

2010—2020 年东非与南部非洲 11 国化石能源碳排放格局演变研究

关大博 李 婕 格桑央吉

摘 要 南非是世界第十四大温室气体排放国，除南非外的撒哈拉以南非洲地区的二氧化碳排放增长率位列世界第一。东非、南部非洲等欠发达地区的新兴经济体正面临二氧化碳排放快速增长的压力，各国已陆续提交国家自主贡献（NDCs）承诺减排。但受限于数据缺失、统计准确性等问题，目前该地区仍然缺乏全面、细致且统一的二氧化碳排放清单以支持其减排政策及脱碳路径的制定。本研究基于多源数据构建了东非、南部非洲 11 个国家 2010 年至 2020 年的二氧化碳排放清单，动态分析了各个国家不同区域、不同行业、不同能源类型的二氧化碳排放格局变化及原因。本研究弥补了东非和南部非洲 11 个国家长期二氧化碳排放数据的缺失，系统细分了行业和区域碳排放，实现了更高精度的碳排放核算，深入揭示了该地区二氧化碳排放的空间格局及演变特征。研究结果将为新兴经济体，特别是东非、南部非洲等欠发达国家探索能源结构转型和低碳减排路径提供数据支持和理论参考。

关键词 东非 南部非洲 化石能源二氧化碳排放 区域排放特征
[中图分类号] X24 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2025) 04-0109-15

一、引言

气候变化被认为是 21 世纪全球所面临的最大挑战之一，人类活动导致的温室气体排放是全球变暖的主要原因。为了缓解气候变化带来的影响，世界各国就全球温升控制在 1.5℃ 之内这一目标达成共识并相继承诺减少排放以促进可持续发展（Peng et al.，2023）。然而，如何在实现经济可持续发展的同时减少排放成为世界各国尤其是新兴经济体和欠发达地区所面临的巨大挑战（Cui et al.，2022a）。此外，全球减排的努力也越来越依赖于那些欠发达国家的自主减排贡献（Meng et al.，2018）。尽管非洲的二氧化碳排放量仅占全球总排放的 2%~3%，却遭受气候变化的严重影响，其排放量一直在增加（Cui et al.，2022b）。有研究表明，在 2005—2015 年，撒哈拉以南非洲（不包括南非）的排放增长率位居全球首位，经济活动和人口的持续增长十分可能使撒哈拉以南非洲国家成为未来的主要排放国（Steckel et al.，2020）。而南非作为非洲大陆最大的能源消费国（Oladunni et al.，2022），其温室气体排放位列全球第十四（Adebayo et al.，2021）。因此，撒哈拉以南非洲各国亟须制定相应减排目标并得到更多国际上的关注与支持。

【基金项目】科技部政府间国际科技创新合作计划“中欧典型行业碳中和评估模型与技术路径研究”（批准号：2023YFE0113000）

【作者简介】关大博，清华大学地球系统科学系，邮政编码：100084；李婕，山东大学蓝绿发展研究院，邮政编码：264209；格桑央吉，清华大学地球系统科学系，邮政编码：100084。

东非是当今世界最具经济活力的地区之一 (Sarkodie and Adom, 2018), 其有望成为非洲大陆各区域中经济表现最好的区域 (预计 2024 年经济增长率达到 5.8%), 这主要得益于埃塞俄比亚、肯尼亚、卢旺达、乌干达、吉布提和坦桑尼亚等国的持续发展 (African Development Bank Group, 2023a)。而南部非洲地区的经济增长却出现放缓, 主要原因是其最大的经济体南非面临内乱、电力危机等多重挑战 (African Development Bank Group, 2023)。一方面, 非洲正处于工业化发展的初级阶段, 其经济增长与碳排放高度耦合。埃塞俄比亚、肯尼亚和坦桑尼亚等非洲大型经济体已将工业化纳入经济发展计划。马达加斯加宣布将在新冠疫情后的经济复苏中更注重工业化发展。乌干达也积极探索转型发展之路, 将工业化确定为实现可持续发展经济的重要途径。另一方面, 非洲拥有丰富的可再生能源 (如太阳能、水能), 但其能源利用率较低。2021 年, 非洲的一次能源消费量位列世界各大洲最后一名 (BP, 2022), 且仍有 43% 的人口 (约 6 亿人) 缺乏电力供应, 其中 5.9 亿人在撒哈拉以南非洲 (IEA, 2022)。未来非洲工业化和经济进一步发展将导致碳排放增加, 而发展清洁能源不仅可以解决非洲电力短缺问题, 还能在一定程度上缓解排放的增长。但由于预算限制和技术落后等原因, 这些欠发达国家的清洁能源投资和应用进程缓慢, 很难迅速提高能源利用效率以扭转排放迅速增长的态势。基于上述经济和环境事实, 东非、南部非洲各国积极迈向可持续发展之路并相继提出了减排目标。肯尼亚于 2020 年更新了其国家自主贡献目标 (NDCs), 承诺到 2030 年在“照常发展情景” (BAU) 基础上减少 32% 的温室气体排放。埃塞俄比亚亦承诺到 2030 年相对于 BAU 情景减少 68.8% 的温室气体排放。南非则于 2022 年更新了其第一份国家自主贡献目标, 明确提出将 2021—2025 年每年的温室气体排放控制在 350—420 百万吨二氧化碳当量之间, 2026—2030 年控制在 350—420 百万吨之间, 体现出相对明确的绝对排放控制目标。此外, 其余 8 个国家也陆续发布了国家自主贡献文件, 提出了各自的温室气体减排承诺。

未来, 东非、南部非洲等欠发达地区是世界减排的主战场之一, 需要准确地核算碳排放从而为减排政策的制定提供数据支撑。以往的数据与研究主要聚焦于发达国家 (Long et al., 2020) 和人口大国 (Wang et al., 2020; Shan et al., 2020), 仅有少量研究关注非洲等欠发达国家 (Li et al., 2023; Sun et al., 2022)。且非洲等欠发达国家的数据往往来自世界银行等国际机构, 统计准确性和全面性有限, 无法精确反映各国真实情况。然而, 对于欠发达地区的政策决策者来说, 获取各部门的排放数据尤为关键。此外, 因地制宜的减排政策制定也需要次国家尺度的排放数据提供支持 (Dong et al., 2023)。总体而言, 非洲地区亟须长时间序列、次国家尺度、多行业类别、分能源类型的碳排放清单以揭示区域二氧化碳排放格局变化, 从而因地制宜制定科学合理的减排政策。

本研究基于多源数据, 构建了东非与南部非洲 11 个国家 2010—2020 年的化石能源碳排放清单, 系统分析了各国在不同行业、不同区域及不同能源类型下的碳排放格局变化及其成因。该研究填补了当前关于东非与南部非洲 11 个国家长期碳排放的数据空白, 揭示了区域碳排放演变特征与结构差异。所选 11 国涵盖东非共同体主要成员及南部非洲关键经济体, 具备较强的区域代表性与经济结构多样性, 能够反映非洲不同发展阶段国家的碳排放特征。与此同时, 这些国家均为“一带一路”倡议下中国的重要合作伙伴, 研究其化石能源碳排放特征对于推动新兴经济体, 特别是东非与南部非洲等欠发达国家的能源结构转型与低碳发展路径探索, 具有重要的数据支撑和政策参考价值。

二、数据来源与方法

(一) 二氧化碳排放核算

根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 指南 (IPCC, 2006), 国家二氧化碳排放量可按照以

