

GLOBAL CHINA INITIATIVE



王燕 (Yan Wang) 是波士顿大学全球发展政策中心全球中国倡议高级学术研究员，联合国秘书长任命的第四次发展筹资问题国际会议专家组成员。她现任世界银行集团顾问，曾在世界银行任职20年，担任高级经济学家和团队负责人。2009年至2011年期间，她还担任经济合作组织与发展援助委员会 (OECD-DAC) 中国研究小组协调员。

赋能非洲

中国对非电力融资对能源贫困的影响

作者：王燕 (YAN WANG)、徐印印 (YINYIN XU)¹

摘要

可持续发展目标7呼吁，在2030年之前实现“确保人人获得可负担、可靠及可持续的现代能源”。然而，非洲在实现这一目标方面仍落后于全球平均水平，数百万人正受困于能源贫困。为推动发展，非洲国家和国际发展伙伴需采取大胆、协同且快速的行动。自21世纪初以来，中国积极参与非洲能源转型。我们从次国家层级的数据中发现，2012年至2020年期间，中国资助的发电项目在解决非洲能源贫困方面卓有成效。具体而言，每当中国资助或共同资助的发电装机运行容量增加一千兆瓦，电气化的平均概率将增加约0.4个百分点。在控制若干变量后，这种正向显著的影响仍具有稳健性。然而，非洲电气化的进展在很大程度上依赖化石燃料。基于研究，我们强调了中国开发性金融机构继续参与非洲能源领域的三个政策方向：为老旧化石能源设施进行再融资和重新利用、积极探索现有燃煤电厂的逐步退役方案、推广可再生能源以助力非洲在可再生能源制造的全球价值链中的参与度。

关键词：发展融资、能源贫困、能源基础设施、夜间灯光、中国、非洲

¹ 分别担任波士顿大学全球发展政策中心高级学术研究员和康奈尔大学区域科学研究生项目应届毕业生。作者感谢 Kevin P. Gallagher、William Kring、Denise L. Mauzerall、Jiaqi Lu、Diego Morro, GDP 中心研讨会参与者提出的建设性意见,以及张雯的翻译工作。错误和遗漏由作者自行承担。如有任何意见,请发送至通讯作者 Yan Wang, 邮箱: ywang5@bu.edu。





徐印印 (Yinyin Xu) 是康奈尔大学城市与区域规划系区域科学研究生项目的应届毕业生。她将于2025年8月进入普林斯顿大学公共与国际事务学院攻读博士学位。她的研究领域包括发展融资和区域发展, 重点关注中国在非洲的海外基础设施投资。她曾协助 Dr. Yan Wang 撰写多篇研究论文, 研究领域包括从新结构经济学角度下的主权债务和中非债务重组历史研究。

引言

能源贫困是非洲普遍且长期存在的发展难题。超过一半的非洲人口（约6亿人，主要分布在撒哈拉以南地区）无法获得可靠的电力供应，占全球电力供应缺口的80%以上。非洲开发银行将解决能源贫困问题列为其五大优先领域之一（the High 5s）。非洲常被形容为“资源丰富的黑暗大陆”。非洲大陆拥有丰富的自然资源，包括石油、天然气和矿产资源以外的可再生能源。尽管资源丰富，但对于发电装机容量不足、发电站老化、制度薄弱、能源融资匮乏的国家而言，“资源诅咒”依然存在（Hafner 等，2018；Ongo Nkoa 等，2023）。此外，在城市化和工业化的推动下，非洲大陆面临着严重能源赤字，支持低收入群体的财政空间也十分有限。

在确保电力扩张不依赖化石能源的同时，提高电力供应是有必要的。在多个非洲国家，能源贫困已对生活质量下降、过早死亡率以及家庭空气污染产生了有据可查的影响（Ogwumike 和 Ozughalu，2016；Njiru 和 Letema，2018；Ang'u 等，2023）。使用未加工生物质材料进行照明、取暖和烹饪，会释放危害人体健康的有毒气体，诱发呼吸、心血管等疾病并导致过早死亡（世界卫生组织，2024）。具体而言，据估计，2019年家庭空气污染在非洲造成约70万人死亡，而环境空气污染导致约40万人死亡（Fisher 等，2021）。尽管环境空气污染的最大来源不是发电，而是农业燃烧和道路运输（Naidja 等，2018），但由于化石燃料仍然是发电的主要来源，持续的工业化进程将不可避免地导致空气质量下降，加剧公共健康风险。

发展融资可以解决扩大电力供应的两个障碍：融资和技术。提供此类支持的成本，远低于能源贫困引发的不稳定和安全风险所带来的治理成本（Birol，2007）。电力供应与经济增长和人类发展密不可分，这也是许多发展融资项目成功的关键所在。同时，能源基础设施项目通过本地采购与技术转移，可带动设备制造市场的发展（Kim，2018）。这反过来又可加强受援国在全球价值链中的参与度（Amen-dolagine 等，2024）。尽管如此，传统发展融资方基本上都退出了能源领域。²多年来，由于发展伙伴投资不足，且无法吸引足够的私营部门投资，非洲许多国家的能源基础设施脆弱且不可靠（Foster 和 Briceno-Garmendia，2010，第25页；Lin 和 Wang，2017）。投资不足的根源在于新自由主义意识形态，这种意识形态主张基础设施、公用事业和公共服务的私有化（Rodrik，2002）。此外，西方援助方通常并不优先支持电力行业，而更倾向于将资源投入社会部门或供水基础设施，因为这些领域对健康成果的影响更为直接，且相较于其他“硬”基础设施，更易显现效益。

传统援助方普遍忽视能源融资，而中国则成为了非洲能源部门的重要发展融资来源。在项目执行层面，与世界银行资助的项目相比，中国支持的能源基础设施项目通常推进更快、附加条件更少，加纳的布伊大坝便是一例（Swedlund，2017，第128页）。据估计，2000年至2023年间，中国通过两家开发性金融机构向非洲能源部门提供了约627亿美元的贷款（GDP Center，n.d.a）。2012年至2021年间，中国是非洲最大的能源融资来源，主要集中于电力领域（以化石能源和水电为主），其投资规模超过了世界银行集团、非洲开发银行及其他多边双边融资机构（Moses，2023）。考虑到在中非合作论坛（FOCAC）中，中非双方均将气候合作与清洁能源转型视为非洲能源转型的关键支柱，中国在该领域的深入参与恰恰适应了非洲各国的需求。

² 2002年至2015年间，能源援助平均仅占经合组织援助国对外援助总额的约5%（Kim，2018）。



目前关于能源领域发展融资有效性的实证证据相当有限。现有多数关于援助有效性的文献都侧重于发展融资与经济增长之间的关系。³在许多情况下，我们仅能对“整体援助是否有效”这一宏观问题给出部分回答。然而，许多发展融资并非用于整体发展，而是投向能源、卫生和教育等领域的具体项目。尤其值得注意的是，能源发展融资的有效性尚且缺乏系统研究。Maruta 和 Banerjee (2021) 研究了能源援助对国家能源效率的影响，发现其具有显著的正向作用。Chapel (2022) 亦发现了类似结果。此外，有证据表明，某些发展融资者可能会夸大其成就。⁴考虑到许多非洲国家面临沉重的债务偿还负担，确保能源领域发展融资的有效性显得尤为重要。

本文旨在探讨以下问题：中国海外发展融资在非洲能源领域的地理分布与技术结构是怎样的？中国电力融资是否缓解了非洲次国家层面的能源贫困？本研究所指的中国电力融资，是由国家开发银行（CDB）和中国进出口银行（CHEXIM）这两家开发金融机构提供的，用于电力生产的海外发展融资。这些融资主要用于各类电力项目的建设、扩容、修复或维护。

本文在以下几个方面对现有文献和实证研究做出了贡献：

首先，本文系统展示了中国在非洲能源融资的地理分布与技术结构，重点分析其空间特征，并将其与其他现有的并网运行的发电项目进行比较。虽然本文的研究重点是中国开发性金融机构资助的发电项目，但我们的描述性分析亦涵盖了其他类型的能源项目。

其次，本文采用了创新的成果导向方法来衡量非洲的能源贫困状况。我们使用了由 Min 等 (2024) 所开发的全球数据集，该数据集为能源贫困提供了基于卫星夜间灯光图像的创新性指标。该数据集具备高空间分辨率，因此我们能够进行一致且可比的评估，有助于准确识别能源获取不足的地点及其成因分析。

第三，我们系统评估了中国在非洲双边能源援助的实际成效。我们的研究可能是首个系统分析中国对非洲电力项目援助有效性的实证研究。具体而言，我们使用真实的发电站运营装机数据，评估了中国电力融资是否提升了电力服务覆盖，而非仅依赖项目承诺的金额或发放时间等指标进行推断。

其余部分结构安排如下：第二小节介绍了能源贫困的概念及一种基于卫星数据的全新测量方法；第三小节分析了非洲当前的能源格局及中国在非洲能源领域的参与情况；第四小节概述了实证研究所使用的数据；第五小节详细说明了研究方法；第六小节呈现了实证结果；最后，第七小节进行总结并提出政策建议。

³ 发展融资通常被视为通过多种机制缓解收入贫困的一种手段，包括：减少贫困 (Collier 和 Dollar, 2002; Mosley 等, 2004)、促进人力资本积累 (Gyimah-Brempong 和 Asiedu, 2008)，以及改善健康与福祉 (Kotsadam 等, 2018)、推动整体经济增长 (Moreira, 2005)，以及突破发展瓶颈、实现经济结构转型 (Lin 和 Wang, 2017; Wang 和 Xu, 2023)。

⁴ 根据美国主导的“电力非洲” (Power Africa) 计划报告，截至2017年，非洲通过该项目实现约1060万户供电连接。但相关评估报告指出，其中，约830万个（占比78%）是通过分发太阳能提灯实现的，这类装置仅能提供最基本的照明功能。



利用遥感数据测量能源贫困

目前全球尚未就“能源贫困”的统一定义达成共识。被较为广泛接受的定义是：能源贫困是指缺乏获得充足、可负担、可靠、高质量、安全且环境友好的、用于支持经济及人类发展的能源服务（联合国开发计划署，2000，第44页）。广义上，能源贫困通常表现为依赖传统生物质实现能源需求，以及无法获取诸如电力等现代能源服务（Biol, 2007）。总体而言，由于缺乏统一定义，能源贫困的概念仍较为模糊，难以在不同分析层级上进行横向比较。因此，目前关于整个非洲大陆在应对能源贫困方面取得成效的定量证据仍较有限。然而，正如 Pachauri 和 Spreng（2011）所指出的：“了解能源贫困本身，是任何缓解能源贫困行动的核心。”

文献中尚未统一衡量能源贫困的方法。现有研究，尤以发达国家为主，多采用支出型或主观型指标（Herrero, 2017）。部分实证研究采用多维评估框架，例如 Nussbaume 等（2012）提出的多维能源贫困指数（MEPI），主要用于对单一国家的分析。MEPI 在很大程度上依赖于家庭调查中受访者提供的自报信息，例如来自人口与健康调查（DHS）的数据（Munyanyi 和 Awaworyi Churchill, 2022）。这些指标高度主观，依赖于家庭对其满足基本能源需求能力的自我评估。然而，这类测量方式未必可靠，因为受访者可能低估其所处的能源贫困程度。

为了追踪国际、国家或地方层面的能源贫困状况，需要建立一种可比且可靠的衡量标准。在非洲及其他许多发展中国家，能源消费与支出数据通常是缺失的，这给相关测量带来了挑战。个案研究常被用于衡量发展中国家的能源贫困，但其结果难以推广，外部效度和普适性受到质疑。尤其对于依赖家庭调查数据的研究而言，许多数据集并不公开或需付费获取，因此研究人员和政策制定者往往难以获得必要的信息。受此限制，发展中国家在国家与国际层面的能源贫困研究远多于地方层面研究。

基于卫星的高分辨率电力接入项目（HREA）为测量能源贫困提供了一种替代路径。HREA 项目基于完整的夜间卫星图像档案，构建了涵盖“获得电力”、可靠性及使用情况三个人类聚居地层面地指标。Min 等人（2024，第5页）指出，“若聚居点在夜间图像时间序列中无明显用电迹象，即被归为电力匮乏型聚居点”。该分类方法适用于多种情境，且便于实证分析。它完全基于使用可见光谱红外成像辐射计套件（VIIRS）昼夜波段（DNB）卫星图像的历史全记录数据，因而不受传感器覆盖时间差异的影响。

与传统测量方法不同，该新方法提供了基于结果的数据支持。针对每个夜晚，它通过比较单一国家/地区内人类聚居地单元的辐射强度，与具有相似地理位置、土地覆盖等属性的非人类聚居地单元的辐射水平来进行分析。原始数据分析以1公里网格为单位，对人类聚居地与非聚居地单元分别加以识别标注。此统计分析基于如下假设：非人类聚居地单元不获得电力。在反事实设定下，若其他条件一致，获得电力的人类聚居地单元应当比周边非聚居地单元更亮。

