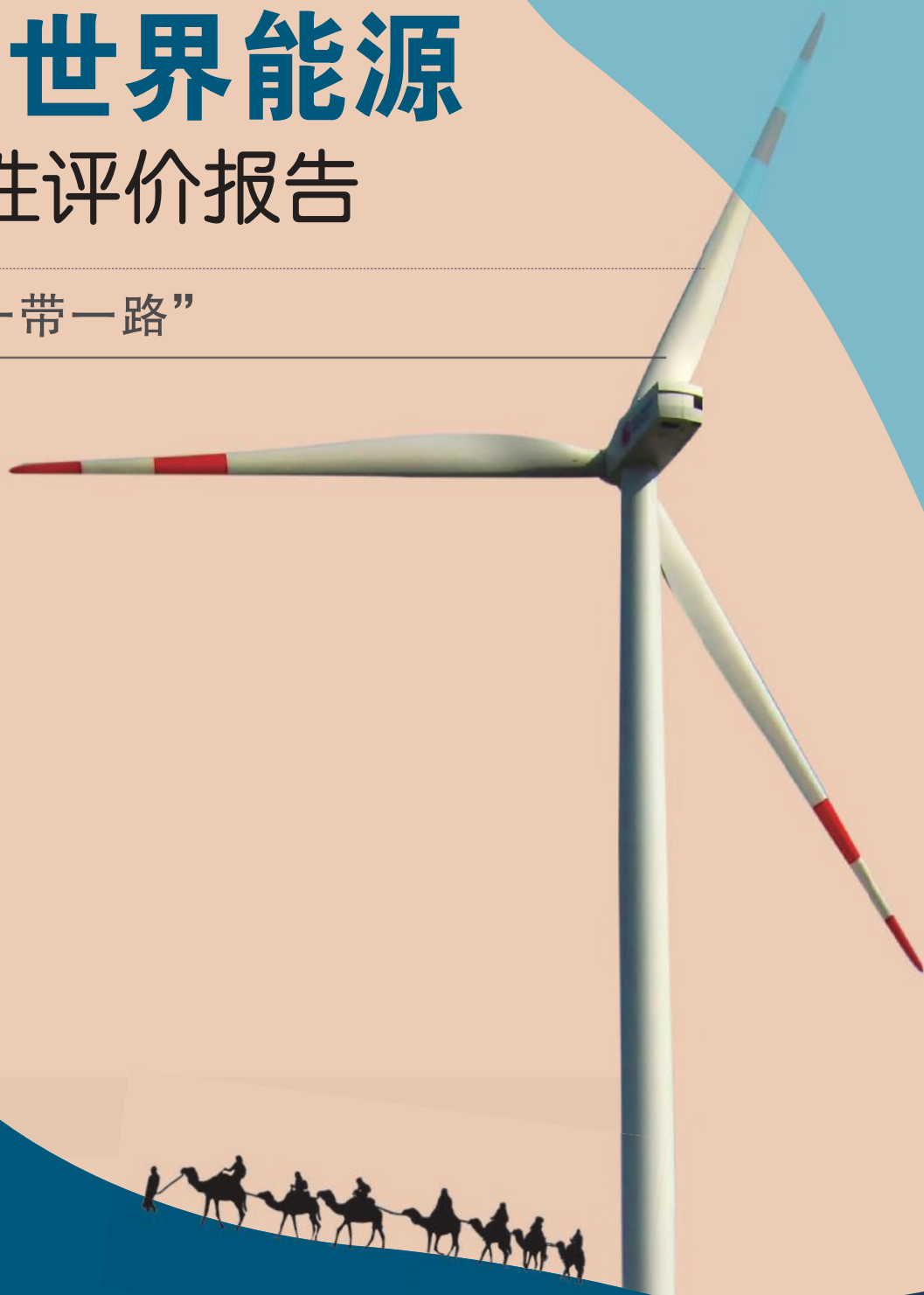


2023 世界能源 可持续性评价报告

—— 聚焦“一带一路”

作者：鲁玺 赵琦 张贤



清华大学 碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University



清华大学 环境学院
School of Environment, Tsinghua University



中国21世纪议程管理中心
The Administrative Center for China's Agenda 21

二零二三年十月

更多免费行业报告

并购家

www.ipoipo.cn

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

2023 世界能源可持续性评价报告聚焦“一带一路”

作者

鲁 玺 清华大学环境学院 清华大学碳中和研究院

赵 琦 清华大学环境学院

张 贤 中国 21 世纪议程管理中心

顾问委员会 (按姓氏笔画排序)

马蔚华 联合国可持续发展影响力目标指导委员会

张建宇 “一带一路”绿色发展国际研究院

杨 斌 清华大学经济管理学院

贺克斌 清华大学环境学院 清华大学碳中和研究院

涂瑞和 联合国环境规划署

徐华清 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心

黄 晶 中国 21 世纪议程管理中心

专家委员会 (按姓氏笔画排序)

王 灿 清华大学环境学院

王 克 中国人民大学环境学院

刘 毅 清华大学环境学院

吴 刚 国家自然科学基金委员会

李金惠 清华大学环境学院

杨 秀 清华大学气候变化与可持续发展研究院

钱小军 清华大学经济管理学院

柴麒麟 国家气候战略中心战略规划部

引用方式

文中部分图片来自 <https://pixabay.com>

<http://www.unsplash.com>



清华大学 碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University



清华大学 环境学院
School of Environment, Tsinghua University



中国21世纪议程管理中心
The Implementation Center for China's Agenda 21

2023 世界能源可持续性评价报告

聚焦 “一带一路”



  清华大学 碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University

  清华大学 环境学院
School of Environment, Tsinghua University

 中国21世纪议程管理中心
The Administrative Center for China's Agenda 21

更多免费行业报告

并购家

www.ipoiipo.cn

目录 contents

执行摘要	5
------------	---

第 1 章 引言	11
----------------	----

第 2 章 构建能源可持续性评价体系	14
--------------------------	----

2.1 定义能源可持续性概念	15
2.2 选取和筛选指标	16
2.3 指标数据的收集与处理	17
2.4 确定指标权重	18

第 3 章 世界能源可持续性评价结果	19
--------------------------	----

3.1 世界能源可持续性现状（2020）	20
3.2 2011–2020 世界能源可持续性变化	25
3.3 未来世界能源可持续性变化趋势	29

第 4 章 各地区能源可持续性评价结果	30
---------------------------	----

4.1 撒哈拉以南非洲	31
4.2 南亚	37
4.3 中东与北非	44
4.4 东亚与太平洋	50
4.5 欧洲与中亚	57

4.6 拉丁美洲	63
4.7 北美	69

第 5 章 “一带一路” 沿线国家能源可持续性评价..... 74

5.1 “一带一路” 能源可持续性现状	75
5.2 2011-2020 “一带一路” 能源可持续性发展趋势	79
5.3 “一带一路” 能源发展重点国家与地区分析	82

第 6 章 结果与讨论 86

6.1 主要结果	87
6.2 讨论	90
6.3 研究展望	93

附录 95

A 地区与国家列表	95
B 方法学详解	96
C 不确定性分析结果	99
D 能源可持续性评价指标与 SDG7 原指标对比	100
E 能源可持续性 2030 目标值的设定	101

参考文献 102



世界能源可持续性评价报告

聚焦“一带一路”

- | | |
|---|--------|
| ● 东亚与太平洋（EAP, East Asia and Pacific） | ● 可及性 |
| ● 欧洲与中亚（EUCA, Europe and Central Asia） | ● 清洁度 |
| ● 拉丁美洲（LAC, Latin America and Caribbean） | ● 能源效率 |
| ● 中东与北非（MENA, Middle East and North Africa） | ● 可支付性 |
| ● 北美（NA, North America） | ● 可靠性 |
| ● 南亚（SA, South Asia） | |
| ● 撒哈拉以南非洲（Sub-Saharan Africa） | |



能源系统的可持续发展，即“确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源”是联合国《2030 年可持续发展议程》提出的可持续发展目标之一，同时更是气候变化、消除贫困、经济增长等一系列国际发展议题的重要支柱。对能源可持续性的评价与表征是制定相关政策的重要依据，而当前的研究在科学性、时空范围和结果探究等方面尚存在着一定不足，无法全面有效地支撑全球能源可持续发展的实现。

针对上述研究存在的不足，清华大学环境学院鲁玺课题组在清华大学碳中和研究院和 Inditex 可持续发展基金的支持下，于 2020 年起开始了全球能源可持续性评价项目的研究工作，并汇总相关成果编撰《2023 世界能源可持续性评价报

告——聚焦“一带一路”》。本研究旨在建立一个兼具数据全面性和方法科学性的能源可持续性评价体系，并据此揭示全球各个国家与地区，特别是“一带一路”沿线国家（以下简称“一带一路”国家）能源系统可持续性的时空分布特征，进而基于分析结果为处在不同地理区域、不同发展阶段的国家提供能源战略方面的政策建议，助力可持续发展目标的实现和“绿色一带一路”发展愿景的达成。该报告将于 2030 年前按年度持续更新，以追踪全球 SDG7 实现进度。

报告以全球 140 个国家 2011–2020 年间的各项能源可持续性指标数据所构成的数据库为基础，利用综合评价方法学理论，围绕着“能源可持续性”的概念构建了包括可及性、清洁度、效率、

能源可持续性维度	指标
 可及性	农村电力普及率（%）
	城镇电力普及率（%）
	清洁炊事燃料普及率（%）
	电气化率（%）
 清洁度	可再生能源占比（%）
	空气污染物排放强度（g/MJ）
	CO ₂ 排放强度（g/MJ）
 能源效率	单位 GDP 能源强度（MJ/\$）
	能源分配效率（%）
 可支付性	电力消费占收入的比例（%）
 可靠性	月均停电次数（#）
	能源自给率（%）

支付性和可靠性 5 个维度、12 个指标的能源可持续性评价体系（如下表），并根据评价结果，分析了全球和各个地区能源可持续性各维度的时空特征，针对以新兴经济体为主的“一带一路”地区开展了专题探究，以此为基础提出了能源可持续发展方面的政策建议。

世界能源可持续性评价结果

世界各个地区的能源可持续性得分呈现出了明显的地区差异，各地区的得分与其经济发展水平显著相关（ $R^2=0.60^{***}$ ），地区得分从低到高的排序分别为撒哈拉以南非洲（51.9 分）、南亚（61.6 分）、中东与北非（66.3 分）、东亚与太平洋（67.0 分）、欧洲与中亚（71.1 分）、拉丁美洲（73.7 分）、北美（74.6 分）。得分最高的 5 个国家分别为冰岛（96.8 分）、挪威（91.2 分）、瑞典（86.4 分）、芬兰（81.9 分）、乌拉圭（81.8

分），得分最低的 5 个国家分别为贝宁（42.6 分）、布基纳法索（41.8 分）、尼日尔（41.7 分）、刚果（金）（40.7 分）、乍得（40.1 分）。

各地区能源可持续性的分维度特征既有共性又有个性。共性体现在能源清洁度对世界各个地区而言都是掣肘 SDG7 实现的重要因素，而低清洁度的主要原因是可再生能源比例较低（全球比例为 11.5%）。个性则包括以下方面：对撒哈拉以南地区来说，能源需求的满足，包括可及性和可支付性是能源可持续性的最大短板；南亚、中东与北非和东亚三个中等水平地区的共性问题表现为能源清洁度过低，但具体原因各不相同，南亚、中东与北非以及东亚地区最大的问题分别出现在污染物排放强度、可再生能源比例以及碳排放强度三个指标上，对南亚地区，能源可靠性同样构成了限制 SDG7 实现的重要因素；欧洲和美洲地区的能源可持续性表现较好，目前实现 SDG7 的瓶颈在于能源清洁性的提升速度能否进一步加快，且欧洲在能源