下方式计算：

$$CE = \sum_{ij} CE_{ij} = \sum_{ij} AD_{ij} \times EF_{ij} \tag{1}$$

其中， CE_{ij} 代表行业 J 的 i 种活动类型的二氧化碳排放量（例如，与能源有关的碳排放核算，与生产过程有关的碳排放核算等）， AD 是活动水平数据（能源消耗等）， EF 是二氧化碳排放因子，用来表示单位活动所产生的二氧化碳排放量。

鉴于各国统计口径存在差异，行业分类标准亦不统一，导致不同国家在部门层面的碳排放数据可比性较弱。为提高数据的一致性与可比性，本文结合各国能源平衡表及行业匹配指标，对国家层面的二氧化碳排放数据进行拆解，并映射至统一的行业分类体系。考虑到各国所提供的行业门类数量及统计精度不尽相同，本文引入已构建的 CEADs 数据库作为统一分类框架，该数据库涵盖 47 个标准化行业部门。在具体操作过程中，本文依据各国可获得的碳排放账户数据，并结合关键行业特征指标（包括能源消费、能源强度、增加值及产出等），将各国原始行业分类与 CEADs 所定义的 47 个行业进行匹配，从而实现对国家总碳排放的行业级拆解与分配，计算公式如下：

$$CE_{ij} = CE_{ij} \times \frac{SI_{ij}}{SI_{ij}} \tag{2}$$

其中， SI 表示行业统计指标，包括行业能源消耗、能源强度、增加值、产出等； J 为国家原始行业分类， j 为映射后 47 个部门的统一行业分类。对于缺乏区域性统计数据的国家，本文进一步引入关键结构指标，对国家排放进行降尺度处理以实现行业分解。相关二氧化碳排放核算步骤和方法详见关大博团队（2024）文献中的方法部分。

（二）数据源

本研究量化了东非与南部非洲等欠发达国家 2010 年至 2020 年能源消费模式的变化及其对全球二氧化碳排放的影响，包括布隆迪、马达加斯加、埃塞俄比亚、乌干达、卢旺达、坦桑尼亚、吉布提、肯尼亚、毛里求斯、南非、博茨瓦纳 11 个国家的二氧化碳排放和能源消费趋势。本文所使用的碳排放核算数据涵盖能源平衡表、排放因子、行业匹配指标及区域降尺度所需的关键统计指标等多个维度。具体数据主要来源非洲能源委员会（AFREC）提供的国家能源平衡表，政府间气候变化专门委员会（IPCC）和国际能源署（IEA）发布的排放因子，以及各国统计局、联合国商品贸易统计数据库（UN Comtrade）、联合国分行业增加值数据库、非洲发展银行（AFDB）和世界银行等国际组织提供的行业分类、能源使用、增加值和区域人口等关键参数。由于各国数据发布平台与统计口径存在差异，相关来源信息已在附录中详细列出

三、结果与分析

（一）综合排放趋势

从化石能源碳排放总量和演变趋势来看，东非 9 个国家的二氧化碳排放量以年均 6.4% 的速度增长，从 2010 年的 30.9 百万吨增加到 2020 年的 57.5 百万吨（如图 1 所示）。与此同时，该地区经济快速增长，GDP 年均增长率为 5.7%，在趋势上与排放高度一致，经济增长与二氧化碳排放挂钩。而南部非洲 2 个国家的二氧化碳排放量却从 2010 年的 394.5 百万吨波动降低到 2020 年的 367.4 百万吨，年均降低速率为 0.7%。就各国二氧化碳排放量而言，南非的二氧化碳排放量最大，而乌干达（243.8%）和埃塞俄比亚（144.8%）的增长率最快。2010 年至 2020 年，南非化石能源碳排放累计达到 4240.1 百万吨，乌干达化石能源碳排放从 2010 年的 1.6 百万吨增至 2020 年的 5.5 百万吨，埃塞俄比亚化石能源碳排放从 2010 年的 5.6 百万吨增至 2020 年的 13.7 百万吨。具体来看，东

非和南部非洲 11 个国家的二氧化碳排放波动并无显著异常。受新冠疫情影响，除了埃塞俄比亚和布隆迪外的其余 9 个国家，2020 年的二氧化碳排放量相较 2019 年均略微下降。其中马达加斯加受新冠疫情影响最大，二氧化碳排放下降了 31.5%（1.1 百万吨）。

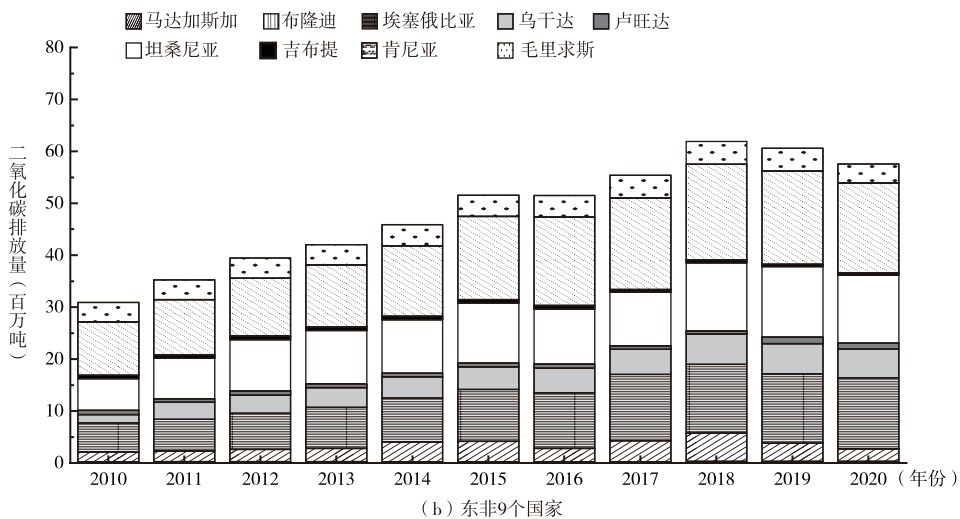
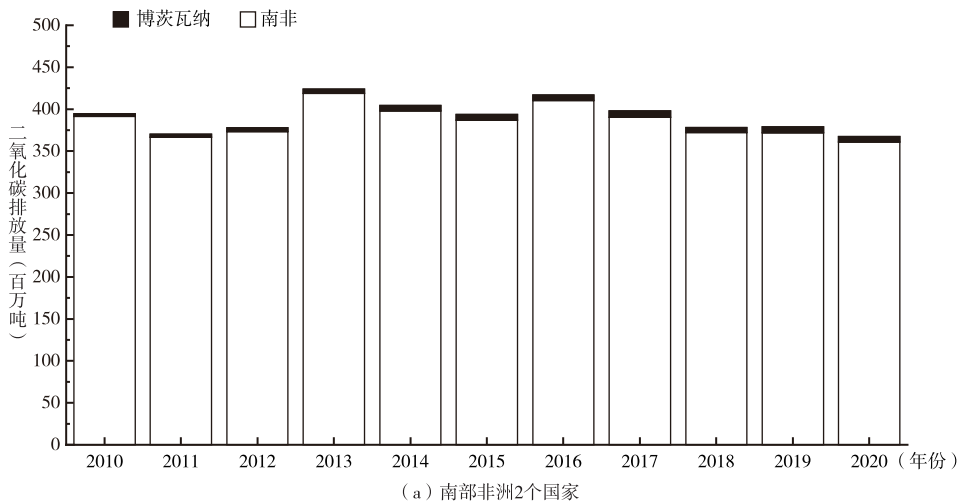


