、休耕、留草等
2	成都TL农场	30余亩	浅丘	生态种植	生姜、胡萝卜、土豆、辣椒、小麦等蔬菜和粮食作物	堆肥、沼液、轮作、间作、绿肥、休耕、多样化种植、生态控虫。
3	成都ZH农场	约25亩	浅丘	生态种植	水果、禽类	轮牧、除草
4	成都WJ农场	约30亩	平原	生态种植	蔬菜、甘蔗	改良土壤、生态控虫等
5	成都HL农场	30亩	山地	生态种植	水果、蛋类加工品等	改善管理、设施农业等
6	成都WX农场	25亩	丘陵	生态种植	五谷杂粮、蔬菜	种植旱稻、肥料管理
7	成都XM农场	3亩	平原	生态种植	蔬菜	堆肥、物理、生物防治等
8	成都LY农场	6亩	平原	生态种植	蔬菜	沼液、物理、生物防治等
9	成都CW农场	10余亩	平原	生态种植	蔬菜、肉类	土壤改良、种养循环
10	成都JY农场	约40亩	平原	生态种植	水稻、蔬菜、水果及加工品等	堆肥、物理、生物防治等
11	成都LX农场	50亩	平原	生态种植	蔬菜、水果等	种植覆盖作物、有机肥等
12	成都AG生态示范合作社	40亩	丘陵	生态种植	柑橘	绿肥、改善土壤、增加有机质等
13	成都AG生态示范合作社合作农友	6亩	丘陵	生态种植	柑橘	增加有机肥、轮作、科学管理等
14	成都AM农场	60亩	平原	生态种植	蔬菜、水稻	有机肥、绿肥、机器辅助等
15	成都YJ农场	约170亩	丘陵	生态种植	莲藕、红薯、杂粮等	生态平衡控虫、秸秆还田等
16	成都ZL农场	约30亩	山地	生态种植	水稻、豆类、蔬菜等	草覆盖、自然粪肥、适度除草、轮作等
17	成都JQ农场	300余亩	平原	生态种植	水稻、油菜、蔬菜、水果、禽类、鸡蛋、牛奶等	种养循环、轮作、种植多样化作物等
18	成都FQ农场	50余亩	浅丘	生态种植	葡萄	人工修枝、兔子粪、马粪等

续表

序号	农场名称	农场面积	农场地形	种植类型	主要作物/产品	主要农田管理方式
19	成都DF农场	约400亩	丘陵	生态种植	玉米、红薯、家禽和产品等	免耕、覆盖杂草、堆肥
20	成都ZY农场	10亩	丘陵	常规种植	柑橘	施用有机肥、轮作
21	成都JH合作社	约1300亩	平原	常规种植/ 高标准农田	主粮、水稻、小麦	间作、轮作、化肥、农药等
22	成都FP种植合作社	约1000亩	平原	常规种植/ 高标准农田	水稻、小麦	无人机喷药、施用有机肥等
23	成都QT农场	100亩	平原	常规种植	叶类蔬菜	增加农药喷施频率、有机肥、菌肥、定期灌水
24	成都ZX农场	3亩	平原	生态种植	蔬菜	农家肥、粪水施肥
25	成都ZD农场	1亩	平原	常规种植	蔬菜	减少化肥，增加农家肥、灌溉、疏通排水沟、打进口药