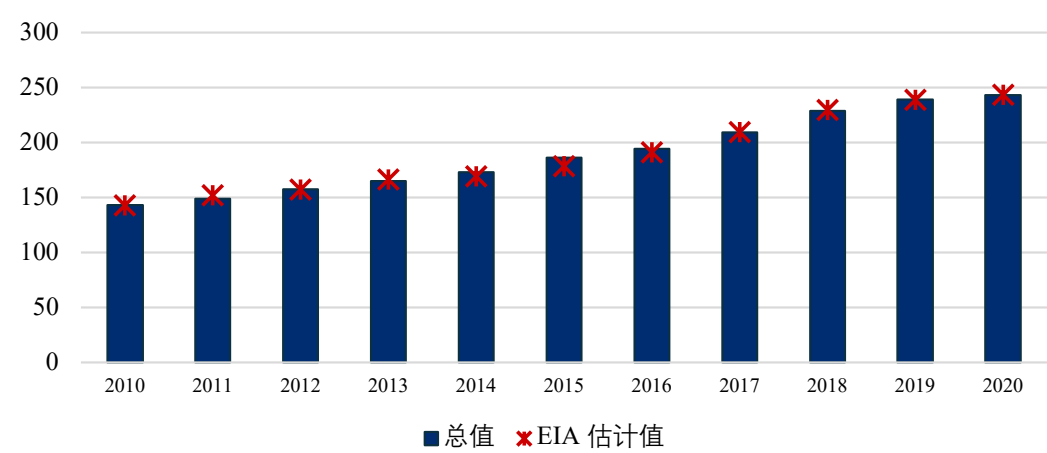


据此，可计算每一个人类聚居地单元电力获得的概率。具体而言，最终数据集估算了在任一夜晚，每个人类聚居地单元相较于其对应的非聚居地单元更亮的概率。⁵ 逐日对比法提高了数据的可靠性，有助于减少背景波动的干扰。总体而言，该数据集为实证研究提供了机会，有助于评估哪些干预措施在空间和时间维度上能有效缓解能源贫困，并具备一定的普适性。除电力接入外，该数据集还提供两个补充性指标：一是电力服务的可靠性（通过一年间人类聚居地在夜间亮度显著高于非聚居地夜晚的比例衡量），二是用电强度（通过亮度水平反映）。

非洲能源供应与中国能源融资

本文使用标普 Capital IQ Pro 全球发电厂数据库（S&P GPP）中的发电机组级面板数据，评估非洲当前的能源供应状况。该数据库提供每个发电机组的运行容量、燃料类型、地理位置和运行状态等信息。我们所使用的面板数据不包括在观察期内已退役或封存的机组。所有观测的发电机组均为并网运行的发电机组。该面板数据时长覆盖为1980年至2024年，包含了非洲1952个发电厂的5327个发电机组。我们将国家层级与非洲整体的总量估算值，与美国能源信息署（EIA）报告中的估值进行了比较，以确保数据准确性。非洲的发电装机容量从2010年的143吉瓦（GW）增长到2020年的243吉瓦，增长率为71%（图1）。

图1：非洲发电装机容量（吉瓦）



来源：作者根据 S&P GPP 和 EIA 进行分析。

⁵ 按照设计，每个人类聚居地单元的反事实辐射水平指的是该单元在未通电或无人居住情况下的平均预期亮度基准。有关其具体计算过程，参见Min等（2024，第13–14页）的论文原文。该指标由回归模型生成，并通过与各单元的预测值进行对比加以量化。将标准化残差（即z-分数）输入累积分布函数（CDF），再将结果减去0.5并乘以2，即可得出一个介于0到1之间的归一化电力获得的概率。



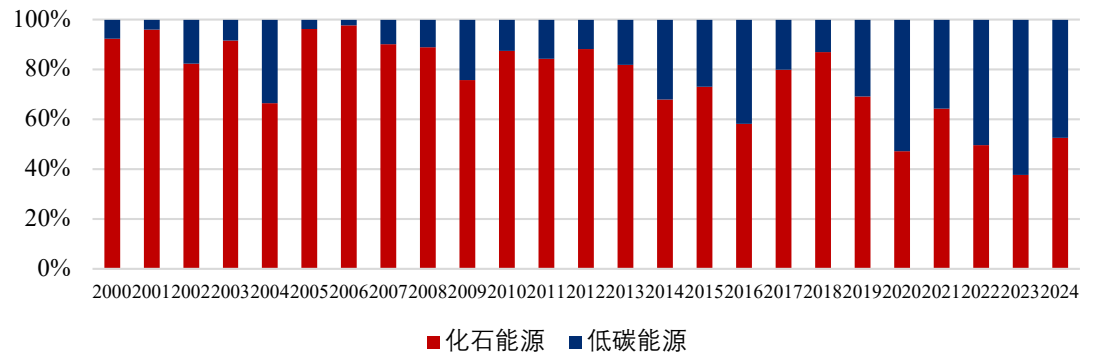
尽管非洲正稳步扩大低碳能源的发电规模，但化石燃料仍是电力生产的主要来源。图2展示了各年份的新增发电装机容量。随着非洲国家不断新增太阳能、风能、水电及其他可再生能源设施，低碳能源装机容量显著上升。然而，非洲大陆的电力生产仍然高度依赖石油、天然气和煤炭等化石燃料。

二级行政区是使用遥感数据捕捉经济活动影响的合适的地理单位。本研究中使用关键的因变量，即夜间光亮度指数，常被建议在二级及以上行政区空间单位中使用。遥感领域的一些学者指出，夜间灯光亮度数据（尤其是依靠卫星收集的数据）可能存在内生性的底层数据采集问题。在较小的地理单位中，弱光信号可能难以得到记录，而在越小的地理范围中，这种问题更容易出现。这种“测量误差”在横截面分析中可能会更加严重（Chen 和 Nordhaus, 2015；Gibson 等，2021）。然而，这一点尚未被经济学家广泛认识到。此外，在更高空间分辨率水平上，控制其他混杂因素更为困难，因为这本质上需要更高分辨率的空间数据。此外，大多数传统的社会经济指标都是通过人口普查收集，其空间单位也是基于行政区划的。

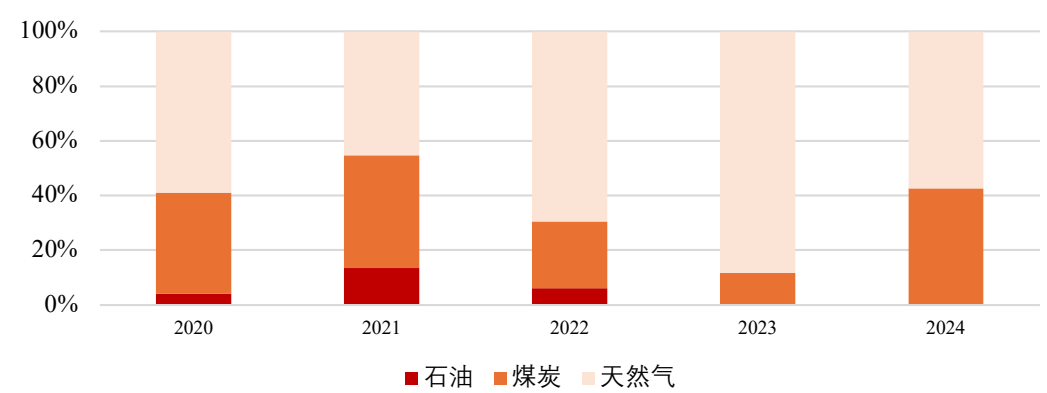
为了研究对微观区域经济活动分布的直接和间接影响，本文根据新经济地理学（NEG）理论（Krugman, 1991a和b）建立了理论模型，如图1所示。根据新经济地理学，空间上呈分散状态的市场的可达性决定了家庭（消费者）和企业的区位选择。这种可达性由经济主体在交换过程中所面临的成本来衡量（Fujita 和 Thisse, 2002, 2009）。与新古典主义模型相反，考虑到经济活动并非完全可分割，进入空间分散市场的成本不可避免。因此，空间最终是异质的，集聚可以观察到（Starrett, 1978）。诚如Fujita 和 Thisse（2009, p.1090）所总结的：“经济活动集聚与地区不平等自然相关。”

图2：非洲年度新增发电装机容量份额（化石能源与低碳能源）

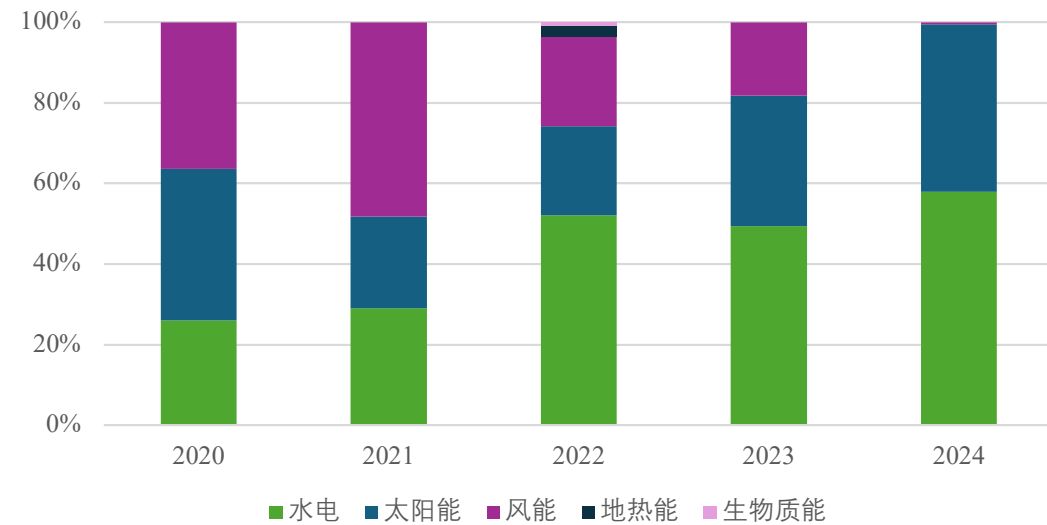
a. 所有燃料类型, 2000-2024



b. 化石能源, 2020 - 2024



c. 低碳能源, 2020 - 2024



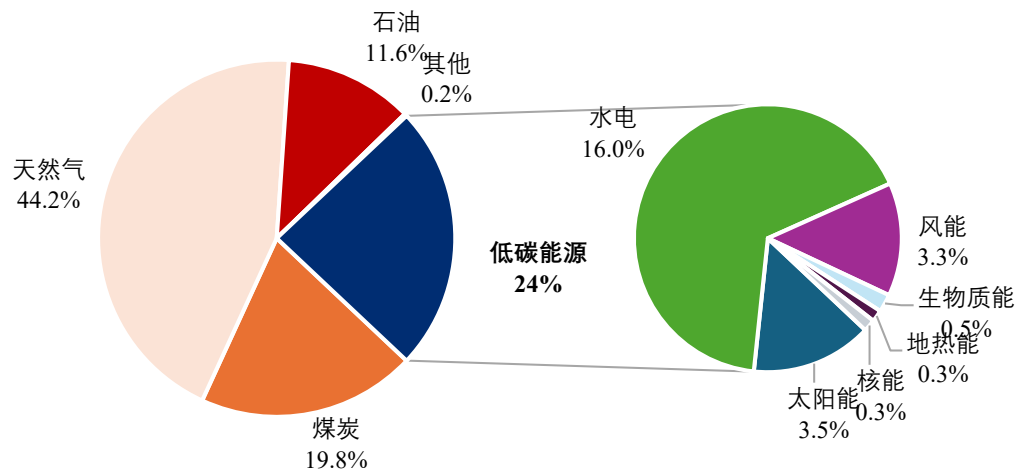
来源：作者基于 S&P GPP 数据的分析。

过去24年间，非洲大陆的能源结构发生了渐进式转变。天然气已取代煤炭，成为非洲大陆最大的发电来源。此外，与2000年之前相比，非洲大陆当前的可再生能源结构更趋多元，风能和太阳能在名义装机容量中的占比显著上升（图 3）。

