

2023 年度回顾：

气候驱动的全球可再生能源 能源潜力资源 能源需求



TERTE WA THER MA OLI WE A



WORLD
METEOROLOGICAL
ORGANIZATION



IRENA
International Renewable Energy Agency



Climate
Change Service
climate.copernicus.eu

作者与贡献者

国际可再生能源机构：伊门·杰尔布吉，阿姆贾德·阿卜杜拉（前IRENA），迈克尔·雷纳，凯瑟琳·丹尼尔，扎法尔·萨马多夫

欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 气候数据服务机构：奇拉·卡纳佐，朱利安·尼古拉斯

世界气象组织：罗伯特·博斯科洛、哈密德·巴斯坦尼、克里斯托弗·休伊特、罗伯特·斯蒂凡斯基

WEMC：阿尔贝托·特罗克利，佩妮·博尔曼，克里斯蒂安·尼尔森

内部气候变化服务有限公司：托马斯·阿尔多罗，伊莲娜·雷斯蒂沃，马蒂亚·扎拉梅拉，斯蒂瓦诺·塞内代的 *te Collier, Kamlesh Dookayka, Toyo Kawabata, Deborah Ayres, Marisol Osman, Ilias Pechlivanidis, Yuh an Zheng, Sajith Wijesuriya, and experts of the WMO Services Commission Study Group on Renewable Energy Transition (SERCOM SG-RENE)*

封面照片：位于垃圾填埋场附近的环保型光伏发电厂和风力涡轮机农场安装。太阳能面板农场建立在垃圾填埋场上，风力涡轮机农场。可再生能源，Adobe Stock。

© 世界气象组织，国际可再生能源机构，以及欧洲联盟（由欧洲中期天气预报中心（ECMWF）代表），2025年

印刷版、电子版以及其他任何形式的出版物和任何语言的版权均由世界气象组织（WMO）、国际可再生能源机构（IRENA）和欧洲中期天气预报中心（ECMWF）保留。未经授权，可复制此出版物中的简短摘录，但必须明确指出完整来源。关于编辑信件和部分或全部出版、复制或翻译此出版物（文章）的请求，应发送至：

主席，世界气象组织（WMO）出版委员会

7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2
瑞士

电话：+41 (0) 22 730 84 03
电子邮件 publications@wmo.int

国际可再生能源机构（IRENA）马斯达尔城，
阿布扎比，邮编236

邮件： publications@irena.org

欧洲中期天气预报中心（ECMWF）通讯部门 – 柯普尼克团队

欧洲中期天气预报中心，ECMWF
罗伯特·舒曼广场3号
53175 波恩，德国

邮件： Copernicus-press@ecmwf.int

注意：

本文件由欧盟资助制作。然而，所表达的观点和意见仅代表作者本人，欧洲委员会或ECMWF对其中所含信息的任何使用均不承担责任。

内容

前言.....	3
摘要.....	4
关键信息.....	5
1 全球对2023年可再生能源资源的看法	7
1.1 引言.....	7
1.2 关键气候观测数据 (2023年)	9
1.3 风力发电容量系数.....	10
1.4 太阳能发电容量系数.....	12
1.5 水力发电代理指标.....	15
1.6 能源需求代理指标...第17页	
2 区域视角.....	
2.1 非洲.....	20
2.2 亚洲	22
2.3 南美洲.....	25
3 适应气候变化与季节性气候预测.....	27
3.1 风速季节预报.....	28
3.2 太阳辐射季节预报.....	29
3.3 降水量季节预报.....	29
3.4 温度季节预报.....	30
4 结论.....	32
4.1 关键信息.....	33
5 方法	34
5.1 风力发电容量系数计算.....	35
5.2 太阳能光伏发电容量系数计算.....	36
5.3 水力发电代理.....	38
5.4 能源需求代理.....	39
5.5 季节性预报技能度量.....	41
5.6 季节性预报评估.....	42
6 参考文献.....	44

前言

世界正处在一个关键的历史时刻，关乎为所有人创造一个宜居的星球。随着气候变化加速——由史上最热的一个十年推动——我们必须集体行动，以确保巴黎协定的气候目标触手可及。为了将长期全球平均地表温度的上升控制在工业前水平以上 2°C 以下，并追求将其限制在 1.5°C 以内的努力，我们需要通过果断扩大可再生能源解决方案的规模来做出紧急而彻底的温室气体排放削减。

在COP28上重申的里程碑，以及呼吁到2030年将可再生能源能力增加三倍、提高能源效率一倍的全球呼吁，突出了实现低碳、气候韧性经济的紧迫性和可行性。这一目标将由技术创新、政策一致性以及基于气候信息的策略来支持。

本年度《气候变化驱动全球可再生能源潜力资源与能源需求回顾》的第二版概述了气候变化/变率与可再生能源之间不可分割的联系。无论是干燥条件下太阳能发电、从拉尼娜转向厄尔尼诺条件的地区风力发电，还是面对降水模式波动的水电发电，气候对能源供应和需求都有直接影响。这些挑战也带来了前所未有的机遇：将气候洞察力融入能源规划可带来更可靠的电力生成，有助于预测季节性需求高峰，并增强未来基础设施发展的适应性。

本报告中提出的最新分析呼吁推进连接气候科学和能源创新的工具、知识和政策。同时，建议转向多元化的能源组合以保障能源安全和弹性，以及创造新的市场结构以考虑到新型和清洁能源系统的灵活性。

跨国界和行业间的合作至关重要。报告的发现还说明了稳健的数据收集和共享的至关重要性，这有助于进行更细腻的分析，以指导能源规划者、政策制定者和利益相关者优化资源配置，提高能源安全，并增强对极端事件的抗御能力，尤其是在全球能源转型加速的背景下。

联合由哥白尼气候变化服务（C3S）、由欧洲中期天气预报中心（ECMWF）运营、国际可再生能源机构（IRENA）和世界气象组织（WMO）共同制作的本报告，展示了在应对气候变化挑战过程中，专业国际机构之间协作的力量。现在是推动一个新纪元可持续发展的时刻——在这个时代，综合气候服务和前瞻性的能源政策将构建一个更加坚韧、包容和繁荣的全球社区。



Celeste Saulo 教授
秘书长
世界气象
组织（世界气象组织）



弗朗切斯科·拉卡梅拉 国际可再生能源机构（IRENA）总干事



卡洛·布昂特莫医生
柯尼克斯项目主任
气候变化服务
在ECMWF



高管总结

扩大可再生能源规模以实现净零未来

全球能源格局正处于关键时刻，迫切需要采取紧急行动以实现2015年巴黎协定和2023年COP28所提出的气候目标。《阿联酋共识》强调了到2030年将全球可再生能源（RE）产能增加三倍和能源效率翻倍的关键需求。实现这些目标是限制全球气温上升至1.5°C和到2050年实现净零排放的必要条件。可再生能源来源——太阳能、风能和水能——对于实现能源系统去碳化、保障能源安全和构建气候韧性至关重要，同时还要应对全球能源需求不断上升的挑战。

气候变化在可再生能源中的作用

过去二十年见证了风能和太阳能装机容量的稳步增长，以及它们在全球电网中的份额。这些能源，连同水力发电，高度依赖于气候和地貌条件，因此，了解气候变率和变化对于优化发电和确保能源系统稳定性至关重要。气候还在塑造能源需求方面发挥着重要作用，特别是在供暖和制冷方面，强调了需要对各地区能源供应和消费模式进行综合分析的需求。

2023年的气候背景

气候变化已成为影响可再生能源发电和能源需求的一个关键因素。2023年标志着从拉尼娜现象过渡到一个成熟的厄尔尼诺阶段，影响了风速、太阳辐射、降水和温度等关键气候变量。这些变化发生在全球变暖的背景下。2023年，全球近地表平均温度达到比1850-1900年平均值高 $1.45^{\circ}\text{C} \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ ，使其成为当时气温最高的年份，超过了2016年和2020年。理解和管理这些动态对于优化可再生能源部署及其发电，以及可持续地满足不断增长的能源需求至关重要。

地理能源指标的地理变异性

关键能源指标——风能、太阳能、水能和能源需求——在2023年显示出显著的地理变异性，这可以通过与1991-2020年气候参考期的百分比偏差来展示（见图A）。水能和能源需求指标分别以降温和供暖/制冷需求为依据表示，并不能直接与风能和太阳能容量因子（CF）偏差进行比较。

受更干燥和更温暖的厄尔尼诺条件驱动，南美洲太阳能光伏（PV）CF增长了3.9%，预计该地区50吉瓦的装机容量将额外产生3.5太瓦时/年的发电量。同样，东亚的风电功率也出现了4.1%的正异常，从其420吉瓦的陆上装机容量中产生了预计45太瓦时的电量，其中95%来自中国。这些例子强调了气候因素在塑造可再生能源发电中的作用以及需要适应性强的能源规划策略。

推进基于气候信息的能源规划

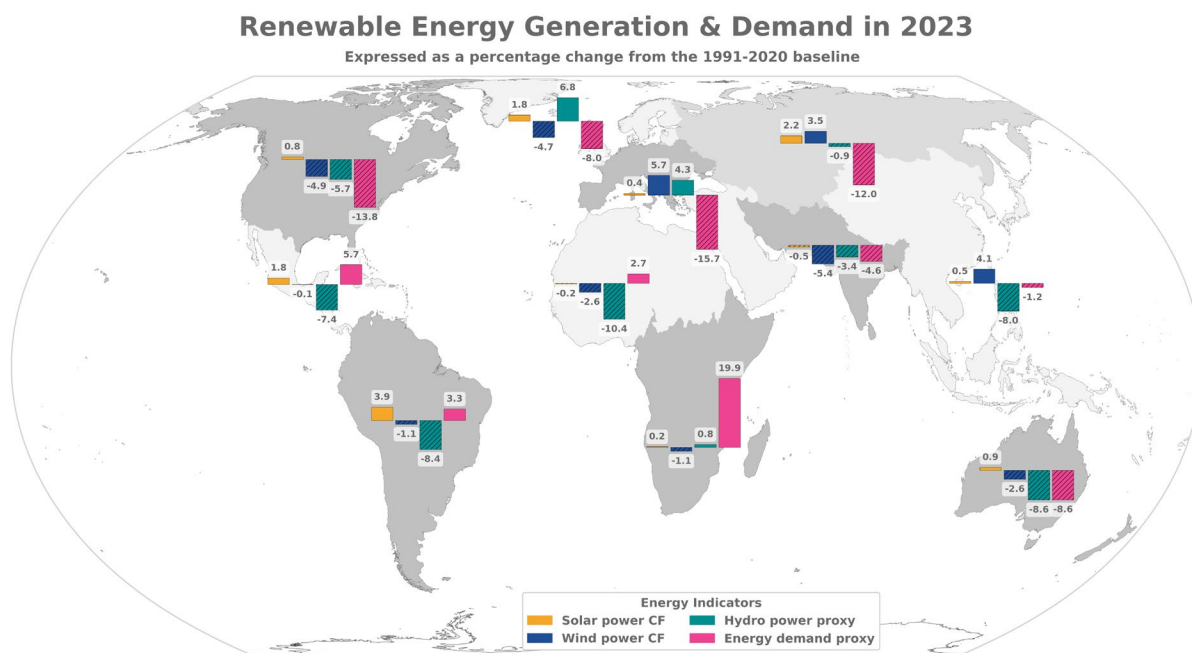
将气候信息整合到能源规划中对于应对气候变率的挑战日益关键。本报告介绍了基于气候模型进步的季节性气候预报，这些预报提供了关于资源变率和能源需求模式的概率性洞察，如本报告通过南美洲的案例所展示的那样。此类信息和工具使利益相关者能够预见供需波动、优化电网运营并提高能源系统的弹性。

水电水库管理、风场选址和太阳能优化可以从气候信息驱动的决策中显著获益。季节性预报也有助于更好地准备极端天气事件，确保能源安全并最小化中断。

政策对实现2030年目标的影响

多元化能源组合，结合风能、太阳能和水电，以及地热能和储能等新兴技术，对于缓解气候变化对可再生能源发电和管理的影响至关重要。区域合作和地方化解决方案也将对平衡供需动态、优化跨境能源流动和构建弹性能源基础设施发挥关键作用。采用基于气候信息的协作方法将加速向可持续、净零排放未来的迈进。

满足到2030年雄心勃勃的能源可再生（RE）目标需要采取多方面方法，包括技术创新、政策协同和基于气候信息策略。政策制定者必须利用如季节性预报等工具，以及其他天气和气候服务，以增强可再生能源系统的可靠性，尤其是在预报精度较高的地区，如热带地区。这与有关可再生能源推广、更广泛的能源转型和气候稳定化努力的整体综合和整体方法是一致的。这些努力只有当它们将支持可再生能源部署的措施与它们在能源系统中的谨慎整合以及旨在升级和平衡电网的并行政策相结合时才能成功，这不仅是在特定国家内部，也包括在地区内部。



图表A. 本报告呈现的四种能源指标——风能、太阳能、水电和能源需求——的全球年度偏差。偏差以百分比表示，为2023年相对于1991-2020年参考期平均值的差异，并且按区域汇总。为了便于识别，负值用网点强调。

注意：本图所示边界、名称以及使用的设计方案不代表世界气象组织、联合国、国际可再生能源机构或欧洲联盟的官方认可或接受。

关键信息

(1) 气候变化和变异性对能源指标产生重大影响。 在2023年，评估的能源指标——风力发电容量因子（CF）、光伏（PV）容量因子、水力发电近似值和能源度日（EDDs）——显示出由气候变率和气候变化驱动的变化。这些影响按技术和国家而异，每年和每月的平均值都观察到了显著的百分数异常。而光伏容量因子显示的年度异常相对较小（与1991-2020年相比低于10%）。

气候参考时期），风力发电容量因子（CF）表现出明显的变异性，许多地区每年的变异性超过15%。这强调了在能源系统规划和操作中考虑气候变异和变化的重要性。

(2) 理解气候驱动因素对于能源弹性至关重要。 2023年从拉尼娜转向厄尔尼诺的过程，作为厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的两个相反阶段，凸显了大规模气候驱动因素，如ENSO，在塑造能源系统中的关键作用。厄尔尼诺的干燥和温暖条件显著影响了能源指标，包括在南美洲增加太阳能光伏发电和东亚增强风能。对这些驱动因素（它们解释了显著的气候变率）的更好理解和准确预测，使利益相关者能够更有效地管理能源资源，优化发电并预测需求波动，促进更加弹性高效能源转型。

(3) 气候变率信息需要融入到能源系统规划和管理中。 2023年创纪录的高温和气候驱动的能源变率凸显了将气候变率纳入能源规划的需求。这种整合可以支持建立早期预警系统，以提高能源负荷管理、资源优化和维护调度。它还可以指导能源基础设施的现代化和扩展，促进技术、市场和政策的创新，以确保在多变气候中的韧性。

(4) 灵活的市场结构对于能源转型至关重要。 电力市场结构的调整对于从集中式向分布式电源系统过渡过程中的灵活性保障至关重要。灵活的市场设计必须能够促进高价值可再生资源的采购，同时容纳灵活的解决方案。一个“双采购”系统，支持可再生资源优化和灵活资源的部署，是实现这一目标的可行途径。

(5) 应通过多元化和促进区域协作来增强韧性。 多元化的能源组合，结合太阳能、风能、水能和新兴技术，对于管理气候变化的影响和确保能源安全至关重要。区域合作对于平衡跨国界的能源供需至关重要。协作努力可以最大化可再生能源潜力，增强电网稳定性，并构建有弹性的能源系统。

(6) 发展中国家拥有巨大的发展机遇。 发展中国家可以利用其可再生能源潜力来解决能源获取挑战，同时利用对气候变率的了解。例如，尽管可再生能源资源丰富，非洲在全球装机容量中仅占2%。通过整合资源潜力与气候信息，国家可以有效地发展可再生能源基础设施，以支持工业化和经济增长，加速整个大陆的可持续发展。

(7) 全面能源数据收集和共享至关重要。 系统性和详细的能源数据收集与共享对于深化对气候变化对能源供需影响的理解至关重要。虽然这里展示的能源指标提供了一个简化的视角，但更具有代表性的指标需要获取到稳健的数据集，包括关于装机容量和实际发电的详细信息。透明和协调的数据共享实践将能够促进能源行业更精确的建模和更具信息量的决策。

1 全球视角下的2023年可再生能源资源

1.1 引言

从第二十八次联合国气候变化框架公约（UNFCCC）缔约方大会（COP28）及随后形成的阿联酋共识中，一个关键信息是通过国际协定确立的碳减排目标的加强，特别是2015年巴黎协定。值得注意的是，阿联酋共识设定了一个雄心勃勃的全球目标，即到2030年将可再生能源发电能力翻三番，并将能源效率提高一倍（国际可再生能源机构，2023）。向可再生能源（RE）的重大转型对于实现2050年净零排放至关重要。这代表着通过扩大包括太阳能、风能、水能、地热能和海洋能在内的清洁能源来源，持续致力于能源部门的脱碳。

电力资源（此处指风力、太阳能和水电）在遵循净零排放路径的全球转型中扮演着关键角色（IRENA, 2022）。鉴于这些资源受气候因素的影响较大，因此理解气候因素对可再生能源发电的影响至关重要。气候同样影响能源需求，尤其是在供暖和制冷方面，这也是为何在此也考虑了能源消耗模式。

正如在首份2023年世界气象组织-国际可再生能源机构联合报告（[2022年度回顾：气候驱动的全球可再生能源潜力资源与能源需求](#)），该机构回顾了2022年的气候状况，随着过去二十年全球风力发电和太阳能发电的总装机容量——以及它们在电网中的份额——稳步增长，监测和理解气候变率和变化的重要性日益增加。

风力发电装机容量在2023年超过1 000吉瓦，比2022年增长13%（比2014年增长190%）。太阳能发电的增长速度远快于风能，2023年的装机容量达到1 420吉瓦，比2022年增长32%（比2014年增长680%）（IRENA, 2024a）。2023年太阳能发电装机容量已超过水力发电，此前水力发电在可再生能源中装机容量最大。具体而言，水力发电略有增长，2023年的装机容量约为1 410吉瓦，比2022年增长1%（比2014年增长20%）。

实现1.5°C气候目标需要在2030年和2050年大幅增加可再生能源（RE）产能。具体而言，预计到2030年风能产能将达到约3,000吉瓦，到2050年将达到8,000吉瓦；太阳能产能预计到2030年将扩大到约5,400吉瓦，到2050年将达到18,000吉瓦；水电产能预计到2030年将增长到1,500吉瓦，到2050年将达到2,500吉瓦（IRENA, 2023）（见表1）。这些数字与2023年COP28期间在阿联酋共识中设定的目标一致，该共识强调了到2030年将可再生能源产能翻三番的必要性。此外，国际可再生能源机构（IRENA）报告称，在2010年至2023年期间可再生能源技术成本显著下降，太阳能成本下降了约90%，风能成本下降了约68%（IRENA, 2024c）。