可靠性（能源安全）方面也存在着一定问题。

2011–2020 年间，全球和各地区的能源可持续性均呈现上升趋势，全球平均分由 2011 年的 60.9 分上升到了 2020 年的 65.0 分，但各地区上升幅度各不相同，南亚和东亚分别贡献了全球能源可持续性增长中的 48.5% 和 32.4%，是拉动全球能源可持续性增长的主要动力，而其他地区的增长较为缓慢，大部分国家的增长幅度低于世界平均值。从维度上来说，全球能源可持续性上升的主要动力来自于南亚、东亚和撒哈拉以南非洲国家的可及性增长（贡献了全球能源可持续性增长中的 73.6%），东亚、欧洲和北美等地区的清洁性提升也有一定贡献（25.5%）；但与此同时，部分地区分维度的能源可持续性出现了下降，特别是除北美外的各地区的能源可靠性（能源安全）都有所下滑。

为将全球能源可持续发展的进展与 SDG7 设定的 2030 目标直接对比，研究根据一系列设定计算出了达到 2030 目标对应的能源可持续性分数（77.4 分）。结合 2030 目标来看，2011–2020 世界能源可持续性上升的幅度和速度并不理想，年均增长率仅有 0.7%。如果保持 2011–2020 阶段的增速，2030 年世界能源可持续性得分仅能达到 SDG7 目标值的 90.3%，而实现 SDG7 目标需要 2021–2030 阶段的能源可持续性以原增速 2.4 倍的速度上升。

“一带一路”能源可持续性评价

以发展中国家为主、占全球人口 44%

各地区能源可持续性评价结果

撒哈拉以南非洲：

撒哈拉以南非洲的能源可持续性得分（51.9）是各个地区中最低的，能源可及性（特别是农村电力普及率和清洁炊事燃料普及率）和可支付性两个维度显著落后于世界平均水平；

撒哈拉以南非洲国家在 2011–2020 年间能源可持续性上升了 3.6%，主要来自能源可及性的提升，而能源清洁度和可靠性则出现了下滑；

南亚：

南亚地区 2020 的能源可持续性得分为 61.6，仅高于撒哈拉以南非洲地区；除了较低的能源清洁度外，南亚在能源可靠性（特别是平均停电次数）和能源效率两个维度上与世界平均水平尚有一定差距；

南亚地区在 2011–2020 年间能源可持续性上升幅度最大，达到了 15.6%，主要来自能源可及性的提升，能源清洁度、能源效率和可支付性也有一定增长，但可靠性出现了下降；

中东与北非：

中东与北非地区 2020 的能源可持续性得分为 66.3，在各地区中排名第 5；地区的能源清洁度明显落后于其他地区，可再生能源比例仅有 1.0%，严重依赖化石能源；

中东与北非地区在 2011–2020 年间能源可持续性上升幅度仅有 1.4%，是各地区中增长最慢的；能源可持续性上升主要来自能源可及性的提升，而能源效率、可支付性和可靠性都出现了下降；

东亚与太平洋：

东亚与太平洋地区 2020 的能源可持续性得分为 67.0，在各地区中排名第 4；地区的能源清洁度较低，特别是空气污染物和 CO₂ 的排放强度表现较差；

东亚与太平洋地区在 2011–2020 年间能源可持续性上升幅度为 6.9%，主要来自能源可及性（特别是清洁炊事燃料普及）和能源清洁度（可再生能源比例）的提升，而能源可靠性由于化石能源进口比例的上升而出现了一定下降；

欧洲与中亚：

欧洲与中亚地区 2020 的能源可持续性得分为 71.1，在各地区中排名第 3；能源清洁转型是欧洲地区能源发展的主题，但除此之外，能源可靠性较低反映出的能源安全问题也值得重视；

欧洲与中亚地区在 2011–2020 年间能源可持续性上升幅度仅为 1.89%，主要来自可再生能源比例提高带来的能源清洁度的提升；但能源可及性和可靠性则出现了一定下降；

拉丁美洲：

拉丁美洲地区 2020 的能源可持续性得分为 73.7，在各地区中排名第 2；拉丁美洲拥有各地区中最高的能源清洁度得分，主要得益于其可再生能源禀赋优势；

拉丁美洲地区在 2011–2020 年间能源可持续性上升幅度为 3.4%，主要来自能源可及性和清洁度的提升，但其他三个维度的得分则有所下降；

北美：

北美地区 2020 的能源可持续性得分（74.6）是各地区中最高的，在能源可及性、能源效率、能源可支付性和能源可靠性 4 个维度上均为各地区中的最高分，在能源清洁度上，北美在各地区中排名第 3，仅低于拉丁美洲地区以及欧洲与中亚地区；

北美地区在 2011–2020 年间能源可持续性上升幅度为 3.24%，主要贡献来自能源清洁度和可靠性（页岩气革命带来的能源自给率上升）的上升。

的“一带一路”国家在能源可持续性水平（64.6 分）上接近世界平均水平（65.0 分），但与代表着发达国家的 OECD 国家（73.3 分）仍然存在差距。“一带一路”国家在能源可及性、清洁度和能源效率上显著低于 OECD 国家，分别只达到了 OECD 国家得分的 87.0%、81.3% 和 83.9%；其中可及性中的清洁炊事燃料普及率和电气化率、清洁度中的可再生能源比例和空气污染物排放强度以及能源效率中的单位 GDP 能源强度，是“一带一路”与 OECD 国家差距最大的指标。

2011–2020 年“一带一路”国家能源可持续性快速增长，增长幅度达到 8.2%，高于 OECD 国家（3.0%）以及世界平均水平（6.8%）。从历年的增速来看，以 2015 年《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》正式发布为关键节点，2015–2020 年“一带一路”国家的能源可持续性增速（0.8%–1.0%）相比于 2012–2014 年的增速（0.6%–0.7%）有明显提升。

“一带一路”国家的能源可持续性增长主要来自于可及性的提升，贡献了提升总量的 89.2%，特别是农村电力普及率和清洁炊事燃料普及率，分别上升了 22.6% 和 17.3%；能源清洁度和能源效率提升也有一定贡献。可支付性和可靠性则出现了下降，特别是能源自给率出现明显下滑。

“一带一路”内部各国的 2020 年能源可持续性同样有着较大差异，中东欧国家领先于其他国家，而东南亚和南亚国家能源可持续性相对较低。“一带一路”国家中，得分位于前列的国家包括拉脱维亚（78.6 分）、阿尔巴尼亚（77.8 分）、塔吉克斯坦（77.2 分）、爱沙尼亚（75.6 分）、克罗地亚（75.4 分）等，而得分较低的国家则包括巴基斯坦（53.1 分）、孟加拉国（54.9 分）、伊拉克（56.8 分）、缅甸（57.6 分）和蒙古（57.7 分）。从 2011–2020 年的能源可持续性发展来看，大部分“一带一路”国家的能源可持续性有所增长，印度、柬埔寨、蒙古等部分东南亚和南亚国家的发展最为迅速；但与此同时，部分“一带一路”国家的能源可持续性出现了下滑，包括塔吉克斯坦、伊拉克、老挝等，其共同特点是化石能源消耗量的突增使能源清洁度大幅下跌，反映出了部分国家依赖化石能源的能源发展模式对其能源可持续性造成的负面影响。

讨论

能源系统的加速转型与协同发展

研究结论表明，现有的能源发展路径和能源转型政策并不足以满足 SDG7，特别是能源清洁度相关的目标，因此，抓住 2030 年前的最后窗口期，综合利用行政命令、财税、金融等政策工

具，加大对清洁能源的支持，是全球实现 SDG7 的必由之路。与此同时，推进能源的清洁转型也要充分考虑与能源可持续性其他维度的协同发展。清洁转型会创造多维度协同发展的机遇，如通过清洁能源解决能源贫困问题和能源安全问题，但清洁转型也会在其他维度带来潜在的挑战，这些挑战包括清洁能源大规模发展可能带来的材料短缺问题，电网波动问题以及能源可支付性问题等。本研究的结果表明，片面关注能源发展的单一维度所导致的能源可持续性其他维度上的倒退，会削弱甚至抵消这一维度上的发展成果，例如“一带一路”中的越南、老挝和伊拉克等国，2011–2020 年间可及性虽有上升，但清洁度和可靠性方面的倒退使得整体的能源可持续性不增反降。因此，对于各级政策制定者，应充分考虑清洁发展与能源可持续性其他维度协同发展的机遇与挑战，并将其明确纳入到清洁发展的战略规划文件中。

各类国家能源战略的侧重点

对于低收入国家来说，能源可及性的不足严重限制了其能源可持续性的表现。例如，在撒哈拉非洲以南地区，2020 年仍有 7.5 亿人无法用电，26 亿人未能使用清洁的炊事燃料能源^[1]，使得能源可及性成为最大短板。因此，低收入国家的能源战略应将能源贫困的解决列为重点。当前，可再生能源中的陆上风电与光伏在技术和经济性上已达到成熟水平，而越来越多的政府和金融机构承诺不再投资化石能源项目，在这一背景下，可再生能源应成为解决低收入国家能源贫困问题的主要手段。中等发达国家在过去十年间新增了大量以化石能源为主的能源基础设施，这些能源基础设施对清洁度、效率和可靠性的影响在本研

究中得到了直观体现，同时这些高碳能源基础设施还会带来大量的锁定碳排放，阻碍能源系统的低碳发展。因此，现有能源基础设施的升级改造和有序淘汰将与清洁能源的发展一道成为中等发达国家推进能源可持续发展的重要抓手。对于能源可持续性较为领先的高收入国家，特别是在 2022 年经历了能源危机的欧洲国家来说，提升可再生能源比例，实现能源清洁转型是当前能源发展的重点所在。在这一过程中，高收入国家应重点关注清洁度提升与其他维度的协同发展，确保能源可持续性的其他维度在清洁转型过程中同样得到发展。

关键技术进步对能源可持续性的推动

能源可持续性指数的提高与关键技术的进步密不可分。例如，2011 年以后全球能源清洁度得分的提升，很大程度上要归功于风电和光伏产业在组件效率、材料强度、生产优化等方面的技术迭代，从而使得 2010 以后的风光平准化度电成本快速下降到接近甚至低于化石能源的水平，极大地促进了可再生能源的部署；北美能源可靠性的逆势增长，源于水平钻井和水力压裂等多种开采技术的进步，这使得页岩气和页岩油的开采具备经济可行性，从而显著增加了北美的天然气本地产量，使得美国由天然气净进口国变为净出口国，大大缓解了其能源安全问题。因此，在当前全球能源可持续性进步速度仍显不足的背景下，推动储能、工业与交通电气化、碳捕集利用

与封存（CCUS）和氢能等能源关键技术的进步，使其由示范性阶段快速进入商业化应用，将是在 2030 年前拉动全球——特别是以“一带一路”国家为代表的发展中国家摆脱化石能源依赖型的发展模式，实现 SDG7 的关键所在。

全球及地区层面的国际合作

研究结果揭示了过去十年间全球能源可持续性发展在地区和国家层面的不平衡性，这一问题的解决需要世界各国在能源和气候领域开展更为密切和实际的合作，包括治理体系、金融投资、技术研发等各个方面的一致行动。在 2022 年 11 月《联合国气候变化框架公约》第 27 次缔约方大会（COP27）达成的决议文件中，能源与气候领域的国际合作得到了着重强调；决议中还包括设立“损失与损害”基金的突破性协议，以及对加速能源转型这一共识的重申，标志着能源与气候领域国际合作取得的进展^[2]。“一带一路”是国际合作有力推动能源可持续性发展的另一个例证，指数结果显示，自 2015 年“一带一路”倡议正式提出后，“一带一路”国家的能源可持续性发展速度显著加快，表明“一带一路”合作的开展与各国能源可持续性进步间存在正向关联。在这些成果的基础上，下一阶段的国际合作应重点关注合作倡议的落地，如加大对可再生能源项目的投资力度、促进发达国家对发展中国家的技术分享与援助、以及设立国际清洁能源专项基金等。

引言

01

能源系统的可持续转型是全球可持续发展的基础。在联合国《2030 年可持续发展议程》提出的 17 个可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）中，能源可持续发展不仅是 SDG7 的主要内容，更是实现其他目标，如 SDG1：消除贫困、SDG6：水与卫生、SDG11：可持续城市 and SDG13：气候变化等的重要支柱^[3, 4]。以气候变化为例，政府间气候变化专门委员会（IPCC）在其发布的第六次评估报告中指出，当前的气候政策和减排行动并不足以实现《巴黎协定》规定的“将本世纪末的全球变暖控制在 2℃ 以内，并尽力实现 1.5℃”的目标^[5]。而化石能源的燃烧是温室气体主要的人为排放源，其产生的碳排放占全球 2020 年人为碳排放总量的 93.0%^[6]，现有能源基础设施的锁定碳排放（即现有基础设施在未来的使用寿命中产生的累积碳排放）更是已经对 1.5℃ 目标构成严