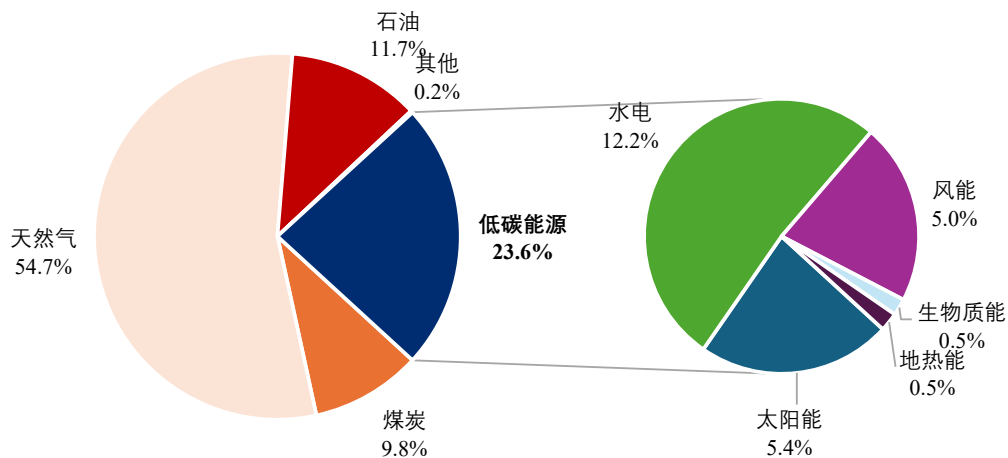


图3：不同时期非洲名义装机容量构成

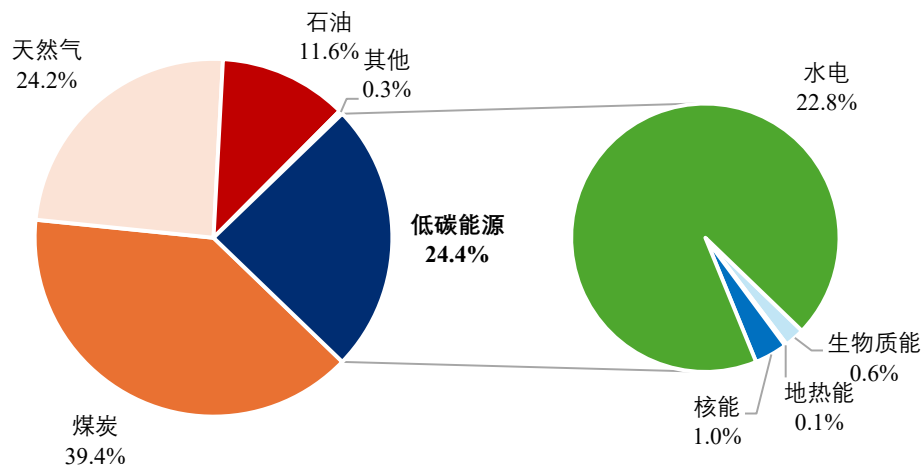
a. 截至2024年的总运行容量



b. 2000-2024年间的增加容量



c. 2000年以前的总运行容量



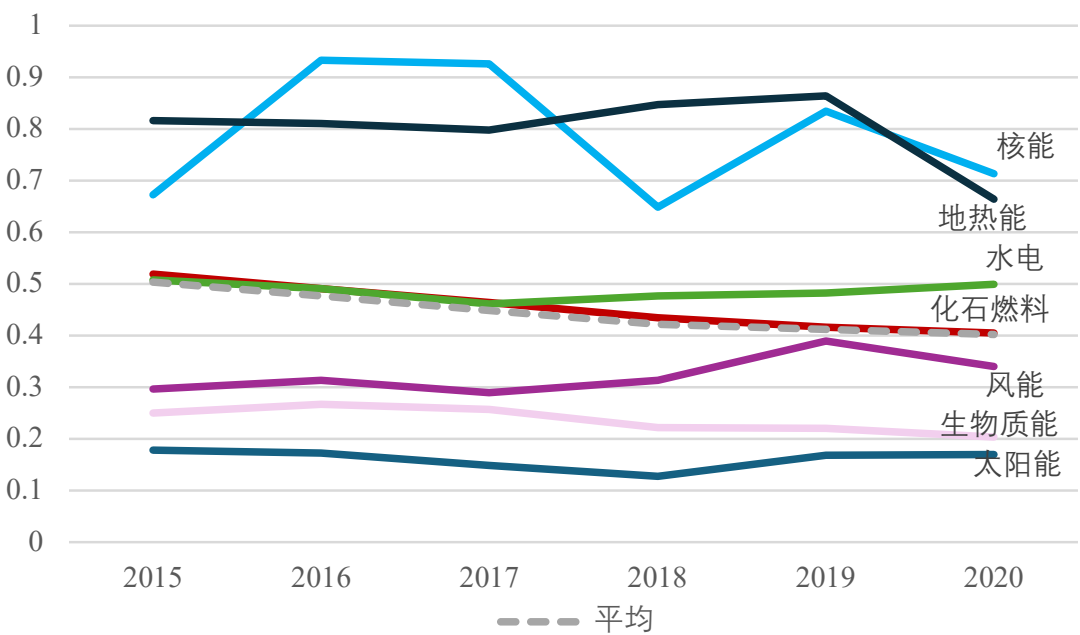
来源：作者基于 S&P GPP 数据的分析。



然而，由于可再生能源的容量因数较低，若要实现与传统能源等效的发电量，通常需要更高的装机容量。受技术及热力学约束，不同发电技术之间存在效率差异，因此在相同装机容量下，不同技术所产生的电量也有所不同。这种效率差异可通过容量因数（CF）进行衡量。从全球来看，太阳能和风能等可再生能源的容量因数通常低于化石燃料发电技术。参考 Bolson 等（2022），我们使用 EIA 提供的净发电量与名义装机容量数据，计算了全非洲范围的容量因数（公式1）。鉴于 EIA 的国别数据质量存在一定的统计误差，我们未采用国家层面的容量因数（见图4）。

$$CF_f = \frac{Generation_{AFRC,f}}{Africa_{AFRC,f} \times 365 \times 24} = \frac{Generation_{AFRC,f}}{Africa_{AFRC,f} \times 8760} \tag{1}$$

图4：2015年至2020年按燃料类型划分的平均容量因数



来源：作者根据 EIA 数据的分析。

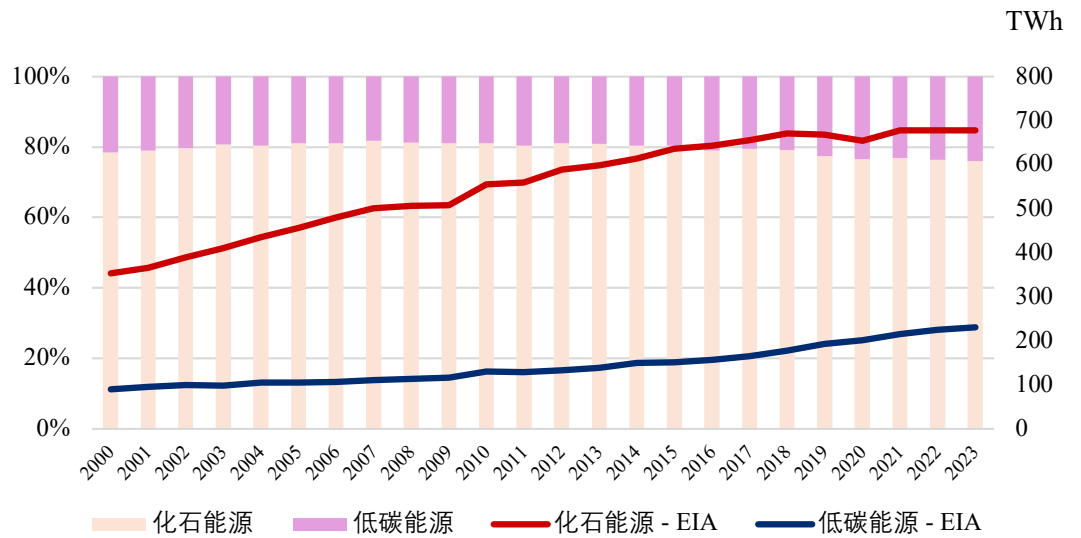
令人鼓舞的是，在非洲的能源结构中，低碳能源占比不断上升。然而，现有和计划中的装机容量远远不足，大量低碳能源潜力仍未被开发。国际可再生能源机构（2021，第38页）估计，理论上，非洲的低碳能源发电潜力为2431765太瓦时（TWh），其中包括1449742太瓦时的太阳能、978066太瓦时的风能、2374太瓦时的生物质能、1478太瓦时的水能和105太瓦时的地热能。尽管整个非洲大陆对低碳能源的兴趣日益增长，但在实现普遍可再生电力供应方面，进展仍远远不足。Peters 等（2024）估计，如果所有拟建和现有的低碳电站都建成并以满负荷运行，到2040年，这些电站最多可以满足非洲51%的电力需求（即提供1225太瓦时的电力，而到2040年非洲的总电力需求预计为2321太瓦时⁶）。实现非洲大陆可再生能源目标极需更多的发展融资。

⁶ 本情景设想普遍获得电力供应，并与《2063年议程》保持一致。



在非洲大陆，用低碳能源替代化石能源将需要大规模的基础设施建设，还需要显著增加低碳能源装机容量。化石燃料仍占非洲电力生产和发电潜力的约80%（见图5）。对于当前高度依赖化石燃料的许多非洲国家而言，以低碳能源取代化石能源将是一项重大挑战。此外，相同名义容量下，更清洁的替代能源可能较于化石燃料具有较低的发电潜力，这意味着需要安装更高的名义容量以满足相同的电力需求。以2020年的平均容量因数为基础，替代1吉瓦的化石能源装机容量需要2.4吉瓦的太阳能装机或1.2吉瓦的风能装机。此外，可再生能源发电具有间歇性，且大多数可再生资源（除太阳能外）在地理分布上并不均匀。太阳能发电的性能还可能因撒哈拉沙尘导致的光伏板积尘而显著下降，尤其是在靠近撒哈拉沙漠的地区（Li 等，2020）。

图5：非洲化石能源与低碳能源发电潜力份额（堆积柱状图，左轴，%）和实际发电量（线图，右轴，TWh）



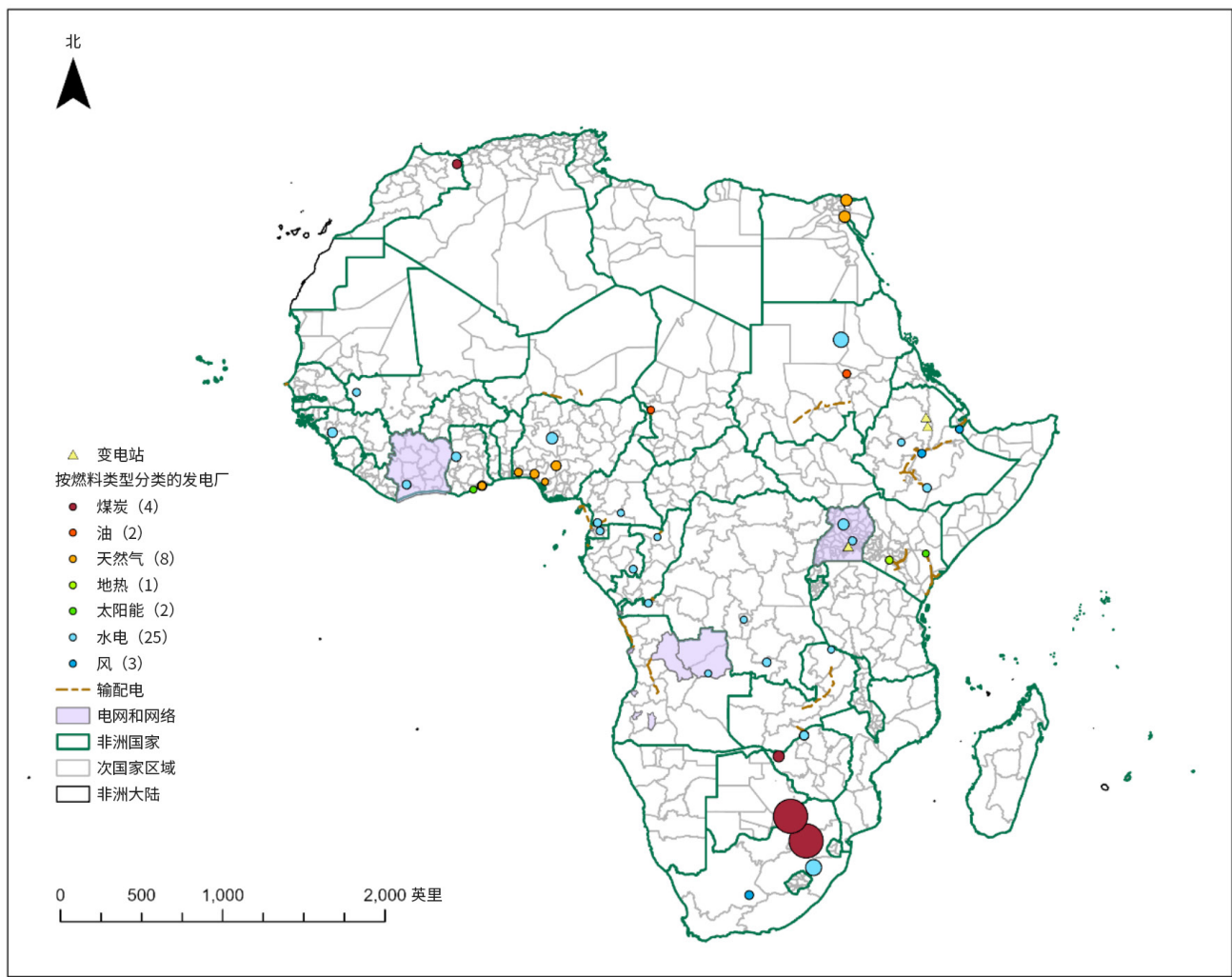
来源：作者的基于 S&P GPP 和 EIA 数据的分析。

注：我们按燃料类型采用年均容量因数（CF）估算每台机组的发电潜力（单位：太瓦时，TWh）。估算结果与 EIA 数据相近。

非洲的能源转型对中国在全球能源发展融资中日益上升的影响力具有核心意义。图6展示了中国对非洲能源发展融资的空间分布与技术结构。由波士顿大学全球发展政策中心运营的中国对非洲贷款数据库（Chinese Loans to Africa, CLA）最新估计，在2000至2023年间，中国对非发展贷款总额达1820亿美元，其中630亿美元投向能源领域。中国对非洲能源的投入不仅限于发电，还覆盖电网韧性和相关基础设施，以确保现代社会能够获得可负担且可靠的电力供应。本研究重点关注中国对非洲的电力发展融资。