图 1 东非、南部非洲 11 个国家 2010—2020 年化石能源二氧化碳排放量

资料来源：笔者根据实际核算情况绘制。

(二) 主要二氧化碳排放地区的案例研究

1. 肯尼亚

肯尼亚是撒哈拉以南非洲第三大经济体，其二氧化碳排放量一直以相对稳定的速度增长，平均每年增长 5.4%。2010 年至 2020 年间，肯尼亚化石能源碳排放量从 10.3 百万吨增至 17.3 百万吨，但受新冠疫情影响，2020 年其化石能源碳排放量相比 2019 年下降了 3.7%。如图 2 (a) 所示，在化石能源碳排放中，石油产品和煤炭消费是肯尼亚化石能源碳排放的主要来源。石油产品作为肯尼亚最主要的化石能源（主要为柴油和汽油），2020 年因其消费产生的二氧化碳排放达到 15.2 百万吨，占化石能源碳排放的 87.8%。煤炭消费所产生的二氧化碳排放从 2010 年的 1.1 百万吨增长到 2020 年 2.1 百万吨，增长速度明显。从化石能源碳排放的行业角度来看，图 2 (b) 表明交通运输、仓储和邮政业是肯尼亚化石能源碳排放最大且增长速率最快的行业，其二氧化碳排放从 2010 年的

4.7 百万吨增长到 2020 年的 12.0 百万吨。主要原因是肯尼亚致力于通过铁路、公路和港口的建设与升级来推动经济发展，但这些基础设施项目在建设和初期运营阶段大量使用了化石燃料从而导致交通运输、仓储和邮政行业二氧化碳排放量快速增长。其中，交通运输、仓储和邮政业的二氧化碳排放量增长率在 2014 年达到最高（33.7%），原因是 2014 年肯尼亚开工建设蒙内铁路，项目施工期间大规模的材料运输及工程设备使用显著增加了石油等化石燃料的消耗，从而导致二氧化碳排放的激增。此外，肯尼亚电力、热力、燃气及水的生产行业二氧化碳排放量从 2010 年的 1.8 百万吨逐步减少到 2020 年的 0.1 百万吨。主要原因是肯尼亚位于东非大裂谷地区，拥有丰富的地热资源，作为非洲地热资源开发的先行者，肯尼亚充分利用这一自然优势大力发展地热发电使其电力行业不仅实现了能源结构的绿色转型，还扭转了以往高碳增长的趋势。

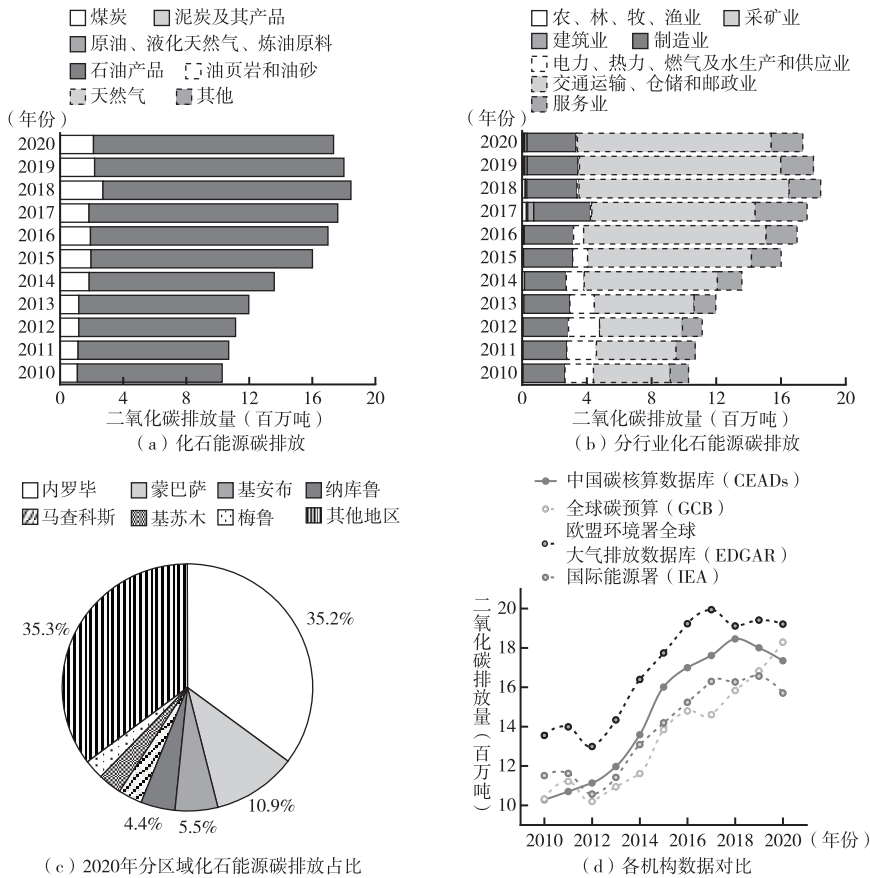


图 2 肯尼亚 2010—2020 年分能源类型二氧化碳排放量 (a) 化石能源碳排放；
(b) 分行业化石能源碳排放；(c) 2020 年分区域化石能源碳排放占比；(d) 各机构数据对比

资料来源：笔者根据全球碳预算网站、欧盟环境署全球大气排放数据库、国际能源署网站公布的国家级二氧化碳排放数据和本研究核算的二氧化碳清单整理绘制。

肯尼亚全国划分为 47 个地区，不同地区化石能源碳排放的高低主要取决于经济总量、人口数量和产业结构。化石能源碳排放主要区域与经济发展中心相重合，而肯尼亚的工业主要集中在内罗毕、蒙巴萨和基苏木三个地区。如图 2 (c) 所示，2020 年肯尼亚首都内罗毕的化石能源碳排放量达到 6.1 百万吨，占全国化石能源碳排放总量的 35.2%，是肯尼亚主要的化石能源碳排放区。其东南部的重要港口城市蒙巴萨是另外一个化石能源碳排放密集区，排放量为 1.9 百万吨，占全国化石能源碳排放总量的 10.9%。

如图 2 (d) 所示，本研究核算的化石能源碳排放量与 IEA 和 GCB 数据更接近，略高于 IEA 和

GCB 而略低于 EDGAR。其中，2015 年至 2020 年本研究结果与 IEA 数据的差距逐渐拉大，这种差异主要归因于数据源的差异。IEA 的数据来源肯尼亚中央统计局的《经济调查》以及国际可再生能源机构的《2020 年可再生能源统计》，而本研究的数据来源肯尼亚中央统计局的《经济调查》，故本研究数据的一致性较高。