实际发电量取决于容量系数（CFs）——即电力系统平均发电量与其标称额定（或最大）功率的比率。因此，在产量方面，与2021年相比，2022年（最新可用数据）水力发电量达到4 470太瓦时（增长了1%），风力发电量为1 840太瓦时（增长了13%），太阳能发电量为1 030太瓦时（增长了25%）（IRENA, 2024b）。

2023年，来自所有来源的总全球电力消费，包括可再生能源，达到29500太瓦时，较2022年增长3.3%，比十年前的2014年增长了26%（Ember，2024）。这标志着从2021年至2022年需求增长2.5%之后的进一步增长。根据IRENA（2023）的数据，2022年的总可再生能源电力发电量为8440太瓦时，高于2021年的7860太瓦时，这意味着可再生能源在2022年满足了全球29.6%的电力消费，较2021年的28.2%有所上升。

在新兴市场和发达经济体——占世界人口的近85%——过去十年中，能源需求以每年2.6%的平均速度增长。这一增长是由超过7.2亿人口的增长、经济产出扩大50%以及工业生产增长40%所驱动的。自2010年以来，电力需求以每年2.7%的平均年增长率增长，超过了总体能源需求每年1.4%的增长。电力在提供供暖、交通和工业能源需求方面越来越取代化石燃料。根据目前的政策设定，全球电力需求预计到2050年将几乎翻倍，从2023年的26 000太瓦时增加到约50 000太瓦时。这种增长主要受轻工业消费、电动交通、冷却、数据中心以及人工智能技术的广泛应用（IEA，2024）所驱动。

表1. 全球风力发电（WP）、太阳能光伏（PV）和水电（HP）的装机容量汇总。同时展示了2022年的对应发电量（截至撰写本报告时的最新数据）。最后一行报告了全球总能源消耗。

来源：IRENA, 2024a, 2024c; IPCC, 2022b; Ember 2024

	2014		2022		2023		2030	2050
	容量生成 (GW)	容量生成 (太瓦时)	容量生成 (GW)	容量生成 (太瓦时)	容量生成 (GW)	容量生成 (太瓦时)	容量生成 (GW)	容量生成 (GW)
WP	350	712	903	2 100	1 020		3 000	8 000
太阳能光伏	180	193	1 070	1 390	1 420		5 400	18 000
惠普 (HP)	1 180	3 990	1 360	4 470	1 410		1 500	2 500
总能量 消费		23 400		28 500		29 500		

在本报告中，可再生能源的潜力与能源需求通过相对简单且稳健的指标表示，这些指标在全球范围内以国家为单位进行呈现。以下各节概述了这些指标的定义，涵盖陆上风力发电（简称风力发电）。¹ 太阳能光伏（PV）发电（也称为太阳能），水力发电和能源需求² 请注意，由于国家规模存在显著差异，特别是非常庞大和非常小的国家之间，比较国家可能会很具挑战性。此外，对于大型国家而言，这些平均值可能无法捕捉到区域差异，例如适宜能源生成系统的地点与更偏远地区之间的差异。因为此处报告的能源指标变化是按国家平均计算的，因此为了获得更详细的见解，应在区或厂级进行更具体的评估。本报告中提供的信息作为更本地化评估的一般指南。

本出版物的主要重点是评估气候变率——而不是长期气候变化——对可再生能源潜力和能源需求的影响。然而，分析还考察了2023年与长期气候参照期相比的情况，以1991-2020年的30年跨度作为基线。这个基线期，作为推荐的标准化气候参照期，有助于理解观察到的偏差或异常。

¹ 关注重点在陆上风力发电，因为结果是在国家陆地层面汇总的。对于大多数国家——除了像中国或美国这样的大国——陆上和海上风力发电的信号可以合理地假设是相似的。

² 进一步关于能量指标计算的具体细节在方法章节中提供。

2023年。鉴于全年现金流量（CF）的显著季节性变化，还评估了所选月份的偏差，将2023年每个月份与30年参考期（也称为“气候学”）中相应月份进行比较。

总体而言，这些偏差通过指出资源和需求的变异性程度和模式，为可再生能源规划、资源管理和电网运营提供了有价值的见解。此评估不仅旨在进行回顾性分析，而且还旨在支持能源领域的未来决策。

在接下来的部分中，首先在全球化层面上分别评估RE资源与需求，然后讨论它们相互作用的含义，这在区域（次大陆）层面上更有效地实现。此外，指标以百分比异常值（与基准期1991-2020年相比，以2023年为基准）表示，但根据具体语境，其他术语如“变化”、“信号”、“变化”或简单地说“异常”也被用来表示“百分比异常”。

1.2 2023年关键气候观测

2023年，全球近地表平均温度比1850至1900年的平均值高 $1.45^{\circ}\text{C} \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ ，创下了当时有记录以来最热的一年，超过了之前的记录。

—记录年份2016年和2020年。全球月度温度记录，尤其是海洋温度，从4月到12月保持持续升高，以及陆地温度，从7月到11月较高（。 [全球气候状况2023](#) (WMO-No. 1347)。2023年全球温度异常对各个区域贡献的月度变化显示了热带海洋上温暖温度的显著影响，尤其是在2023年最后几个月，来自北半球温带陆地区域的影响尤为突出（C3S，2024a，2024b）。

厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）影响全球的区域气候模式，影响风速、太阳辐射、降水和温度等变量。尽管与厄尔尼诺和拉尼娜事件相关联的区域模式是典型的，但个别事件之间的气候响应可能会有很大的变化。³

从长期的拉尼娜阶段（2020-2023）到2023年9月的完全发展厄尔尼诺，很可能是全球温度上升的原因。然而，在东北大西洋的异常升温并不符合典型的厄尔尼诺模式，这表明还有其他因素在起作用。这一异常升温的确切原因仍在调查中，因为内部气候变化和人为强迫似乎并不能完全解释所观察到的上升（Schmidt，2024）。到2023年底，一个强大的厄尔尼诺已经形成，海洋厄尔尼诺指数在11月至1月期间达到 2.0°C ——自2015/2016年厄尔尼诺以来最高值。⁴

除了ENSO（厄尔尼诺-南方涛动）之外，其他气候模式，如印度洋偶极子（IOD）和北大西洋涛动（NAO），也对全球天气产生了显著影响。2023年出现的正印度洋偶极子加剧了澳大利亚的干旱条件，同时在该地区2020年至2023年初的长期干旱之后，导致非洲之角出现重雨和洪水。这些气候现象对能源系统和资源规划具有重大影响。

³ 这些模式在技术上的称呼是遥相关。更多信息可在以下链接获取：[\[链接地址\] https://www.weather.gov/fwd/teleconnections](#) .

⁴ 参见例如美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的ENSO监控系统：[https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso](#) .

1.3 风力发电容量系数

一个有用的指标，用于理解与能源部门相关的气候变率，是相对于一个参考时期，对于给定年份的CF（以百分比异常表示）的相对变化。全球月度风力发电CF，如从以下来源获得：[能源天气](#) (WfE) IEA门户网站的计算考虑了单个100米塔高风力涡轮机和在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 空间分辨率下的100米风速（IEA; CMCC, 2023）。⁵ 每月相对于1991-2020年参考期间的月平均值的2023年风力发电CF异常值随后被计算。

当将2023年全年数据平均计算时，年度风电CF异常值显示出相对较大的数值和明显的模式，这些模式影响了发电潜力（图1，顶部）。例如，在南非、东亚（包括中国）、墨西哥和中欧东部可以看到显著的正向变化。⁶ 在4%至12%之间。具体而言，中国的并网陆上风电装机容量超过400吉瓦（约占总全球装机容量的40%）（IRENA, 2024a），其CF（现金流）增加4%至8%，可能会意味着电力产出的显著增长，相当于额外约65太瓦时。这一年（或每人每天130Wh）。⁸

另一方面，许多国家观察到风能资源减少或负变率。这包括南亚、中东、非洲之角以及西非、北美和北欧的一些国家。特别是，印度CF减少了4%–8%，该国装机容量超过40吉瓦（这比中国的装机容量小得多），这仍可能导致对电力产生的显著影响，减少约7太瓦时的发电量。

与2022年相比，2023年异常情况的发展也颇具趣味（图1上下部分分别展示）。在许多情况下，两种年份之间的异常情况符号发生了反转。这种转变可能是由于2022年拉尼娜现象的普遍存在以及2023年向厄尔尼诺现象的转变所导致的。这在受ENSO影响的典型国家（如澳大利亚和索马里、埃塞俄比亚和肯尼亚等东非国家）尤为明显。然而，由于这些数值代表年度平均值，且2023年两种现象都存在，因此这些变化需要更深入的考察。

因此，六月和十一月已被选为单独的月份来评估所有四个指标。关注单独月份的另一个关键原因在于，电网管理、储能集成、需求响应策略和维护通常发生在与月度周期相一致的时间尺度上，而不是年度尺度上。此外，由于较短时间内的气候变率更大，月度变化往往大于年度平均值（即，较长的平均周期往往会平滑信号）。请注意，用于月度图表的数值范围是年度图表的两倍。

2023年6月标志着从2022/2023年的拉尼娜现象向2023/2024年的厄尔尼诺现象的过渡，并且——如此类过渡的典型情况——在这一时期ENSO的气候信号并不强烈。2023年6月的风力发电CF异常，与1991–2020年6月的平均值相比，显示出明显的空间分布，其中存在显著负异常。

⁵ 风电转换模型使用的高度简化，因为存在许多不同的风力涡轮机类型，塔架高度范围宽广。这里简化的模型旨在比较2023年与气候学时期1991-2020年，而不是计算具体年份的实际值。值得注意的是，CF值低于0.1的网格点在 国家平均数中未予考虑（更多信息请参见方法学部分）。

⁶ 关于2023年欧洲异常情况的讨论，请参阅《2023年欧洲气候状况》：
<https://climate.copernicus.eu/esotc/2023/renewable-energy-resources> .

⁷ 假设平均CF为0.3，以及6%的增长（4%-8%范围的平均值）。

⁸ 假设中国人口为14亿。

许多地区（图2，左）。这些地区包括大部分的东南部非洲（南非是明显的例外），中东，大部分南美洲，北美洲，东南亚，澳大利亚以及大部分欧洲。除了南非，只有少数国家，特别是在西非，表现出明显的正异变。

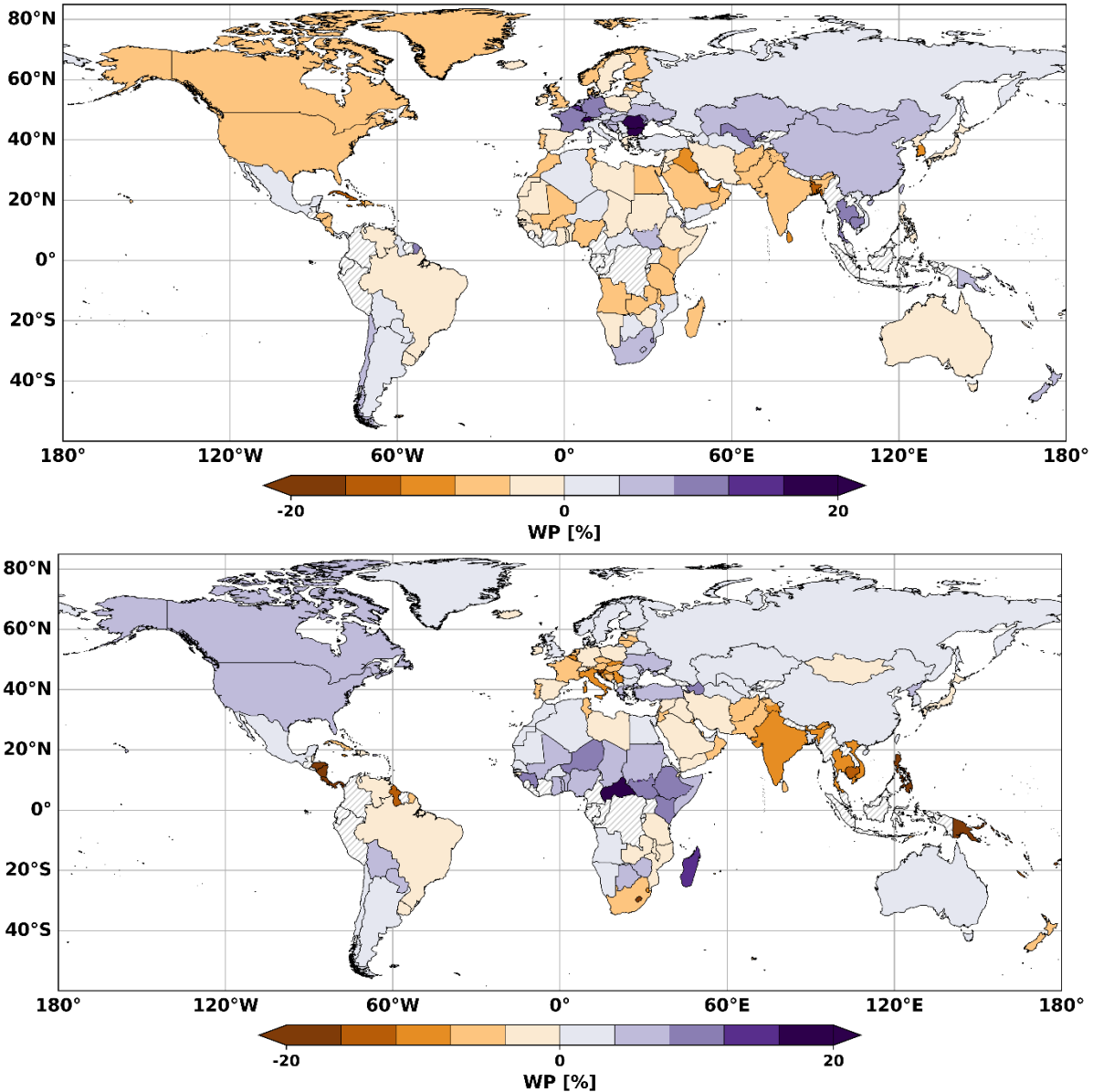


图1. 2023年（顶部）和2022年（底部）全球风力发电（WP）容量因子年度平均值（以百分比表示），相对于1991-2020年参考期平均值。阴影表示由于计算风力发电容量因子时所做的假设，没有可用数据的国家（参见方法部分）。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计指定不表示官方WMO、联合国、IRENA或欧盟的认可或接受。

值得注意的是，尽管2023年年度平均异常值模式与2023年6月观测到的模式在某些方面存在相似之处，尤其是在东非、巴西和澳大利亚，但6月份异常值的幅度明显更加显著。例如，在巴西，异常值从年度平均的-0%至4%范围增加到2023年6月的-8%至16%范围。

2023年11月，许多在2023年6月观察到的异常现象得以逆转，尤其是在南美洲、南部非洲、亚洲大部分地区 and 欧洲的大部分地区。除了南部地区之外，其他地区的情况也是如此。

非洲这些地区目前展现出强阳异常现象，其中巴西和阿根廷的增长率为16%至24%，巴拉圭超过32%。值得注意的是，中国以及大多数中亚地区也显示出强阳异常现象，而印度和巴基斯坦则呈现出负异常。这些变化，尤其是在邻近国家之间，表明潜在的力量均衡，其中中国和中亚地区的“盈余”可能抵消南亚地区的“赤字”。

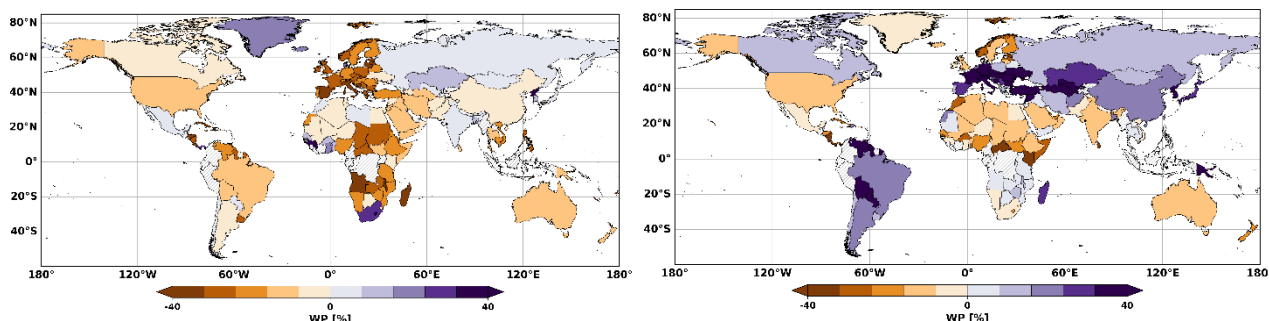


图2. 2023年6月（左侧）和11月（右侧）全球风电（WP）容量因子年平均值（以%表示）相对于1991-2020年相应月份的平均值。注意，数值范围是年平均值的两倍。

注意：本图所示边界、名称以及所使用的设计标识并不表示世界气象组织（WMO）、联合国、国际可再生能源机构（IRENA）或欧盟的官方认可或接受。

1.4 太阳能发电容量系数

太阳能光伏功率CF，也称为太阳能光伏CF，是通过一种简单的公式计算的，该公式考虑了全球太阳辐射，同时考虑到近地表的空气温度和10米风速引起的效率调整。⁹ 该方法的主要局限性在于它假设了在不同地理位置的PV太阳能电池板具有恒定的倾斜角度。然而，这种简化并不特别有影响，因为我们在此关注的重点是相对变化，而不是绝对CF值。

全球光伏CF的年度异常值，与1991-2020年的基准值相比，如图3（顶部面板）所示。值得注意的是，这些异常值的范围比风能CF的异常值要小（太阳能光伏CF为 $\pm 10\%$ ，而风能CF为 $\pm 20\%$ ）。从年度趋势来看，太阳能光伏CF的变化通常在大多数国家接近零，变化范围为 $\pm 2\%$ ，而在南美洲的部分地区观察到最显著的变化，即正值4%-6%的异常，包括玻利维亚的多元国家、哥伦比亚、玻利瓦共和国的委内瑞拉和巴西。具体到巴西而言，2023年安装容量为37吉瓦（IRENA，2024a），这一增长将转化为额外的30吉瓦时电。¹⁰ 每年能源生产，或每天每人37瓦时。¹¹