图6：中国对非洲能源发展融资



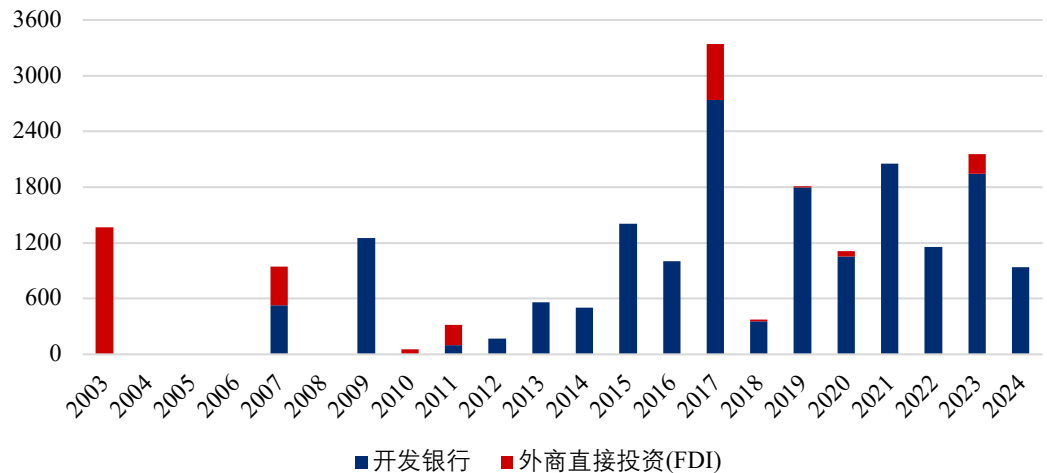
来源：作者根据 GADM 版本4.1和 CODF 版本2.0制作。
注：符号大小表示各电厂的相对运行容量。地图投影使用1984年世界大地坐标系（WGS 1984）。括号内数字表示项目数量。

尽管中国是非洲最大的大型能源基础设施融资方，但其政府未公开相关发展融资项目的详细信息。因此，多数研究人员需依赖由研究机构编制的数据库。本研究采用了由 GDP 中心（2023）编制的中国海外发展融资数据库（CODF）。除此之外，我们还使用 GDP 中心（2022）维护的中国全球电力数据库（CGP），该库涵盖由中国对外直接投资（FDI）或政策性银行资助的发电站数据。CODF 提供与发电及输配电项目相关的融资信息，CGP 则包含发电站层级的详细记录。我们从 CODF 获取项目级信息，并将相关机组属性与 S&P GPP 数据进行匹配。本研究仅聚焦于并网运行的发电机组。

两家政策性银行为 CGP 与 CODF 数据库中所登记的大多数项目提供了融资。2003年至2024年间，两家政策性银行与中国 FDI 共同为非洲提供了20.5吉瓦新增装机容量的融资，占同期总新增容量的12.4%。其中，中国国家开发银行或中国进出口银行提供了这部分新增装机容量融资的85.5%。图7展示了来自政策性银行与外国直接投资的年均运行容量新增融资情况。2017年，中国资本支持的新增装机容量出现显著增长。



图7：受中国融资支持建设的非洲年度新增发电容量，兆瓦（MW）



来源：作者根据 CODF、CGP、S&P GPP 数据的分析。

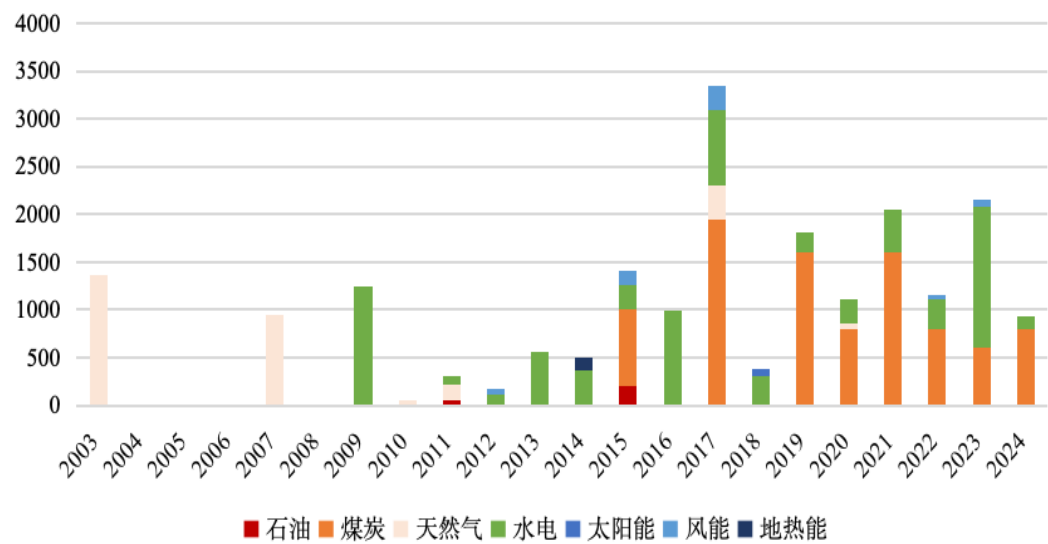
相较可再生能源，中国在化石能源领域的投资仍占显著比重。图8显示，近年来，越来越多的低碳发电项目（尤其是水电）获得了中国融资，这与中国将“一带一路”转型为绿色倡议的承诺相契合。根据2021年9月所提出的倡议，中方承诺停止为海外新建燃煤电厂提供融资。然而，从2003至2024年，中国融资的新增装机容量中仍有约60%（12吉瓦）来自化石燃料项目。中国的政策性银行仍对承诺前已批准项目承担合同义务，这些项目大多已在建设中，或正处于其预计持续数十年生命周期的早期阶段。

那么，中国资助的燃煤电厂应何去何从？有研究建议，尽早逐步减少这类电厂的发电量（Manych 等，2023），但这一做法成本高昂，且在发展中国家几乎缺乏实践基础。从现实角度来看，提前退役由中国政策性金融机构和其他方共同融资的燃煤电厂，将依赖长期的再融资安排以及大量的政策投入。公正能源转型的实现可能有赖于中国政策性银行与其他发展伙伴的合作。然而，目前大多数“公正能源转型”与气候投融资倡议仍主要由西方捐助方主导支持（GDP Center, 2023），而此类融资机制对于中国支持的海外煤电资产而言，获取难度较大。

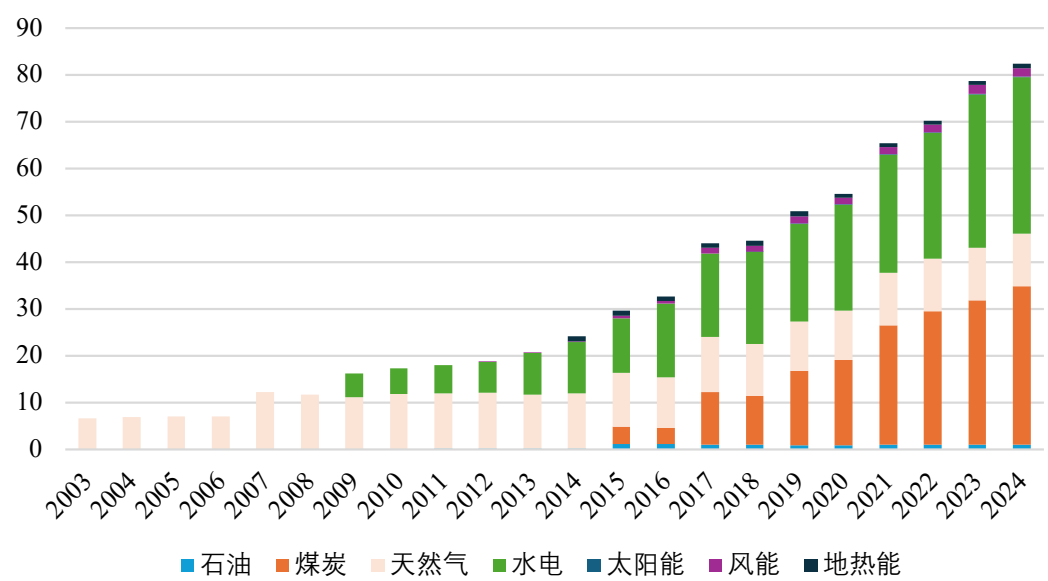


图8：中国资本融资支持建设的年度新增装机容量和发电潜力（按燃料类型划分）

a. 年度新增装机容量，MW



b. 年发电潜力，TWh



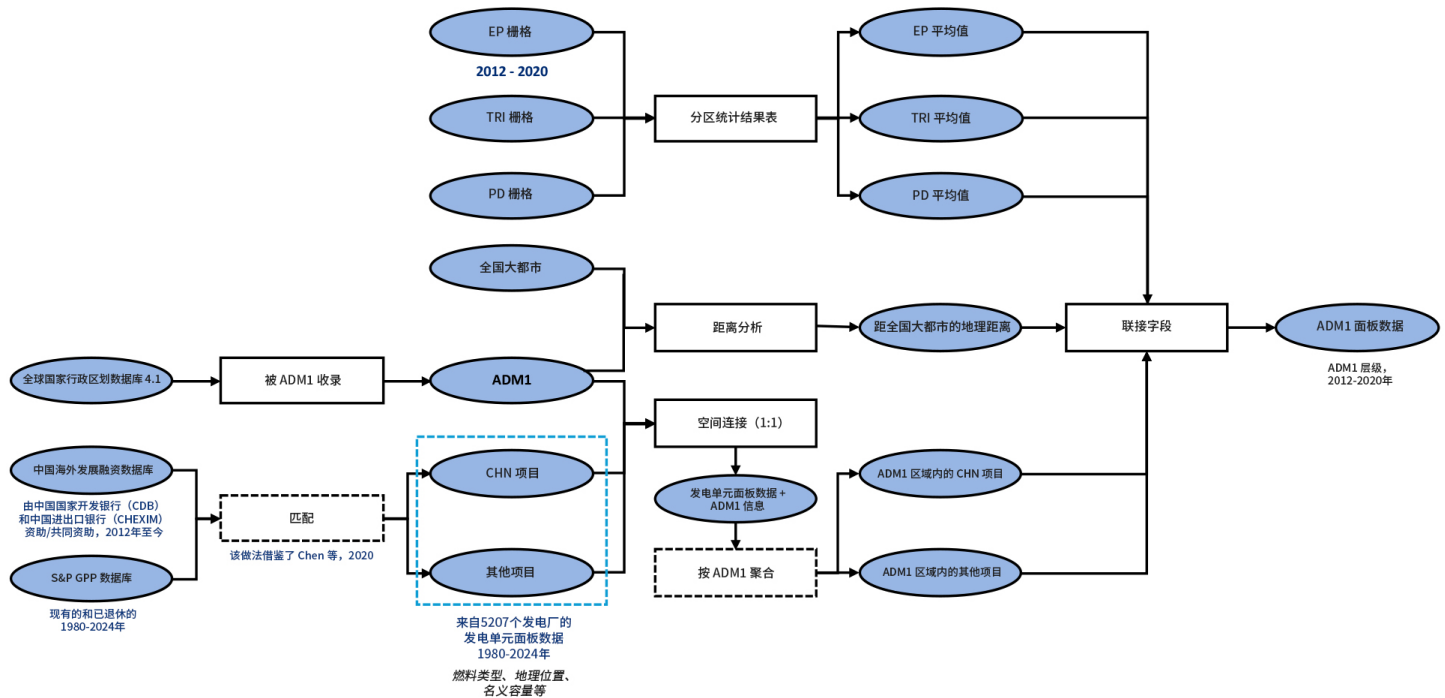
来源：作者根据 CODF、CGP、S&P GPP 和 EIA 的数据的分析。



数据描述

本研究采用空间分析与地理数据处理，构建了覆盖2012–2020年期间850个非洲次国家级行政区的面板数据集。⁷首先，我们对54个非洲国家的850个次国家区域边界进行标准化处理，并生成每个区域的能源贫困栅格数据。这些区域以矢量格式定义为分析单位，并从其内栅格单元中提取统计特征。随后，我们基于地理位置将各类发电厂（无论其燃料类型或是否获得中国融资）匹配到对应次国家级区域。其他控制变量也以类似方式在次国家级尺度上收集与整理。所有地理投影均采用 WGS 1984 坐标系统。图9概述了地理数据处理方法；表1列出了研究所用变量的定义及其数据来源。