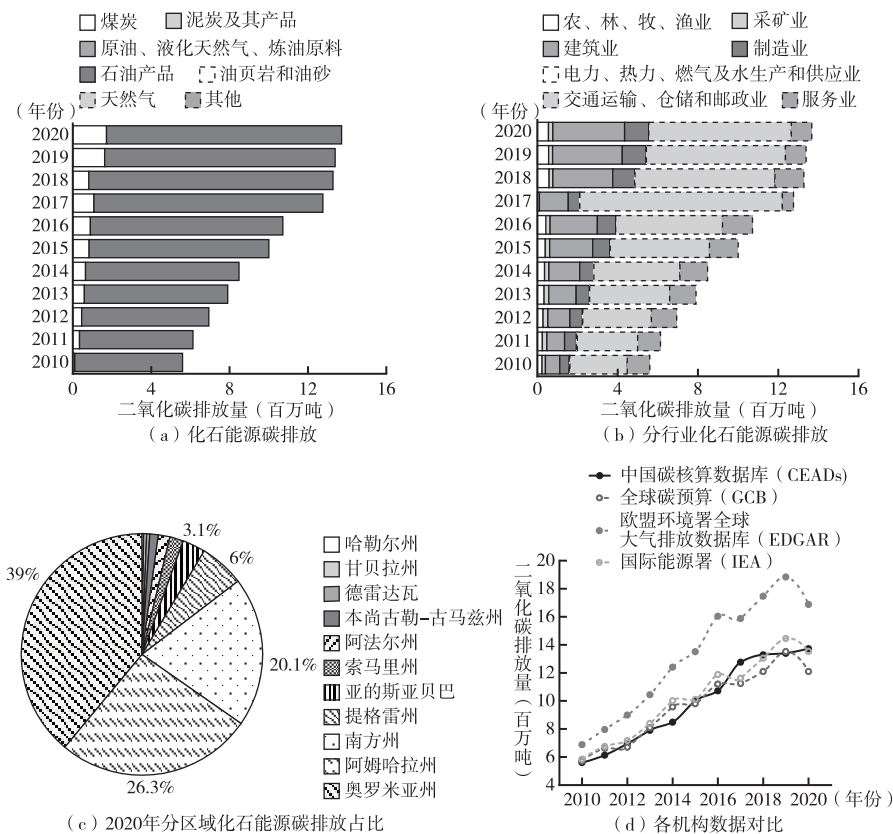


图 3 埃塞俄比亚 2010—2020 年分能源类型二氧化碳排放量 (a) 化石能源碳排放；(b) 分行业化石能源碳排放；(c) 2020 年分区域化石能源碳排放占比；(d) 各机构数据对比

资料来源：笔者根据全球碳预算网站、欧盟环境署全球大气排放数据库、国际能源署网站公布的国家级二氧化碳排放数据和本研究核算的二氧化碳清单整理绘制。

2. 埃塞俄比亚

埃塞俄比亚是非洲第二人口大国，也是世界上增长最快的经济体之一。2010 年，埃塞俄比亚实施的增长和转型计划（GTP）促使其工业部门迅速发展，成为国内生产总值增长的主要经济部门。埃塞俄比亚 2010 年至 2020 年的年均 GDP 增长率为 9.1%，在此期间其二氧化碳排放量以年均 9.4% 的速度增长。这一排放趋势反映了埃塞俄比亚经济发展和工业化进程的加快，同时也揭示了其未来二氧化碳排放可能大幅增长的 风险。这表明，在推动经济增长的同时，加强低碳转型和可持续发展战略至关重要。

埃塞俄比亚化石能源消费所产生的二氧化碳排放中，石油产品和煤炭消费产生的二氧化碳排放占据主导地位。如图 3（a）所示，石油产品作为埃塞俄比亚最主要的化石能源，其在 2020 年共产生 12.0 百万吨二氧化碳排放占化石能源碳排放的 87.5%，其中运输、仓储和邮政业是石油产品的主要消费和排放部门（7.1 百万吨）。煤炭消费所产生的二氧化碳排放从 2010 年的 0.1 百万吨增长到 2020 年 1.7 百万吨，主要集中在建筑业（1.2 百万吨）。从行业角度来看，图 3（b）表明了埃塞俄比亚化石能源碳排放主要由交通运输、仓储和邮政业与建筑业推动。2020 年，交通运输、仓储和

邮政业消费化石能源所产生的二氧化碳排放为 7.1 百万吨, 占化石能源碳排放的 52.1%。根据 WTO 和 UN Comtrade 的贸易数据显示, 该国运输设备进口额急剧增加, 包括从德国和美国进口的飞机和从比利时进口的铁路与有轨电车机车等。建筑业是埃塞俄比亚近年来的第二大化石能源碳排放行业, 2020 年其建筑业化石能源碳排放 (3.6 百万吨) 占总化石能源碳排放的 26.0%, 主要能源消费品种为石油和煤炭。其主要原因是 2010 年埃塞俄比亚实施了增长和转型计划 (GTP) 促使其工业部门快速扩张, 并且其扩张很大程度上是由建筑业的发展所推动的。此外, 2017 年埃塞俄比亚农、林、牧、渔业二氧化碳排放为 0, 这可能是因为官方数据公布错误导致的。根据 2017 年该国能源平衡表的数据显示, 农业部门未消耗任何化石能源。我们将根据官方数据的后续更新情况, 进一步核实和调整二氧化碳排放核算结果。

从区域角度来看, 图 3 (c) 表明埃塞俄比亚首都亚的斯亚贝巴以及附近的阿姆哈拉州、提格雷州和奥罗米亚州都是高排放区, 在该国中部形成一条南北向的“高排放轴”, 且高排放区域与国家经济中心相重合。根据埃塞俄比亚中央统计局 (CSA) 数据显示, 该国大约 39% 的制造业都位于亚的斯亚贝巴, 其次是奥罗米亚州 (超过 29%)。其中, 奥罗米亚州凭借其人口众多, 经济总量较大这一特点成为该国化石能源碳排放最高的地区。2020 年, 奥罗米亚州化石能源碳排放量达 5.3 百万吨, 占全国化石能源碳排放总量的 39.0%。此外, 阿姆哈拉州化石能源碳排放量为 3.6 百万吨, 仅次于奥罗米亚州。

如图 3 (d) 所示, 即在统一核算口径下各机构的核算结果与本研究核算的数据大致是相同的。而核算方法和基础数据的差异使得各个机构的结果存在一定差异。其中, 本研究核算的化石能源碳排放量与 IEA 的数据非常接近, 误差约为 5%。但本研究数据与 IEA 数据的差异主要发生在 2014 年, 其主要原因是石油产品统计的偏差。IEA 数据显示 2014 年埃塞俄比亚石油产品消费量激增, 而非洲能源委员会数据却显示其 2011—2015 年间的石油产品消费均匀增长。

3. 南非

南非是非洲经济规模最大、最发达的国家之一, 也是全球第十四大温室气体排放国之一。煤炭资源丰富、油气资源稀少的资源禀赋使南非长期以来保持着以煤炭为主的能源结构, 同时也产生了大量的二氧化碳排放。如图 4 (a) 所示, 在南非化石能源消费所产生的二氧化碳排放中, 煤炭和石油产品消费是其排放的主要来源。2020 年, 煤炭消费产生的二氧化碳排放为 268.1 百万吨, 占化石能源碳排放的 74.3%。石油产品消费所产生的二氧化碳排放为 84.0 百万吨, 占化石能源碳排放的 23.3%, 呈现波动下降趋势。从化石能源碳排放行业结构来看, 图 4 (b) 表明了南非化石能源碳排放主要来自电力、热力、燃气及水的生产行业以及交通运输业、仓储与邮政。2020 年, 电力、热力、燃气及水生产和供应业产生的二氧化碳排放量为 235.7 百万吨, 占化石能源碳排放总量的 65.3%。这主要是由于南非超过 80% 的电力供应长期依赖燃煤电站, 且燃煤在能源结构中始终占据主导地位。此外, 交通运输、仓储和邮政也是南非主要的化石能源碳排放行业, 该行业排放全部由石油产品消费所导致。2020 年, 交通运输、仓储和邮政行业产生的二氧化碳排放量为 53.8 百万吨, 占化石能源碳排放总量的 14.9%。其主要原因是汽油、柴油等化石燃料在南非交通运输行业中占据主导地位。具体来看, 该国 45% 的客运和 85% 的货运是通过燃油汽车完成的, 且根据南非统计局 (Stats SA) 数据显示, 2020 年其全国汽车保有量中电动汽车仅有约 1000 辆 (全国汽车保有量约为 983 万辆)。