⁹ 值得注意的是，CF值低于0.1的网格点不被纳入国家平均值计算（详见方法部分以获取更多详细信息）。

¹⁰ 假设平均CF为0.18，并且增加5%（4%至6%范围内的平均值）。

¹¹ 假设巴西人口为2.15亿人。

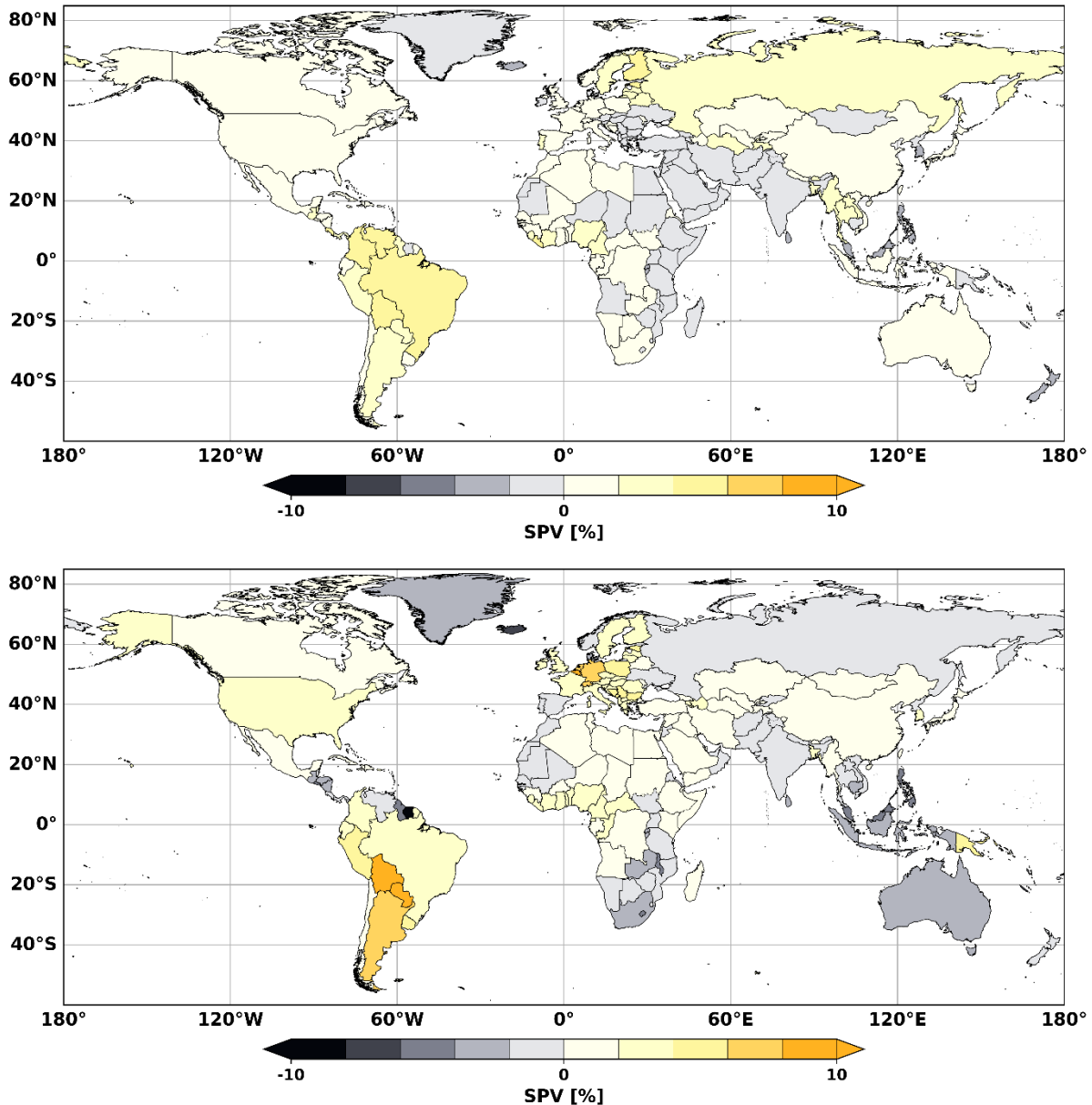


图3. 与1991-2020年参考期平均值相比，2023年（顶部）和2022年（底部）全球太阳能光伏（SPV）发电容量系数年平均平均值（用百分比表示）。

注意：本图所示边界、名称和设计ations并不表示世界气象组织(WMO)、联合国、国际可再生能源机构(IRENA)或欧洲联盟的官方认可或接受。

大规模的空间模式也体现在太阳能光伏CF异常中。例如，正变异性在南美洲的大部分地区、包括中国在内的几个东南亚国家以及非洲西部部分地区观察到。相比之下，具有负太阳能光伏CF异常的广大区域从东非延伸至中东到印度。负CF变异性也出现在欧洲的大部分地区。在东非，特别是在坦桑尼亚联合共和国北部，太阳能光伏CF的减少与WP CF的类似减少相一致（图1，顶部）。这表明一种气候模式，很可能是由ENSO引起的，其特征是多云条件增加，影响太阳辐照度和近地表风。

从电力生产的角度来看，风能和太阳能来源在区域范围内的这种广泛但微小的CF下降可能需要补偿策略，例如采购

来自替代发电来源或从邻国进口的电力。¹² 例如，东非可以考虑从南苏丹（风能和太阳能）或从刚果民主共和国（DRC）和赞比亚进口太阳能，而亚洲那些负CF变化的地区可能会探索从中亚（例如，土库曼斯坦和乌兹别克斯坦）或邻近的巴基斯坦进口；这些国家CF变化均为正值。

应注意，这些考虑事项仅为示例，并不能完全涵盖：(i)已安装的容量或输电线路的可用性；(ii)实际的CF（提供的数字仅显示相对变化）；(iii)替代能源的可用性（亦参见水力发电代理指标部分）；(iv)对负载平衡至关重要的气象条件，尤其是在亚日时间尺度上。尽管如此，这些观察结果突显了将气候驱动的变异性整合到能源政策和规划中的重要性，以增强电网弹性并优化在变化条件下的跨境电力流动。

几个差异在2023年和2022年太阳能光伏CF模式之间是显而易见的（图3，顶部和底部分别表示）。在一些地区，CF变化的符号在两年间发生了反转，就像风CF一样，例如在北美、俄罗斯联邦、澳大利亚、大部分欧洲和东南亚。在其他地区，例如南美洲（例如，玻利维亚多国、巴拉圭和阿根廷，年增长超过6%）和南部非洲（赞比亚、莫桑比克、博茨瓦纳和南非显示2%–4%的减少），符号保持不变，但2022年的变化幅度更大。这种差异可能再次归因于2023年是拉尼娜和厄尔尼诺之间的过渡年，气候信号往往相互平衡，与受拉尼娜影响的2022年相比。这些地区——包括澳大利亚、东非和东南亚，这些地区的变异符号也发生了转变——是受ENSO影响最大的地区之一。

2023年6月，中南美洲、亚洲和欧洲的多个国家在太阳能光伏CF方面与1991-2020年6月的平均值相比出现了正异常。欧洲的结果与以下内容相符：*欧洲气候状况2023* 尽管阳光明媚的南欧国家实际上看到了CF的相对下降。相反，非洲、中东、美国（USA）和澳大利亚的大部分地区在同一月份出现了负异常，一些撒哈拉以南非洲国家的降幅达到4%–8%。再次考虑风能和太阳能CF之间的平衡，存在明显的区域差异。例如，在撒哈拉以南非洲的大部分地区，风能和太阳能CF均为负值，电力生产短缺的可能性很大。这种短缺在该地区已经面临重大电力短缺和有限的或没有备用能力的情况下尤其令人担忧。相比之下，南美洲显示出补偿性模式，太阳能光伏CF的整体正值变化抵消了风能CF的负值变化。

在11月与5月相比，太阳能光伏CF的整体变化更为显著，尽管这些变化在两个月份之间不一定保持一致的符号。例如，墨西哥、美国、加拿大、印度和俄罗斯联邦等大型国家，其异常值的符号发生了反转。最显著的变更是出现在中非和东非，这主要归因于厄尔尼诺的影响，同时也因同时出现的IOD的正相而进一步加剧。虽然这些条件对水资源有益，因为它们通常带来高于正常的降水量，但它们自然也会导致云层增加。这导致太阳能光伏CF显著下降，在索马里、肯尼亚、中非共和国和布隆迪，下降幅度从12%到16%，而在南苏丹、乌干达和坦桑尼亚联合共和国，下降幅度从8%到12%。

¹² 重要的是要重申，跨境电力交易所的实际可行性取决于国家规模差异、国内差异以及输电基础设施的可获得性等因素。

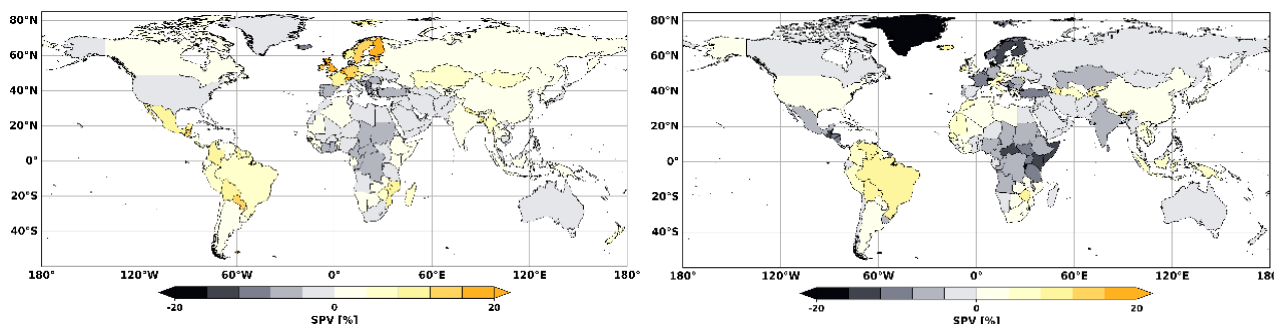


图4. 与1991-2020年间对应月份平均值相比，2023年6月（左）和11月（右）全球太阳能光伏（SPV）发电容量的年度平均值异常值（以%表示）。注意，值的变化范围为年度平均值的两倍。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计指定不表示官方WMO、联合国、IRENA或欧盟的认可或接受。

1.5 水力发电代理指标

水力发电指标通过一个基于特定地点降水量和水电厂装机容量的组合代理来表示。仅考虑位于子国家地区的月降水量数据，每个电厂的装机容量用于相应地加权降水量数据。这个被称为装机容量加权总降水量（IWP）的水力发电指标，在月尺度上计算为容量加权的国家平均值。该指标基于三个月滚动平均值，包括目标月份的前两个月。¹³ 图5（上图）显示了2023年的IWP平均变化情况，相对于1991-2020年期间。没有大型水力发电厂的国家的指标被排除在外，如图所示。

按年度平均值计算，IWP在2023年与1991至2020年期间相比普遍减少了，特别是在南美、北美、中国和俄罗斯地区。

— 联邦、南亚和澳大利亚。值得注意的是，苏丹和纳米比亚的降幅超过50%，但这些数字由于它们通常的低年降雨量而被放大。例如，苏丹在2023年（根据ERA5再分析数据（Hersbach等人，2020年））的降雨量仅为100多毫米，而长期平均降雨量约为250毫米，而纳米比亚的降雨量约为200毫米，而长期平均降雨量约为350毫米。这些减少可能具有重大影响。苏丹的装机水力发电容量约为1500兆瓦，约70%的电力依赖水力发电，尽管电力仅占其总能源消耗的不到10%。¹⁴ 这种能源支持着一个庞大且快速增长的population，估计在2023年有4800万人。相比之下，纳米比亚的水电装机容量较小，约为350兆瓦，其约60%的电力来自水电，这大约占其总能耗的20%。¹⁵ 服务着一个大约250万人口的小众群体。与此同时，包括南非洲国家、智利、印度、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦以及欧洲大部分国家在内，一些国家表现出积极的独立工作人口（IWP）变化。

比较2023年和2022年，澳大利亚、南部和东部非洲、中南美洲以及中欧等地区出现了显著的变化，这些变化反映了ENSO的变动。

¹³ 该代理指标的选择是由所覆盖期间（1991-2023年）缺乏同质化的发电数据集所决定的，这阻止了实施一个电力——甚至水流入——数据模型（通常是一个统计模型），例如在以下情况中所做的那样：

<https://doi.org/10.3390/en13071786> 更多详细信息请参阅方法学部分。值得注意的是，任何从气候变量派生出的水力发电指标都具有固有的局限性，因为水力发电受众多其他因素的影响，例如水库管理实践、运营限制、基础设施能力和泥沙淤积。

¹⁴ <https://www.iea.org/countries/sudan>

¹⁵ <https://www.iea.org/countries/namibia>

模式（图5）。因此，与太阳能光伏CF类似，全球ENSO影响在IWP中同样明显。在分析个体月份，例如2023年6月和11月时，这种ENSO模式表现得尤为突出（见图6的左侧和右侧，分别表示）。具体而言，在2023年6月，澳大利亚和南非观察到正的IWP变异（请注意，这代表的是过去三个月的平均值，而不仅仅是当月降水），这与拉尼娜模式典型特征相符；但在2023年11月，这种变化变为负异常。相反，许多国家在6月呈现的负异常转变为11月的正异常，特别是在受厄尔尼诺影响的 tropical 地区，包括东南部非洲、南美洲和西部的南美洲的国家。此外，诸如哈萨克斯坦、俄罗斯联邦、中国和许多欧洲国家这些温带国家也由负变正。

值得注意的是，智利（装机容量为7.5吉瓦）的水电装机容量增长了60%–80%，埃塞俄比亚（装机容量为5吉瓦）增长了40%–60%，肯尼亚（装机容量为850兆瓦）和坦桑尼亚联合共和国（已报道装机容量为600兆瓦，但近期新增的大型朱利叶斯·尼雷尔水电站，装机容量超过2吉瓦）。

《2023年全球水资源监测概要报告》（Van Dijk et al., 2024）和《2023年全球干旱快照》（UNCCD, 2024）为水资源可用性和干旱提供了额外的有用参考资料。

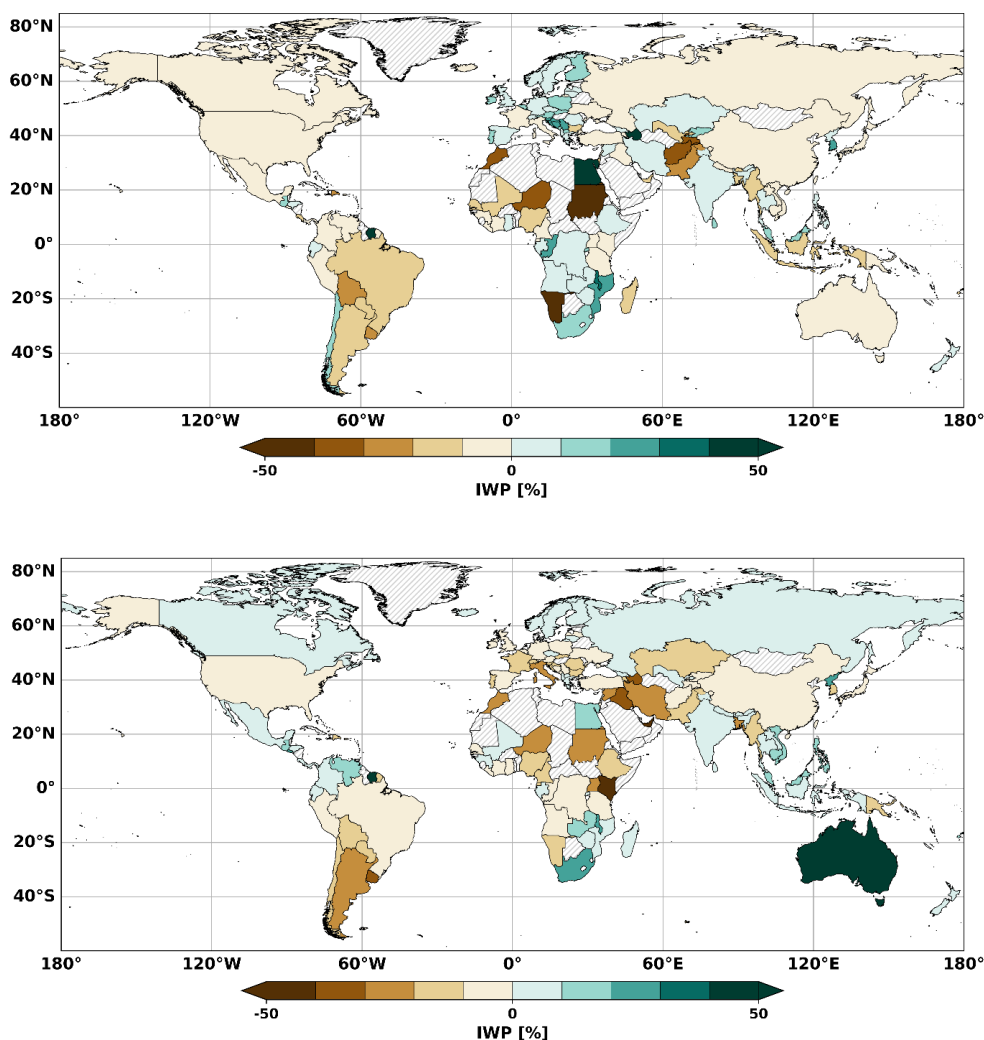


图5. 2023年（顶部）和2022年（底部）全球水能替代年均异常值（以百分比表示），相对于1991-2020年参考期的平均值。虚线表示因计算此替代指标时的假设而无法获取数据的国家（参见方法部分）。

注意：本图所示边界、名称及使用的 designation 均不代表世界气象组织、联合国、国际可再生能源机构或欧洲联盟的官方认可或接受。

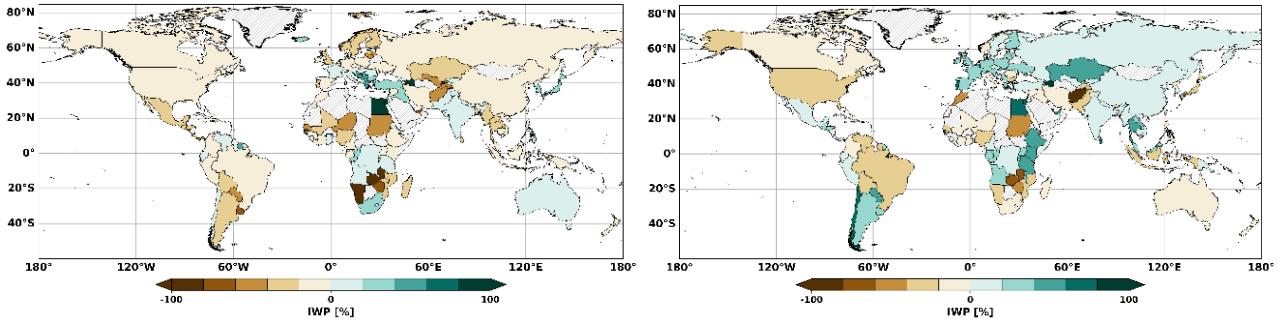


图6. 2023年6月（左侧）和11月（右侧）全球水电替代年平均异常值（以%表示），与1991-2020年相应月份的平均值相比。请注意，值域是年平均值的两倍。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计方案，并不意味着世界气象组织、联合国、国际可再生能源机构或欧盟的官方认可或接受。

1.6 能源需求代理指标

能源需求指标由基于两种常用指标（冷却度日数（CDDs）和供暖度日数（HDDs））的代理变量表示。¹⁶ 通常，这些指标是分别使用的，因为它们分别满足不同的需求，即冷却和加热的需求。然而，为了简化能源需求指标的表述，也有可能将能量度日（EDDs）定义为日最高温度（CDDs）和日最低温度（HDDs）的总和。¹⁷（IPCC, 2021, 2022a; Spinoni et al., 2018）。自然地，极端热日（CDDs）和极端冷日（HDDs）（因此还有极端温差日（EDDs））并不能捕捉到所有电力的用途（例如，工业、农业和交通），因为它们更适合人类舒适（住宅或商业建筑中的供暖/冷却）。此外，它们并没有将电力需求与更广泛的一般能源需求（例如，包括天然气）分开。然而，它们提供了能源需求的指示，并且易于计算；这就是为什么它们被广泛使用，包括IEA在其 [WFE 数据](#)。