重威胁^[7]。在此背景下，能源系统需要在未来几十年中实现快速而有深度的转型，以支撑气候目标乃至可持续发展议程整体的实现。

对能源可持续性的评价与表征是相关研究发展和政策制定的重要依据。联合国制定的 SDG7 衡量指标体系中，仅包括了“电力普及率”“清洁炊事普及率”“可再生能源比例”和“能源效率”四个成果类指标。在这一基础上，学术界针对能源可持续性评价开展了多方面的研究探索。这些研究可被分为两类，第一类是研究机构定期发布的指数报告，以世界能源理事会发布的“世界能源三难指数”（World Energy Trilemma Index, WETI）^[8]以及世界经济论坛发布的“能源转型指数”（Energy Transition Index, ETI）^[9]为代表。这一类研究选取的指标更为全面，且囊括了全球大部分国家长时间段的数据结果，但其在指标体系构建的方法学上缺少透明度和



科学性^[10, 11]。第二类研究则是发表于学术期刊上的能源可持续性指数研究^[12-16]，这一类研究在方法学上具备较强的科学性，但大部分是针对特定国家或地区的研究，缺少全球范围的、长时间尺度的数据与结果，且大多数将重点放在指标体系的建立过程上，缺乏对结果的深度解读。

针对上述研究存在的不足，清华大学环境学院鲁玺课题组在清华大学碳中和研究院和 Inditex 可持续发展基金的支持下，于 2020 年开始了全球能源可持续性评价项目的研究工作，旨在建立一个兼具数据全面性和方法科学性的能源可持续性评价体系，并据此揭示全球各个国家与地区——特别是“一带一路”国家能源系统可持续性的时空分布特征及其不确定性，进而基于分析结果为处在不同地理区域、不同发展阶段的国家提供能源战略方面的政策建议，助力可持续发展目标的实现和“绿色

一带一路”发展愿景的达成。研究成果以《2023 世界能源可持续性评价报告——聚焦“一带一路”》的形式发布。该报告将于 2030 年前按年度持续更新，以追踪全球 SDG7 实现进度。

报告后五章的内容分为以下部分：

报告后五章的内容分为以下部分：

第二章：介绍能源可持续性评价体系的构建过程，包括“能源可持续性”的定义与范围，指标初选、筛选、数据获取和权重赋值等构建指标体系的具体环节，最终建立的指标体系以及开展不确定性分析的方法。

第三章：分析世界的能源可持续性现状，包括能源可持续性的总分以及各个维度得分，并对地区差异进行分析解读；探究世界和各个地区的能源可持续性在 2011-2020 年间的发展趋势以及其与 SDG7 2030 年目标的差距，并分析各个地区、各个维度对可持续发展的贡献。

第四章：分地区探究能源可持续性得分的空间和时间分布特征，包括现阶段地区能源可持续性在不同维度的特点、各维度在 2011-2020 年间的发展趋势、以及地区内重点国家的表现。

第五章：针对“一带一路”地区开展专题探究，包括“一带一路”能源可持续性现状、能源可持续性发展趋势以及能源可持续发展重点国家识别与分析。

第六章：基于以上研究结果，展开对研究的讨论与展望，包括研究的政策内涵以及研究本身的潜在改进方向。



构建能源可持续性评价体系

02

2.1 定义能源可持续性概念



联合国对 SDG7 的原文表述是“确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源”。根据这一表述，结合现有研究对能源可持续性概念的探讨，本研究提炼出了衡量能源可持续性的 5 个维度，即：

可及性：确保尽可能多的人能够获取电力等现代能源的供应

清洁度：减少能源的生产和使用对环境的影响

效率：能源的单位投入应带来尽可能多的产出

可支付性：能源消费支出的负担尽可能小

可靠性：确保能源系统提供稳定可靠的能源供应

2.2 选取和筛选指标

在综合评价研究中，评价指标的选取起着至关重要的作用。综合评价的方法学研究指出^[17]，指标的选取需要遵循的原则包括但不限于：系统性（评价指标应覆盖评价目标的所有重要方面），科学性（指标应具有明确的定义，以及其在过往的相关实践中得到过应用），可运算性（具有清楚的计算/测定方法），相互独立性（指标间应尽可能相互独立，避免信息的冗余），简约性（在

满足评价要求的前提下尽可能控制指标数量）等。

基于以上指标选取原则，以及 2.1 中定义的能源可持续性的 5 个维度，研究初步选取了一批指标，并进一步考虑了指标间的相关性以及指标数据的可得性，对初选指标进行了筛选（初选指标与筛选过程详见附录）。最终确定的指标体系如表 2-1 所示：

表 2-1 | 能源可持续性评价指标体系

能源可持续性维度	指标	备注
可及性	农村人口的电力普及率（%）	
	城镇人口的电力普及率（%）	
	清洁炊事燃料的普及率（%）	
	终端能源消费的电气化率（%）	
清洁度	终端能源消费中现代可再生能源占比（%）	排除了传统生物质能源
	空气污染物排放强度（g/MJ）	包括 SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 三种污染物
	CO ₂ 排放强度（g/MJ）	
能源效率	单位 GDP 的能源强度（MJ/\$）	
	能源分配效率（%）	指能源供应中分配、传输和运输损失所占比例
可支付性	电力消费占居民收入的比例（%）	假定人均年用电量为 1000kWh
可靠性	电力消费者经历的月均停电次数（#）	
	能源自给率（%）	指能源供应中不来自于进口部分的比例

2.3 指标数据的收集与处理

指标数据的来源包括国际能源署（IEA）的世界能源平衡表、世界能源价格和能源温室气体排放数据库，世界银行的世界发展指数数据库，以及全球大气研究排放数据库（EDGAR）的污染物排放数据库。其中，终端能源消费量、现代可再生能源消费量、能源供应总量、能源进口量、能源分配损失来自于 IEA 世界能源平衡表数据库，电力价格来自于 IEA 世界能源价格数据库，CO₂ 排放量来自于 IEA 能源温室气体排放数据库；人口、GDP、人均收入、电力普及率、清洁炊事燃料普及率和停电次数来自世界银行的世界发展指数数据库；SO₂、NO_x、PM_{2.5} 三种污染物的排放量则来自于 EDGAR 污染物排放数据库。

本研究共收集了全球各大洲 140 个国家

2011–2020 各年度的数据。

为将各指标数据转化成可以相互对比的形式，研究采用极值处理法对数据进行了标准化，具体计算过程如下：

效益型指标（即原始数值越高代表可持续性越好的指标，如可再生能源占比）：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})}$$

成本型指标（即原始数值越低代表可持续性越好的指标，如空气污染物排放强度）：

$$y_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})}$$

其中， x_{ij} 代表标准化前的数据， y_{ij} 代表标准化后的数据。



2.4 确定指标权重

权重是能源可持续性评价体系中各个指标、维度重要程度的体现，因此权重系数的确定是综合评价中的核心问题之一。权重系数的确定方法可分为两类，包括功能驱动型（主观）赋权法和差异驱动型（客观）赋权法。

在透明度较高的客观方法中，熵权法在样本数据完整和指标间具有复杂联系时的表现最好^[18]。

因此，本研究使用熵权法作为各维度权重确定的主要方法。熵权法的基本原理是根据各项指标观测值提供的信息量大小来确定指标权重，并借用了信息论中“信息熵”的概念和计算方法，利用信息熵来衡量各指标提供的信息量大小^[19]。最终确定的指标权重如表 2-2（具体计算过程见附录）所示。

表 2-2 | 指标体系与权重赋值

能源可持续性维度	指标	指标权重
可及性 (37.1%)	农村人口的电力普及率 (%)	9.2%
	城镇人口的电力普及率 (%)	9.2%
	清洁炊事燃料的普及率 (%)	9.2%
	终端能源消费的电气化率 (%)	9.2%
清洁度 (34.9%)	终端能源消费中现代可再生能源占比 (%)	17.4%
	空气污染物排放强度 (g/MJ)	8.7%
	CO ₂ 排放强度 (g/MJ)	8.7%
能源效率 (7.4%)	单位 GDP 的能源强度 (MJ/\$)	4.9%
	能源分配效率 (%)	2.4%
可支付性 (9.3%)	电力消费占居民收入的比例 (%)	9.3%
可靠性 (11.3%)	电力消费者经历的月均停电次数 (#)	5.6%
	能源自给率 (%)	5.6%



世界能源可持续性评价结果

03

3.1 世界能源可持续性现状（2020）

全球各国的能源可持续性分布呈现出了显著的区域差异（见图 3-1）。具体来说，在经济较为发达的地区，包括欧洲、北美和大洋洲的大部分国家，能源可持续性评价表现较好。欧洲与中亚地区和北美地区的能源可持续性平均得分分别达到了 71.1 分和 74.6 分。与之相反，经济发展较为落后的地区，包括撒哈拉以南非洲、南亚和东南亚的部分国家，在能源可持续性上处于明显的落后位置，撒哈拉以南非洲和南亚的能源可持续性平均得分仅有 51.9 和 61.6 分。经济发展处于中等水平的地区则表现出了更加多样的结果。一方面，以发展中国家为主体的拉丁美洲地区能源可持续性平均得分为 73.7 分，仅次于北美地区

的得分，这主要得益于拉美国家较为清洁的能源结构；另外一方面，中东与北非和东亚与太平洋两个地区的得分为 66.3 分和 67.0 分，处于中等水平。

能源可持续性的得分差异在国家层面得到了进一步体现。得分最低的 10 个国家中，有 9 个为撒哈拉以南非洲国家，得分最后一名乍得仅有 40.1 分；而在得分最高的 10 个国家中，有 7 个国家来自欧洲与中亚地区（具体来说，其中有 5 个国家来自北欧地区），得分第一名的冰岛达到了 96.8 分，是乍得得分的 2.4 倍（见图 3-2）。美国、日本和中国则分别以 74.3、68.8 和 67.6 分位居 25、58 和 71 名（140 个国家的详细得分