如图 4 (c) 所示, 南非的化石能源碳排放主要集中于豪登省。豪登省是南非人口最多的省份, 虽占地面积小但城市化程度较高, 包括南非最大的城市约翰内斯堡等。该省份繁荣的经济活动导致了较高的化石能源碳排放。2020 年, 豪登省化石能源碳排放为 120.1 百万吨, 占该国化石能源碳排放的 33.3%。此外, 北开普省的化石能源碳排放量最低, 仅为 8.0 百万吨, 占该国化石能源碳排放的 2.2%, 其主要原因是该地区的气候不宜人类居住, 人口稀少, 产业基础薄弱。

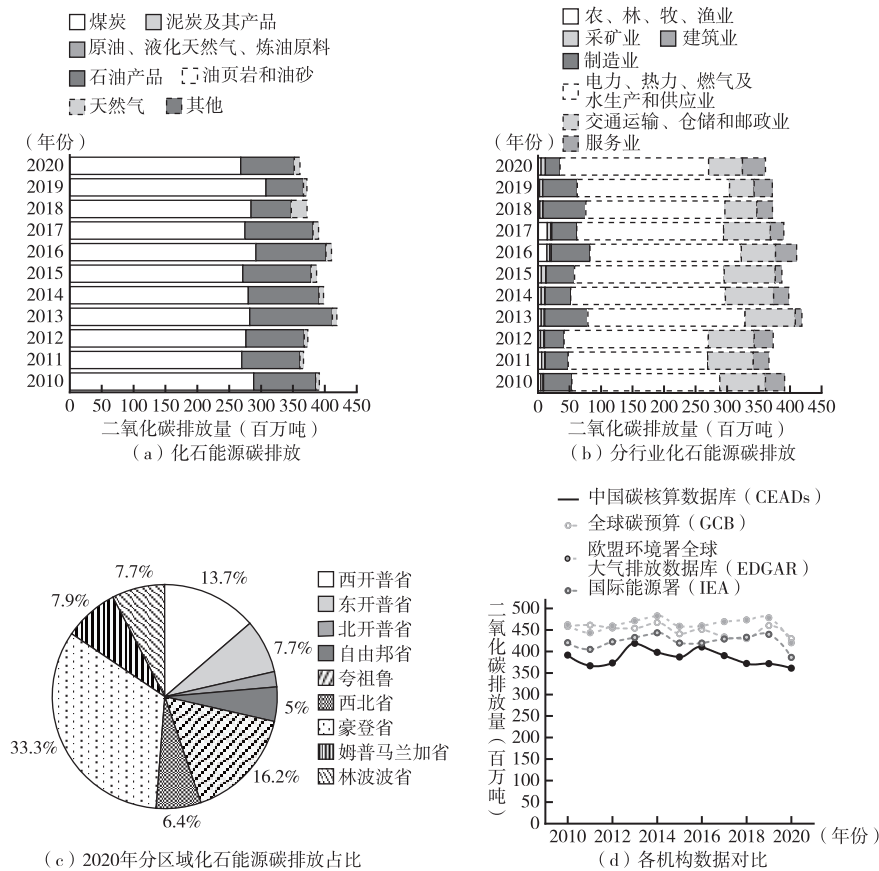


图 4 南非 2010—2020 年分能源类型二氧化碳排放量 (a) 化石能源碳排放；(b) 分行业化石能源碳排放；(c) 2020 年分区域化石能源碳排放占比；(d) 各机构数据对比

资料来源：笔者根据全球碳预算网站、欧盟环境署全球大气排放数据库、国际能源署网站公布的国家级二氧化碳排放数据和本研究核算的二氧化碳清单整理绘制。

图 4 (d) 表明了本研究核算的南非化石能源碳排放量与其他机构统计数据排放趋势几乎相同，但是具体数值与各大国际机构相比仍存在一定差异。例如，IEA 的统计数据高于本研究的核算数据。其主要原因可以从排放因子差异和能源消耗量差异这两个角度来解释。从统计口径的角度来看，本研究数据的优势在于其采用了更详细的能源分类和更准确的排放因子。例如，本研究数据中石油产品分为车用汽油、柴油、燃料油等，且每一类油品都有不同的排放因子，而 IEA 的统计口径中并未将其细分为多种石油产品。因此，排放因子的选择不同导致了排放数据的差异。从能源消耗数据的选取角度来看，本研究采用的能源消耗数据均来自南非中央统计局，从而有较高的准确性和一致性，而 IEA 的能源消耗数据来自多个数据源且各个来源的数据之间存在差距。

（三）其他新兴经济体的二氧化碳排放格局变化

为了剔除 2020 年受新冠疫情影响所导致的碳排放下降偏差，本研究基于 2010—2019 年间各国化石能源碳排放的增长速率，将除了肯尼亚、埃塞俄比亚和南非以外的其余 8 个国家划分为三类：布隆迪、毛里求斯和卢旺达被归为碳排放缓慢增长地区；乌干达、坦桑尼亚、博茨瓦纳和马达加斯加被归为碳排放快速增长地区；而吉布提则被归类为碳排放减少地区。

布隆迪是东非的一个内陆国家，经济以农业为主而工业化程度较低，因此其碳排放水平相对较低，增长速度也较为缓慢。如图 5 (a) 所示，2010—2020 年，布隆迪化石能源碳排放从 0.2 百万

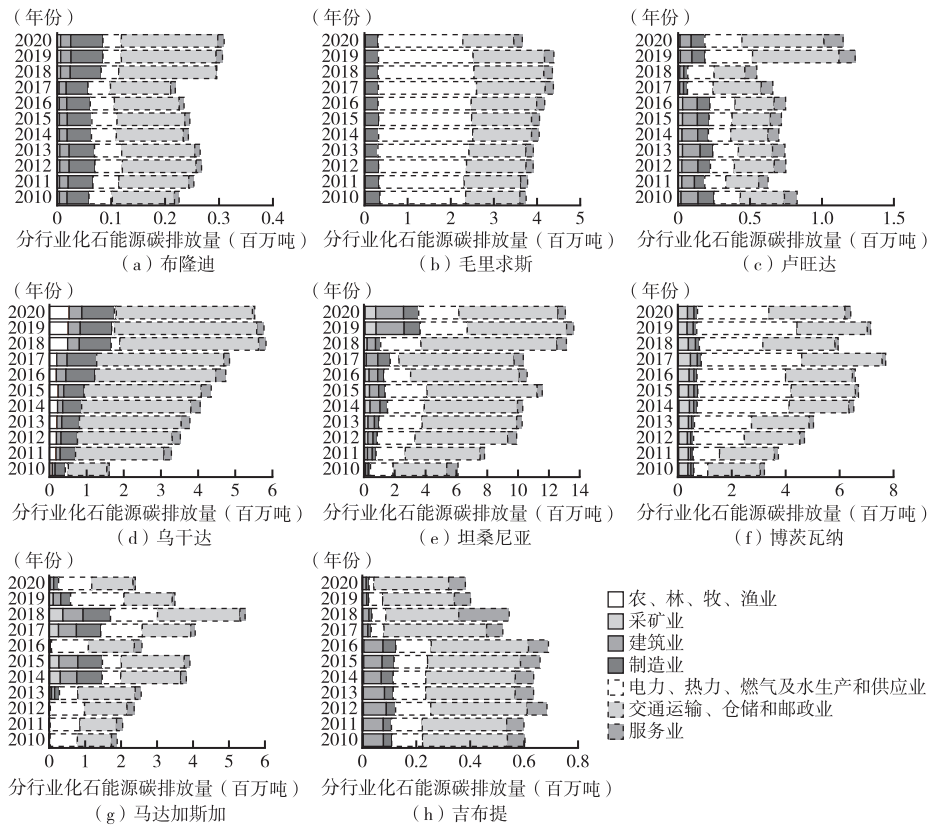


图5 分行业化石能源碳排放量 (a) 布隆迪; (b) 毛里求斯; (c) 卢旺达; (d) 乌干达; (e) 坦桑尼亚; (f) 博茨瓦纳; (g) 马达加斯加; (h) 吉布提