图9 简化的地理数据处理步骤



来源：作者绘制，仅供说明。

⁷ 指表示地理特征的矢量数据模型，即用于定义本研究中次国家级区域边界的多边形单元。



表1：变量定义及来源

变量名	定义	来源
EP	次国家一级地区平均电力获得概率，见表2	Min et al., 2024
CHN	中国出资/联合出资的发电机组	CODF, S&P GPP
Other	其他发电机组	S&P GPP
PD	人口密度	UNDP GeoHub, 2024
TRI	地形崎岖指数	Esri, 2024
Distance to Metropole	距全国大都市的地理距离	OECD/SWAC, 2024
ADM1	次国家一级行政区	GADM 4.1
ADM0	国家	GADM 4.1

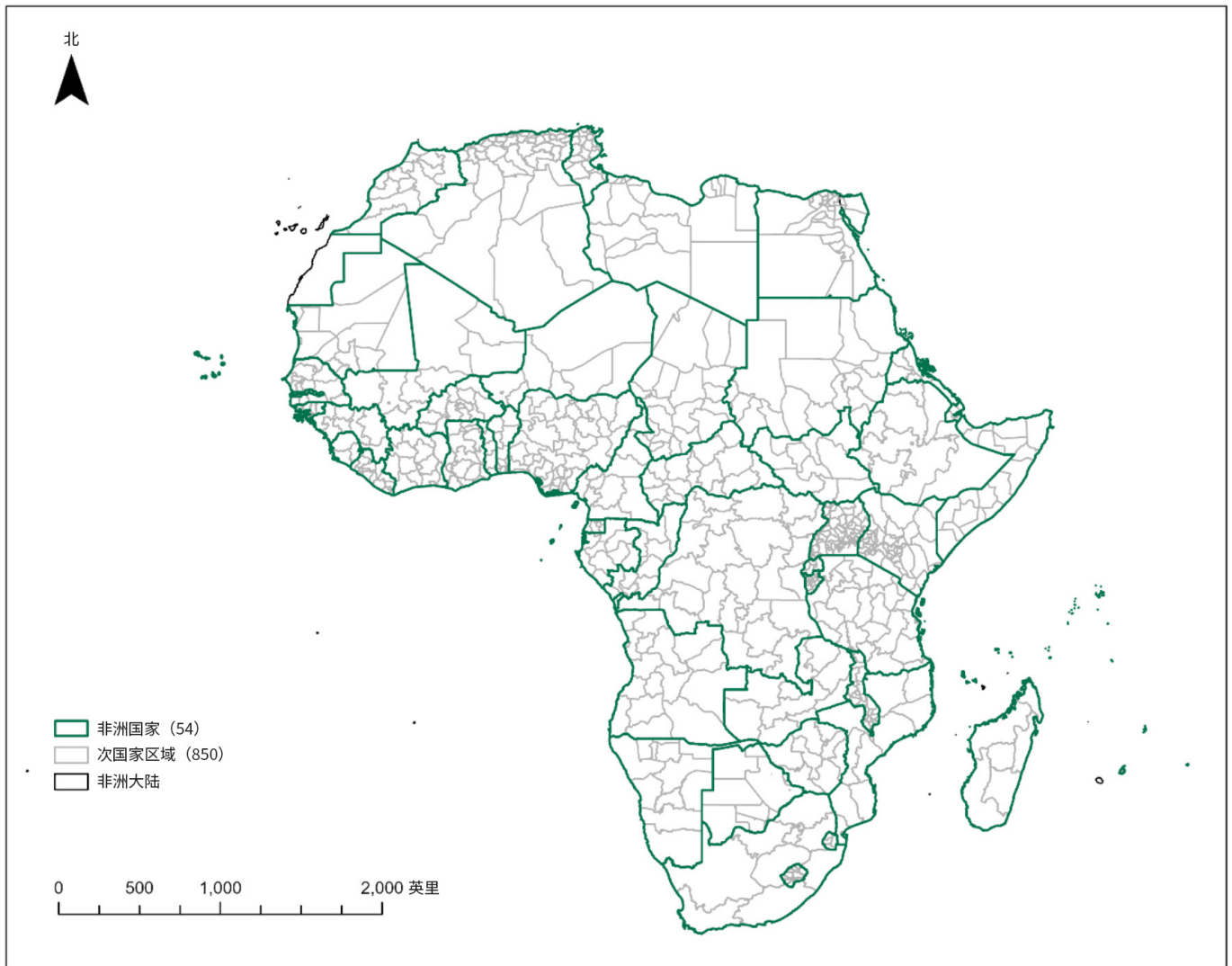
来源：作者的阐述。



空间单元

本研究的空间单元为54个非洲国家的次国家行政区（ADM1），即国家下一级的地方行政单位（见图10）。考虑到发电站与电网基础设施的运行特性主要体现在地方层级，我们更倾向于采用地方行政区作为研究空间单位。尽管缺乏系统性的电网基础设施空间数据，但“非洲电网探索”（World Bank, 2023）提供的可视化资料显示，许多非洲国家电网基础设施仍较为薄弱。图10展示了本研究所覆盖的空间范围。行政区域边界的原始数据基于全球行政区划数据库（GADM）第4.1版矢量数据集，该版本为截至2022年7月16日发布的最新数据。

图10：研究的范围：撒哈拉以南非洲国家的次国家区域



来源：作者根据 GADM 版本 4.1 的显示。

注：根据联合国大会和会议管理部，非洲由54个联合国会员国组成；本研究采用相同划分标准。地理投影采用 WGS 1984坐标系。



因变量

本研究基于 HERA 所提供的人类聚居地层级估算数据，计算非洲每个次国家级区域的平均电力获得概率。每个1平方公里的聚居地栅格单元被映射到一个对应的次国家级行政区。能源贫困 (EP_{ist}) 为在年份 t 、区域 i 内所有聚居地单元 ($cell$) 电力获得概率的平均值。详见公式(2)。图A1展示了2020年的示例。

$$EP_{ist} = \frac{\sum_{cell} \text{likelihood of being electrified}_{cell,i,t}}{N_{cell,i,t}} \quad (2)$$

总体来看，非洲在缓解能源贫困方面已取得一定进展，但整体改善速度仍然缓慢。2012至2020年间，非洲各次国家级行政区的平均电力获得概率从34%提升至37%（见表2）。尽管如此，这一进展仍远不足以满足电力需求，许多地区依然缺乏可靠的电力供应。这一发现与现有估计相符：目前约有6亿非洲人口——几乎占整个大陆人口的一半——仍无法获得可靠的电力供应。此外，能源贫困在国家之间以及国家内部地区之间均呈现出显著差异。撒哈拉以南非洲的次国家级区域电力获得概率明显低于北非地区。在撒哈拉以南非洲的大多数地区，电力获得概率仍低于50%。

表2：非洲样本次国家级区域平均电力获得概率

年份	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
2012	838	34.29	30.10	0.84	100
2013	838	34.78	30.22	0.34	100
2014	838	34.66	30.21	0.53	100
2015	838	35.14	30.41	0.45	100
2016	838	36.01	30.37	0.73	100
2017	838	35.64	30.60	0.50	100
2018	849	36.66	31.00	0.74	100
2019	829	37.15	31.61	1.14	100
2020	849	37.24	31.17	1.04	100

来源：作者的分析。



解释变量

本研究的核心解释变量是中国在非洲投资或共同投资的发电机组的实际运行容量。我们使用地理编码的 CODF 数据追踪非洲中国电力融资项目的位置⁸，实证分析仅聚焦于2012至2020年间建成并投运的电力项目，总价值超过85亿美元⁹。由于 CODF 未提供发电单元的详细技术属性，我们参考 S&P GPP 数据库来补充每个项目的技术细节（该做法借鉴了 Chen 等，2020）。分析样本覆盖18个非洲国家的26个发电站，共计89台发电机组，总装机容量约为11吉瓦（见表2和附录表1了解涉及的全部发电厂名单）。截至2020年，这些机组的年发电潜力约为45太瓦时（TWh）。在回归分析中，我们将该变量以1000兆瓦为单位计量边际效应，稳健性检验中则使用100兆瓦为单位。

表3 2020年中国在非洲融资/联合融资发电厂的运行容量

燃料类型	国家	运行容量, MW	小计, MW	发电潜力, TWh	小计, TWh
煤炭	摩洛哥	350	5150	1.2	18.2
	南非	4800		17.0	
油	苏丹	200	200	0.7	0.7
天然气	尼日利亚	530	530	1.9	1.9
地热	肯尼亚	140	140	0.8	0.8
太阳能	肯尼亚	55		0.1	0.1
水电	安哥拉	12	5178	0.1	22.7
	喀麦隆	15		0.1	
	科特迪瓦	270		1.2	
	刚果民主党	150		0.7	
	赤道几内亚	120		0.5	
	埃塞俄比亚	351		1.5	
	加蓬	160		0.7	
	加纳	400		1.8	
	几内亚	240		1.1	
	刚果共和国	20		0.1	
	南非	1332		5.8	
	苏丹	1250		5.5	
	乌干达	183		0.8	
	赞比亚	375		1.6	
	津巴布韦	300		1.3	
风	埃塞俄比亚	204	204	0.6	0.6
全部的	全部的	11457	11457	45.0	45.0

来源：作者根据 CODF 数据库 2.0 版分解分析、S&P GPP 数据库和 EIA 的阐述。

⁸ 2012年前签署的三个项目未纳入CODF，但已在CGP中记录：苏丹的麦洛维水电站、尼日利亚的奥洛伦索戈天然气电厂，以及埃塞俄比亚的芬查-阿默蒂-内舍水电站。我们也将这三项纳入实证样本中。

⁹ 部分项目还包括输电与配电组件。



表2显示，中国在非洲投资或共同融资的发电项目大多为水电站。但从装机容量来看，摩洛哥的杰拉达电站，以及南非的库西勒与梅杜皮电站是运行容量和发电量最高的三座燃煤电厂，具有极高的名义容量。在整个观察期内，中国资助发电厂的年均新增运行容量约为1.1吉瓦，2017年达到峰值，增量为2.7吉瓦，创下纪录。虽然本研究不对比各发电厂的投运时间与融资承诺时间，但不同机组之间确实存在显著的时间差异。

控制变量

除中国资助或共同资助的发电机组外，我们还控制了其他非洲发电机组的运行容量（以1000兆瓦为单位计量），并同样基于 S&P GPP 数据库进行地理编码匹配。我们进一步控制了可能影响电力需求和地理分布差异的因素，包括人口密度（UNDP GeoHub, 2024）、地形崎岖度（Esri, 2024）和距主要城市的距离（OECD/SWAC, 2024）。我们采用 Africapolis 对 71 个大都市的定义，这些城市被认为在各自国家中具有显著的经济、政治或文化意义。这71个城市群约占非洲城市人口的31%，合计2.24 亿人。各次国家级行政区到最近大都市的距离通过其质心（即行政区多边形的几何中心）与大都市之间的地理直线距离计算得出（详见附录表 1）。表3展示了主要变量的描述性统计结果。

表4：统计摘要

变量名	单位	均值	标准差	最小值	最大值	观测值
<i>ΔEP</i>	百分比	0.32	3.49	-24.99	31.13	6,266
<i>CHN</i>	1000 MW	0.01	0.10	0.00	3.20	6,266
<i>Other</i>	1000 MW	0.23	1.25	0.00	30.57	6,266
<i>ΔPD</i>	人/平方公里	9.62	43.10	-268.39	1008.97	6,266
<i>TRI</i>	/	3.34	1.55	1.00	6.83	6,266
<i>Distance to Metropole</i>	公里	247.37	211.73	1.66	1181.62	6,266

来源：作者的阐述



实证策略

我们构建如下实证模型（公式 3）以评估中国能源融资是否有助于缓解地方层面的能源贫困：

$$EP_{ist} = \alpha_1 \sum_j CHN_{jst} \times N_{jst} + \alpha_2 \sum_u Other_{uist} \times N_{uist} + \alpha_3 X_{ist} + \theta_{is} + \delta_{is} \times T + \theta_s \times T + \tau_t + \varepsilon_{ist} \quad (3)$$

其中， EP_{ist} 表示在年份 t 、国家 s 的第 i 个次国家级区域的能源贫困程度，具体衡量为该区域所有定居点的平均电气化预测概率。 CHN_{jst} 表示在年度 t 、中国融资或共同融资的第 j 台发电机组在地区 i 的运行容量（以1000兆瓦为单位）， N_{jst} 表示发电机组 j 截至 t 年累计运行的年数。 $Other_{uist}$ 表示同期在地区 i 内非中国资助发电机组 u 的运行容量， N_{uist} 表示其截至 t 年的累计运行年数。 X_{ist} 为协变量向量，包括人口密度及其他与时间相关的地理特征。为保留识别效应，我们将这些特征与线性趋势交互，避免在一阶差分中被剔除。 θ_{is} 为区域固定效应， $\delta_{is} \times T$ 为区域特定线性趋势项， $\theta_s \times T$ 吸收全国层面的共同冲击， τ_t 为年份固定效应， ε_{ist} 为误差项。我们亦可采用一阶差分形式进行估计（见公式4）。

$$\Delta EP_{ist} = \alpha_1 CHN_{ist} + \alpha_2 Other_{ist} + \alpha_3 \Delta X_{ist} + \delta_{is} + \theta_s + \vartheta_t + \Delta \varepsilon_{ist} \quad (4)$$