图 3-1 | 世界能源可持续性总分（2020）

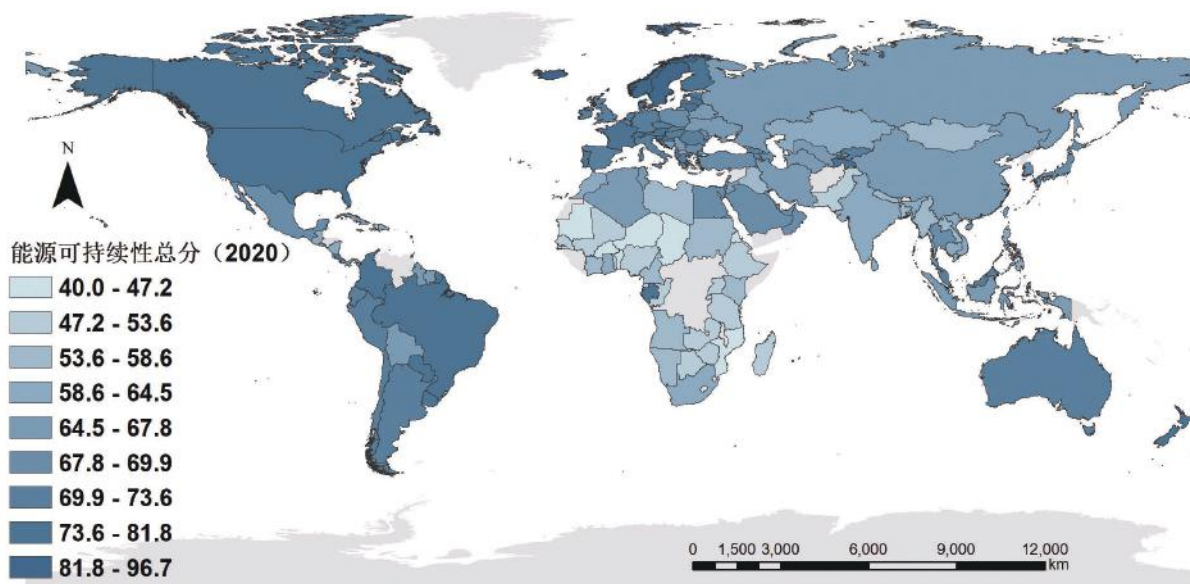
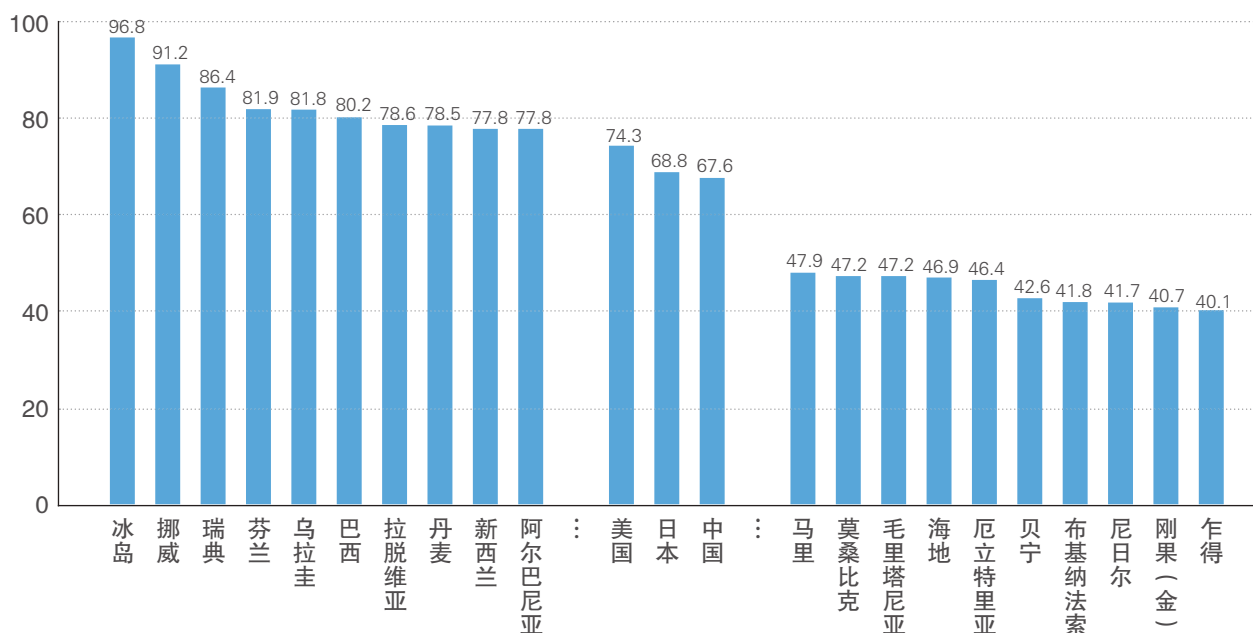


图 3-2 | 得分最高与最低的 10 个国家以及部分主要经济体



与排名见补充信息)。

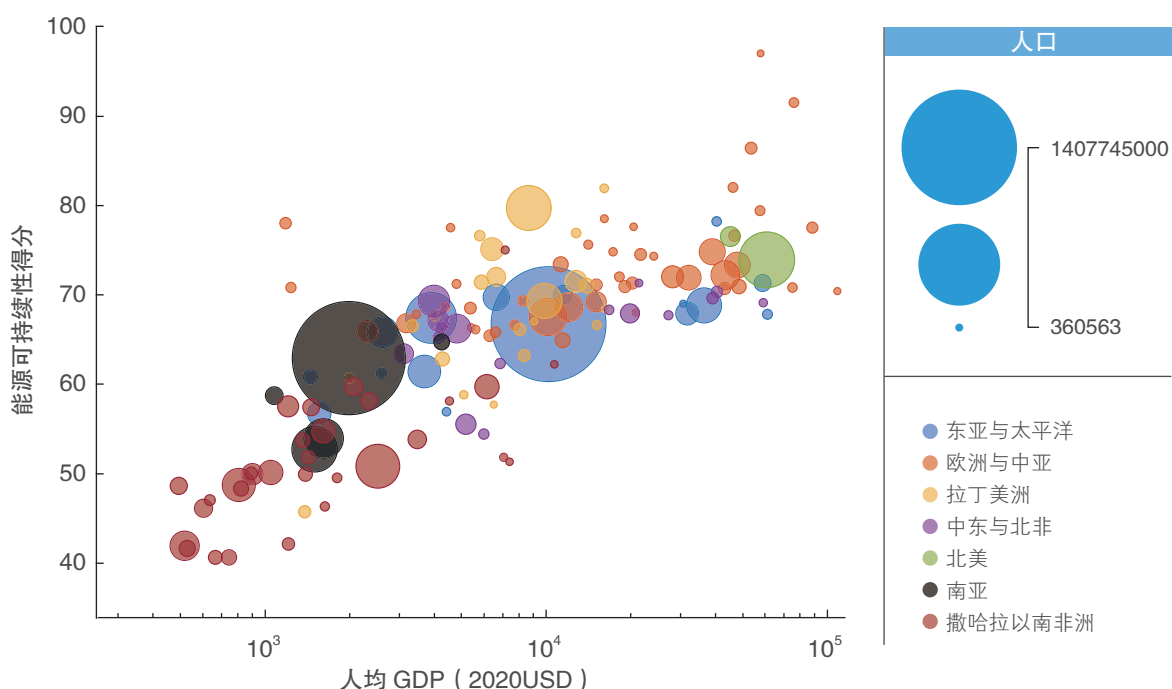
图 3-3 展示了 140 个被评价国家能源可持续性得分与经济水平(人均 GDP)的相关关系。回归分析的结果显示,能源可持续性得分与经济水平之间存在着显著的对数线性关系($p < 0.001$, $R^2 = 0.60$),人均 GDP 每翻 10 倍,能源可持续性得分会增加 13.6 左右。从人口角度来看,覆盖了全球大部分人口的发展中国家在能源可持续性得分方面大多处于中下水平,人口超过 1 亿的国家除美国外得分均低于 70,得分位于后 50% 的国家人口之和占到了总数的 72.4%,而得分位于前 50% 的国家仅占人口的 27.6%,这也进一步反映出了能源可持续性在地区和人口层面的不公平性。

从具体各维度的得分来看,能源清洁度对世界各个地区而言都是掣肘 SDG7 实现的重要因素,各地区的能源清洁度得分在 35.4 与 54.2 之间,

远低于其他维度的水平(见图 3.4c),而能源清洁度的世界平均得分仅有 41.8。其主要原因是能源消费中可再生能源占比尚处在较低的水平(见表 3-1),全球能源消费中仅有 11.5% 属于可再生能源。这也反映了能源低碳清洁转型这一议题在能源可持续发展当中的重要性和紧迫性。

各地区的能源可持续性总分差异可以追溯到其在各个维度乃至各个具体指标上的得分差异。对于欠发达地区来说,能源需求问题,包括能源的低可及性和低可支付性,是限制其能源可持续性的最大短板。以撒哈拉以南非洲为例,撒哈拉以南非洲地区的得分在其他维度上并未出现明显劣势,但其在能源可及性和能源可支付性上的得分仅为 34.2 分和 82.5 分,明显低于其他地区的得分(见图 3.4b 和 e)。表 3-1 中显示,在电力普及、清洁炊事燃料普及、电气化率和电力消费占居民收入比例等隶属于可及性和可支付性的指

图 3-3 | 能源可持续性得分与经济水平（人均 GDP）

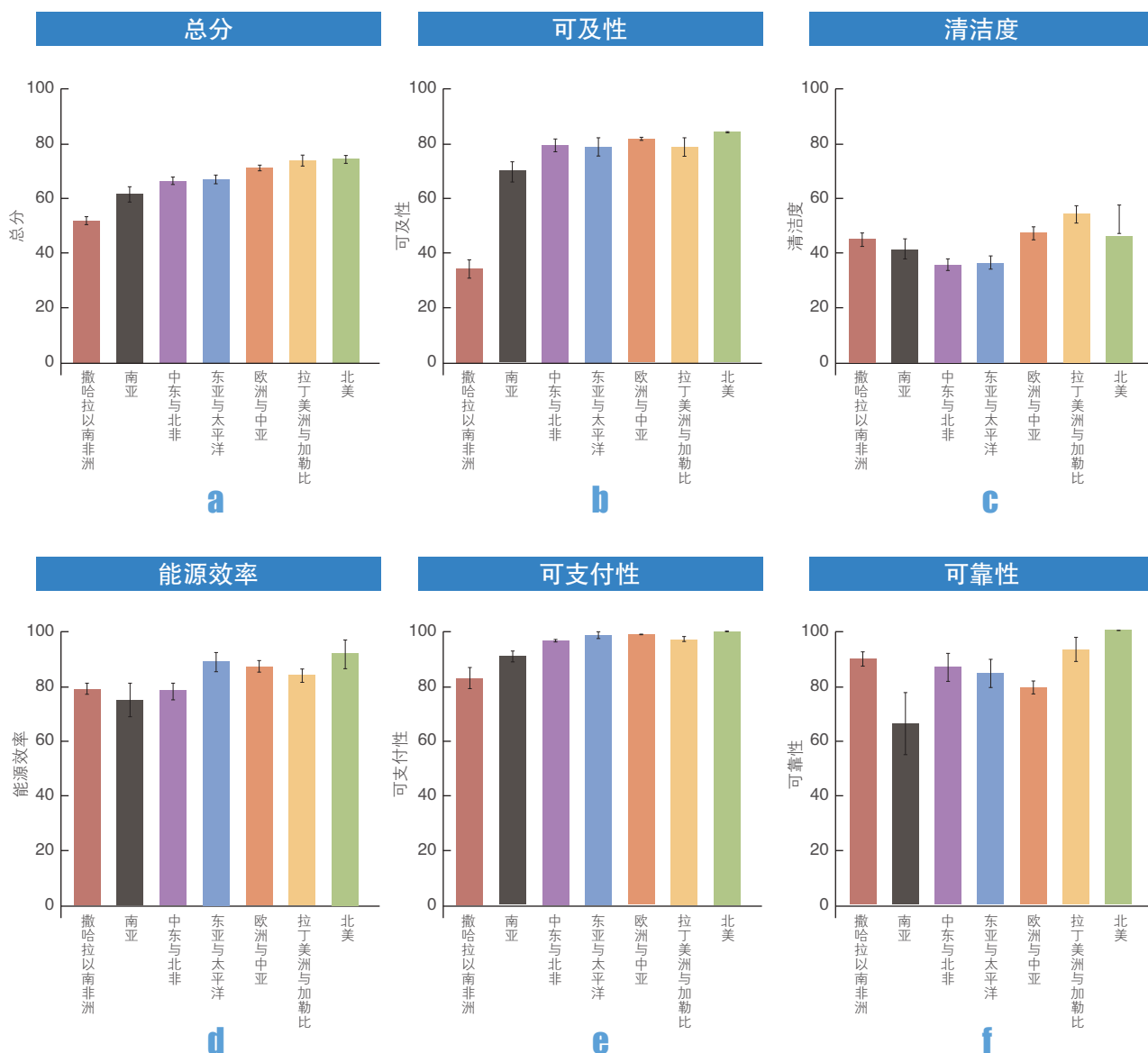


标上，撒哈拉以南非洲地区均居末列，特别是农村人口电力普及率（28.7 分）和清洁炊事燃料普及率（17.7 分），严重低于世界其他地区的水平，反映出了撒哈拉以南非洲等欠发达地区目前仍面临着缺乏现代能源供应的困境。

对于中等发达地区（南亚、中东与北非、东亚与太平洋）来说，其呈现出的特点既有共性也有个性。其共性问题表现为能源清洁度过低，中东与北非、东亚与太平洋及南亚三个地区在能源清洁度上的得分分列第 7、6、5 名，低于世界其他地区（见图 3-4c）。但聚焦到具体指标上可以看到，导致能源清洁度过低的指标并不完全相同。如表 3-1 所示，中东与北非地区对化石能源的依赖程度最高，其可再生能源占比得分仅有 1.3（可再生能源占比仅有 1%）；而南亚地区能源清洁度过低的主要原因则是较高的空气污染物排