2023年EDD变化揭示了显著的区域集群，能源需求显著下降。例如，欧洲、加拿大和新西兰的降幅至少达到12%（图7，顶部）。具体来说，加拿大在2023年记录了大约310个EDD，而1991-2020年30年的平均值为约360。在这种情况下，HDD（随着2023年较温和的气温而下降）占EDD的大部分，而CDD仅占约2。此外，其他中高纬度国家（北纬30°以上），如俄罗斯联邦（8%至12%）和美国（12%至16%）也显示出显著减少。这些重大变化再次主要归因于HDD成分的减少，因为2023年较温和的气温（尤其是人为全球变暖导致的）在较冷月份减少了供暖需求。中国、墨西哥、南非和澳大利亚等国家的降幅较为温和。

¹⁶ 硬盘驱动器评估在特定时间段内（通常是一个月）的寒冷程度，考虑到室外温度和平均室内温度，以推断加热的需求（相反，冷却度日数CDD评估热量水平以推断冷却需求）。与水力发电指标类似，由于大多数国家在1991-2020基线时期按月分辨率收集的能源需求数据的稀疏性和差异性，因此使用HDD和CDD。CDD和HDD有几种版本。更多细节请参阅方法部分。全球格网化的CDD和HDD数据基于ERA5再分析。

¹⁷ 主要困难在于，即使通常在低中纬度地区（以及夏季）冷却效应更为明显，而在中高纬度地区（以及冬季）加热效应更为明显，也很难将冷却和加热的影响分开。

也存在显著的EDD（极端日度温度）积极变化，特别是在撒哈拉以南非洲和中美洲的大部分地区，以及更广泛的tropical region（热带地区）。例如，在刚果民主共和国（DRC），EDD增加了大约24%，相当于比平均为67年的30年期间增加了16。这种增加主要是由CDD（热日）单独驱动的，因为DRC的HDD（热日）接近于零。这些变化再次反映了2023年全球极端的高温。

2022年已显示出的极地边缘带模式与2023年的模式相似，由于上述原因（图7，底部），在高纬度地区减少，而在低纬度地区增加。然而，2023年的更高温度显著放大了这些极地边缘带的变动。这些变动对能源消耗有直接影响，导致高纬度地区在寒冷月份对天然气和在某些情况下对电力的需求减少（如法国的情况），而在中低纬度地区对电力的需求增加。在年度波动大和长期变化的情况下，平衡这些变动与相应的能源供应可能具有挑战性。

HDDs的减少也被视为2023年6月在高纬度地区EDDs的下降（图8，左）。例如，在津巴布韦和博茨瓦纳，分别从长期的50和90 EDDs平均值下降约40个EDDs。在这两种情况下，这些差异几乎完全归因于HDDs的减少，反映了这些南半球国家的冬季变得更加温和。即使在北半球，EDDs的减少也是由较低HDDs引起的。例如，在法国，HDDs显著下降，从平均超过30个EDDs下降到仅有3个。相反，中国和墨西哥（在程度上更大）的EDDs增加主要归因于CDDs的明显增加。中国从110个基准值增加了近20个CDDs，而墨西哥从约80个基准值增加了近35个CDDs。

2023年11月的变异性显著强于2023年6月所观察到的，并且与2023年年度模式相符（图8，右侧）。大多数亚热带北半球国家经历了EDDs（极端低温日数）的减少，这是由于较温暖的秋季气温导致的HDDs（极端高温日数）减少。斯堪的纳维亚是一个例外，因为比正常温度略低的温度导致EDDs增加。例如，芬兰的EDDs（在这种情况下相当于HDDs）增加了超过8%，从大约530个EDDs增加到约575个。

在南方半球，广泛的温暖条件导致了极端高温日数（EDDs）的增加，这主要归因于夏季气温的升高，导致持续高温日数（CDDs）增加。例如，巴西的EDDs增加了约45%，从90增加到130，几乎完全是由CDDs的增加驱动的（11月份的日最低气温（HDDs）很少，约为1或更低）。在东非和澳大利亚，由于成熟的厄尔尼诺阶段的影响，更高的多云条件导致EDDs减少。在澳大利亚，EDDs的数量减少了34%，从长期平均的50减少到33，这反映了比前述例子更为复杂的气候变化。这种减少反映了日最低气温（HDDs）减少（从约30减少到17）和CDDs减少（从20减少到16），突显了在这个广阔国家中气候变化的多样性。

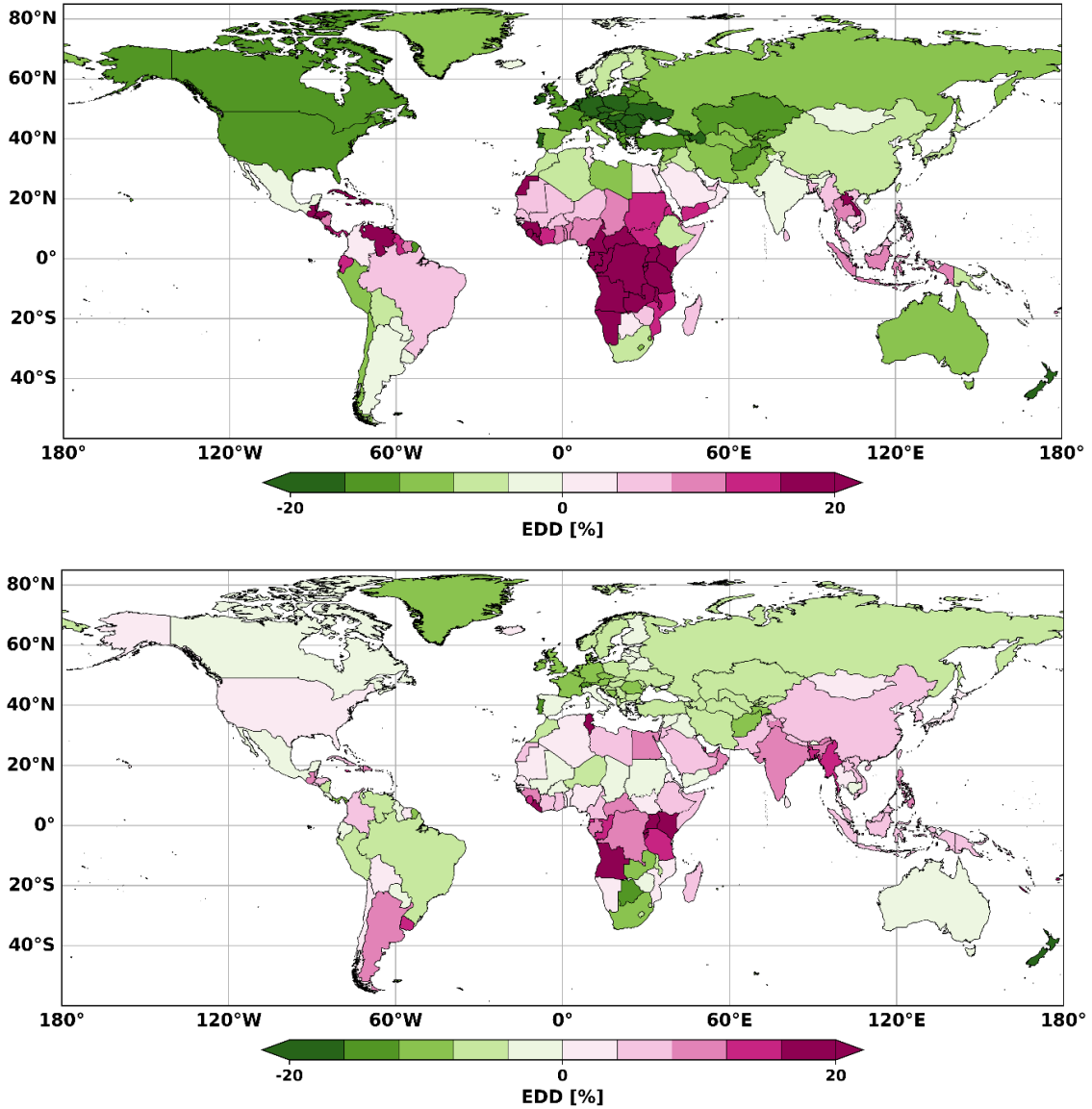


图7. 2023年（顶部）和2022年（底部）相对于1991-2020年参考期平均值的能源需求替代指标（能源日度（EDDs））年平均（以百分比表示）。

注意：本图所示边界、名称及所使用的标示均不代表世界气象组织（WMO）、联合国、国际可再生能源机构（IRENA）或欧盟的官方认可或接受。

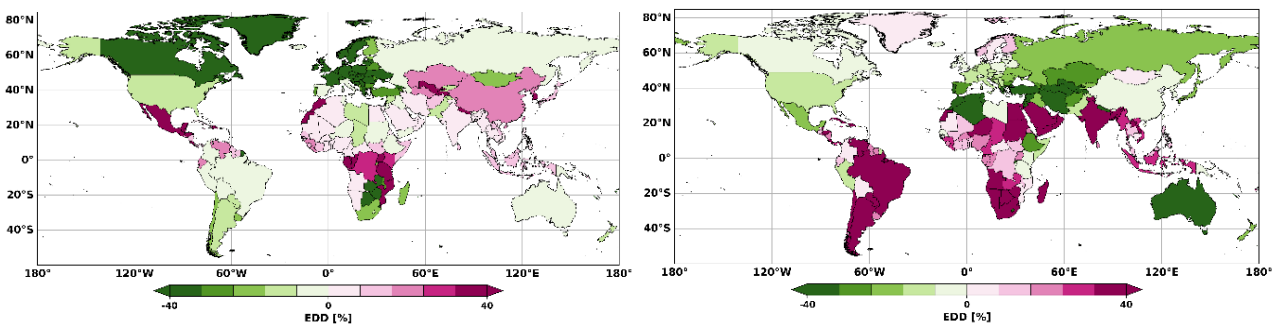


图8. 2023年6月（左侧）和11月（右侧）全球能源需求替代指标（能源日度（EDDs））的年度平均值（以%表示），与1991-2020年同期相应月份的平均值相比。请注意，数值范围是年度平均值的两倍。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计指定不表示官方WMO、联合国、IRENA或欧盟的认可或接受。

2 区域视角

对四个能源指标的变化和变异性进行更详细评估的工作，在三个大洲（非洲、亚洲和南美洲）选定区域进行。在每个地区，选择了四个相邻国家，选取范围保持有限，以确保演示的清晰度。针对每个能源指标，将2023年月度变化与1991-2020年气候学期间的相应月份进行比较，并绘制出来。这种方法在视觉上突出了以下内容：

(1) 每月的变化，引起对一年中特别异常或接近正常时期的关注；(2) 与参考期间30年中每一年的变化对比，通过小提琴图展示；(3) 能源供应中可能出现的盈余、赤字或补偿，可以通过比较所有四个相邻堆叠图上的能源指标来观察，这也与能源需求有关。

需要注意的是，这些年内月度变化可能并不直接与上一节所述能源指标年度平均值相一致。这种差异产生的原因是：(i) 小提琴图中的月度值反映的是中位数，而非上一节中所示的均值；(ii) 平均年变化在视觉上与单独月度变化的计算均值有所区别。

国家是根据彼此之间的邻近性选择的，以便通过输电线路实现潜在的或实际上的连通性，这对于不同能源类型之间的电力平衡考虑是相关的。这种考虑为分析中不同能源类型和国家的能源规划提供了基础，以在每月的基础上持续满足需求。因此，考虑能源指标的三个维度空间——时间（月份）和国家——以优化能源管理是很重要的。然而，撇开这里所提出的能源系统的简化表示，对潜在能源资源平衡的详细评估超出了本出版物的研究范围，因为它侧重于容量系数（CFs）或代理指标的变化，而不是实际需求、发电或安装的可再生能源（RE）容量。因此，电力平衡的讨论在很大程度上仍然是定性的，作为进一步分析的提示。

2.1 非洲

对于非洲，南方非洲发展共同体（SADC）内的四个国家被选为进行深入的分析（图9）：莫桑比克（绿色）、坦桑尼亚联合共和国（黄色）、马拉维（红色）和赞比亚（蓝色）。这些国家也是南方非洲电力池（SAPP）的成员，其中坦桑尼亚联合共和国还属于东非电力池。

图9总结了大量信息，我们将简要讨论。需要注意的是，由于涉及多个解释层，关于实际应用只能给出一般性指示。本质上，图9展示了这些国家在2023年每月的四项能源指标。回顾2023年年度平均变化，这四个国家的表现如下：风能CF变化平均为负，莫桑比克除外（图1，顶部）；太阳能光伏（PV）CF变化略为负值，赞比亚有轻微的正向变化（图3，顶部）；水电代理变化为正，坦桑尼亚共和国除外（图5，顶部）；能源需求偏差为正，马拉维和坦桑尼亚共和国的正向值特别强烈（图7，顶部）。

月度变化与模式

每月的变异性揭示了在年度平均值或之前考察的特定月份（六月和十一月）中不明显的情况。例如，2023年1月赞比亚的太阳能光伏CF（容量因子）明显偏低，分布的最大值呈负数（整个小提琴图均位于零以下）且与30个参考年份中的任何一个相比，降幅超过30%。与此同时，莫桑比克和坦桑尼亚联合共和国1月份的中值对于同一月份来说为正值，尽管增幅仅为几个百分点。2023年1月与拉尼娜现象相吻合，该现象通常会在此地区产生独特的遥相关模式。该模式的特点是呈现双极形状，南部坦桑尼亚联合共和国和北部马拉维之间有一个过渡区。它通常会导致坦桑尼亚联合共和国和赞比亚的信号相反，而马拉维由于规模较小且位于过渡区，表现出更高的变异性。在厄尔尼诺阶段，11月和12月观察到类似的模式，与1月相比，坦桑尼亚联合共和国和赞比亚的信号发生反转。然而，2月却与预期的拉尼娜影响略有不同。

在十一月和十二月平衡能源指标

关注十一月和十二月——这两个月受到厄尔尼诺现象的影响——可以提供对各国间所有指标间平衡的洞察。对于坦桑尼亚联合共和国来说，十一月的风力发电CF接近正常水平，但在十二月则显著低于正常水平，这使得它不足以补偿太阳能光伏CF的减少。然而，水力发电指标高于正常水平，这与厄尔尼诺期间增加的降水量一致。鉴于坦桑尼亚联合共和国拥有约2 600兆瓦（包括朱利叶斯·尼雷尔水电站）的大型水力发电装机容量，这一来源的发电量可以抵消风能和太阳能发电（尽管这些目前非常小，分别为2兆瓦和20兆瓦（IRENA，2024a））的贡献。这种情况发生在11月需求略低于正常水平（EDDs）和12月需求略高于正常水平的背景下。

区域动态与权力平衡

需求在11月接近正常水平，但在12月对于马拉维和赞比亚都异常高，2023年的数值超过了赞比亚参考期内的任何一年的数值。虽然马拉维的水力发电指标在11月显示出了正异常，但在赞比亚和马拉维，水力发电指标在12月显著为负，加剧了满足需求的挑战。为应对增长的需求，电力可以来源于：

- **太阳能** 赞比亚在11月和12月的太阳能光伏CF值均高于正常水平，而马拉维在12月的太阳能光伏CF值也高于正常水平。 **风力发电**：三个国家在两个月内都经历了高于正常水平的风力发电CFs。 **水力发电** 坦桑尼亚联合共和国的正向水力异常可能在传输连通性允许的情况下，弥补邻国电力短缺。

这些月度变化突显了能源供应指标与需求之间的复杂相互作用。尽管这种分析在很大程度上是定性的，但它强调了区域能源规划的重要性，尤其是在跨越边境平衡可再生能源资源和管理在不同气候条件下供需动态方面。

2.2 亚洲

对于亚洲，在中东选择了四个邻国（图10）：阿拉伯联合酋长国（UAE）（绿色）、卡塔尔（黄色）、阿曼（红色）和也门（蓝色）。基于2023年年度平均变化，该地区的风能CF异常通常为负，除也门外（图1，顶部）。太阳能光伏CF异常对所有国家微负（图3，顶部），而仅适用于阿联酋的水力发电代理异常为负（图5，顶部）。EDD偏差对所有国家为正，也门显示出特别高的值（图7，顶部）。

年际变率与气候影响

一月份观察到显著的需求变化，除阿曼外，所有国家的波动幅度均较参考期大（图10，底部）。小提琴图的形状高度拉长，某些情况下甚至超出绘图区域，突显了这种变化。这些变化主要是由2023年1月异常低的EDD值驱动的。例如，卡塔尔的EDD值从平均25降至几乎为零，而阿联酋也经历了类似的下降，从平均8.5降至几乎为零。相比之下，阿曼的降幅较小，从8.5降至4。这些减少可以归因于高于平均气温，这显著降低了名义HDD值。全球标准化的HDD阈值可能无法完全反映当地气候条件，突显了进行地区特定分析的重要性。虽然这些百分比变化引人注目，但仍需进行更深入的研究，以更好地理解其背后的驱动因素和影响。

需求与可再生能源指标之间的关系

11月和12月凸显了该地区能源需求和可再生能源（RE）生产之间的显著关联性，甚至在需求量超过历史平均水平的时期。在卡塔尔，12月份的能量消耗差异（EDD）从平均8降至零，导致基于比例的分析无法确定，如图10中缺失的对应小提琴图所示。

在与需求增加的背景下，四个分析国家中的风能和太阳能指标大部分是负面的。然而，也门在12月份在太阳能光伏产量上出现了轻微的正向变动，这可能在一定程度上满足增加的国内需求，但很可能会不足以支持出口潜力。