其中， EP_{ist} 表示国家 s 中第 i 个次国家级区域在年份 t 与 $t-1$ 之间能源贫困水平的变化。 CHN_{ist} 表示中国资助发电机组的总运行容量， $Other_{ist}$ 表示非中资发电机组的总运行容量。两者均通过加总各机组的运行容量与累计运行年限获得，图A2展示了2020年的估算示例。差分后的年份固定效应定义为 $\vartheta_t = \tau_t - \tau_{t-1}$ 。考虑到电网往往横跨多个行政区域，且现有电网数据与研究时空范围不完全匹配，我们将标准误差聚类至国家层面，以允许区域之间存在任意的空间与时间相关性。由于使用一阶差分形式，分析样本涵盖2013至2020年（排除首年）。

为了进行稳健性检验，我们进一步考虑了不同燃料类型下的发电潜力。我们根据燃料技术类型的平均容量因子 ($CF_{t,f}$) 估算每台发电机组的发电潜力（单位：TWh）。相应的估计模型见公式（5）：

$$\Delta EP_{ist} = \beta_1 CHN Gen_{ist} + \beta_2 Other Gen_{ist} + \beta_3 \Delta X_{ist} + \delta_{is} + \theta_s + \vartheta_t + \Delta \varepsilon_{ist}$$

$$CHN Gen_{ist} = \frac{\sum_f \sum_j CHN_{jst,f} \times CF_{t,f} \times 8760}{1000}, \quad Other Gen_{ist} = \frac{\sum_f \sum_u Other_{uist,f} \times CF_{t,f} \times 8760}{1000} \quad (5)$$

其中， $CHN Gen_{ist}$ 和 $Other Gen_{ist}$ 分别表示在年份 t ，中国资助与非中资发电厂在国家 s 的第 i 个次国家级区域的发电潜力。发电潜力用于识别不同燃料与技术路径的发电效率差异，因而不直接等同于实际发电量。



结果

表5报告了在多种模型设定下，中国资助或共同资助的电力项目与撒哈拉以南非洲国家能源贫困之间的估计关系。总体而言，中国每新增1000兆瓦的电力运行容量，平均可使其所覆盖的非洲次国家区域的电力获得概率提高约0.4个百分点。

表5：不同参数下公式（4）的估算结果，CHN = 1000 MW

变量		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
装机容量	中国出资/ 联合出资	0.420**	0.418**	0.433**	0.441**	0.389*	0.359*	0.366**
		(0.196)	(0.197)	(0.208)	(0.208)	(0.216)	(0.181)	(0.182)
	其他		-0.010	-0.032	-0.043	0.003	-0.011	-0.023
			(0.053)	(0.073)	(0.076)	(0.061)	(0.086)	(0.089)
人口密度				0.003	0.002		0.003*	0.002
				(0.002)	(0.002)		(0.002)	(0.002)
地形崎岖指数				0.009	0.010		0.008	0.009
				(0.025)	(0.024)		(0.025)	(0.024)
距大都市的地理距离					-0.016			-0.016
					(0.019)			(0.019)
次国家层级固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
国家固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
国家年份固定效应		N	N	N	N	Y	Y	Y
赤池信息准则		34645.05	34647.04	32554.14	32555.45	33240.15	31242.98	31244.16
贝叶斯信息准则		34692.68	34701.48	32621.57	32629.62	33253.76	31269.95	31277.88
观测值		6666	6666	6266	6266	6666	6266	6266

来源：作者的分析。

注：*** p<.01、** p< 0.05、*p< 0.1；括号中报告了国家层面聚类的稳健标准误差。在最严格的模型中，年份固定效应和国家固定效应被国家年份固定效应吸收。

除第1列外，表5中所有模型设定均控制了其他非中资发电厂运行容量的影响。在第2列中，我们发现：每新增1000兆瓦由中国资助或共同资助建设的运行容量，平均会使该区域的电力获得概率提高0.4个百分点，该估计在95%的置信水平下具有统计显著性。在第3列和第4列中，我们进一步纳入了一系列协变量，估计系数的方向与幅度与第2列基本一致，表明结果具有稳健性。在第6和第7列中，我们采用了最严格的模型设计，控制了可能在不同年份影响特定国家或地区的未观测异质性冲击。尽管统计显著性略有下降，但估计系数在方向与数值上仍表现稳健。



控制变量的估计方向大体符合预期。例如，人口密度较高或靠近主要大都市的地区，往往面临更低的能源贫困水平。这可能是因为在人口较为稀疏的边缘城市、偏远地区或地形复杂区域，居民更可能依赖离网方案，从而导致电力服务的不稳定或难以获取。此外，地形崎岖度指标的引入借鉴了 Nunn 和 Puga (2012) 关于地理对经济发展的研究思路。但在本研究中，我们并未发现崎岖度与能源贫困之间存在类似路径的显著关联。总体而言，所有协变量在95%的置信区间内，在多元回归设定下均未表现出显著影响。

一个值得注意的发现是，非中国开发性金融机构所资助或共同资助的发电产能与能源贫困之间并不存在统计上显著的相关性。我们认为，这一现象背后可能存在多重原因。首先，这类产能中很大一部分设备已相对老旧，效率较低。以2020年为例，约40%的相关发电装机容量在2000年之前已投入运行，其中约13%更是可追溯至1980年之前。然而，受限于数据可得性，目前尚无法获得机组级的发电量或容量因数信息，因此我们无法直接识别这类过时装机容量的实际低效率。其次，许多中国资助的电力项目包含了配电基础设施（见图6），这可能提升了其所支持装机容量向最终用户的输送电力，从而增强了实现电力服务的可及性。相比之下，目前尚不清楚非中国开发性金融机构所资助的项目中，有多少产能真正实现了可供终端用户使用的传输。

同时，我们检验了估计结果是否对变量单位设定具有稳健性。2023年召开的第三届“一带一路”高峰论坛强调了未来将重点支持“小而美”或“小而有影响力”的项目，标志着从超大型基础设施建设转向规模更小、效益更高的项目。在电力领域，中国的一些旗舰项目装机容量通常介于100兆瓦至500兆瓦以上。因此，我们将变量单位从原先的1000兆瓦调整为100兆瓦，并重新估算了模型（见表6）。结果显示，在所有模型设定中，中国融资或共同融资的发电产能对减少能源贫困始终具有积极影响，且该影响在统计上显著。



表6：不同模型（4）的估算结果，CHN = 100 MW

变量		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
装机容量	中国出资/联合出资	0.042**	0.042**	0.043**	0.044**	0.039*	0.036*	0.07**
		(0.020)	(0.020)	(0.021)	(0.021)	(0.022)	(0.018)	(0.018)
	其他		-0.010	-0.032	-0.043	0.003	-0.011	-0.023
			(0.053)	(0.073)	(0.076)	(0.061)	(0.086)	(0.089)
人口密度				0.003	0.002		0.003*	0.002
				(0.002)	(0.002)		(0.002)	(0.002)
地形崎岖指数				0.009	0.010		0.008	0.009
				(0.025)	(0.024)		(0.025)	(0.024)
距大都市的地理距离					-0.016			-0.016
					(0.019)			(0.019)
次国家层级固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
国家固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
国家年份固定效应		N	N	N	N	Y	Y	Y
赤池信息准则		34645.05	34647.04	32554.14	32555.45	33240.15	31242.98	31244.16
贝叶斯信息准则		34692.68	34701.48	32621.57	32629.62	33253.76	31269.95	31277.88
观测值		6666	6666	6266	6266	6666	6266	6266

来源：作者的分析。
注：*** p<.01、** p< 0.05 、*p< 0.1；括号中报告了国家层面聚类的稳健标准误差。在最严格的模型中，年份固定效应和国家固定效应被国家-年份固定效应吸收。

为了进一步验证基准结果的稳健性，我们用计算所得的年度发电潜力替代原始自变量，作为额外的稳健性检验。结果显示，中国资助或共同资助的发电潜力每增加1TWh，非洲次国家区域的平均电气化概率上升0.1个百分点，该估计在95% 的置信水平下具有统计显著性（见表7）。然而，该估计依赖于一个假设，即所有使用同种燃料的发电机组具有相同的容量因子。实际上，各发电机组的实际发电效率可能存在差异，但我们缺乏足够的数据来观察或衡量这种差异。



表7：不同模型（5）的估计结果

变量		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
发电潜力 (单位：1 太瓦时)	中国出资/ 联合出资	0.135**	0.134**	0.138**	0.140**	0.120**	0.107**	0.109**
		(0.057)	(0.057)	(0.060)	(0.059)	(0.056)	(0.045)	(0.04)
	其他		-0.010	-0.032	-0.043	0.003	-0.011	-0.023
			(0.053)	(0.073)	(0.076)	(0.061)	(0.086)	(0.089)
人口密度				0.003	0.002		0.003*	0.002
				(0.002)	(0.002)		(0.002)	(0.002)
地形崎岖指数				0.009	0.010		0.008	0.009
				(0.025)	(0.024)		(0.025)	(0.024)
距大都市的地理距离					-0.016			-0.016
					(0.019)			(0.019)
次国家层级固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
国家固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定效应		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
国家年份固定效应		N	N	N	N	Y	Y	Y
赤池信息准则		34645.95	34647.95	32554.04	32555.35	33240.08	31242.93	31244.11
贝叶斯信息准则		34692.58	34701.39	32621.47	32629.53	33253.69	31269.90	31277.83
观测值		6666	6666	6266	6266	6666	6266	6266

来源：作者的分析。

注：*** $p < 0.01$ 、** $p < 0.05$ 、* $p < 0.1$ ；括号中报告了国家层面聚类的稳健标准误差。在最保守的规范中，年份固定效应和国家固定效应被国家-年份固定效应吸收。



结论与政策含义

本文发现，中国资助的发电项目在缓解非洲地方层面的能源贫困方面具有显著成效。据我们所知，这是首次以实证方法系统评估中国在非洲电力基础设施项目中的作用。具体而言，中国资助或共同资助的运行容量每增加1000兆瓦，非洲次国家区域的平均电力获得概率将提升约 0.4 个百分点。即使在控制了其他来源资助的发电装机容量、城市化水平、地理特征、与大都市的距离，以及引入基于不同燃料类型容量因数计算的发电潜力作为替代自变量，并采用多种更为严格的模型规范后，这一积极且显著的影响依然稳健存在。

然而，我们也观察到，非洲大陆的电气化进展在很大程度上仍由化石能源驱动。2020年——即我们样本期的最后一年——由中国开发性金融机构资助或共同资助的运营发电容量中，有0.6吉瓦来自化石能源，占当年总运营装机容量的51%。其中，仅燃煤电厂就贡献了0.5吉瓦。水电为第二大来源，占比约45%。在观察期内，风能、太阳能等可再生能源在改善能源可及性方面的进展相对有限。若要替代现有以化石燃料为主的能源结构，并实现能源基础设施的大规模扩张，将需要大幅提升可再生能源发电装机容量。

我们认为，中国的开发性金融机构可以通过以下三种途径进一步促进非洲的能源转型。首先，凭借其在本国能源转型中积累的丰富经验，这些机构可协助东道国对老旧的化石能源项目进行融资重组，推动其向可再生能源形式过渡。其次，中国的开发性金融机构应积极参与政策对话，并探索对已资助或共同资助的燃煤电厂实施脱碳改造的路径。第三，正如《北京行动计划》（中华人民共和国外交部，2024）所强调的，这些机构还可加大对可再生能源项目的支持力度，提升其在非洲的可及性和覆盖率。此外，中国的开发性金融机构还可在制度设计方面发挥作用，培育有利于私营部门参与清洁能源制造业的市场环境，从而释放非洲可持续工业化的潜力。

本文对引言中提出的两个研究问题提供了初步回应，但也存在一些局限性。首先，受限于数据可得性，我们未能评估除中国开发性金融机构以外的其他融资主体所支持发电项目的影响。未来研究可以就不同发展合作伙伴（无论是双边还是多边）所资助项目的成效，提供具有比较性的见解。其次，我们未能细化可再生能源与化石能源项目在缓解地方能源贫困方面的相对成效。为深入理解中国海外基础设施投资的绿色转型路径，后续研究可聚焦于可再生能源项目的地方性影响评估，为中国与非洲伙伴间的发展合作提供更明确的政策指引，并为制度改革与跨国知识共享积累实证基础。