放强度，这一指标的得分（69.5 分）低于其他各地区，说明南亚地区在能源系统的空气污染物排放控制方面较为落后。值得注意的是，尽管东亚与太平洋地区的可再生能源占比得分并不是最低，其 CO_2 排放强度得分（42.0 分）却位居末尾，甚至远低于化石能源比例极高的中东与北非地区（54.7 分）。这说明在提升可再生能源比例的同时，优化现有的化石能源使用方式对于东亚与太平洋地区的国家也是一个具有很大潜力的减排选项，包括调整化石能源的能源结构、扩展碳捕集利用与封存（CCUS）技术的应用等。此外，对于发展较为落后的南亚地区来说，其在能源效率（74.8 分）和能源可靠性（65.8 分）方面也都位于全球各地区中的最低值（图 3.4d 和 f），特别是能源可靠性明显低于其他地区，体现在具体指标上则为南亚地区拥有最低的月均停电次数得分（66.1

图 3-4 | 各地区的能源可持续性总分 (a) 和各维度上的得分 (b-f)。



分，月均停电次数为 25.5 次）和倒数第二的能源自给率得分（65.4 分，能源自给率为 65.4%）（见表 3-1），这也揭示了南亚地区在能源发展的过程中应当更加关注能源系统（特别是电力系统）的稳定性问题以及能源安全问题。特别的，拉丁美洲地区国家虽然也大多属于中等发达国家，但由于其较为丰富的可再生能源禀赋和对可再生能

源的开发利用（26.6% 的能源消耗来自可再生能源），拉丁美洲地区在能源清洁度上得分最高（图 3-4c），这也是拉丁美洲地区总分位居第 2 的主要原因。相较于发达国家，拉丁美洲地区在可及性和能源效率等方面仍有提升空间。

欧洲与中亚以及北美作为主要由发达国家组成的地区，在能源可持续性评价的大部分维度上

表 3-1 | 各地区具体指标得分，其中深蓝色和浅蓝色分别代表在该指标中得分倒数第一和第二的地区。

维度	具体指标	撒哈拉以南非洲	南亚	中东与北非	东亚与太平洋	欧洲与中亚	拉丁美洲与加勒比	北美
可及性	农村人口电力普及率	28.7	93.7	94.1	96.3	100.0	93.6	100.0
	城镇人口电力普及率	78.3	99.7	99.7	99.1	100.0	99.7	100.0
	清洁炊事燃料普及率	17.7	60.2	96.1	77.4	95.2	88.7	100.0
	终端能源消费电气化率	11.9	25.9	27.1	41.4	30.3	32.2	35.9
清洁度	能源消费中可再生能源占比	11.6	18.7	1.3	13.5	18.0	35.0	15.5
	空气污染物排放强度	76.7	69.5	84.5	75.9	90.0	79.0	91.8
	CO ₂ 排放强度	79.4	57.0	54.7	42.0	62.4	67.6	61.3
能源效率	单位 GDP 能源强度	72.0	73.4	76.8	87.3	91.2	89.5	92.8
	能源分配效率	92.0	77.6	81.6	92.3	78.2	73.1	90.1
可支付性	电力消费占居民收入比例	82.5	90.5	96.2	98.2	98.4	96.6	99.6
可靠性	月均停电次数	87.5	66.1	87.8	93.7	99.0	97.7	99.6
	能源自给率	91.0	65.4	84.8	74.6	59.0	88.0	100.0

都取得了较好的表现，目前实现 SDG7 的瓶颈在于能源系统清洁转型的实现（图 3-4c），具体来说是可再生能源比例的提升以及电气化率的进一步提高（表 3-1）。北美地区在除能源清洁度以外的其他各维度上都得到了最高分，而欧洲与中亚地区在能源可靠性上位居倒数第二（图 3.4b-f），这主要来自于该地区较低的能源自给率（59.0

分，能源自给率为 59.0%，是各地区中最低的），这直接体现了欧洲地区能源进口依赖导致的能源安全问题。2022 年初俄乌冲突引起的“欧洲能源危机”中，欧洲的能源安全问题以更为直观和突出的形式爆发出来，也在某种程度上佐证了本研究的这一发现。

3.2 2011–2020 世界能源可持续性变化

2011–2020 年间，全球能源可持续性整体呈现上升趋势，平均分由 2011 年的 60.9 分上升到了 2020 年的 65.0 分（图 3-6）；各地区的能源可持续性也均有增长，但上升幅度同样存在地区性差异，发展中国家的增长明显快于发达国家。具体来说，南亚地区的增长势头最为强劲，由 2011 年的 53.3 分增长到了 2020 年的 61.6 分，实现了 15.6% 的增长；其次是东亚和太平洋地区，由 2011 年的 62.6 上升到了 2020 年的 67.0，增长幅度为 7.0%。相比之下，其他地区的能源可持续性提升幅度并不理想，均未超过 4%（见图

3-5）。

从各地区为全球能源可持续发展做出的贡献来看，南亚和东亚是 2011–2020 年间拉动全球能源可持续性增长的主要动力。南亚和东亚分别贡献了全球能源可持续性增长的 48.5% 和 32.4%，撒哈拉以南非洲的贡献为 6.0%（图 3-6）。这一结果一方面来自于这些地区能源可持续性得分的大幅度提升，另一方面也在于这些地区覆盖的人口较多（南亚 18 亿，东亚与太平洋 23 亿，撒哈拉以南非洲 10 亿，总计占全球人口的 68.3%），产生的变化对全球能源可持续性有着

图 3-5 | 各地区能源可持续性得分 2011–2020 年变化

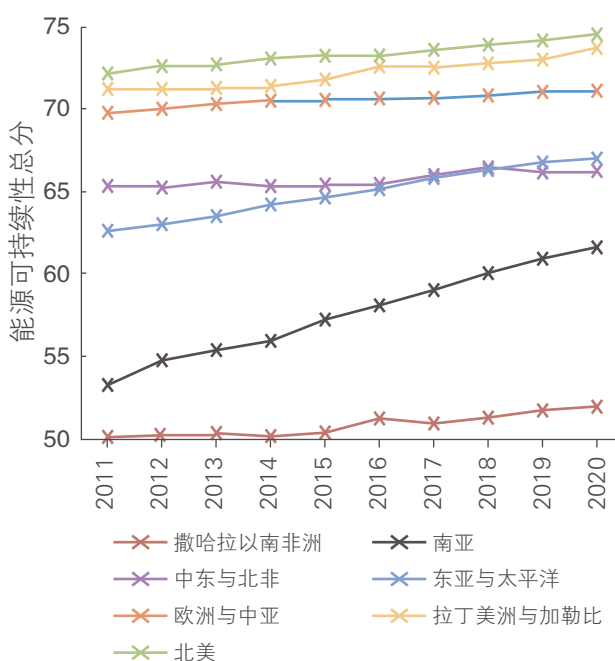
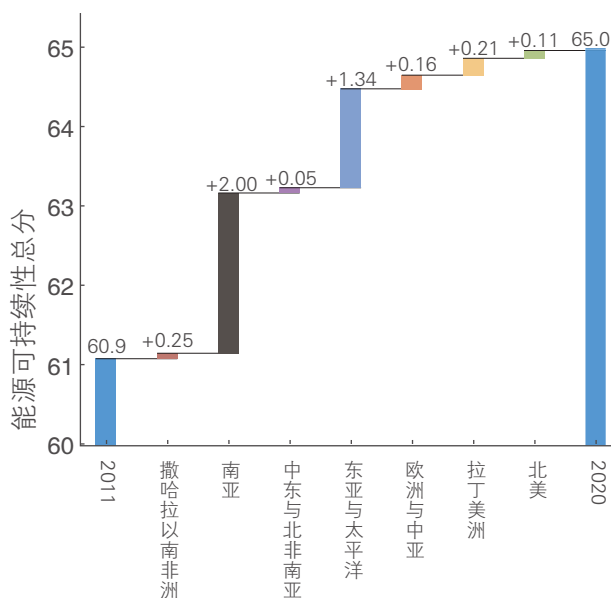


图 3-6 | 各地区对全球能源可持续发展的贡献 (2011–2020)



更为显著的影响。世界的其他地区，即中东与北非、北美、拉丁美洲以及欧洲与中亚地区对全球能源可持续性增长的贡献较少，特别是中东与北非地区，其贡献仅有 1.3%。

图 3-7 更为详细地展示了各个国家的能源可持续性变化。南亚及东亚与太平洋区域的部分国家，如印度、孟加拉国、中国、蒙古、柬埔寨和印度尼西亚等国家都有明显的能源可持续性提升。此外，东非地区的部分国家，包括埃塞俄比亚、肯尼亚、坦桑尼亚和乌干达，以及拉丁美洲的秘鲁和玻利维亚，也都在过去的十年中经历了能源可持续性得分的快速提升。另一方面，也有部分国家能源可持续性不升反降，包括欧洲与中亚地区的荷兰、俄罗斯、亚美尼亚、格鲁吉亚以及塔吉克斯坦，中东与北非地区的伊拉克、突尼斯和利比亚，撒哈拉以南非洲地区的毛里塔尼亚，博茨瓦纳，尼日利亚和毛里求斯以及拉丁美洲的圭亚那、苏里南、海地和智利。

尽管大部分国家都实现了能源可持续性增长，但 2011–2020 能源可持续性增长率超过世界平均增长率（6.8%）的国家只有 26 个（占国家总数的 18.6%），另外 114 个国家的增长率均低于 6.8%，且其中还有 15 个国家的能源可持续性出现了下降（图 3-8）。进一步地，研究对各国从“能源可持续性得分”及“2011–2020 能源可持续性变化率”两个维度进行了 K 均值聚类分析。K 均值聚类的结果显示，140 个国家可以被分为 3 类，其中类别 1 为高得分、低增长型国家（图 3-8 中蓝色），类别 2 为低得分、低增长型国家（图 3-8 中粉色），类别 3 为低得分、高增长型国家（图 3-8 中绿色）。其中，类别 3 国家仅有 11 个，除波黑外均为来自亚洲或非洲的发展中国家，能源可持续得分增长率均超过 10%。据此，世界能源可持续性 2011–2020 年的提升在很大程度上依赖于亚洲和非洲的少数发展中国家（即图 3-8 中类别 3 国家）的拉动，而如何动员更多数的国