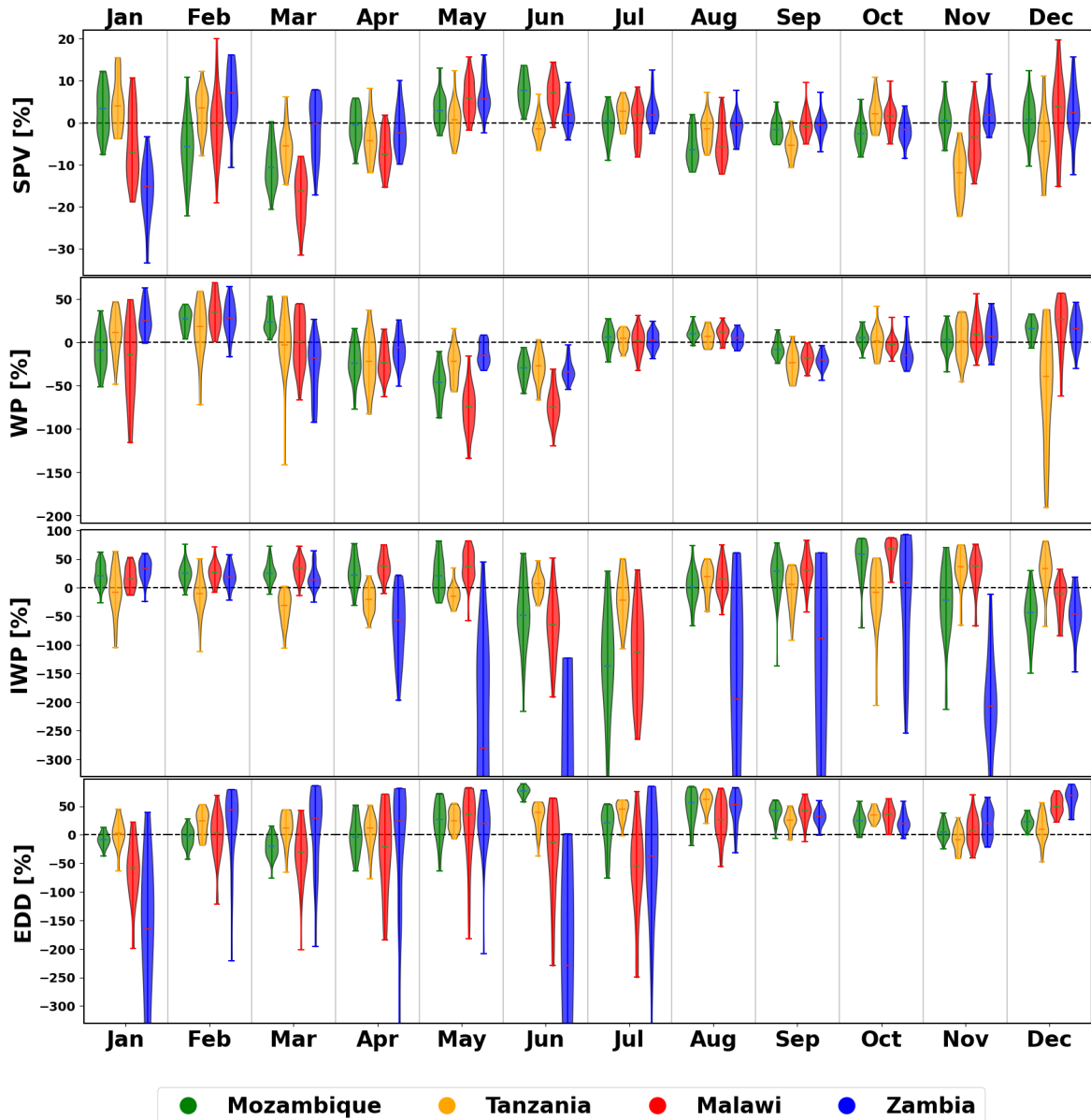


图9展示了非洲四个国家的四个能源指标——太阳能光伏发电电力系数（SPV）、风力发电（WP）能力系数、装机容量加权总降水量（IWP）（水电代理）和能源度日数（EDD）（能源需求代理）——按月度在2023年进行展示。小提琴图说明了2023年每个月相对于参考期（1991-2020年）对应月份的百分比变化范围（每把小提琴包含30个值）。30年分布的中位数通过小提琴内的短水平线突出显示。由于范围较广，一些小提琴已被裁剪以提高可读性。这种表示方法使得可以轻松比较每个月的需求变化与供应变化，以利于国内外能源管理。请注意，当分母较小时，百分比变化可能会很大。

相比之下，阿联酋在水力发电方面显示出显著的正向替代指标，尽管其基线较低。值得注意的是，在这四个国家中，阿联酋是唯一具有水力发电潜力的国家，这得益于近期哈塔抽水蓄能水电站的建造。该项目仍在2024年进行建设中，计划容量为250兆瓦。¹⁸ 尽管它承诺将在未来提高能源弹性，但风力、太阳能和水电的实际发电数据对于全面评估可再生能源满足需求的能力将是必不可少的。

¹⁸ <https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/strategic-initiatives/hatta-project>

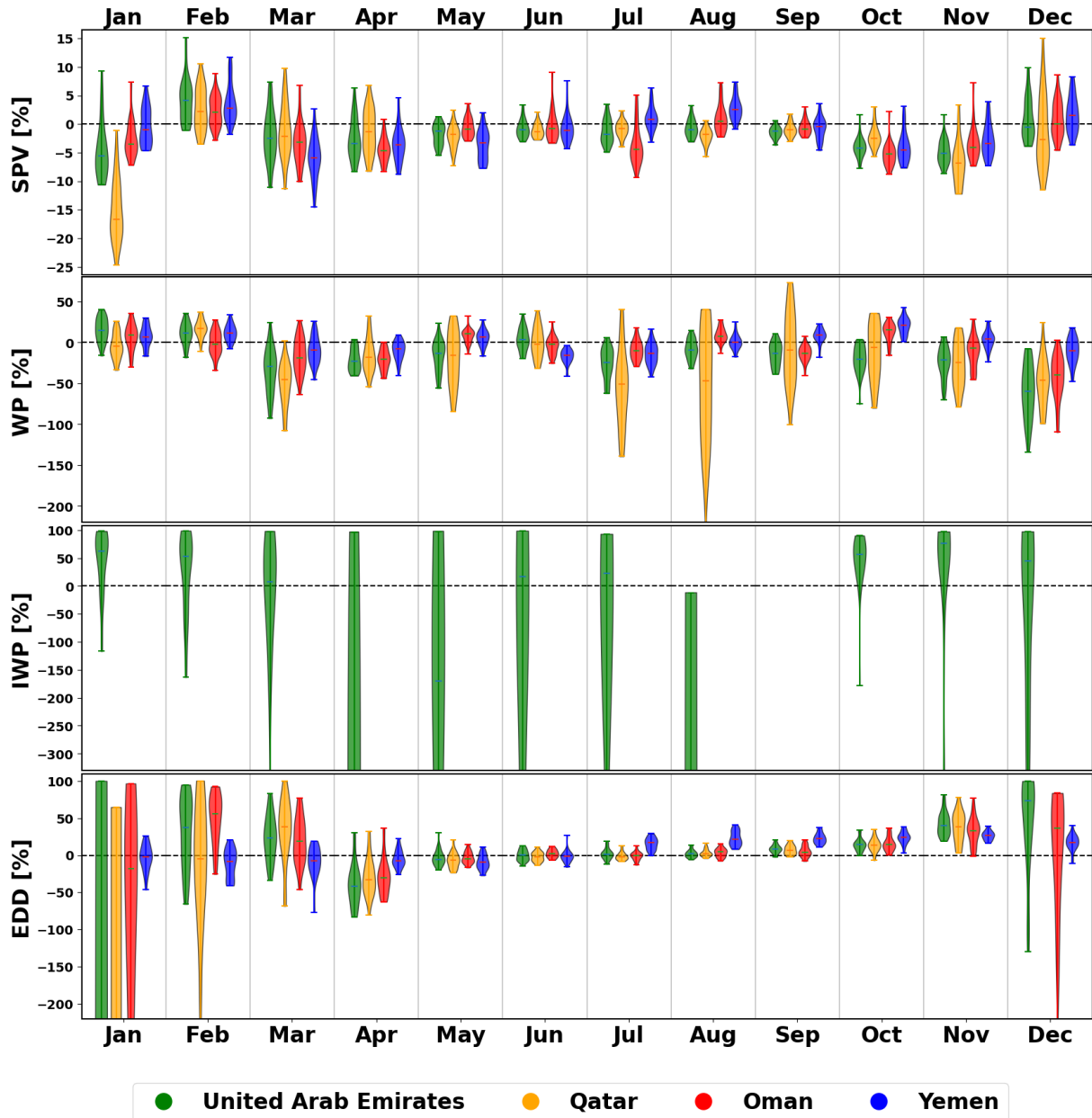


图10。四个能源指标——太阳能光伏发电容量系数（SPV）、风力发电（WP）容量系数、装机容量加权总降水量（IWP）（水电替代指标）和能源度日（EDD）（能源需求替代指标）——按月显示在2023年亚洲四个国家的数据。请注意，卡塔尔、巴林和也门没有水电指标（详情见方法学）。

中东地区气候变化与能源系统之间的相互作用仍然复杂且具有地域特殊性。一月份高于平均气温的温度减少了供暖需求，而在十一月和十二月满足增加的需求则对可再生能源生产构成了重大挑战。也门在太阳能光伏方面的适度增长突显了该地区在韧性方面的挑战，而阿联酋的水能潜力则说明了有效管理需求波动的多元化能源来源的价值。这些发现突显了进行进一步区域分析的需求，以细化气候变量的阈值，提高年际变率的预测，并在未来的气候情景下优化能源系统。对这些动态的更深入了解对于有效地应对该地区的独特能源和气候挑战至关重要。

2.3 南美洲

对于南美洲，所选的邻近国家（图11）包括智利（绿色）、哥伦比亚（黄色）、秘鲁（红色）和巴西（蓝色）。2023年的年度平均变化揭示了不同的可再生能源（RE）趋势。风能CFs仅适用于巴西和智利，智利的CFs为正（4%–8%），而巴西的CFs略有负值（0%–4%）（图1，顶部）。太阳能光伏CF在所有四个国家都持续为正（图3，顶部），而水力发电的代理指标表现出变化性——巴西为负（10%–20%），而智利则显著为正（10%–20%）（图5，顶部）。EDD偏差遵循类似的区域对比，巴西增长了7%，哥伦比亚略有正值，而秘鲁和智利则显示相当负的值（8%–12%）（图7，顶部）。在巴西，EDD的增加是由更高的CDDs（+8）驱动的，而HDDs略有下降（-2）。相比之下，智利和秘鲁的EDD下降主要是由于HDDs的减少。然而，秘鲁从CDDs的上升中得到了部分抵消（从平均18升至26）。

可再生能源应对厄尔尼诺现象

回顾11月和12月，在厄尔尼诺高峰期，除了秘鲁外，所有国家的EDDs都增加了，而哥伦比亚只出现了微小的增长。在这两个月里，巴西记录了2023年最多的EDDs（小提琴图完全为正值），中位数增加了20%至30%。相比之下，秘鲁在那几个月经历了2023年最少的EDDs（小提琴图完全为负值），中位数减少了大约20%。巴西有2.2亿人口（相比之下，秘鲁有3400万，智利有2000万，哥伦比亚有5200万），这在区域整体能源需求中的比重显著增加，并可能影响了相关动态。

为了满足巴西更高的需求，可再生能源（RE）将发挥关键作用。光伏（PV）的现金流量（CF）显著高于平均水平（11月和12月的提琴图均完全为正值，12月大部分为正值），其中中位数增幅接近10%，尤其是在11月。风力发电的CF也有所上升。然而，巴西水电的代理指标下降了30%–40%，鉴于水电提供了其60%的电力，这带来了挑战。¹⁹ 尽管有所下降，巴西从风能（占发电量的13.5%）和太阳能（占7.2%）的贡献部分抵消了水电短缺。

区域能源趋势的差异性

哥伦比亚在11月份的需求略高于平均水平，这可能是由于太阳能光伏的增加所满足的，这抵消了水电的轻微减少。在12月份，太阳能光伏CF略有下降（1%–2%），而水电替代品则恢复到接近平均水平，导致能源系统面临仅是适度挑战。

智利11月需求量显著高于往常，接近40%，需求得到满足。

水电发电量增长显著（约50%，水电几乎提供了国家27%的电力）。²⁰ 并且风力发电CF（贡献近11%）上涨了8%。这些增长抵消了太阳能光伏CF的轻微下降，后者占智利电力发电的20%。

在秘鲁，需求量低于正常水平（约比平均水平低20%）可能造成了生产过剩。这一过剩得到了水力发电代用能增加10%的支持，而水力发电在秘鲁电力组合中占比高达50%。²¹ 12月份太阳能光伏CF（现金流量）大约下降了5%，但由于太阳能光伏对秘鲁整体能源供应的贡献极小，因此对整体影响微乎其微。

¹⁹ <https://www.iea.org/countries/brazil> 请注意，这些数据为2022年数据。

²⁰ <https://www.iea.org/countries/chile> 请注意，这些数据为2022年数据。

²¹ <https://www.iea.org/countries/peru> 请注意，这些数据为2022年数据。

这些观察强调了厄尔尼诺在塑造该地区能源需求和可再生能源（RE）生产中的关键作用。尽管在一些国家高峰需求期间，太阳能和风能提供了基本缓冲，但水电的变异性突显了过度依赖该资源的能源系统的脆弱性。一个多元化的能源组合，加上区域合作，可以增强恢复力并确保未来由气候驱动的活动中的稳定性。

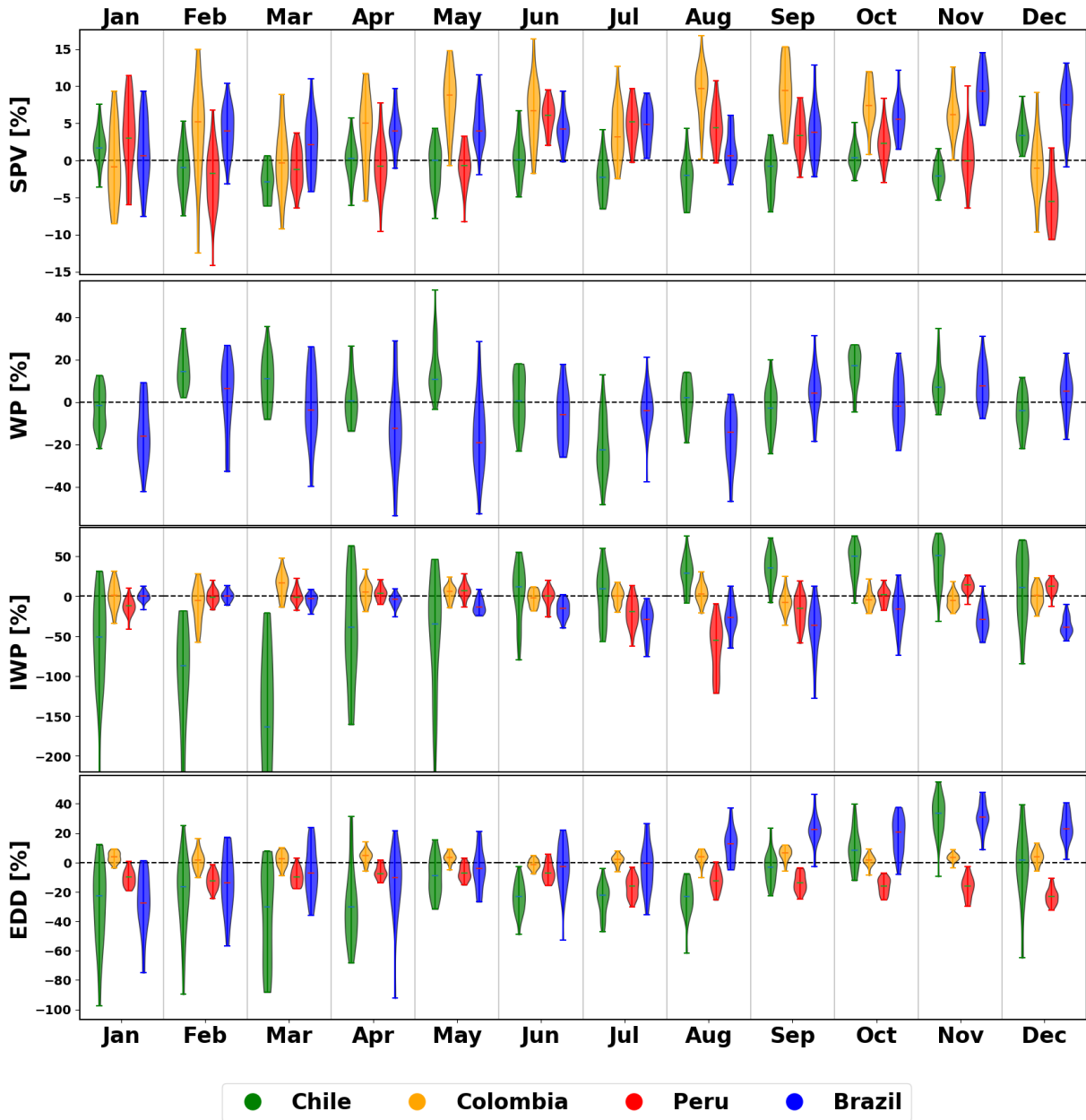


图11显示了2023年南美洲四个国家的四种能源指标——太阳能光伏发电装机容量（SPV）、风力发电（WP）装机容量、装机容量加权总降水量（IWP）（水电代理指标）和能源度日数（EDD）（能源需求代理指标），并按月进行展示。请注意，哥伦比亚和秘鲁没有风力发电指标（具体方法见方法部分）。

3 适应气候变异性与季节性气候预报

季节性气候预测已成为能源部门的关键工具，使利益相关者能够预测和适应从数月至季节尺度上的气候变化（例如，参见White等人，2022年）。随着全球能源转型加速，预测季节性气候条件的能力对于确保能源安全、优化可再生能源（RE）生产和增强对极端天气事件的抵御力具有深远影响。例如，了解预测的降水模式及其概率和不确定性，可以指导水力发电水库管理，而温度预测则能指导电网运营商为应对高峰期制冷或供暖需求做准备。通过将季节性预测纳入能源规划，政策制定者和行业领导者可以做出更明智的决策，最终支持能源系统的可靠性和可持续性。

本节旨在阐述季节性预报作为能源规划和管理的宝贵工具的潜在应用。通过展示与2023年相关的季节性预报实例，并评估用于生成这些预报的模型的性能，来实现这一目标。

季节预报的相关性在于其有可能弥合短期天气预报和长期气候预测之间的差距。它们提供了关于关键气候变量的概率性见解，如温度、降水量、太阳辐射和风向，这些变量直接影响可再生能源（RE）资源。例如，风能和太阳能发电对大气条件非常敏感，而水力发电则依赖于受季节性降雨影响的溪流流量。将这些预报纳入运营和管理计划中，可以帮助最小化风险、降低成本并最大化能源效率。近期在气候建模方面的进步以及定制化预报产品的日益可用，如通过哥白尼气候变化服务（Copernicus Climate Change Service），²²使这种方法比以往任何时候都更容易获得。季节预报的整合可以通过减少意外中断和优化资源配置每年节省数百万美元（Troccoli, 2010；Troccoli 等人，2018；IRENA, 2023）。

季节性气候预测是一个具有许多复杂方面且不直观的专业领域。²³鉴于生成和呈现预测的广泛选项——包括不同的预测模型、提前期、验证指标、地区、季节和月份——本节专注于一个特定的模型（ECMWF系统5）。²⁴度量（连续排名概率技能得分（CRPSS），详见方法学部分），地区（南美洲），目标月份（2023年1月）。

为了更好地说明季节性预报的信号，气候变量被用来代替能源指标。尽管气候数据在全球范围内以1°的规则网格定期提供，²⁵能源指标通常在国家间进行平均。然而，原则上，风能和太阳能的容量系数（CFs）也可以像气候数据一样在同一常规电网上进行展示。尽管它