参考文献

- Amendolagine, Vito, Andrea F. Presbitero, and Roberta Rabellotti. 2024. "Chinese Infrastructure Lending in Africa and Participation in Global Value Chains." *Review of World Economics* 161: 7-48. <https://doi.org/10.1007/s10290-024-00566-0>.
- Ang'u, Cohen, Nzioka John Muthama, Mwanthi Alexander Mutuku, and Mutembei Henry M'Ikiugu. 2023. "Analysis of Energy Poverty in Kenya and Its Implications for Human Health." *Energy Policy* 176: 113506. doi: [10.1016/j.enpol.2023.113506](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113506).
- Birol, Fatih. 2007. "Energy Economics: A Place for Energy Poverty in the Agenda?" *The Energy Journal* 28 (3): 1-6. doi: [10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol28-No3-1](https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol28-No3-1).
- Bolson, Nathanael, Pedro Prieto, and Tadeusz Patzek. 2022. "Capacity Factors for Electrical Power Generation from Renewable and Nonrenewable Sources." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119 (52): e2205429119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2205429119>.
- Chapel, Capucine. 2022. "Impact of Official Development Assistance Projects for Renewable Energy on Electrification in Sub-Saharan Africa." *World Development* 152: 105784. doi: [10.1016/j.worlddev.2021.105784](https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105784).
- Chen, Xu, Kevin P. Gallagher, and Denise L. Mauzerall. 2020. "Chinese Overseas Development Financing of Electric Power Generation: A Comparative Analysis." *One Earth* 3 (4): 491-503. doi: [10.1016/j.oneear.2020.09.015](https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.015).
- Collier, Paul, and David Dollar. 2002. "Aid Allocation and Poverty Reduction." *European Economic Review* 46 (8): 1475-1500. doi: [10.1016/S0014-2921\(01\)00187-8](https://doi.org/10.1016/S0014-2921(01)00187-8).
- Esri. 2024. "Terrain Ruggedness Index." Last updated January 18, 2024. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=b58bce26b79a4b9f90f4e4f079788f29>.
- Fisher, Samantha, David C. Bellinger, Maureen L. Cropper, Pushpam Kumar, Agnes Binagwaho, Juliette B. Koudénoukpo, Yongjoon Park, Gabriella Taghian, and Philip J. Landrigan. 2021. "Air Pollution and Development in Africa: Impacts on Health, the Economy, and Human Capital." *The Lancet Planetary Health* 5 (10): e681-8. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00201-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00201-1).
- Foster, Vivien, and Cecilia M. Briceno-Garmendia. 2010. "Africa's Infrastructure: A Time for Transformation. Africa Development Forum." World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/246961468003355256/Africas-infrastructure-a-time-for-transformation>.
- GADM (Global Administrative Areas). 2024. "Download GADM Data (Version 4.1)." Accessed August 2024. https://gadm.org/download_country.html.
- Global Development Policy Center. 2022. "China's Global Power Database." Accessed August 2024. <https://www.bu.edu/cgp/>.
- Global Development Policy Center. 2023. "China's Overseas Development Finance Database." Accessed August 2024. <https://www.bu.edu/gdp/chinas-overseas-development-finance/>.
- Global Development Policy Center. 2024. "Chinese Loans to Africa Database." Accessed August 2024. <https://www.bu.edu/gdp/chinese-loans-to-africa-database/>.
- Gyimah-Brempong, Kwabena, and Elizabeth Asiedu. 2008. "Aid and Human Capital Formation: Some Evidence." Paper presented at the African Development Bank/United Nations Economic Commission for Africa Conference on Globalization, Institutions and Economic Development in Africa, Tunis, Tunisia.



Hafner, Manfred, Simone Tagliapietra, and Lucia De Strasser. 2018. *Energy in Africa: Challenges and Opportunities*. Springer International Publishing.

Herrero, Sergio Tirado. 2017. "Energy Poverty Indicators: A Critical Review of Methods." *Indoor and Built Environment* 26 (7): 1018–31. doi: [10.1177/1420326X17718054](https://doi.org/10.1177/1420326X17718054).

Kim, Jung E. 2018. "Technological Capacity Building Through Energy Aid: Empirical Evidence from Renewable Energy Sector." *Energy Policy* 122: 449–58. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.003>.

Kotsadam, Andreas, Gudrun Østby, Siri Aas Rustad, Andreas Forø Tollefsen, and Henrik Urdal. 2018. "Development Aid and Infant Mortality. Micro-Level Evidence from Nigeria." *World Development* 105: 59–69. doi: [10.1016/j.worlddev.2017.12.022](https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.12.022).

International Renewable Energy Agency. 2021. *The Renewable Energy Transition in Africa*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2021/March/The-Renewable-Energy-Transition-in-Africa>.

Li, Xiaoyuan, Denise L. Mauzerall, and Mike H. Bergin. 2020. "Global Reduction of Solar Power Generation Efficiency Due to Aerosols and Panel Soiling." *Nature Sustainability* 3 (9): 720–27. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0553-2>.

Lin, Justin Yifu, and Yan Wang. 2017. *Going Beyond Aid: Development Cooperation for Structural Transformation*. Cambridge University Press.

Manyich, Niccolò, Rishikesh Ram Bhandary, Kevin P. Gallagher, Tsitsi Musasike, Gireesh Shrimali, and Fabby Tumiwa . 2023. "Early Phase-Down of Coal Plants: The Role of Development Finance Institutions." Boston University Global Development Policy Center. <https://www.bu.edu/gdp/2024/03/21/early-phase-down-of-coal-plants-the-role-of-development-finance-institutions/>.

Maruta, Admasu Asfaw, and Rajabrata Banerjee. 2021. "Does Energy Aid Improve Energy Efficiency in Developing Countries?" *Empirical Economics* 61 (1): 355–88. doi: [10.1007/s00181-020-01854-y](https://doi.org/10.1007/s00181-020-01854-y).

Min, Brian, Zachary P. O'Keeffe, Babatunde Abidoye, Kwawu Mensan Gaba, Trevor Monroe, Benjamin P. Stewart, Kimberly Baugh, and Bruno Sánchez-Andrade Nuño. 2024. "Lost in the Dark: A Survey of Energy Poverty from Space." *Joule* 8 (7): 1982–98. doi: [10.1016/j.joule.2024.05.001](https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.05.001).

Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China. 2024. "Forum on China-Africa Cooperation Beijing Action Plan (2025–2027)." Last updated September 5, 2024. https://www.mfa.gov.cn/eng/xw/zyxw/202409/t20240905_11485719.html.

Moreira, Sandrina Berthault. 2005. "Evaluating the Impact of Foreign Aid on Economic Growth: A Cross-Country Study." *Journal of Economic Development* 30 (2): 25–48.

Moses, Oyintarelado. 2023. "Who Finances Energy Projects in Africa?" Carnegie Endowment for International Peace. <https://carnegieendowment.org/research/2023/11/who-finances-energy-projects-in-africa?lang=en>.

Mosley, Paul, John Hudson, and Arjan Verschoor. 2004. "Aid, Poverty Reduction and the 'New Conditionality.'" *The Economic Journal* 114 (496): F217–43. doi: [10.1111/j.1468-0297.2004.00220.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0297.2004.00220.x).

Munyanyi, Musharavati Ephraim, and Sefa Awaworyi Churchill. 2022. "Foreign Aid and Energy Poverty: Sub-National Evidence from Senegal." *Energy Economics* 108: 105899. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105899>.

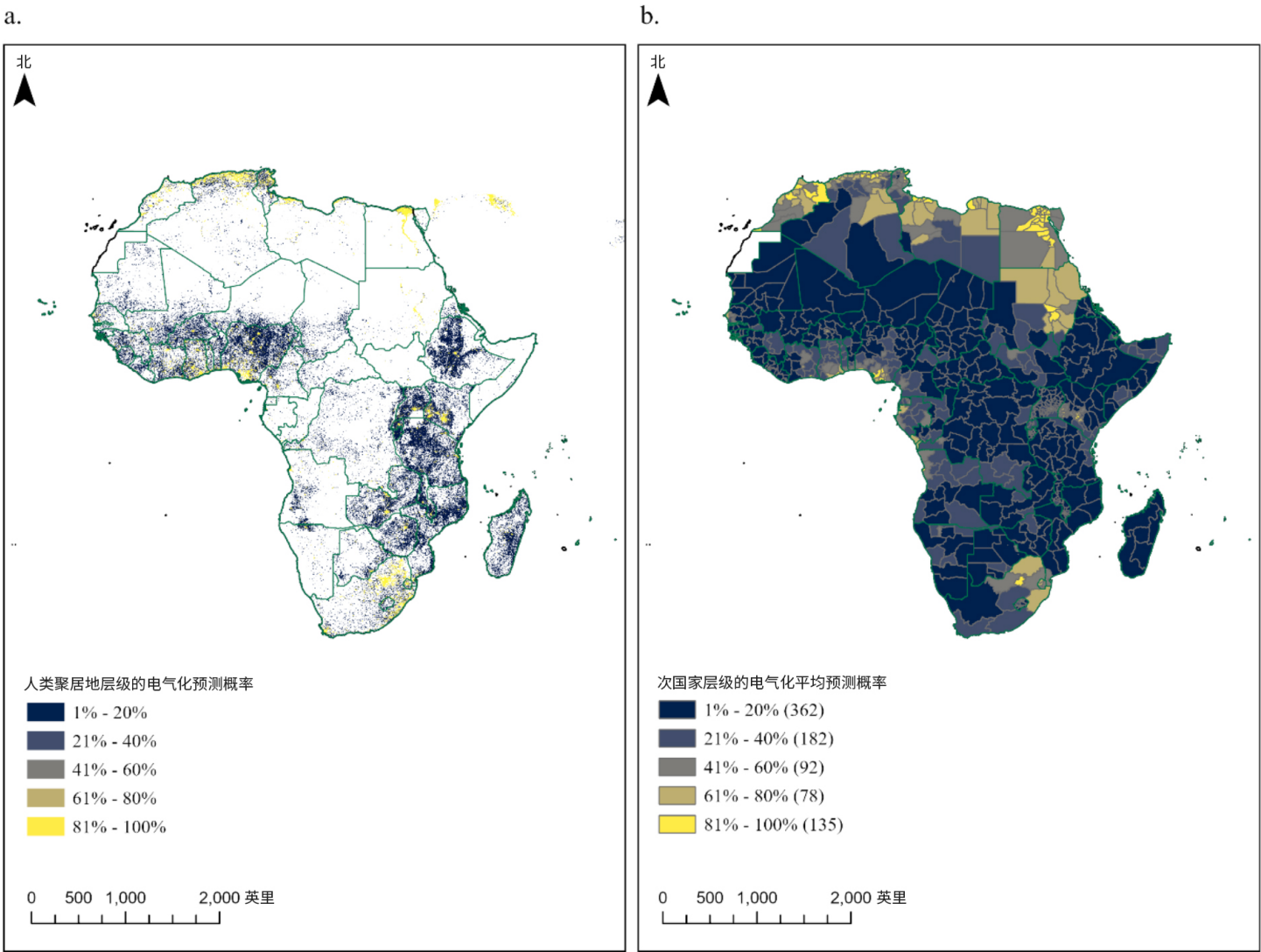
Naidja, Lamri, Hocine Ali-Khodja, and Salah Khardi. 2018. "Sources and Levels of Particulate Matter in North African and Sub-Saharan Cities: A Literature Review." *Environmental Science and Pollution Research* 25 (13): 12303–28. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1715-x>.



- Njiru, Christine W., and Sammy C. Letema. 2018. "Energy Poverty and Its Implication on Standard of Living in Kirinyaga, Kenya." *Journal of Energy* 2018 (1): 3196567. doi: [10.1155/2018/3196567](https://doi.org/10.1155/2018/3196567).
- Nunn, Nathan, and Diego Puga. 2012. "Ruggedness: The Blessing of Bad Geography in Africa." *Review of Economics and Statistics* 94 (1): 20–36. doi: [10.1162/REST_a_00161](https://doi.org/10.1162/REST_a_00161).
- Nussbaumer, Patrick, Francesco Fuso Nerini, Ijeoma Onyeji, and Mark Howells. 2013. "Global Insights Based on the Multidimensional Energy Poverty Index (MEPI)." *Sustainability* 5 (5): 2060–76. <https://doi.org/10.3390/su5052060>.
- OECD/SWAC (Organisation for Economic Co-operation and Development/Sahel and West Africa Club). 2024. "Africapolis Database." Accessed August 2024. www.africapolis.org.
- Ogwumike, Fidelis O., and Uche M. Ozughalu. 2016. "Analysis of Energy Poverty and Its Implications for Sustainable Development in Nigeria." *Environment and Development Economics* 21(3): 273–90. doi: [10.1017/S1355770X15000236](https://doi.org/10.1017/S1355770X15000236).
- Ongo Nkoa, Bruno Emmanuel, Sosson Tadadjeu, and Henri Njangang. 2023. "Rich in the Dark: Natural Resources and Energy Poverty in Sub-Saharan Africa." *Resources Policy* 80: 103264. doi: [10.1016/j.resourpol.2022.103264](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103264).
- Pachauri, Shonali, and Daniel Spreng. 2011. "Measuring and Monitoring Energy Poverty." *Energy Policy, Clean Cooking Fuels and Technologies in Developing Economies*, 39 (12): 7497–7504. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.008>.
- Peters, Rebecca, Jürgen Berlekamp, Charles Kabiri, Beth A. Kaplin, Klement Tockner, and Christiane Zarfl. 2024. "Sustainable Pathways Towards Universal Renewable Electricity Access in Africa." *Nature Reviews Earth & Environment* 5 (2): 137–51. doi: [10.1038/s43017-023-00501-1](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00501-1).
- Rodrik, Dani, 2002. "After Neoliberalism, What?" In remarks at the Brazilian Development Bank's seminar on New Paths of Development, Rio de Janeiro, Brazil.
- S&P Global Market Intelligence. n.d. "S&P Capital IQ Pro, Global Power Plant Database." Accessed August 2024. Retrieved from: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/solutions/products/sp-capital-iq-pro>.
- Swedlund, Haley J. "The Future of the Development Dance and Why We Should Care." In *The Development Dance: How Donors and Recipients Negotiate the Delivery of Foreign Aid*, edited by Haley J. Swedlund. Cornell University Press, 2017. <https://doi.org/10.7591/cornell/9781501712876.003.0007>.
- UNDP GeoHub (United Nations Development Programme). n.d. "Datasets." Accessed August 2024. <https://geohub.data.undp.org/>.
- UNDP, ed. 2000. *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. UNDP.
- Wang, Yan, and Yinyin Xu. 2023. "China and Africa: A New Narrative on Debt Sustainability and Infrastructure Financing." *Journal of Infrastructure, Policy and Development* 7 (1): 2181. doi: [10.24294/jipd.v7i1.2181](https://doi.org/10.24294/jipd.v7i1.2181).
- WHO (World Health Organization). 2024. "Household Air Pollution." October 16. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- World Bank. 2023. "Africa—Electricity Transmission and Distribution Grid Map." Last updated January 19, 2023. <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0040465/Africa---Electricity-Transmission-and-Distribution-Grid-Map>.