图 3-7 | 各国能源可持续性得分 2011–2020 变化值

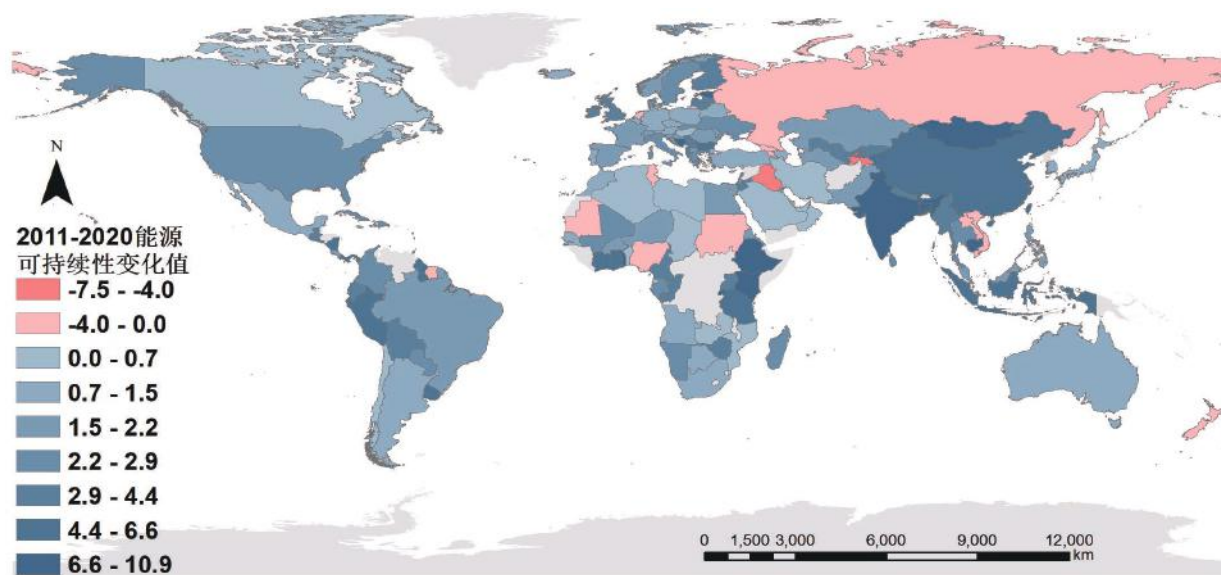
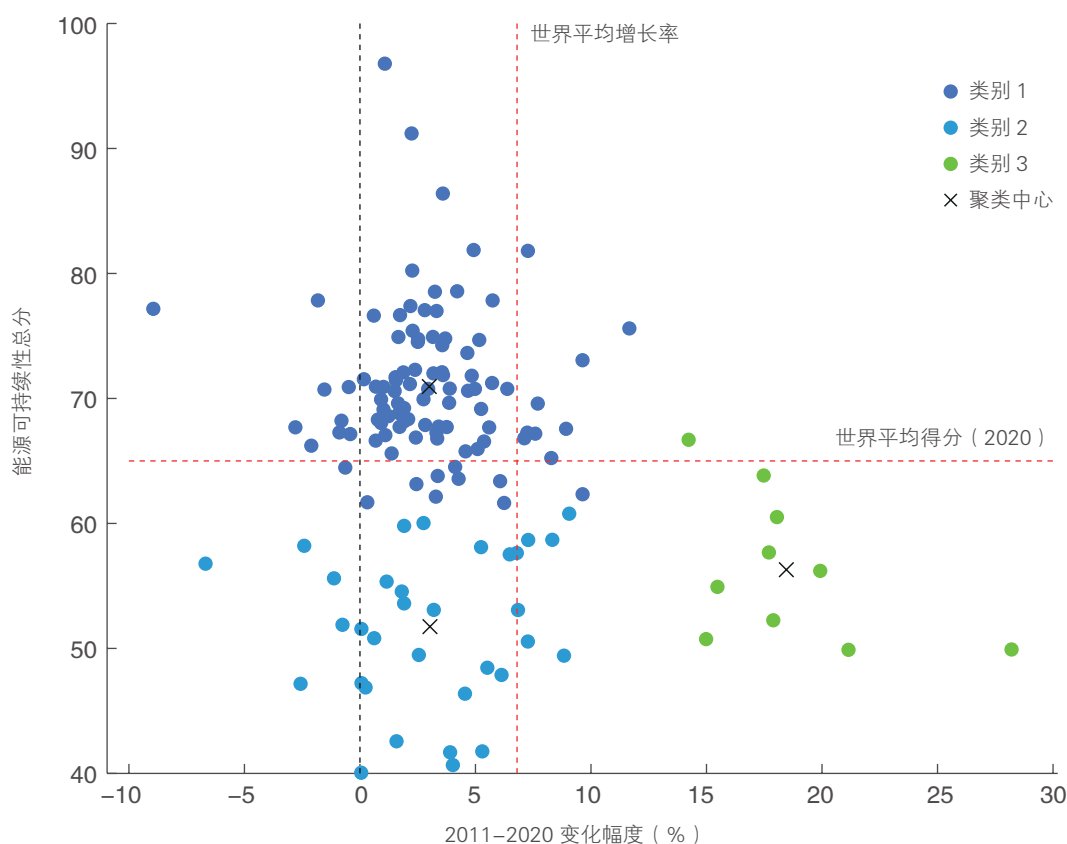


图 3-8 | 各国 2020 能源可持续性得分与 2011–2020 能源可持续性增长幅度



家实现更快速的能源可持续转型，将是全球能源发展在下一个阶段的重要议题。

在能源可持续性的五个维度中，能源可及性和清洁度的提高是 2011–2020 全球能源可持续性上升的主要因素。其中，可及性的提高贡献了全球能源可持续性增长的 73.6%（图 3-9），特别是可及性中的“农村人口电力普及率”和“清洁炊事燃料普及率”两项，在 2011–2020 年间分别提高了 10.8% 和 12.7%。能源清洁度的提高贡献了全球能源可持续性增长的 25.5%（图 3-9），主要得益于可再生能源在能源消费中占比的提高（由 2011 年的 11% 提升到了 2020 年的 15%）。能源效率和可支付性对能源可持续性

增长的贡献较小。值得注意的是，全球能源可靠性的平均得分在 2011–2020 年间出现了下降，这一结果来自于各国能源进口依存度的上升，反映出了全球能源需求上升和能源贸易增加带来的能源安全隐患。

图 3-10 展示了各地区在能源可持续性的 5 个维度上的变化。撒哈拉以南非洲的能源可持续性增长有 106.4% 来自于可及性的提高，可支付性和能源效率的增长也有一定贡献，但清洁度与可靠性则出现了下降，反映出撒哈拉以南非洲在扩大能源供给、满足能源需求的同时，未能实现能源结构的优化，化石能源的占比不降反增。南亚地区的可及性增长尤为显著，贡献了南亚 84.0% 的能源可持续性增长，清洁度、效率和可支付性也有一定提高，但可靠性下降颇为明显。中东与北非地区的能源可持续性增长同样以可及性为主。东亚与太平洋地区的可及性和清洁度提高分别贡献了 68.1% 和 36.7% 的能源可持续性增长，说明东亚与太平洋地区在扩大能源供给的同时在能源清洁转型上也取得了一定进步。欧洲与中亚地区的能源可持续增长有 100.3% 都来自于清洁度的提升，特别是可再生能源比例的提升。拉丁美洲地区同样在可及性和清洁度方面都有提升，但在能源效率、可支付性和可靠性上出现了下降。北美的清洁度和可靠性提升分别贡献了 53.4% 和 40.2% 的能源可持续性增长，值得一提的是，北美是所有地区中唯一实现能源可靠性增长的地区（其他地区的可靠性均因为能源自给率的降低而有所下滑），这其中既有可再生能源发展的贡献，同时也与北美通过页岩气革命实现从天然气进口国到出口国的转变有直接关系。

图 3-9 | 各个维度对能源可持续性提高的贡献

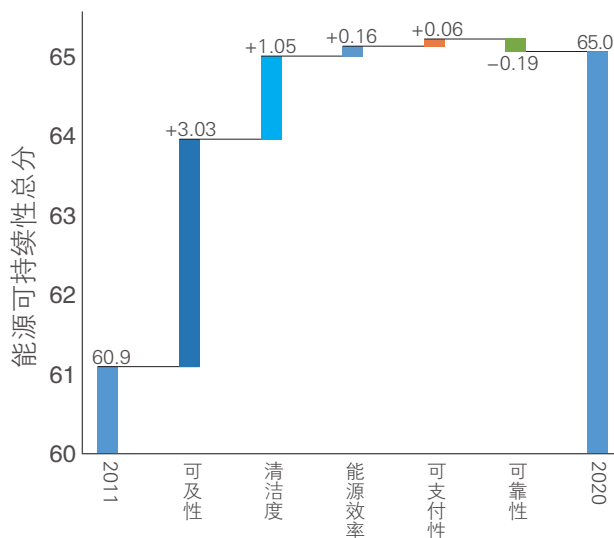
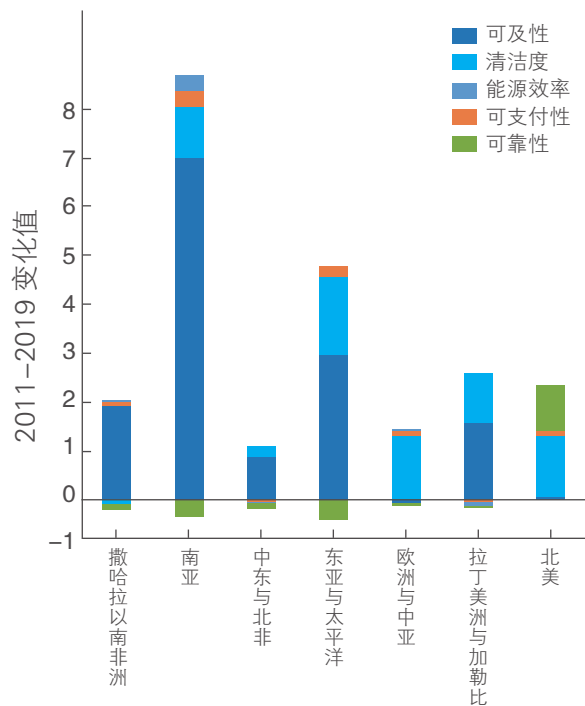


图 3-10 | 各地区在能源可持续性 5 个维度上的变化



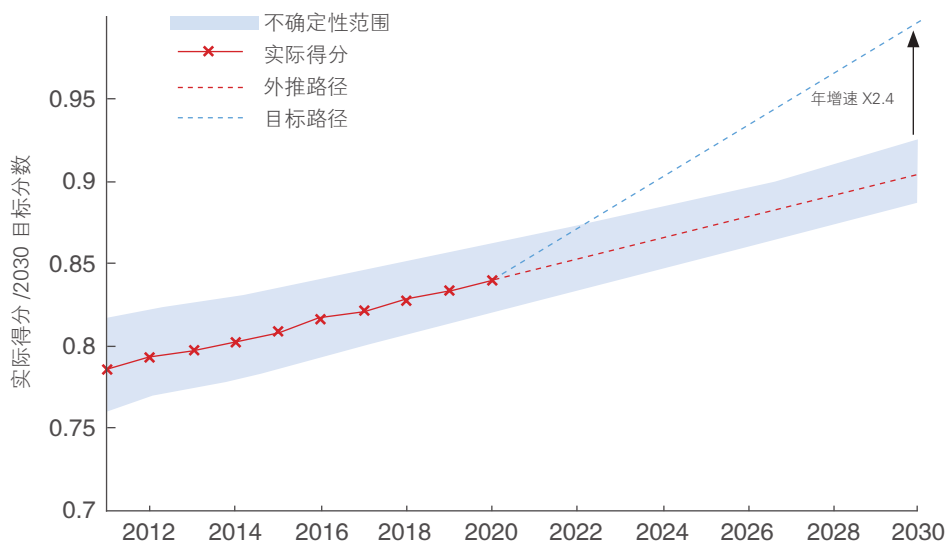
3.3 未来世界能源可持续性变化趋势

为将全球能源可持续发展的进展与 SDG7 设定的 2030 目标直接对比，研究通过结合《可持续发展议程》、国际能源署（IEA）《净零 2050》^[20] 报告等多个方面的假设（详见附录），计算出了达到 2030 目标对应的能源可持续性分数。结果显示，实现 SDG7 需要全球能源可持续性指数得分在 2030 年达到 77.4 分。

与这一目标值相比，2011–2020 世界能源可持续性上升的幅度和速度并不理想，2011–2020 年间世界能源可持续性只增长了 6.8%，年均增长率为 0.7%。图 3–11 中展示了 2011–2020 年能源可持续性指标进展（即当年实际得分 / 2030

目标分数）的变化（图 3–11 中红色实线），以及按照 2011–2020 年的增长率进行外推得到的 2021–2030 预测值（图 3–11 中红色虚线）。结果显示，如果之后仍以 2011–2020 阶段的速度增长，2030 年世界能源可持续性得分仅能达到 SDG7 目标值的 90.3%。而实现 SDG7 的路径（图 3–11 中蓝色虚线）则需要 2021–2030 阶段的能源可持续性以原增速 2.4 倍的速度（即年均增长率 1.8%）上升，这意味着实现 SDG7 目标迫切需要全球能源系统在 2030 年前加快其可持续转型的速度。

图 3–11 | 能源可持续性指标进展（得分 / 2030 目标分数），其中红色实线为 2011–2020 年实际值，红色虚线为 2021–2030 预测值，蓝色虚线为实现 SDG7 所要求的路径





各地区能源可持续性评价结果

04

4.1 Sub-Saharan Africa

撒哈拉以南非洲 (SSA)



撒哈拉以南非洲 2020 年的人口总数为 11.4 亿，占全球人口总数的 14.6%，大部分撒哈拉以南非洲国家经济发展较为落后，地区的人均 GDP 仅有 1588 美元（2020 年）。32 个撒哈拉以南非洲国家被纳入了本研究的评价范围。