²² <https://climate.copernicus.eu/seasonal-forecasts>

²³ 概念如初始条件、集合成员及其生成、模型偏差、概率预报和预报期等因素增加了该领域的复杂性。本节涉及几个关键概念，以帮助理解所呈现的材料。

²⁴ 欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的系统5，ECMWF最新的季节性预报系统，被广泛认为是最优秀的全球模型之一。然而，全球有数十个季节性预报系统，其中一些在特定地区或某些月份的表现优于ECMWF的系统。重要的是，经过经验证明，结合多个模型的输出通常比依赖单个模型单独得出的结果更好。

²⁵ 这是C3S为所有八个通过气候数据中心提供的模型所使用的常用网格：<https://cds.climate.copernicus.eu>。

有可能基于国家平均值分析季节性预报图，通过检查网格图提供了一种更具教学性和洞察力的方法来理解预报的空间模式和动态。因此，我们评估了与相应能源指标对应的四个气候变量：风速对应风力发电，太阳辐射对应太阳能发电，降水量对应水力发电，温度对应能源度日（EDDs）。

3.1 风速季节预报

南美洲深受厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的影响。在ENSO活跃期，无论是正相（厄尔尼诺）还是负相（拉尼娜），季节性预报通常更为准确。图12（右）展示了基于2023年10月1日启动的预报，对于2023年11月10米高度风速的季节性预报地图。该预报由51个成员组成，要显示一张地图同时保留概率信息，常见的做法是展示最有可能的类别。这种方法避免了将集合简化为单一值（如平均值或中位数）。相反，它突出了风速落在较高或较低三分位数中的概率，分别由不同的颜色调色板表示。对于南美洲的大部分地区，预报表明风速位于较高三分位数的概率高于较低三分位数（更强风速，以绿色色调显示）。

为了将预测与观测事件进行比较，观测事件由ERA5再分析表示，另外两张地图显示了ERA5在2023年11月的结果。第一张地图（图12，左侧）显示了异常值，计算为2023年11月风速与参考期间（1993-2016年）平均值的差。²⁶ 该图表明，该大陆大部分地区的风速确实高于平均水平。为了与“最有可能的类别”预测进行更公正的比较，中间的地图（图12，中心）将观测到的异常值分为三个十等分（上、中或下）。该地图证实，大多数南美洲地区经历了上十分位的风速，这与正常风速更强的条件一致。这与风力功率CF显示的偏差相符。²⁷（图2，右侧），与Bett等人（2022）的研究发现一致，²⁸ 尽管应注意的是，在参考期间存在轻微的差异：风力发电CF为1991-2020年，而季节性预报回溯数据则略短，为1993年至2016年，如C3S气候数据提供所示。

– 店铺。对于所选事件的季节性预报模型的评估，请参阅第6.6节。

²⁶ 此参考期由C3S气候数据中心提供的季节性回顾性预报数据的可用性确定。

²⁷ 风力功率CF与风速（通常在100米高度处）通过标准功率曲线转换相关（参见方法学部分）。

²⁸ Bett等人（2022年）发现，对于季节性和区域平均值（例如，一个国家），风能和太阳能光伏（PV）发电量分别与平均风速和太阳辐射度非常高度相关。

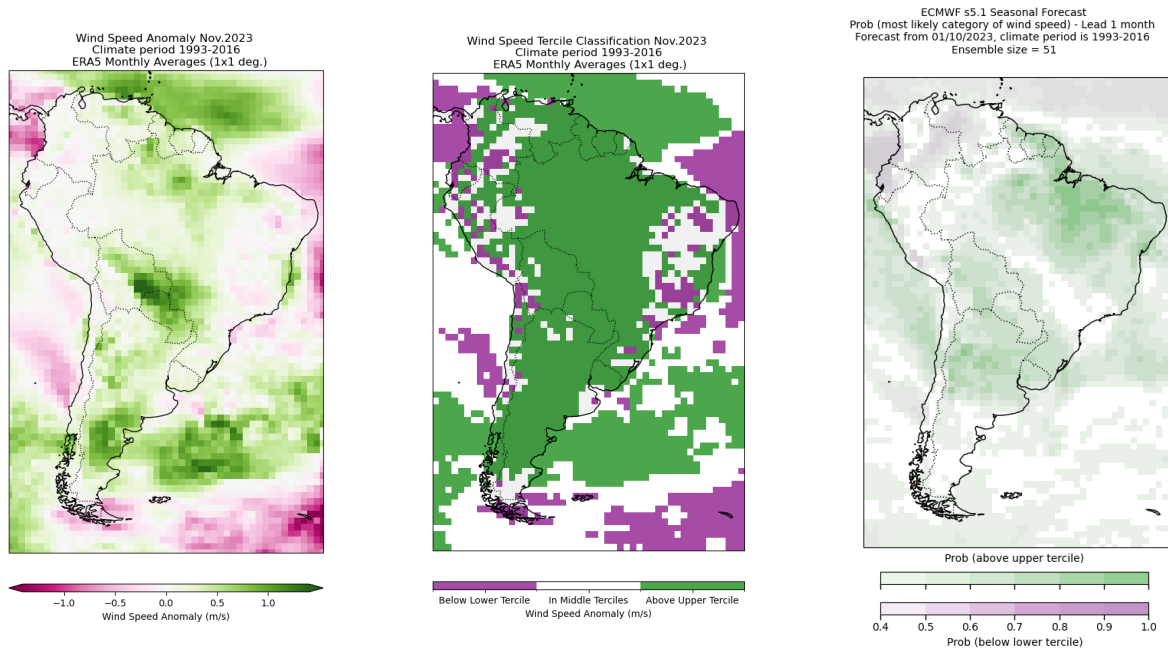


图12. 2023年11月针对南美洲的风速图（来自全球模型）。图板显示（左）基于ERA5再分析观测到的异常，（中）由ERA5得出的三分位数分类，（右）一个月前（2023年10月1日启动预测）季节预报最可能的三分位数类别。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计指定不表示官方WMO、联合国、IRENA或欧盟的认可或接受。

3.2 太阳辐射的季节预报

如图13所示，与太阳能密切相关的大气辐射在季节性预报的第三分位数（upper tercile）中显示出强烈的信号，尤其是在巴西的大部分地区。相反，在秘鲁、巴西南部 and 乌拉圭（图13右侧）的第三分位数信号更为明显。这种模式在ERA5异常（图13左侧）中得到了广泛的反映，并在中间面板的ERA5第三分位分类中得到进一步支持（图13中心）。观察到的这种模式与图4右侧所示的太阳能光伏（PV）CF变化相一致。同样，大陆东部大部分地区的强烈正值信号与西部的负值信号可以归因于厄尔尼诺接近成熟阶段。

3.3 降水季节预报

对于降水，它与水电代理密切相关，季节性预报信号与太阳辐射信号密切相关，但符号相反（图14，右）。因此，最有可能的类别是大多数大陆的较低三分位数（表示干燥条件），而在秘鲁、巴西南部 and 乌拉圭观察到的是较高三分位数（表示更多降水）。这种模式与ERA5异常（图14，左）和ERA5三分位数分类（图14，中）相一致。它也与水电代理（图6，右）大体一致，但需要注意的是，代理代表的是降水（在本例中为九月、十月和十一月的）三个月的平均值，因此它不能直接与这里所示的十一月单独的值进行比较。

3.4 季节性温度预报

季节性温度预报通常比其他变量的预报更准确。这归因于与其他气候变量（如风速）相比，整体高频变异性较低，以及全球变暖趋势的影响。2023年11月南美洲的预报（图15，右侧）表明，上三分位数的强烈优势是最有可能的分类，这与全球变暖一致。然而，在南美洲的南部观察到低三分位数的区域。这种模式与ERA5异常（图15，左侧）和ERA5三分位分类（图15，中部）相吻合。然而，与相应的EDD变化（图8，左侧）的对应关系不太明显，这是由于温度与EDD定义之间的非线性关系。尽管在大陆中部和西北部的巴西和其他国家在EDD和季节性预报（以及ERA5）中都存在强烈的正值变化，但某些地区的EDD变化与季节性预报（以及ERA5）的变化符号不同。例如，ERA5显示秘鲁有正值变化，但EDD显示负值变化，而智利和阿根廷则相反。这种不匹配可能是由于EDD定义中固有的非线性所导致的。

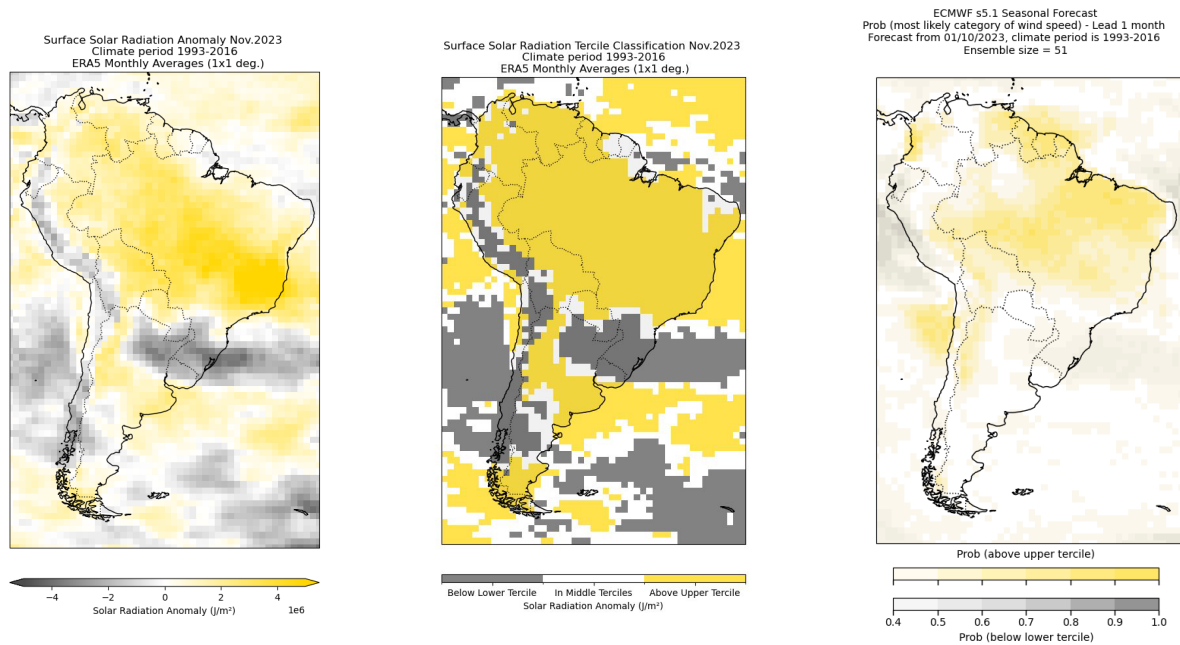


图13. 以南美洲为重点的太阳辐射地图（来自全球模型）2023年11月。面板显示（左）基于ERA5再分析观察到的异常，（中）由ERA5推导出的三分位分类，（右）基于一个月前（2023年10月1日启动的预测）的季节预测最可能的三分位类别。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计方案不代表世界气象组织、联合国、国际可再生能源署或欧洲联盟的官方认可或接受。

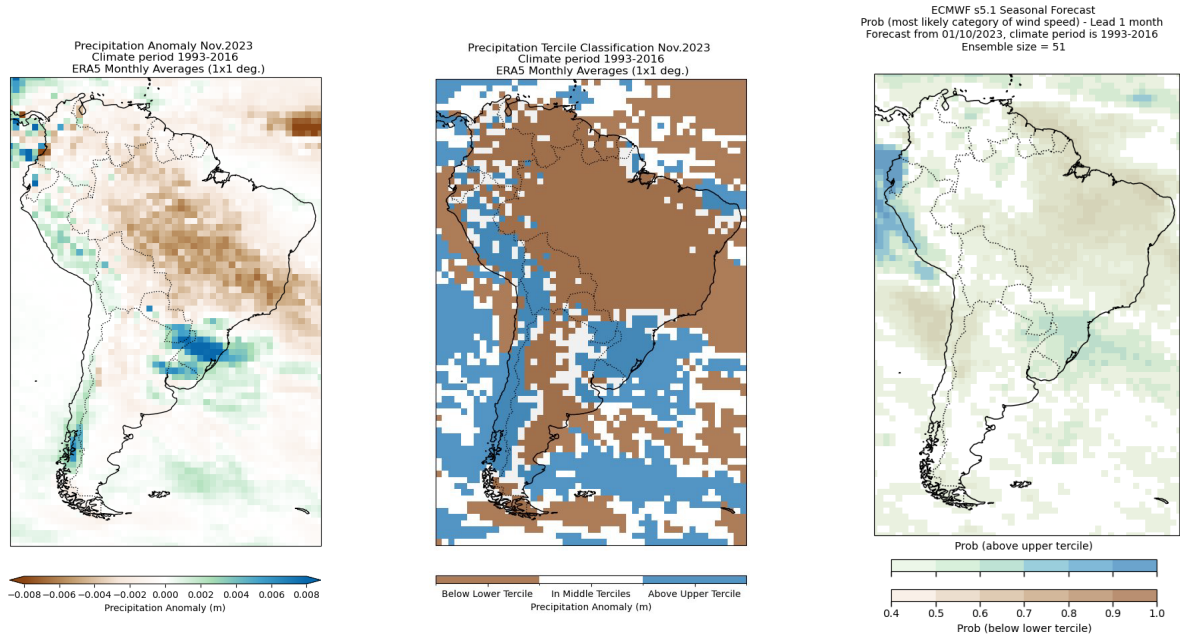


图14. 集中显示南美洲的降水地图（来自全球模型）——2023年11月。各图板展示了（左侧）基于ERA5再分析的观测异常，（中部）从ERA5导出的三分位数分类，（右侧）在一个月的提前期（预报于2023年10月1日开始）的季节性预报中最可能的三分位数类别。

注意：本图所示边界、名称及使用的设计指定不表示官方

WMO、联合国、IRENA或欧盟的认可或接受。

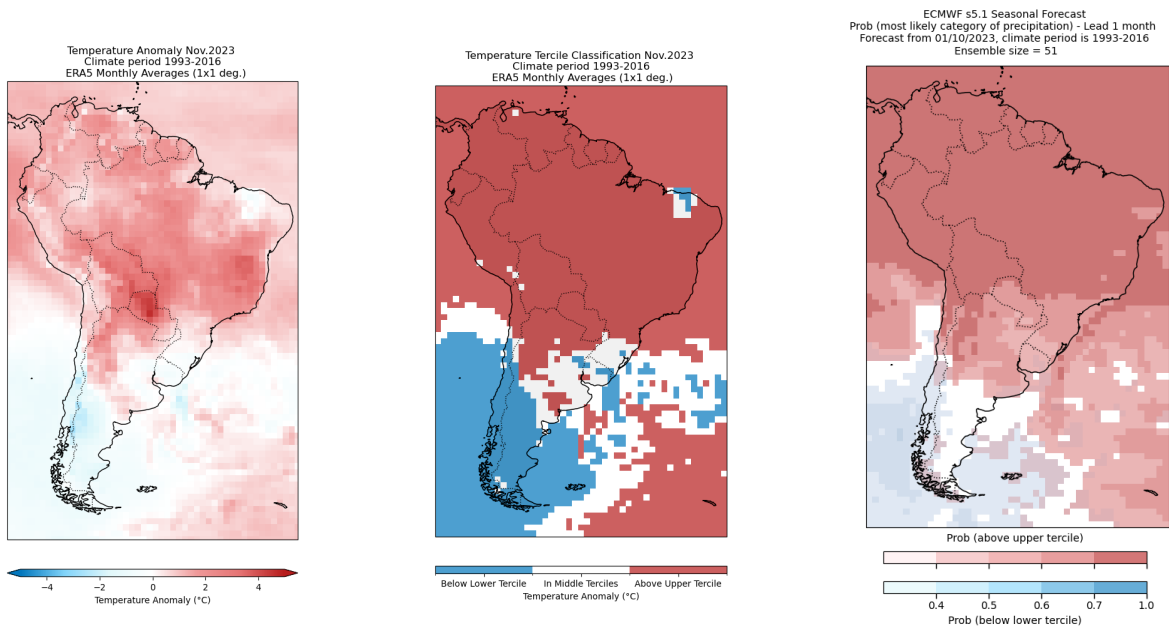


图15. 2023年11月针对南美洲的空气温度图（来自全球模型）。图板显示（左）基于ERA5再分析的观测异常，（中）从ERA5导出的三分位数分类，（右）一个月预报期（预报始于2023年10月1日）中最可能的分位数类别。

注：本图所示边界、名称以及所使用的设计标识，并不代表世界气象组织、联合国、国际可再生能源机构或欧洲联盟的官方认可或接受。

4 结论

气候变化对可再生能源的影响

气候变化，由厄尔尼诺和拉尼娜等现象驱动，对可再生能源（RE）的发电和需求产生了深远影响。2023年，成熟的厄尔尼诺阶段展示了气候驱动因素对能源系统的双重影响。增强的太阳辐射改善了南美洲部分地区的太阳能光伏（PV）容量系数（CFs），而减少的降水阻碍了关键地区的 hydropower generation。这些影响在全球气候变化和变暖的背景下发生，凸显了建立强大、适应性强、能够减轻气候驱动风险的能源系统的紧迫需求。

风力、太阳能和水能潜力的变化和波动强调了将气候因素纳入能源规划中的必要性。对单一能源来源，如水能，高度依赖的国家尤其容易受到这些影响。能源规划采取多样化方法，结合区域合作，可以降低这些风险，稳定能源供应并增强韧性。

季节性气候预报的价值

季节性气候预报对改善能源规划和管理工作具有显著潜力。通过提供关于关键变量（如温度、降水量、风速和太阳辐射）的概率洞察，这些工具使利益相关者能够预测资源变化并优化能源系统运作。例如，水力发电水库管理得益于准确的降水量预报，而风能和太阳能农场运营商可以根据预报的风速和太阳辐射模式调整运营。

尽管在能源领域，季节预报的使用有其实用性，但其采纳率仍然有限。要完全实现其价值，必须克服诸如认知不足、技术能力缺乏以及整合挑战等障碍。能力建设举措、协作研究和定制工具对于弥合这些差距并促进气候信息驱动的能源规划的更广泛和包容性采用至关重要。

检测、观测、监控、分析和预测

虽然现有数据集和模型为创建有效的能源服务和预测提供了坚实基础，但在数据质量和覆盖率方面仍存在差距。改进工作可以集中在更好地表示与风能和太阳能相关的物理过程。例如，提高模型分辨率、改进使用预测集合以及增加观测覆盖率可以深化我们对气候异常（如厄尔尼诺）及其动力学的理解（。 [综合气象与气候服务以支持净零能源转型](#) (WMO- No. 1312)。准确评估和理解关键气候驱动因素及其相关的大气模式对于提供高级预警和实现积极主动的能源管理至关重要（以及支持其他行业应用）。

数据共享在提高预测精度和能源系统建模中也扮演着关键角色。观测是初始化数值天气预报、评估气候模型以及校准后处理技术的根本。然而，许多地区，特别是在发展中国家，对于像不同高度的风速和太阳辐射等关键变量仍然存在观测不足的问题。

在能源领域，关于发电和装机容量的数据共享同样至关重要。高质量的、一致性的能源数据对于准确模拟电力生产和容量因子至关重要。然而，由于商业敏感性和不规则的报告实践，仍然存在差距和不一致性。即使在具有稳健数据共享框架的地区，如.....