资料来源：笔者根据实际核算结果整理绘制。

吨缓慢增加到 0.3 百万吨。从行业角度来看，2020 年，交通运输业、仓储和邮政业与制造业是其化石能源碳排放的主要贡献者，分别产生了 0.2 百万吨（57.7%）和 0.1 百万吨（19.3%）二氧化碳。从时间上看，2015—2017 年布隆迪二氧化碳排放呈现下降趋势，这主要由于 2015 年布隆迪发生军事政变引发了一系列政治动荡和社会不稳定。这使得国内的商业活动、工业生产等经济活动受到冲击，导致能源消耗减少从而使碳排放下降。毛里求斯是非洲经济发展较好的国家之一，该国实行多元化产业政策，制造业、金融服务业、旅游业和信息通信业是其四大经济支柱。如图 5（b）所示，2010—2019 年，毛里求斯化石能源碳排放从 3.7 百万吨缓慢增加到 4.4 百万吨（增长率为 17.2%），受新冠疫情影响，2020 年化石能源碳排放下降到 3.7 百万吨。其二氧化碳排放缓慢增长的原因得益于其稳定增长且多元化的产业结构。毛里求斯的经济以服务业为主导，特别是旅游业和金融服务业等，而服务业相较于工业的能源消耗和碳排放相对较低。毛里求斯化石能源消费所产生的碳排放中，石油消费所产生的碳排放占据主导地位，且其主要贡献行业是交通运输、仓储和邮政业。从行业角度来看，电、热、燃气、水生产和供应业是毛里求斯化石能源碳排放的主导者，该部门化石能源碳排放占总化石能源碳排放的 50% 左右。其主要原因是毛里求斯电力市场中火力发电占据主导地位。卢旺达是东非地区最小的经济体之一，该国正经历高速的经济增长，吸引了大量的国外投资，被称为“非洲大陆的新加坡”。如图 5（c）所示，2010—2020 年，卢旺达化石能源碳排放从 0.8 百万吨缓慢增加到 1.1 百万吨（增长率为 38.6%）。卢旺达二氧化碳排放增长缓慢主要得益于其传统能源依赖度低，而主要依赖于可持续性生物质，且近年来逐步增加对可再生能源的使用（FAO, 2018）。2020 年，卢旺达可持续性生物质消费占一次能源消费比重达 81.5%，可再生能源消

费比重达到 2.1%。在化石能源消费所产生的碳排放中,石油产品消费是其化石能源碳排放的唯一来源。从行业角度来看,交通运输、仓储和邮政业是卢旺达化石能源碳排放的主导者,该行业化石能源碳排放占总化石能源碳排放 20%~30% 左右。其主要原因是内燃机摩托车是该国主要的交通工具之一,而对于一个低收入国家来说,这种交通模式不仅会加重生活成本,还会对环境造成严重污染。为此,该国已制定了相关激励政策以推广电动车使用,并部署电动车充电所需的硬件基础设施等。这些举措不仅有助于降低碳排放,还可能成为推动卢旺达经济可持续发展的新动力,实现经济与环境的协调共进。

乌干达是东非经济增长较快的国家之一,其化石能源碳排放增长速率是 11 个国家中最高的(259.3%)。如图 5(d) 所示,2010—2020 年,乌干达化石能源碳排放从 1.6 百万吨快速增加到 5.5 百万吨,是 11 个国家中化石能源碳排放增长速率最高的国家。在化石能源消费所产生的碳排放中,石油消费所产生的碳排放占据主导地位。从行业角度来看,交通运输、仓储和邮政业是其化石能源碳排放的主导者,该行业化石能源碳排放占总化石能源碳排放的 60%~70% 左右。而电、热、燃气、水生产和供应业的化石能源碳排放占总化石能源碳排放的比例却少于 10%,这主要因为乌干达拥有丰富的水资源,水电在其电力结构中占比较大。坦桑尼亚是世界最不发达国家之一,其经济以农业为主。2010—2020 年,坦桑尼亚化石能源碳排放从 6.1 百万吨迅速增加到 13.1 百万吨(增长率为 114.1%)。在化石能源消费所产生的二氧化碳排放中,石油产品和天然气消费产生的二氧化碳排放占据主导地位。如图 5(e) 所示,从行业角度来看,交通运输、仓储和邮政业是其化石能源碳排放的主导者,该行业化石能源碳排放占总化石能源碳排放的 60% 左右。博茨瓦纳是非洲经济发展较快,经济状况较好的国家之一。如图 5(f) 所示,2010—2020 年,博茨瓦纳化石能源碳排放从 3.2 百万吨快速增加到 6.4 百万吨(增长率为 99.5%)。在化石能源消费所产生的碳排放中,石油产品贡献最大。2020 年,石油产品消费产生的二氧化碳排放为 3.5 百万吨,占化石能源碳排放的 56.4%。从行业角度来看,交通运输、仓储和邮政业以及电、热、燃气、水生产和供应业是博茨瓦纳化石能源碳排放的主要贡献行业。2020 年,这两个行业分别产生了 2.8 百万吨和 2.6 百万吨二氧化碳,分别占化石能源碳排放总量的 44.0% 和 41.2%。如图 5(g) 所示,马达加斯加 2010—2019 年化石能源碳排放从 1.9 百万吨迅速增加到 3.5 百万吨(增长率为 84.8%),但受新冠疫情影响,2020 年化石能源碳排放又降低到 2.4 百万吨。在化石能源消费所产生的碳排放中,柴油等石油产品和煤炭的碳排放占据主导地位。2020 年,马达加斯加石油产品消费所产生的二氧化碳排放(2.0 百万吨)占总化石能源碳排放的 84.6%。从行业角度来看,电、热、燃气、水生产和供应业化石能源碳排放从 2010 年的 0.8 百万吨缓慢减少到 2015 年的 0.5 百万吨,而在 2016 年迅速增长到 1.0 百万吨,随后缓慢增加到 2019 年的 1.5 百万吨。电、热、燃气、水生产和供应业化石能源碳排放从 2016 年后出现大量增长的原因是:2016 年开始,马达加斯加电力结构中清洁能源发电的占比有所减少,水电占比从 2015 年的 45.1% 减少至 2020 年的 33.5%。

吉布提是世界最不发达国家之一,该国工农业基础薄弱,交通运输、商业和服务业(主要是港口服务业)在经济中占主导地位。如图 5(h) 所示,吉布提是 11 个国家中唯一实现化石能源碳排放减少的国家。2010—2016 年,吉布提化石能源碳排放从 0.6 百万吨缓慢增加到 0.7 百万吨,随后在 2017—2020 年,化石能源碳排放从 0.5 百万吨缓慢降低到 0.4 百万吨。这主要是因为 2017 年后吉布提在电、热、燃气、水生产和供应业的能源消耗迅速减少从而导致化石能源碳排放迅速减少。