撒哈拉以南非洲 2020 年的能源可持续性总分为 51.9 分（图 3-4a），在全球 7 个地区中得分最低。从能源可持续性的 5 个维度来看，撒哈拉以南非洲在能源可及性和可支付性两个维度上相比于世界平均值具有明显的落后（在这两项上的得分同样是 7 个地区中最低的）；清洁度和能源效率与世界平均值相差不大，分别在各地区中排名第 4 和第 5；可靠性得分则略高于世界平均值，在 7 个地区中排名第 3（见图 4-1 及图 3-4a）。

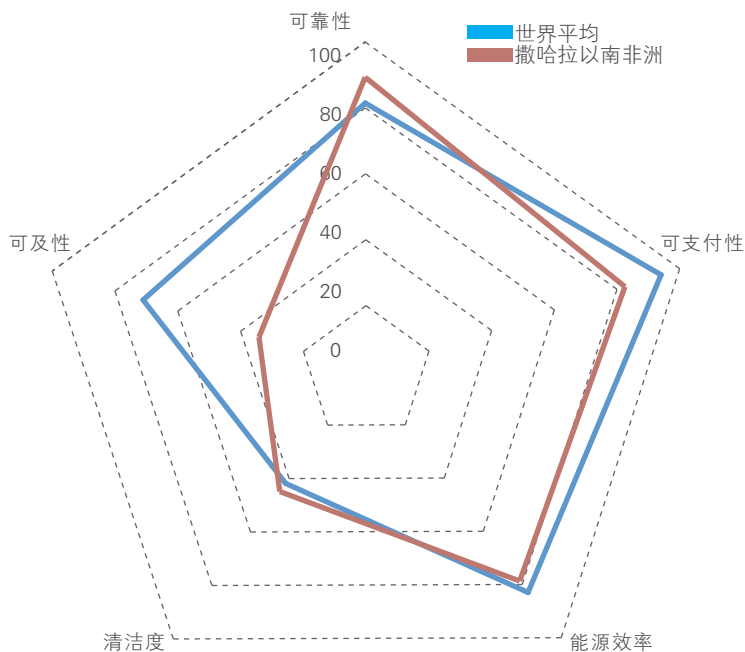
可及性

撒哈拉以南非洲在能源可及性的各个指标，即农村电力普及率、城镇电力普及率、清洁炊事燃料普及率和电气化率上都明显落后于世界平均水平，特别是农村电力普及率（28.1%）和清洁炊事燃料普及率（17.1%）两项（图 4-2）。这意味着撒哈拉以南非洲的大部分国家目前还处在由于经济长期落后而导致的能源基础设施严重不足的阶段。此外，农村和城镇的电力普及率存在着巨大差距，这也反映出了撒哈拉以南非洲地区在能源发展方面的城乡不平衡问题。

清洁度

撒哈拉以南非洲的可再生能源比例较低，仅

图 4-1 | 撒哈拉以南非洲能源可持续性各维度得分

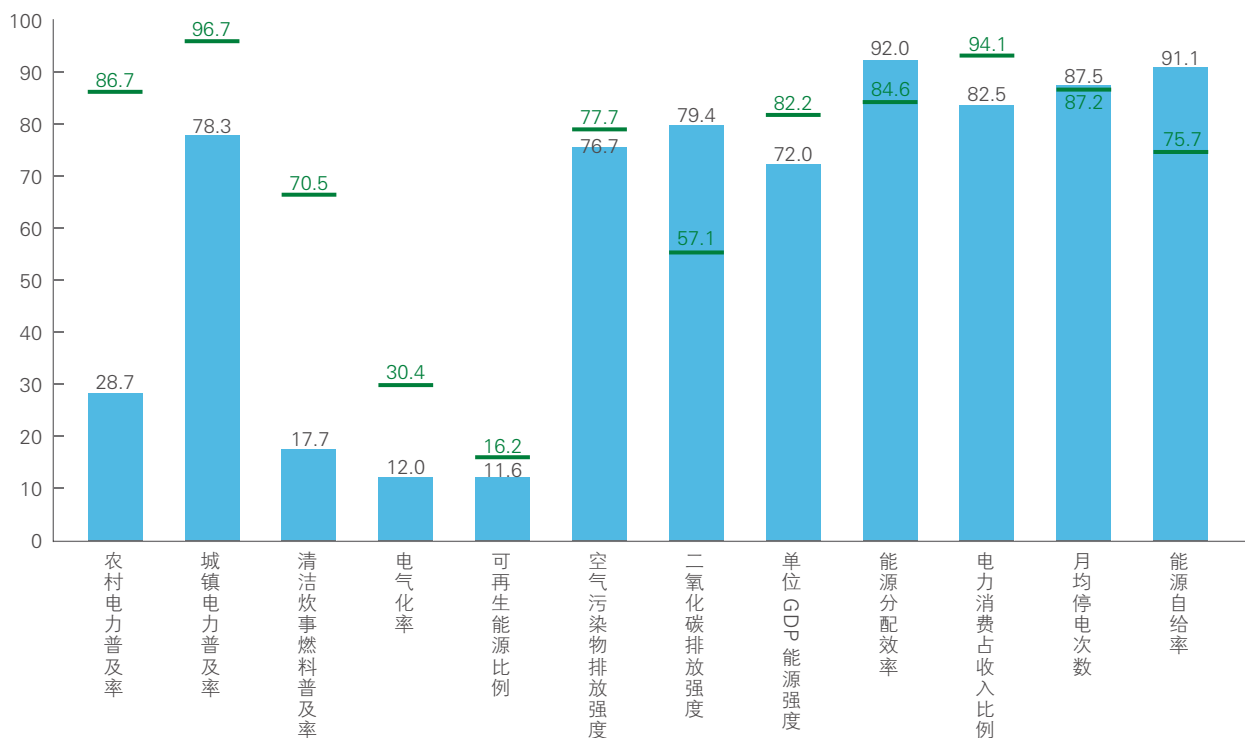


占能源消费总量的 8.8%，但其 CO₂ 排放强度却明显低于世界平均水平（图 4-2）。这一看似矛盾现象的产生主要是因为非洲的能源结构中还有着大量的传统生物质用能（如木柴、农作物残渣和人畜粪便的直接燃烧），约占非洲能源总消费的 40%，这部分生物质能在本研究的统计中不属于“现代可再生能源”的范畴，导致了撒哈拉以南非洲可再生能源比例较低和能源碳排放强度较低同时存在的现象。传统生物质用能虽属于生物质能，但仍会带来一系列环境和健康问题，如空气污染（图 4-2，撒哈拉以南非洲的空气污染物排放强度得分低于世界平均值）^[21]。因此，高比例的传统生物质用能和化石能源一样，都是撒哈拉以南非洲地区提升能源清洁度的过程中亟待解决的问题。

能源效率

撒哈拉以南非洲的单位 GDP 能源强度为 10.0MJ/\$（即 2.8kWh/\$），是世界平均值 4.9MJ/\$ 的 2 倍，反映出撒哈拉以南非洲的经济体能源利用效率低的问题。但另一方面，撒哈拉以南非洲的能源分配效率较高，仅有 1.0% 的能源损失在了分配、传输和运输环节，在一定程度上平衡了能源强度上的低分（图 4-2）。对于撒哈拉以南非洲来说，提高用能端的能源效率，包括推广能效更高的用能设备和调整高耗能产业等，将是在下一阶段提高能源效率得分的关键所在。

图 4-2 | 撒哈拉以南非洲各项指标得分（绿色为世界平均值）



可支付性

按每年人均电力消费 1000kWh 计算，在撒哈拉以南非洲地区的用电家庭，平均将有 11.3% 的可支配收入用在电费支出上（图 4-2），而这一比例的世界平均值仅有 3.9%，在中国仅有 1.0%。从电力价格来说，撒哈拉以南非洲的平均电价与世界平均值几乎持平，因此较低的电力可支付性主要源于撒哈拉以南非洲地区较低的人均收入。低可支付性加剧了撒哈拉以南非洲地区的“能源贫困”问题，上文“可及性”部分的分析指出，非洲有大量人口生活在没有电力供应的地区；而结合能源可支付性部分的分析可以得出，即使生活在有电力供应的地区，用电成本也会成为能源普及的阻碍。

可靠性

撒哈拉以南非洲地区的月均停电次数与世界平均值差距不大，能源自给率则明显高于世界平均值（图 4-2）。高能源自给率既与该地区本身较为丰富的能源资源有关，同时也在于撒哈拉以南非洲地区目前能源产业处于早期发展阶段，对化石能源的需求不大。撒哈拉以南非洲地区的化石能源消费量在近年来处于增长趋势，因此保持能源安全将会成为下一阶段能源发展中新的挑战。

图 4-3 展示了撒哈拉以南非洲 32 个国家在 2020 年的能源可持续性得分。其中，表现最好的加蓬得到了 74.9 分，位于所有国家中的第 19 位，明显优于该地区的其他国家。其余 31 个国家的得

图 4-3 | 撒哈拉以南非洲各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）

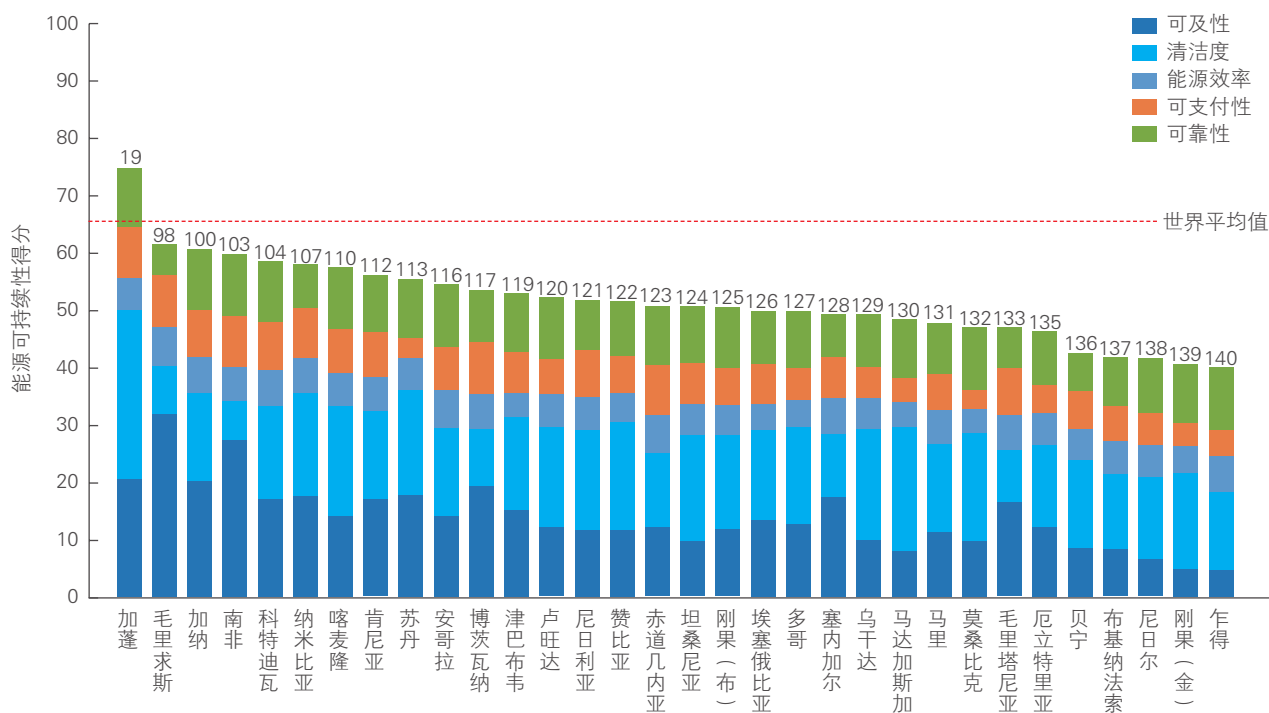
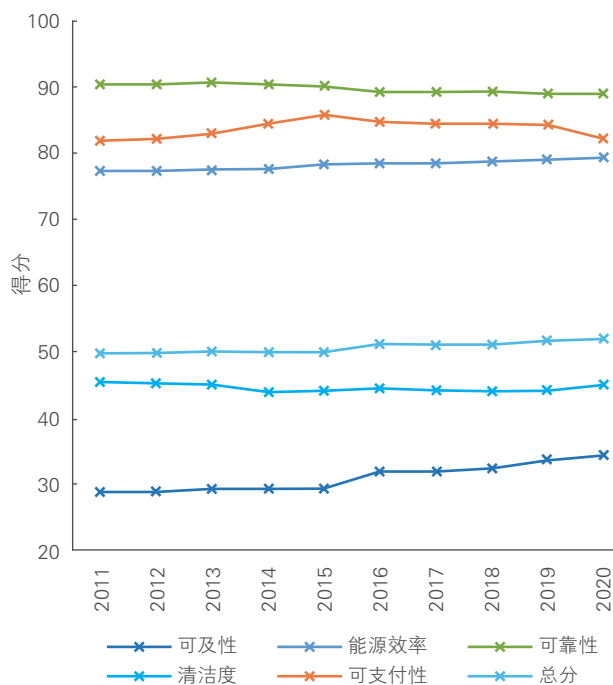