[欧洲电力传输系统运营商网络 \(ENTSO-E\) 透明度门户](#) 报告中的产能报告差异凸显了需要更频繁和准确的更新。解决这些差距对于全球推进可再生能源系统至关重要。

政策建议以实现弹性能源未来的发展

多元化能源组合，包括太阳能、风能、水能、新兴技术和储能的混合，对于管理气候变率和确保能源安全至关重要。实现到2030年将可再生能源容量翻三倍和到2050年实现净零排放的雄心勃勃目标需要多方面的方法。政策制定者必须将气候信息整合到国家能源战略中，确保像季节性预报这样的工具得到有效利用，以增强韧性和可靠性。

这与对可再生能源推广、更广泛的能源转型和气候稳定努力的全面综合和整体方法保持一致。只有当这些努力结合了支持可再生能源部署的措施，并将这些措施谨慎地整合到能源系统中，以及与升级和平衡电网相关的并行政策，不仅是在特定国家，而且在地区层面，这些努力才能成功。技术措施需要伴随确保供应链可行的政策。能源供应的安全和稳定性需要与确保社区和国家分享能源转型社会经济收益的政策相匹配。而且，转型必须基于人类和环境保护本质上相互关联的理解。不仅能源系统对整体经济的运作至关重要，而且经济与地球的气候和生态系统不可分割地嵌入在一起。

区域合作对于平衡供需动态、优化跨境能源流动和促进对气候风险的共同抗御同样至关重要。国际社会必须优先投资于具有气候韧性的能源基础设施，利用能够利用共享知识和资源的伙伴关系。通过采用这些策略，各国可以加速向可持续、低碳能源系统的转变，确保一个具有韧性和公平性的能源未来。

4.1 关键信息

(1) 气候变率和变化对能源指标产生重大影响。 在2023年，评估的能源指标——风力发电容量因子（CF）、太阳能光伏（PV）CF、水力发电代理指标以及能源度日（EDDs）——显示出由于气候变率和变化所驱动的重大变化。这些影响因技术和国家而异，年度和月度平均数均观察到明显的百分比异常。尽管太阳能光伏CF显示出相对受限的年度异常（与1991-2020年的气候参照期相比低于10%），但风力发电CF表现出明显的变异性，在许多地区年际变化超过15%。这强调了在能源系统规划和运营中考虑气候变率和变化的重要性。

(2) 理解气候驱动因素对于能源韧性至关重要。 2023年从拉尼娜现象过渡到厄尔尼诺现象，这是厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的两个相反阶段，突显了像ENSO这样的大规模气候驱动因素在塑造能源系统中的关键作用。厄尔尼诺的干燥和温暖条件对能源指标产生了显著影响，包括在南美洲增加太阳能光伏发电以及在东亚增强风能。对这些驱动因素（它们解释了显著的气候变化）的更好理解和准确预测，使得利益相关者能够更有效地管理能源资源，优化发电并预测需求波动，从而促进更加韧性和高效的能源转型。

(3) 气候变异性信息需要纳入能源系统规划与管理中。 2023年创纪录的高温和气候驱动的能源变化凸显了将气候变率纳入能源规划的需求。这种整合可以支持建立早期预警系统，以改善能源负荷管理、资源优化和维护调度。它还可以指导

现代化和扩展能源基础设施，促进技术、市场和政策的创新，以确保在变化莫测的气候中的韧性。

(4) 灵活的市场结构对于能源转型至关重要。 适应电力市场结构对于确保从集中式到分布式电力系统的过渡期间的灵活性至关重要。灵活的市场设计必须促进最高价值可再生能源的采购，同时容纳灵活的解决方案。一个“双重采购”系统，该系统支持可再生能源优化和灵活资源的部署，是实现这一目标的可行途径。

(5) 应通过多元化发展和培育区域合作来增强韧性。 多元化的能源投资组合，结合太阳能、风能、水能和新兴技术，对于应对气候变率的冲击和确保能源安全至关重要。区域合作对于平衡跨境能源供需至关重要。协作努力可以最大化可再生能源潜力，提升电网稳定性，并构建具有弹性的能源系统。

(6) 发展中国家拥有巨大的发展机遇。 发展中国家可以利用其可再生能源潜力来解决能源获取挑战，同时利用对气候变率的了解。例如，尽管可再生能源资源丰富，但非洲仅占全球安装容量的2%。通过整合资源潜力与气候信息，国家可以有效地发展可再生能源基础设施，以支持工业化和经济增长，加速整个大陆的可持续发展。

(7) 综合能源数据收集和共享至关重要。 系统化和详细的能源数据收集与共享对于深化理解气候变化对能源供需的影响至关重要。尽管此处提供的能源指标提供了一个简化的视角，但更具有代表性的指标需要访问稳健的数据集，包括关于装机容量和实际发电的详细信息。透明化和协调一致的数据共享实践将有助于在整个能源行业中实现更精确的建模和更明智的决策。

5 方法论

为了了解2023年电力潜力异常的模式，所有情况都以1991-2020年期间作为基准。这一时期被正式确定为新的基准。[气候变化正常 \(2022年气候服务状况：能源 \(WMO-No. 1301\)\)](#)。

所有关于风能、太阳能和水电（或其替代品）的计算均基于全球月度数据，分辨率为0.25°。风能和太阳能异常值通过功率容量系数进行估算。降水量被用作水电的替代指标，但根据特定区域的 hydroelectric power plant 数量和规模进行加权。

一旦计算了三种可再生能源（或其替代品）的发电量，将以定性方式探讨它们的协变性和在能源组合中的作用。同时，发电指标还将与能源需求替代品进行比较。

以下各节描述了计算四个能源指标（其中三个用于发电，一个用于需求）所采用的方法。

气候数据局限性

所有能源指标均基于ERA5再分析中的气候数据（Hersbach et al., 2020；IPCC, 2021）。虽然ERA5被认为是一个出色的全球再分析，但像所有再分析一样，它是由观测数据和数值天气预报模型过程相结合的，

这意味着，相较于直接观察，它通常并不那么准确。再分析被使用，因为它们提供了完整的数据集，在时间上（在所需的时期，1991-2023）和空间上（在整个全球的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 范围内），这是通常观察中所不具备的。

口罩

对于每种能源，除了通用的陆海掩膜外，还会使用适当的掩膜。每种掩膜的详细信息将在相应章节中给出，但总的来说，不包括不适宜或不适合建设电厂的区域（如自然保护区、陡峭的山坡）。

显示屏

全球层面的地图以国家平均数据呈现。此外，还显示了2023年选定国家的月平均值的时序图。

5.1 风力发电容量系数计算

所使用的风电容量系数数据是可在以下网址获取的：

[提供网址的英文内容] [能源气象](#)（WfE）门户由国际能源署/地中海气候变化中心（CMCC）计算，范围在1991-2020年和2023年。它们代表在特定时间内，特定电网节点上的风力涡轮机名义功率输出占总功率输出的百分比。

基础数据

风机距离废物转化发电厂100米处的风能转换率：

- 空间分辨率： $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 纬度/经度 范围：全球
- 时间分辨率：月度
- 时间范围：1991-2020和2023

风屏

- 本产品是在C3S能源项目中生产的。²⁹ 并且被认为是时间不变的 • 空间分辨率： $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 纬度/经度 范围：全球
- 二元层包括：保护区、高海拔和高坡地形、城市覆盖率区域、极地地区

陆地-海洋掩膜

一个简单的面罩，用于识别 0.25° 范围内的陆地和海洋（来自ERA5）；该面罩同样适用于太阳辐射。

²⁹ <https://climate.copernicus.eu/operational-service-energy-sector>

使用的WfE公式

$$CF_{t,i,j} = \frac{1}{n} \sum_{t \in T} \frac{P_{output}^{t,i,j}(W_{100}^{t,i,j})}{P_{nominal}}$$

where:

100 : 风速在地面以上100米处的风速，在时间 t 纬度 i 纬度和经度 j (米每秒)

t : 净电能输出时间 t 纬度 i 纬度和经度

T : 已考区， : 风机的名义输出功率 (兆瓦) $P_{nominal}$ j (MW) 例如，日 : 区间的小时 Tn : 小时数 T

i, j 纬度 i 纬度和经度 j 关于网格点

$W_{100}^{t,i,j}$ (米每秒) 是所力机的功率曲线，在本例中Vestas V110 2 MW ³⁰

工作流程

风力发电容量系数 (CF) 在计算前被掩盖。根据这些数据，计算以下内容：(i) 1991-2020年和2023年的“非限制性”电网点的容量系数；(ii) 按国家平均计算的容量系数 ()。自然地球 管理员0地区 (ADM0)，考虑非限制区域。

(1) 除使用风场掩膜 (见下文描述) 对风力发电容量系数数据进行掩膜外，还需使用陆地-海洋掩膜 (将该区域内的所有海洋掩膜掉)。

(a) 考虑每个国家的网格点 (在应用掩码后) 并仅保留气候场CF值高于0.1阈值的点，以避免包括风能不太可能开发的区域。(b) 如果超过阈值的网格点数大于该国所有网格点的20%，并且至少有两个网格点，则保留该国；否则，不将该国家考虑在内 (即设置为NA)。

(2) 使用1991-2020年作为基线 (月平均值)，计算2023年的异常值。

(3) 异常值 = 2023年月均值 - 1991年至2020年期间月均值。

(4) 按国家汇总，仅选取超过CF阈值的网格点。

(5) 生成按国家聚合的全球异常地图 (形状文件)。

(6) 使用网格数据生成选定世界气象组织 (WMO) 区域的区域异常图，清晰显示掩蔽区域 (这一点对用户来说也是有用信息)。

5.2 太阳能光伏发电容量因子计算

太阳能光伏 (PV) 功率潜力系数基于每月向下的太阳辐射值、2米和10米高度的气温以及风速。PV容量系数主要考虑太阳能辐射资源，但也考虑到其他大气变量可能对光伏电池效率的影响，这种影响会随着温度的升高而减弱 (Jerez等，2015)。因此，温度和风速的影响也被考虑在内。

³⁰ Vestas V110-2 MW是一款高110米的涡轮机，能够在3 m/s的低风速下开始发电，在低风速和中风速地点产生良好的容量和产量。

PV容量因数的计算遵循Jerez等人(2015年)的方法。仅评估陆地上的电力容量，在本例中，城市区域没有被遮挡，因为可以在那里安装光伏板。在所有未遮挡的区域假设光伏板分布均匀。与风力发电类似，计算了2023年的异常值，并将数据按国家汇总，以探索每个地区的能源混合互补性。

基础数据

向下太阳辐照度(波长区间为0.2–4.0 μm)来自ERA5:

- 空间分辨率: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 纬度/经度 范围: 全球
- 时间分辨率: 月度
- 时间范围: 1991-2020和2023

空气温度: 从ERA5再分析数据中提取的2米处温度:

- 空间分辨率: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 纬度/经度 范围: 全球
- 时间分辨率: 月度
- 时间范围: 1991-2020和2023

风速(10米高度)来自ERA5再分析数据:

- 空间分辨率: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 纬度/经度 范围: 全球
- 时间分辨率: 月度
- 时间范围: 1991-2020和2023

太阳能面罩

- 这款产品由WEMC(C3S能源项目)生产,被认为是时不变的。空间分辨率: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 纬度/经度 范围: 全球
- 二元层包括: 保护区、地形高度和坡度较高的区域、极地地区

工作流程

(1) 根据假设的PV电池板在土地上的均匀分布,计算太阳能发电能力。

(2) 使用限制区域掩码和陆地-海洋掩码对太阳能容量因子数据进行屏蔽。

(a) 考虑每个国家的网格点(在应用掩码后)并仅保留气候学CF值高于0.1阈值的点,以避免包括太阳能光伏发电不太可能开发的区域。

(b) 如果该国超过阈值的网格点数量大于该国所有网格点的20%，并且至少有两个网格点，则保留该国；否则，不将该国家考虑在内（即设置为NA）。

(3) 使用与风相同的基线和公式计算2023年的异常值。

(4) 按国家汇总，仅选取超过CF阈值的网格点。

(5) 生成按国家聚合的全球异常地图（形状文件）。

(6) 使用网格数据生成区域异常地图（选定的世界气象组织地区），清晰地展示屏蔽区域（因为这也是有用信息）。

5.3 水力发电替代指标

计算代理水力发电容量系数基于ERA5降水数据的月平均值。由于这种可再生能源的装机容量随时间更加稳定，因此使用了全球水力发电厂位置数据，其余部分均被屏蔽。然而，仅考虑了近年来的安装（例如，2021-2023年），以避免参考期间覆盖不均的问题，并且使结果更能代表未来水力发电装机容量（假设变化将很小）；然而，考虑到投影数据的潜在使用，也可能包括新电厂的知识，否则那些网格单元将不会被考虑（例如，马三维计划的大型水力发电厂）。

现有电厂的装机容量被用作代理计算的权重，这些计算基于定义的子国家地区的降水量。[自然地球](#) 管理员1区域（ADM1）。一些国家的降水量值非常低，任何增加/减少都会导致百分比变化计算中的高值。因此，数据是按三个月期汇总的，即考虑的月份及其前两个月份（以模拟水力发电的水积累）。

基础数据

ERA5的降水数据：

- 空间分辨率：0.25° × 0.25° 纬度/经度 范围：全球
- 时间分辨率：月平均值
- 时间范围：1991-2020和2023

植物位置与装机容量

我们使用全球能源监测的 hydroelectric power plant locations 数据库。[全球水电追踪器](#) 这是一个全面且最新的数据库：

- 空间分辨率：经纬度数据点
- 覆盖范围：全球

工作流程

(1) 对于每个网格单元或区域（由ADM1形状文件定义），根据该区域的累计装机容量分配权重。(2) 使用三个月的窗口计算新的月移动平均值。

- (3) 在ADM1级别（或其他商定的汇总区域）的降水量数据。
- (4) 计算基于安装容量权重的该国加权平均降水量（标准化因子取该国平均值，考虑所有该特定国家的ADM1）。
- (5) 使用与其他能源指标相同的基线和公式，计算2023年的异常值。
- (6) 生成按国家聚合的异常图，以供不同的WMO地区使用。

5.4 能源需求代理

为了评估需求与可再生能源之间的平衡或失衡，在能源结构背景下，报告考虑了一个能源需求替代指标。

鉴于大多数国家在1991-2020年基线时期按月分辨率收集的能源需求数据的稀疏性和差异性，不得不考虑使用代理数据。为此，能源度日指标（EDDs）——即冷却度日（CDDs）和加热度日（HDDs）的总和——得到了应用。³¹ 被选作能源（电力）需求的代理。在欧洲（Spinoni等，2018年）和全球范围内（Spinoni等，2021年），能源需求日数（EDDs）已经被定义并在各种研究中使用。只有一个需求指标EDDs，而不是两个，即CDDs和HDDs，使得呈现和讨论得以简化。

全球 [CDD和HDD数据可免费获取](#) 来自IEA/CMCC [能源天气追踪器](#)

从1979年到近实时的数据（IEA; CMCC, 2023）。提供了多个CDD（酷热天数）和HDD（寒冷天数）的实时再现。与之前报道不同（）。 [2022年回顾：气候驱动的全球可再生能源潜力资源和能源需求](#) 在此报告中，对于CDDs（及其相应的EDDs）采用与HDDs不同的定义，以适应C3S能源服务（见表2）现在提供的更广泛产品范围。具体来说，这里使用的CDD定义为CDDThold21。

CDD是一种用于估算能源需求和空调需求的气候指标。它被定义为参考温度（感觉舒适）与2米高度外界空气温度日平均值的每日差值的月总和，但仅当2米高度外界空气温度超过某个阈值温度时。这个条件定义了全年的“降温天数”，以下为计算公式（所有温度单位为°C）：

如果 $T2M \geq T_{\text{threshold}}$: $CDD = T2M - T_{\text{ref}}$

如果 $T2M < T_{\text{threshold}}$, $CDD = 0$

这被称为CDDThold21（IEA, 2023；Scoccimarro等人，2023），参考温度为21°C，阈值温度为24°C。例如，这意味着如果日平均气温为26°C，那么该日CDD指标值为5（26°C - 21°C）。如果日平均气温为22°C，那么该日CDD值为0。

同样地，与CDD一样，HDD也是一种气候指标，用于估算能源需求和供暖需求。HDD有几种操作定义。对于本报告，HDD定义为参考温度（感觉舒适）与2米高度（T2M）的每日平均室外气温之间的每日差值的月总和，但

³¹ 硬盘在此特定时间段内根据室外温度和平均室内温度来评估寒冷程度，以推断供暖的必要性（反之，加热日数（CDD）评估高温程度，以推断制冷的必要性）。随后计算温度高于或低于预定义阈值的天数。

仅当T2M低于某个阈值温度时。根据以下公式（所有温度单位为°C）定义全年“供暖天数”：

如果 $T2M \geq T_{\text{threshold}}$: 硬盘驱动器 (HDD) = 0

如果 $T2M < T_{\text{threshold}}$ ，则 $HDD = T_{\text{ref}} - T2M$

硬盘定义中的HDDThold18 (IEA, 2023 ; Scoccimarro等, 2023) 已被采用，参考温度为18°C，阈值温度为15°C。例如，这意味着如果日平均气温为12°C，则当日的HDD指标值将为6 (18°C - 12°C)，而如果日平均气温为16°C，则当日的HDD值将为0。

与IEA/CMCC数据集一样，网格化数据根据人口进行加权，因为人口位置和增长对能源需求的变化有影响，然后计算国家平均值。

表2. 按CDD和HDD选定的指数

变量	简称	简短说明
CDD (21 °C, 24 °C 阈值)	CDDThold21	冷却度日 (参考温度21°C) 并且阈值温度为24°C)。例如：如果阈值温度为24°C。日均气温为26°C，当天CDD指标的值为5 (26°C - 21°C)。如果日平均气温为22°C，则为那个... 当天CDD值等于0。
硬盘驱动器 (18°C , 15°C阈值)	HDDThold18	加热度日 (参考温度 18 °C) 并且阈值温度为15°C)。例如：如果该值日平均气温为12°C，当天硬盘的值为6 (18°C - 12°C)。日均气温为16°C，当天情况。硬盘容量为0。
EDD	EDD	CDDThold21与HDDThold18之和

注意：另请参阅：[能源天气追踪器](#)

人口数据

由中国移动通信集团公

司提供：³²

- 空间分辨率：0.25° × 0.25° 纬度/经度 • 范围：全球
- 时间分辨率：年度
- 时间段：1991-2020年和2023年

基础数据

使用 HDDThold18 和 CDDthold21 数据集 (见表 2)：

- 空间分辨率：0.25° × 0.25° 纬度/经度 • 单位：度日

³² 他们的数据来源于哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心 (CIESIN)，2018年，《全球人口网格，版本4》以及联合研究中心的GHS人口网格 (IEA ; CMCC, 2023)。数据经过插值处理，以估算2000年至2023年的年度人口值。