四、总结与展望

受 2020 年新冠疫情冲击,全球大部分国家被迫放缓甚至停滞了生产活动,从而在一定程度上

上缓解了碳排放增长趋势，但东非、南部非洲 11 个国家中仍存在部分国家的碳排放量呈现不减反增的现象。这也表明，尽管撒哈拉以南非洲大部分国家的碳排放总量相对较低，其碳排放增长率却呈现快速上升趋势，未来该地区的碳排放可能大幅增加，对全球气候变化治理构成挑战。2020 年，除布隆迪、埃塞俄比亚以外的其余 9 个国家的化石能源碳排放因受新冠疫情影响均有所下降，其中马达加斯加反应最为明显，二氧化碳排放较前一年相比减少了 36.2%。而布隆迪和埃塞俄比亚的二氧化碳排放相较前一年却分别增长了 87%（0.3 百万吨）和 2.4%（0.3 百万吨）。从行业结构来看，2020 年埃塞俄比亚排放增长的主要贡献行业是交通运输、仓储和邮政业以及建筑业，分别增加了 0.2 百万吨二氧化碳和 0.1 百万吨二氧化碳。而对布隆迪来说，交通运输、仓储和邮政业与制造业是排放增加的主要贡献行业，分别增加了 0.2 百万吨二氧化碳和 0.1 百万吨二氧化碳。

考虑到当前非洲大部分国家的能源结构仍然以生物质能和化石能源为主，而非洲可再生能源丰富，未来非洲各国发挥自身清洁能源优势是应对电力短缺问题和气候变化挑战的有力路径。例如，埃塞俄比亚境内有东非大裂谷分支，拥有丰富的水电、风电、地热能等资源，但这些资源大部分都未被开发，仍超一半人口缺乏电力供给。考虑到水力资源具有季节上的间歇性，建议埃塞俄比亚发展多种新能源互补，即发展光伏、风电等为水电提供补充（截至 2021 年，埃塞俄比亚电力供给中水电占 90%，风电占 8%，火力发电占 2%）。此外，在利用和发展新能源的同时也要结合各地区的社会、经济、环境事实。埃塞俄比亚城市化率较低，解决经济落后地区缺水问题的关键就是降低用电成本，最可行的方案就是发展基于太阳能的微型电网和独立系统（IEA, 2022）。加大清洁能源的利用不仅可以缓解埃塞俄比亚缺水问题，还有利于发展电动汽车以降低交通部门二氧化碳排放。研究表明，埃塞俄比亚化石能源碳排放主要由交通运输、仓储和邮政业推动，为缓解该部门二氧化碳排放，埃塞俄比亚政府已出台一系列政策来支持电动汽车的发展。例如，埃塞俄比亚政府通过取消增值税、消费税和附加税来鼓励行业和进口商投资电动汽车，并将进口 800 辆电动公交车和 148000 辆电动汽车纳入其 2020—2030 年发展计划（Gicha et al., 2024）。此外，埃塞俄比亚宣布禁止燃油汽车的进口（全球首个禁售燃油汽车的国家），并大力发展电动汽车。然而，电力短缺、技术落后和资金不足等问题都会影响埃塞俄比亚电动汽车的转型，因此国际社会应该给予埃塞俄比亚更多资金、技术上的支持与帮助。目前，中国是全球第一大汽车出口国，其新能源产业从供应链到整车具备了闭环且成熟的生产体系，而埃塞俄比亚是“一带一路”沿线重要国家，在既往良好合作的基础上，中国或将在该国新能源推行计划上伸出援手。非洲的可再生能源发展存在地区异质性，埃塞俄比亚等尼罗河流域国家却主要依靠水力发电，而南非则在太阳能、风能的利用方面更具优势。南非是非洲最发达的国家同时也是全球主要温室气体排放国之一，其煤炭资源储量丰富且占据该国能源结构的主要地位。由于电力系统老化以及过度依赖化石能源，南非面临着严峻的电力危机及温室气体排放快速增长的问题。因此从长远来看，南非亟须对清洁能源发电进行大量投资。2022 年，南非内阁批准了一项引资计划，旨在帮助南非摆脱对煤炭的依赖并加速可再生能源发展。考虑到南非大部分地区年均日照时长位居全球前列且西部和东部沿海等地区风力资源丰富，建议南非在西部和东部沿海等地区搭载可再生能源混合系统，利用风光互补发电。然而，考虑到非洲的经济、技术发展水平较为落后，现有条件并不足以支持各国尽早实现能源转型以缓解碳排放。因此，非洲国家在能源转型的过程中应受到更多国际上的支持与帮助。国际社会应加强对非洲各国提供技术转让和合作的力度，帮助非洲国家发展清洁能源技术（如太阳能、风能）、建设清洁能源基础设施等。这不仅可以帮助非洲国家解决能源问题，还能创造就业机会从而促进当地经济发展。

新兴经济体尤其是欠发达地区正面临碳排放快速增长的趋势，并可能成为全球碳排放的重要来源。深入解析其二氧化碳排放格局的演变，对于制定更加精准的减排政策和有效应对气候变化至关重要。本研究对东非、南部非洲等欠发达地区开展了长时序、降尺度、分行业、分能源类型的碳排

放动态核算，揭示了各国二氧化碳排放格局的演变特征。未来，中国碳核算数据库将持续关注欠发达地区的碳排放情况，并逐步提高对欠发达地区碳排放核算的准确性和全面性，旨在为欠发达地区因地制宜制定减排政策提供数据基础，促进其可持续发展，并在国际事务中获得更高话语权以谋求更公平、合理的发展。

参考文献

清华大学关大博讲席教授团队 (2024):《全球 60 个新兴经济体 2010—2020 年二氧化碳排放数据集》,《生态文明研究》第 2 期,第 118—128 页。

Adebayo, T. S. and J. A. Odugbesan (2021), “Modeling CO₂ emissions in South Africa: empirical evidence from ARDL based bounds and wavelet coherence techniques”, *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (8), 9377–9389.

African Development Bank Group (2023), “Southern Africa Economic Outlook 2023”, Retrieved from <https://www.afdb.org/en/documents/southern-africa-economic-outlook-2023>.

African Development Bank Group (2023), “East Africa Economic Outlook 2023”, Retrieved from <https://www.afdb.org/en/documents/east-africa-economic-outlook-2023>.

Bailis, R., R. Drigo and A. Ghilardi, et al. (2015), “The carbon footprint of traditional woodfuels”, *Nature Climate Change*, 5 (3), 266–272.

BP (2022), “bp Statistical Review of World Energy”, Retrieved from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>

Cui, C., D. Guan and D. Wang, et al. (2022), “Global mitigation efforts cannot neglect emerging emitters”, *National Science Review*, 9 (12), nwac223.

Cui, C., S. Li and W. Zhao, et al. (2022), “Energy-related CO₂ emission accounts and datasets for 40 emerging economies in 2010–2019”, *Earth System Science Data Discussions*, 2022, 1–20.

Dong, J., B. Cai and S. Zhang, et al. (2023), “Closing the gap between carbon neutrality targets and action: Technology solutions for China’s key energy-intensive sectors”, *Environmental Science & Technology*, 57 (11), 4396–4405.

FAO (2018), “Rwanda Energy Sector Strategic Plan”, Retrieved from <https://www.fao.org/wood-energy/search/detail/en/c/1382215>.

Gicha, B. B., L. T. Tufa and J. Lee (2024), “The electric vehicle revolution in Sub-Saharan Africa: Trends, challenges, and opportunities”, *Energy Strategy Reviews*, 53, 101384.

IEA (2022), “Africa Energy Outlook 2022”, Retrieved from <https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2022>.

IPCC (2006), “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, S., L. Buendia and K. Miwa, et al. (eds), Japan: IGES.

Li, S., C. Cui and J. Meng, et al. (2023), “The heterogeneous driving forces behind carbon emissions change in 30 selective emerging economies”, *Patterns*, 4 (7).