图A1：2020 年非洲国家以下层面的能源贫困状况（等间隔）

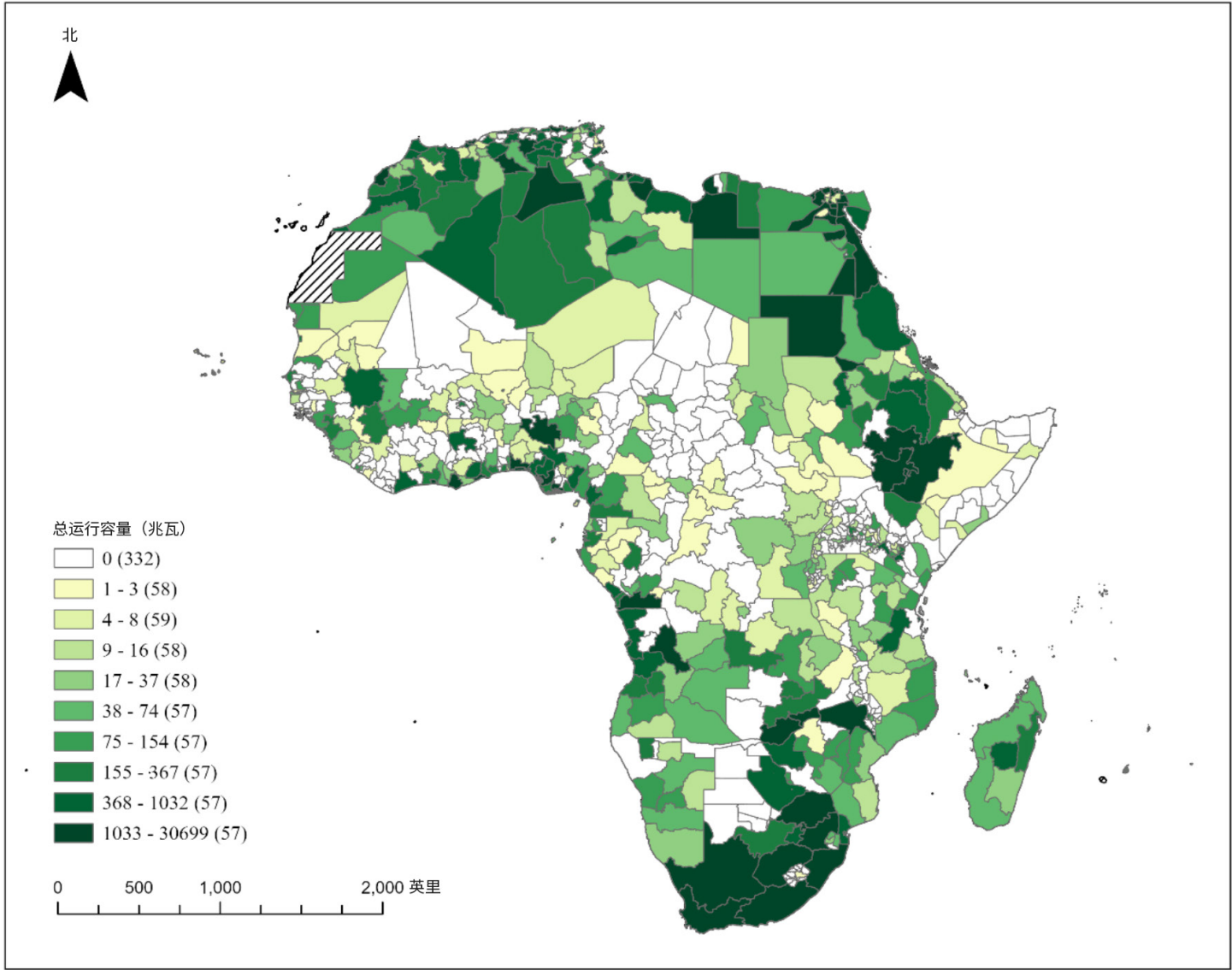


来源：作者基于 GADM 版本 4.1；能源贫困基于 Min 等人（2024 年）计算。

注：投影为 1984 年世界大地测量系统。图 A1a 报告了以 1 公里空间分辨率预测的定居点通电可能性。图 A1b 报告了使用 ArcGIS Pro 中的分区统计数据在国家以下层面的平均可能性。括号中报告了每组区域的数量。



图A2 : 2020年非洲总装机运行容量（十分位）



来源：作者阐述，GADM 版本 4.1，S&P GPP。
注：投影为 1984 年世界大地测量系统。每组的区域数量在括号中报告。



附录表 1：中国资助/共同资助的发电厂（已纳入实证研究的发电厂）

发电厂	国家	燃料类型	运行容量（兆瓦）
Jerada Steam Plant	摩洛哥	煤炭	350
Kusile Steam Plant	南非	煤炭	1600
Medupi Steam Plant	南非	煤炭	3200
Olorunsogo -I Gas Plant	尼日利亚	天然气	195
Omotosho-I Gas Plant	尼日利亚	天然气	335
Mahmoud Sharif Steam Plant	苏丹	石油	200
Kiwanda Cha Umeme Wa Jua Cha Garissa	肯尼亚	太阳能	55
Adama Wind Power Plant	埃塞俄比亚	风能	204
Olkaria IV Geothermal Power Plant	肯尼亚	地热能	140
Bui Dam Hydro Plant	加纳	水力发电	400
Central Hidroeléctrica do Chiumbe Dala (Tchihumbwe)	安哥拉	水力发电	12
Centrale Hydroélectrique De Djibloho	赤道几内亚	水力发电	120
Centrale Hydroélectrique De Grand Poubara	加蓬	水力发电	160
Centrale hydroélectrique de Kaleta	几内亚	水力发电	240
Centrale hydroélectrique de Liouesso	刚果共和国	水力发电	20
Centrale Hydroélectrique De Soubre	科特迪瓦	水力发电	270
Centrale Hydroélectrique De Zongo-II	刚果民主共和国	水力发电	150
Finchaa-Amerti-Neshe (Fan) Hydro Plant	埃塞俄比亚	水力发电	97
Genale-Dawa-III Hydro Plant	埃塞俄比亚	水力发电	254
Hydro-Mekin Plant	喀麦隆	水力发电	15
Ingula Pumped Storage Plant	南非	水力发电	1332
Isimba Hydropower Station	乌干达	水力发电	183
Kariba North Hydro Plant	赞比亚	水力发电	360
Kariba South Hydro Plant	津巴布韦	水力发电	300
Lunzua Upgrade Hydro Plant	赞比亚	水力发电	15
Merowe Hydro Plant	苏丹	水力发电	1250

数据来源：CODF 版本 2.0



附录表 2：非洲大都市

ID	大都市	ISO/国家代码	经度	纬度
1	拉各斯	NGA	3.241489	6.66942
2	阿布贾	NGA	7.44602	9.062758
3	卡萨布兰卡	MAR	-7.64282	33.52901
4	拉巴特	MAR	-6.86088	33.99356
5	突尼斯	TUN	10.57864	36.64077
6	的黎波里	LYB	13.21437	32.70152
7	阿尔及尔	DZA	3.135672	36.67089
8	开罗	EGY	31.34043	30.13713
9	马拉博	GNQ	8.765116	3.730737
10	巴塔	GNQ	9.789901	1.850128
11	朱巴	SSD	31.58514	4.832184
12	班吉	CAF	18.54842	4.415092
13	喀土穆	SDN	32.54451	15.52198
14	布拉柴维尔	COG	15.24534	-4.22003
15	黑角	COG	11.8939	-4.81882
16	恩贾梅纳	TCD	15.06721	12.12678
17	雅温得	CMR	11.54897	3.918972
18	杜阿拉	CMR	9.750962	4.059658
19	利伯维尔	GAB	9.46574	0.425634
20	金沙萨	COD	15.29604	-4.41043
21	卢本巴希	COD	27.49005	-11.6557
22	维多利亚	SYC	55.46959	-4.66543
23	圣多美	STP	6.7293	0.333172
24	塔那那利佛	MDG	47.52224	-18.9295
25	普拉亚	CPV	-23.5159	14.93621
26	明德卢	CPV	-24.9846	16.87803
27	路易港	MUS	57.52652	-20.2188
28	莫罗尼	COM	43.26408	-11.6939
29	罗安达	AGO	13.38492	-8.92392
30	哈拉雷	ZWE	31.03435	-17.8797
31	布拉瓦约	ZWE	28.57463	-20.1711
32	布兰太尔	MWI	35.0088	-15.7865
33	利隆圭	MWI	33.76555	-13.9796
34	马普托	MOZ	32.48442	-25.8317
35	哈博罗内	BWA	25.89606	-24.624
36	温得和克	NAM	17.08083	-22.5582
37	约翰内斯堡	ZAF	28.08316	-26.0579
38	开普敦	ZAF	18.52671	-33.9762
39	德班	ZAF	30.99647	-29.8475



ID	大都市	ISO/国家代码	经度	纬度
40	曼齐尼	SWZ	31.29742	-26.455
41	姆巴巴内	SWZ	31.21379	-26.3553
42	马塞卢	LSO	27.51552	-29.3498
43	卢萨卡	ZMB	28.25497	-15.3992
44	基加利	RWA	30.03766	-1.78901
45	阿斯马拉	ERI	38.93297	15.33318
46	摩加迪沙	SOM	45.31306	2.058726
47	哈尔格萨	SOM	44.05498	9.558777
48	布琼布拉	BDI	29.35155	-3.52766
49	坎帕拉	UGA	32.56672	0.334337
50	吉布提	DJI	43.09775	11.5677
51	亚的斯亚贝巴	ETH	38.77079	8.884383
52	达累斯萨拉姆	TZA	39.17777	-6.80792
53	内罗毕	KEN	36.79371	-1.19838
54	蒙巴萨	KEN	39.70804	-3.98719
55	班珠尔	GMB	-16.7341	13.34446
56	阿克拉	GHA	-0.07846	5.746204
57	库马西	GHA	-1.62433	6.670937
58	比绍	GNB	-15.587	11.89549
59	尼亚美	NER	2.127841	13.51079
60	弗里敦	SLE	-13.0199	8.347426
61	洛美	TGO	1.1653	6.235264
62	巴马科	MLI	-7.88817	12.63137
63	阿比让	CIV	-3.9597	5.368937
64	瓦加杜古	BFA	-1.49514	12.36407
65	博博迪乌拉索	BFA	-4.28641	11.19659
66	科托努	BEN	2.338214	6.537449
67	波多诺伏	BEN	2.651729	6.57239
68	达喀尔	SEN	-17.3644	14.76983
69	努瓦克肖特	MRT	-15.9226	18.08027
70	蒙罗维亚	LBR	-10.6937	6.351428
71	科纳克里	GIN	-13.5239	9.702599

数据来源：OECD/SWAC，2024 年。





GLOBAL CHINA INITIATIVE

The Global China Initiative (GCI) is a research initiative at Boston University Global Development Policy Center. The GDP Center is a University wide center in partnership with the Frederick S. Pardee School for Global Studies. The Center's mission is to advance policy-oriented research for financial stability, human wellbeing, and environmental sustainability.

www.bu.edu/gdp

The views expressed in this Working Paper are strictly those of the author(s) and do not represent the position of Boston University, or the Global Development Policy Center.