- 范围：全球
- 时间分辨率：月平均值
- 时间段：1991-2020年和2023年

工作流程

(1) 数据仅使用陆地-海洋掩膜进行掩码。(2) 热日数 (CDD) 和热夜数 (HDD) 根据人口加权。(3) 利用以下公式从热日数 (CDD) 和热夜数 (HDD) 获得极端日数 (EDD) 值：
 $EDD_{h21Thold18} = CDD_{hum21} + HDD_{Thold18}$ (4) 异常值是根据上述相同公式计算的。(5) 数据按国家汇总，以便与来自三种可再生能源的能源混合进行比较。

5.5 季节性预报技能度量

各种指标可用于评估季节预报，范围从确定性指标（使用集合平均）到利用整个集合的概率性指标。对于本次分析，选择了一种概率性指标，这对于概率性预报如季节预报更为合适。具体来说，采用了连续排名概率技能得分 (CRPSS)。CRPSS是一种通过比较实际预报的累积平方概率误差（称为排名概率得分RPS）与基于气候学的预报所得的RPS来评估预报技能的指标。RPS量化了预报成功区分不同观测结果的程度，并识别了位置和置信水平中的系统性偏差。正的RPSS表示预报的RPS低于气候学预报的RPS，表明预报性能有所提高（表3）。CRPSS特别实用，因为它将整个集合的信息浓缩为一个单一值，而像Brier技能得分这样的指标则仅关注分布的特定部分（例如，上三分之一）。

表 3 . 摘要：连续排名概率技能得分 (CRPSS) 的主要特点

指标	答案问题	范围	特征
持续排名概率技能得分 (CRPSS)	什么是相对的改善的概率预测超出气候学领域预测分类为：观测值下降进入？	一无穷大到1；0表示无技能时 compared to the 参考预测。 完美得分： 1	衡量多方面的改进。类别概率预报相对于一个参考预测（通常为长期预测）或者样本气候学）；严格正确；将气候频率纳入账户；当应用于小范围时，不稳定数据集；CRPSS 是一种泛化RPSS，其中阈值是持续而非离散。

33

³³ [https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Section+12.B+Statistical+Concepts+-+Probabilistic+Data#Section12.BStatisticalConceptsProbabilisticData-RankProbabilityScores\(RPS\)](https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Section+12.B+Statistical+Concepts+-+Probabilistic+Data#Section12.BStatisticalConceptsProbabilisticData-RankProbabilityScores(RPS))

5.6 季节预报评估

鉴于季节性预报本质上具有概率性，无法仅凭单个事件——在本例中为2023年11月——来确定预报是否准确。这就是为什么在评估模型质量之前是至关重要的，因为这可以提供有关预报是否可信以及可信程度的指示。为了实现这一点，将技能指标应用于回顾性预报，在本例中，这些预报涵盖了1993年至2016年这一时期。

风速

如前文所述，连续排名概率技能得分（CRPSS）被选为衡量标准。图16显示了四个国家（巴西、哥伦比亚、秘鲁和智利）的CRPSS平均值。具体而言，该图说明了模型在预测11月份的技能，其中预测从10月1日开始（预测提前期1）、9月1日开始（预测提前期2），依此类推。一般来说，季节性预测模型的准确度或技能随着预测提前期的增加而降低。然而，也有一些例外，部分原因是样本量有限（24年，虽然相对较长，但对于完全稳健的气候学来说还不够）。更具体地说，11月份的季节性预测在第一个月显示出正技能，之后技能显著下降。这是可以预见的，因为风速具有很高程度的变异性，使得季节性预测具有挑战性。

值得注意的是，这代表的是平均技能水平，包括中性ENSO阶段和活跃ENSO阶段多年的经验。如前所述，在活跃的ENSO阶段（厄尔尼诺或拉尼娜），信号往往更强，导致通常更高的预报准确性。此外，与副热带地区相比，热带地区的预报技能通常更高，这有助于解释在国家汇总结果中观察到的异质性。由于图16所示的技能反映了1993-2016年期间回顾性预报的质量，因此不可能对图12（右）中所示的2023年11月特定预报的准确性得出明确结论。随着经验的积累，用户可以更好地评估和解释即将到来的季节性预报的可靠性。这就是为什么开始探索和采用季节性预报作为计划和决策的有价值工具非常重要，认识到熟练程度是通过一致的使用和分析随时间发展的。

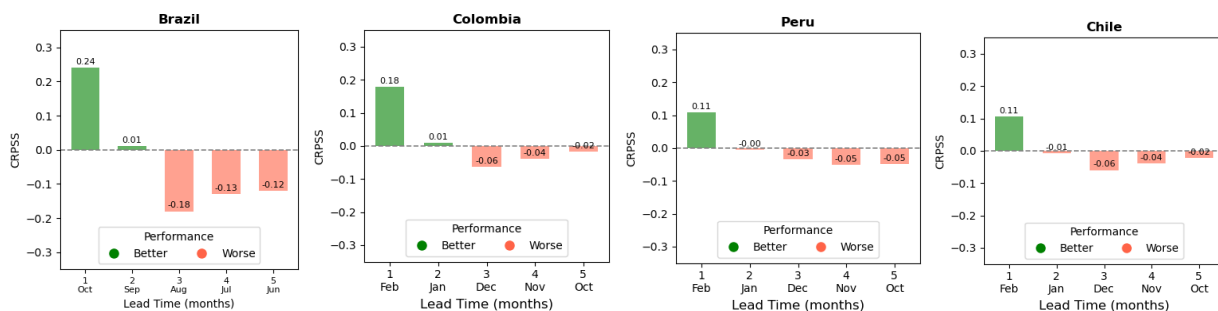


图16. 使用连续排名概率技能得分（CRPSS）评估风速的季节性预报，目标为11月，测试期间为1993-2016年，并关注与区域视角（第2.3节）中分析的相同四个国家：巴西、哥伦比亚、秘鲁和智利。直方图柱状条代表在10月1日（提前期1）（最左侧）、9月1日（提前期2）等日期开始的预报的技能。正值表示季节性预报模型在测试期间（平均而言）比气候参考预报表现更好，而负值（红色）则表明气候学可能提供更准确的预报。

太阳辐射

关于11月份的技能，巴西、哥伦比亚和智利的太阳辐射预报在大多数提前期表现出正技能（图17）。然而，哥伦比亚的预报显示出不典型

行为在提前期1时，需要进一步调查。对于秘鲁的预测，再次显示在所有提前期内几乎没有技能。这种有限技能的原因之一可以归因于该国陡峭的地形和靠近海岸的强洋流，而这些因素并未被季节性预报模型中的海洋成分充分考虑。

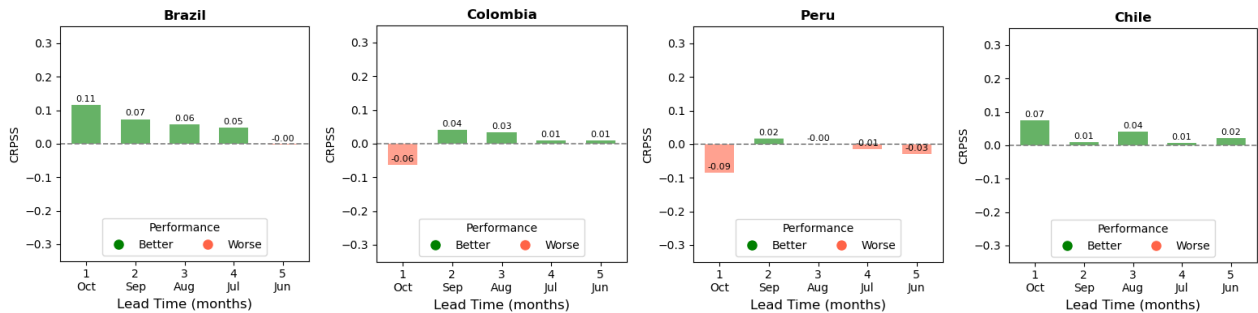


图17. 通过连续排名概率得分法 (CRPSS) 对太阳辐射的季节性预报进行评估，针对1993–2016年测试期间的目标月 (11月)，并聚焦于第2.3节区域视角中分析的四国 (巴西、哥伦比亚、秘鲁和智利)。柱形条表示自10月1日起始的预报的技能水平 (最早时间为1，即滞后时间1) (左侧最远)，9月1日 (滞后时间2) 等。正值表明季节性预报模型在测试期间内平均表现优于气候学参考，而负值 (红色) 则暗示气候学可能提供更为准确的预报。

降水量

对于11月，巴西、哥伦比亚和智利的多数预报时间跨度内降水预报的技能值为正，表明提前4-5个月做出的预报比依赖气候学值更为准确 (图18)。相比之下，秘鲁的预报在所有预报时间跨度内都表现出负技能值。

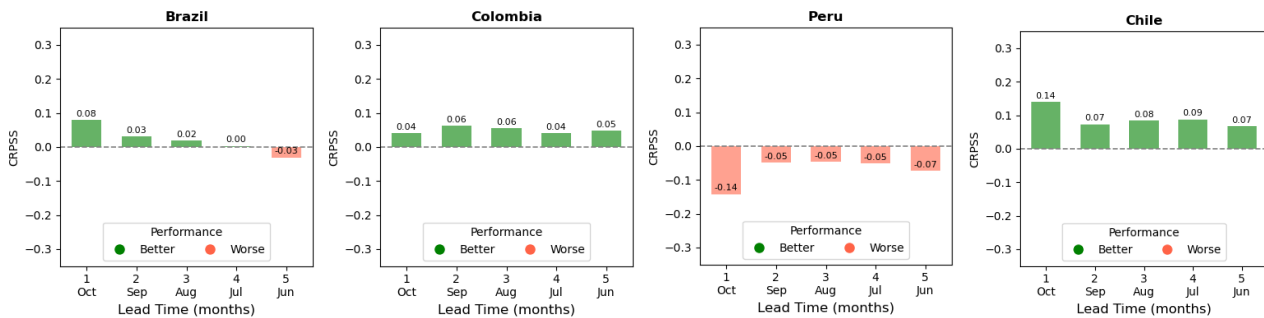


图18. 使用连续排名概率技能得分 (CRPSS) 评估季节性预报，针对1993-2016年的测试期降水情况，并集中在与区域视角 (第2.3节) 中分析的同四个国家：巴西、哥伦比亚、秘鲁和智利。直方图柱表示1日10月 (预测时间提前1天) (最左边)、1日9月 (预测时间提前2天)、依此类推的预报技能。正值表示季节预报模型在平均意义上 (在测试期内) 比气候参照表现更佳，而负值 (红色) 暗示气候学可能提供更准确的预报。

温度

11月份的温度季节预报模型的技能结果显示，巴西 (最长预测提前期可达4周) 显示出积极的成果，尤其是哥伦比亚，其技能值更高，并且在所有预测提前期都表现出积极的成果 (图19)。然而，智利和秘鲁的技能水平不太乐观。与之前的分析一样，对秘鲁的预测在所有预测提前期都显示出负值或零技能，可能...

受陡峭的地形和复杂的海洋环流模式的影响，如前所述。类似的因素可能对智利季节预报的较差表现有所贡献。值得注意的是，在智利的情况下，提前量1显示出正的技能。

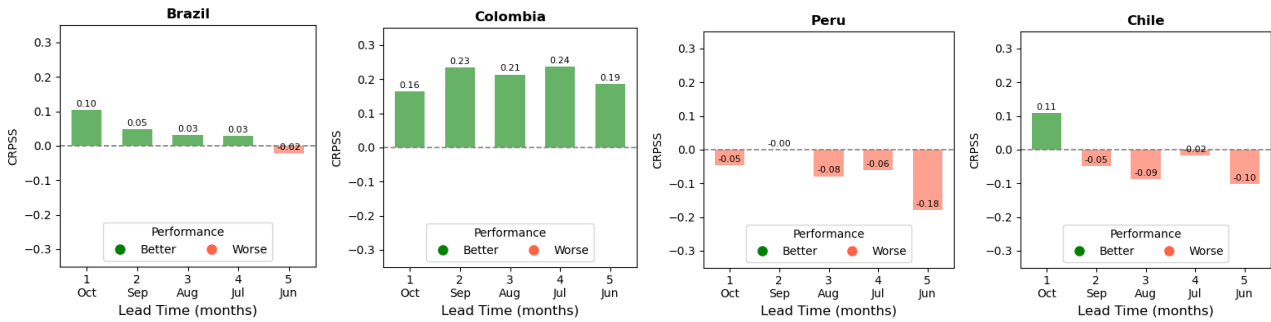


图19. 使用连续概率排序技巧分数 (CRPSS) 对气温季节预报进行评估, 目标月份为11月, 评估时间为1993-2016年测试期, 重点关注与区域视角 (第2.3节) 中分析相同的四个国家: 巴西、哥伦比亚、秘鲁和智利。直方图柱子表示在10月1日 (提前时间1) (最左边)、9月1日 (提前时间2) 等开始的预报技巧。正值表示季节预报模型在平均意义上 (在测试期内) 比气候参考预报表现更好, 而负值 (红色) 则表明气候预报可能提供更准确的预报。

6 参考文献

- 贝特, P. E.; 桑顿, H. E.; 特罗克里, A. 等. 应用于欧洲风能和太阳能的简化季节性预测策略. *气候服务* 2022, 27, 100318.
<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100318> 哥白尼气候变化服务 (C3S) *欧洲气候状况2023*; C3S, 2024a.
<https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2023> 哥白尼气候变化服务 (C3S) *全球气候变化重点 2023*; C3S, 2024b.
<https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023> . 火绒草. *全球电力评论 2024*; Ember, 2024. <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf> 赫斯巴赫, H.; 贝尔, B.; 贝里斯福德, P. 等人. ERA5全球再分析. *《皇家气象学会季刊》* 2020, 146 (730), 1999-2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803> 国际能源署 (IEA) *世界能源展望2024*; 国际能源署: 巴黎, 2024.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> . 国际能源署 (IEA); 地中海-欧洲气候变化中心 (CMCC)。
能源天气追踪器: 用户指南; 2023年4月版; 国际能源署: 巴黎, 2023年。
https://iea.blob.core.windows.net/assets/d8558cd7-5a1a-4ef6-9c24-6d639f54be7d/IEA_CMCC_Weather_for_Energy_Tracker_-_Users_Guide.pdf . 政府间气候变化专门委员会 (IPCC). *气候变化2021: 物理科学基础*。
《政府间气候变化专门委员会第六次评估报告》工作组I的贡献; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. 等编; 剑桥大学出版社: 英国剑桥, 2021年。
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> .

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) *气候变化2022：影响、适应和脆弱性。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告工作组II的贡献*；波特纳, H.-O.; 罗伯茨, D. C.; 蒂格诺, M. M. B. 等编；剑桥大学出版社：英国剑桥, 2022a。
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2> . 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) . 《2022年气候变化：气候变化的缓解。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告工作组III的贡献》 Shukla, P. R.; Skea, J.; Slade, R. 等人, 编；剑桥大学出版社：剑桥, 英国, 2022b。
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3> . 国际可再生能源机构 (IRENA). *重新组织电力系统以实现转型* 国际可再生能源机构：阿布扎比, 2022年。 <https://www.irena.org/publications/2022/Jun/RE-organising-Power-Systems-for-the-Transition> . 国际可再生能源机构 (IRENA). *世界能源转型展望2023：1.5°C路径* 第一卷；IRENA：阿布扎比, 2023年。
<https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023> . 国际可再生能源机构 (IRENA). *2024年可再生能源容量统计数据* IRENA: 阿布扎比, 2024a. <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024> . 国际可再生能源机构 (IRENA). *可再生能源统计 2024* 国际可再生能源机构：阿布扎比, 2024b. <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024> . 国际可再生能源机构 (IRENA). *2023年可再生能源发电成本* IRENA: 阿布扎比, 2024年 <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> . 热雷斯, S.; 托宾, I.; 沃塔, R. 等. 气候变化对欧洲光伏发电的影响。《自然通讯》 **2015**, *6* (1), 10014. <https://doi.org/10.1038/ncomms10014> . 施密特, G. 气候模型无法解释2023年的巨大热异常——我们可能处于未知领域。《大自然》 **2024**, *627* (8004), 467–467. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00816-z> . 斯皮诺尼, J.; 福格特, J. V.; 巴巴osa, P. 等. 1981年至2100年欧洲采暖和制冷度日的变化 《国际气候学杂志》 **2018**, *38* (S1), e191–e208. <https://doi.org/10.1002/joc.5362> . 斯皮诺尼, J.; 巴博萨, P.; 弗塞尔, H.-M. 等. 结合气候和社会经济情景的全球人口加权度日预测。《国际气候学杂志》 **2021**, *41* (11), 5447–5464. <https://doi.org/10.1002/joc.7328> . 托克罗奇, A. 季节性气候预报。《气象应用》 **2010**, *17* (3), 251–268. <https://doi.org/10.1002/met.184> 托克罗奇, A., 主编。《能源行业气象与气候服务》；帕尔格雷夫·麦克米伦出版社, 2018年。 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68418-5> . White, C. J.; Domeisen, D. I. V.; Acharya, N. 等人. 亚季节至季节预测的应用与效用进展。《美国气象学会公报》 **2022**, *103* (6), E1448–E1472. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0224.1> 联合国防治荒漠化公约 (UNCCD) . *全球干旱快照2023：主动行动的必要性* 联合国防治荒漠化公约：波恩, 2024年。
<https://reliefweb.int/report/world/global-drought-snapshot-2023-need-proactive-action-enru> 范迪克, A.I.J.M.; 贝克, H.E.; 博格斯, E.等 *全球水资源监测2023：总结报告* 全球水资源监测, 2024. 世界气象组织 (WMO) . *2022年气候服务状况：能源* (WMO-No. 1301). 日内瓦, 2022年。

世界气象组织 (WMO)。 [综合气象与气候服务以支持净零能源转型](#) (WMO-No. 1312)。日内瓦，2023。
世界气象组织 (WMO) [全球气候状况2023](#) (WMO-No. 1347)。日内瓦，2024年。世界气象组织 (WMO)；
国际可再生能源机构 (IRENA)。 [2022年回顾：气候驱动的全球可再生能源潜力资源和能源需求](#) 世界气象组织：日内瓦，2023年。 <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/2022-Year-in-Review-Climate-drive-n-Global-Renewable-Energy-Potential-Resources-and-Energy-Demand> .

关于更多信息，请联系：

世界气象组织

7 bis, avenue de la Paix – 邮政信箱 2300 – 瑞士 CH 1211 日内瓦 2

Strategic Communications Office

电话：+41 (0) 22 730 83
14 邮箱：cpa@wmo.int

wmo.int

国际可再生能源机构

马斯达尔城，阿布扎比，邮政信箱 236
邮箱：publications@irena.org
www.irena.org

欧洲中期天气预报中心

UK | 意大利博洛尼亚 | 德国波恩 邮件：copernicus-press@ecmwf.int
<https://climate.copernicus.eu/>