Long, Y., Y. Yoshida and H. Zhang, et al. (2020), “Japan prefectural emission accounts and socioeconomic data 2007 to 2015”, *Scientific Data*, 7 (1), 233.

Meng, J., Z. Mi and D. Guan, et al. (2018), “The rise of South-South trade and its effect on global CO₂ emissions”, *Nature Communications*, 9 (1), 1871.

Oladunni, O. J., K. Mpofu and O. A. Olanrewaju (2022), “Greenhouse gas emissions and its driving forces in the transport sector of South Africa”, *Energy Reports*, 8, 2052–2061.

Peng, K., K. Feng and B. Chen, et al. (2023), “The global power sector’s low-carbon transition may enhance sustainable development goal achievement”, *Nature Communications*, 14 (1), 3144.

Sarkodie, S. A. and P. K. Adom (2018), “Determinants of energy consumption in Kenya: a NIPALS approach”, *Energy*, 159, 696–705.

Shan, Y., Q. Huang and D. Guan, et al. (2020), “China CO₂ emission accounts 2016–2017”, *Scientific Data*, 7

(1), 54.

Steckel J. C. , J. Hilaire and M. Jakob, et al. (2020), “Coal and carbonization in sub-Saharan Africa”, *Nature Climate Change*, 10 (1), 83 –88.

Sun, Y. , Q. Hao and C. Cui, et al. (2022), “Emission accounting and drivers in East African countries”, *Applied Energy*, 312, 118805.

Wang, Z. , J. Meng and D. Guan (2020), “Dynamic driving forces of India’s emissions from production and consumption perspectives”, *Earth’s Future*, 8 (8), e2020EF001485.

Withey, P. , C. Johnston and J. Guo (2019), “Quantifying the global warming potential of carbon dioxide emissions from bioenergy with carbon capture and storage”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109408.

附录

附表 1 各国排放数据核算来源

国家	数据类型	数据来源	网址
布隆迪	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au - afrec. org/en/energy - balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www. ipcc - nggip. iges. or. jp/EFDB/
	行业匹配指标	联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtradeplus. un. org/
		布隆迪统计局	http://www. isteebu. bi/nada/index. php/catalog
马达加斯加		非洲发展银行 (AFDB)	https://dataportal. opendataforafrica. org/nbyenxf/afdb - socio - economic - database - 1960 - 2023
	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au - afrec. org/en/energy - balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www. ipcc - nggip. iges. or. jp/EFDB/
	行业匹配指标	马达加斯加统计局	https://www. instat. mg/statistiques/bases - de - donnees/comptes - nationaux https://www. instat. mg/thematique/population
		联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtrada. un. org
埃塞俄比亚	国家到区域的降尺度指标	马达加斯加统计局	http://www. instat. mg
	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au - afrec. org/en/energy - balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www. ipcc - nggip. iges. or. jp/EFDB/
	行业匹配指标	联合国 (UN) 分行业增加值	http://data. un. org/Explorer. aspx#marts
		联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtradeplus. un. org/
乌干达	国家到区域的降尺度指标	埃塞俄比亚就业部	http://www. csa. gov. et/
	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au - afrec. org/en/energy - balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www. ipcc - nggip. iges. or. jp/EFDB/
	行业匹配指标	乌干达统计局 (UBOS)	https://www. ubos. org/explore - statistics/9/ https://www. ubos. org/explore - statistics/20/
		联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtrada. un. org
卢旺达	国家到区域的降尺度指标	乌干达统计局 (UBOS) 地区人口预测	https://www. ubos. org/explore - statistics/20/
	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au - afrec. org/en/energy - balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www. ipcc - nggip. iges. or. jp/EFDB/
卢旺达	行业匹配指标	卢旺达统计局	https://www. statistics. gov. rw/statistical - publications/subject/statistical - yearbook

续附表

国家	数据类型	数据来源	网址
坦桑尼亚	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au-afrec.org/en/energy-balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/
	行业匹配指标	联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtradeplus.un.org/
		坦桑尼亚国民账户	National Bureau of Statistics – NA Publications (nbs.go.tz)
	国家到区域的降尺度指标	国家统计局	National Bureau of Statistics – Regional GDP Reports (nbs.go.tz)
吉布提	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au-afrec.org/en/energy-balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/
	行业匹配指标	联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtrade.un.org/
		吉布提国民账户	http://www.insd.dj/accueil.php
肯尼亚	能源平衡表	肯尼亚国家统计局	https://www.knbs.or.ke/
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/
	行业匹配指标	肯尼亚统计局	https://www.knbs.or.ke/
		联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtrade.un.org/
	国家到区域的降尺度指标	肯尼亚统计局	https://www.knbs.or.ke/
毛里求斯	能源平衡表	毛里求斯统计局	https://statsmauritius.govmu.org/Pages/Statistics/By_Subject/Energy_Water/Arch_Energy-Water.aspx
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/
	行业匹配指标	毛里求斯统计局	https://statsmauritius.govmu.org/Pages/Statistics/By_Subject/Manufacturing/SB_Manufacturing.aspx
	国家到区域的降尺度指标	毛里求斯统计局	https://statsmauritius.govmu.org/Documents/Statistics/Digests/Demography
南非	能源平衡表	南非统计局	http://www.energy.gov.za/files/media/Energy-Balances.html
	排放因子	国际能源署 (IEA)	https://www.iea.org/areas-of-work/global-engagement/china?language=zh
	行业匹配指标	联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)	https://comtrade.un.org/
		南非统计局	https://www.statssa.gov.za/?page_id=1854&PPN=P0441
	国家到区域的降尺度指标	世界银行	https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/
博茨瓦纳	能源平衡表	非洲能源委员会 (AFREC)	https://au-afrec.org/en/energy-balances
	排放因子	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/
	行业匹配指标	博茨瓦纳统计局	https://www.statsbots.org.bw/
	国家到区域的降尺度指标	博茨瓦纳统计局	https://www.statsbots.org.bw/

资料来源：笔者根据实际所用数据进行整理汇总。

Research on the Evolution of Fossil Fuel CO₂ Emission Patterns in 11 Countries in East and Southern Africa from 2010 to 2020

GUAN Dabo¹, LI Jie², GESANGYANGJI Gesang¹

(1. Department of Earth System Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Blue and Green Development, Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: South Africa is the world's 14th-largest emitter of greenhouse gases, and sub-Saharan Africa, excluding South Africa, has the world's fastest-growing rate of CO₂ emissions. Emerging economies in underdeveloped regions, such as East Africa and Southern Africa, are under increasing pressure due to the rapid rise in carbon dioxide emissions. In response, many countries have submitted their Nationally Determined Contributions (NDCs), committing to emission reduction efforts. However, the region still lacks a comprehensive, detailed, and unified carbon emissions inventory to support the development of policies to reduce carbon emissions and decarbonize pathways due to a lack of data and statistical accuracy. This study constructed CO₂ emission inventories for 11 countries in east and southern Africa from 2010 to 2020 based on multi-source data. It dynamically analyzes the changes and causes of the carbon dioxide emission patterns in different regions, industries, and energy types of each country. This study fills the gap in long-term CO₂ emissions data for representative countries in East and Southern Africa. By systematically disaggregating emissions by sector and region, it achieves higher-precision emissions accounting and provides an in-depth analysis of the spatial patterns and temporal evolution of carbon dioxide emissions in the region. The research results will provide data support and theoretical reference for emerging economies, especially the less-developed countries in East Africa and Southern Africa, to explore the transformation of energy structure and low-carbon emission reduction paths.

Key Words: east Africa; southern Africa; fossil fuel CO₂ emissions; Regional emission characteristics

责任编辑：刘心如