图 4-4 | 撒哈拉以南非洲 2011–2020 能源可持续性得分



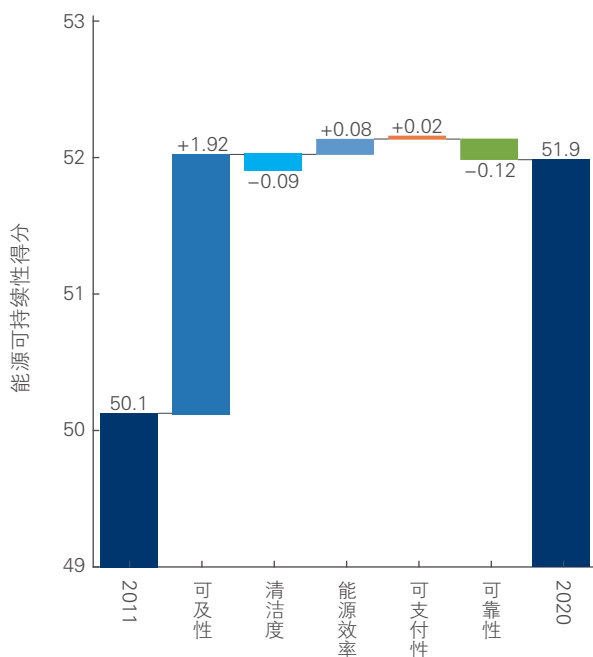
分均低于世界平均值，且有 30 个国家排在 100 位之后。对于加蓬来说，其较为突出的表现主要来自于较高的能源清洁度。加蓬的可再生能源占到了终端能源总消费的 63.1%，在 140 个国家中仅次于冰岛的 81.1%。作为撒哈拉以南非洲较为发达的国家之一（人均 GDP 达到了 6696 美元），加蓬在可及性和可支付性方面的得分同样高于平均值。同时，石油资源的丰富也使得加蓬在能源安全方面表现良好。相对应的，撒哈拉以南非洲表现最差的国家（乍得、刚果（金）、尼日尔等）同样都属于联合国定义的“最不发达国家”，呈现出来的共性问题是在能源可及性和可支付性较差，尚处在能源贫困问题未能解决的阶段。

除 2013–2014 和 2016–2017 外，2011–2020 年间，撒哈拉以南非洲的能源可持续性得分

保持上升趋势，由 2011 年的 50.1 分上升到了 2020 年的 51.9 分，增长幅度为 3.6%，年均增长率为 0.4%，低于世界平均值（图 4-4）。

能源可及性的上升是撒哈拉以南非洲能源可持续性增长的主要贡献因素（图 4-5）。撒哈拉以南非洲的能源可及性得分虽低，但增长也较为明显，由 2011 年的 29.0 分上升到了 2020 年的 34.2 分，2015 年之后的增长尤为显著；可支付性在 2011–2015 年间增长迅速，但在 2015 年之后停止了上升趋势，受新冠疫情影响 2020 年的可支付性甚至跌回了 2011 年的水平；能源效率的增长幅度不大，而清洁度和可靠性则出现了小幅度的下降（图 4-4）。总的来说，撒哈拉以南非洲地区通过能源供应的扩张在一定程度上缓解了能源贫困问题，但扩张过程并没有很好地兼顾能源可持续发展的其他方面，特别是清洁度与能源安全。

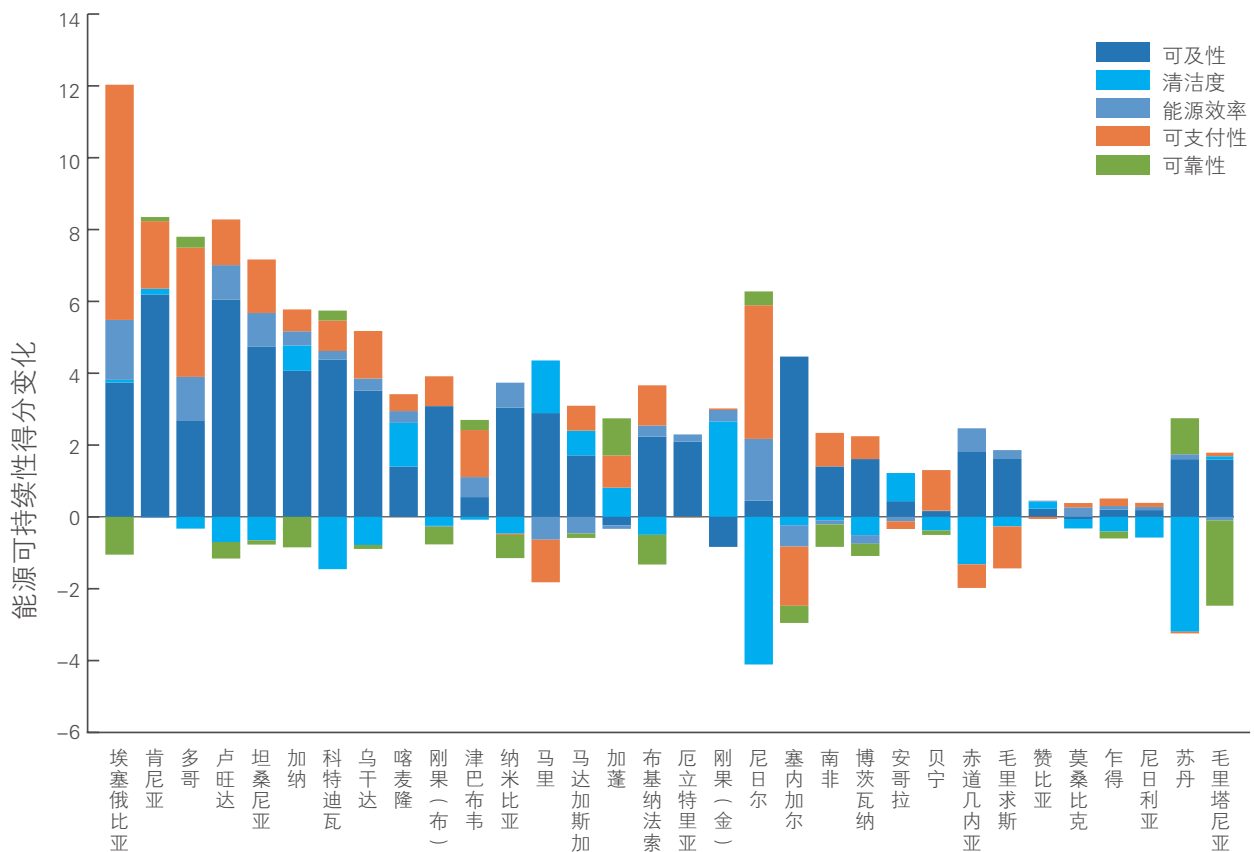
图 4-5 | 撒哈拉以南非洲 2011–2020 能源可持续性各维度变化



在撒哈拉以南非洲的 32 个国家中，埃塞俄比亚在 2011–2020 年的进步最快，能源可持续性得分的提升幅度达到了 28.3%，主要来自可支付性和可及性的改善。此外，肯尼亚、多哥、卢旺达、坦桑尼亚和加纳等国的能源可持续性得分也由于可及性和可支付性的得分上升而有了较大改善。另一方面，尼日利亚、苏丹和毛里塔尼亚三个国家的能源可持续性得分出现了下降，其中，毛里塔尼亚

的能源自给率下降了 43.1%，是其能源可持续性下降的最主要因素；苏丹的得分下滑主要来自于能源可支付性的下降，而尼日利亚的下滑则均可归因于能源清洁度的退化（图 4–6）。值得注意的是，刚果（金）和博茨瓦纳两个国家出现了能源清洁度的大幅下降，主要原因是化石能源消耗量特别是煤炭消耗量的增加。

图 4–6 | 撒哈拉以南非洲各国 2011–2020 能源可持续性得分变化



4.2 South Asia 南亚 (SA)



执行摘要

第 1 章

第 2 章

第 3 章

第 4 章

第 5 章

第 6 章

附录

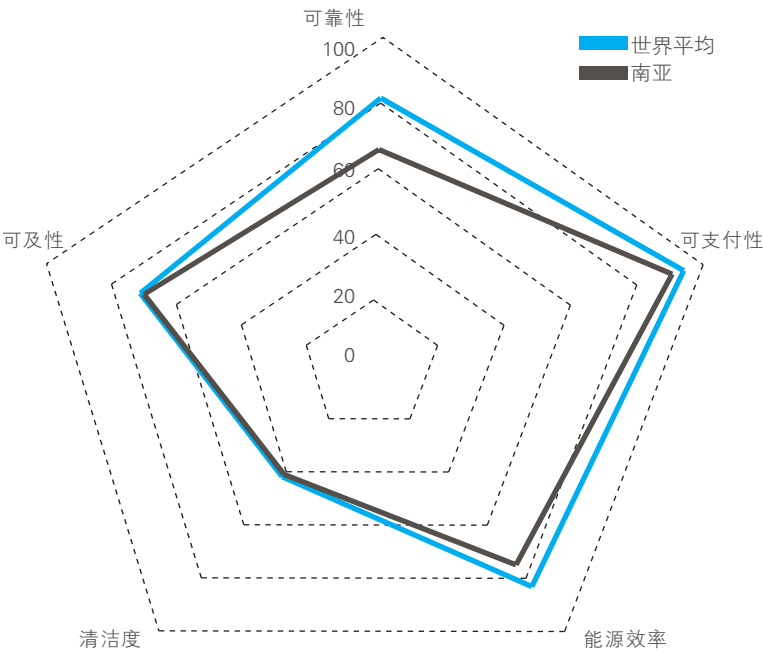
南亚地区包括了孟加拉国、印度、尼泊尔、巴基斯坦、斯里兰卡 5 个国家，2020 年共有人口 18.2 亿，占全球人口总数的 24.0%，其中包括了印度、巴基斯坦和孟加拉国三个人口过亿的国家，是世界上人口密度最高的地区之一。南亚各国均属于发展中国家，2020 年地区的人均 GDP 为 1745 美元，远低于世界平均值（10549 美元）。

南亚地区 2020 年的能源可持续性总分为 61.6 分（图 3-4a），在全球 7 个地区中排在第 6 位，仅高于撒哈拉以南非洲地区。从能源可持续性的 5 个维度来看，南亚地区在能源可及性和能源清洁度上略低于世界平均水平（分别为各地区中的第 6 名和第 5 名），在能源效率、可支付性和可靠性上与世界平均值有较大差距（图 4-7），其中能源效率和可靠性得分是全球各地区中最低的。

可及性

南亚地区的农村和城市电力普及率均达到了 90% 以上，高于世界平均水平，其中城市电力普及率达到了 99.7%。因此对于南亚地区来说，电力普及的挑战在于解决农村偏远地区用电的“最后一公里”问题。在清洁炊事燃料方面，南亚地区的清洁炊事燃料普及率为 60.2%，低于世界平均水平。以该地区人口最多的印度为例，炊事燃料中液化石油气的比例已经达到了 71%，但仍有相当部分的家庭使用传统生物质能作为炊事燃料，或将生物质能与液化石油气混烧^[22]。同样，南亚地区的电气化率也低于世界平均水平，表明南亚在终端清洁用能的普及上仍与目标存在差距。

图 4-7 | 南亚能源可持续性各维度得分



清洁度

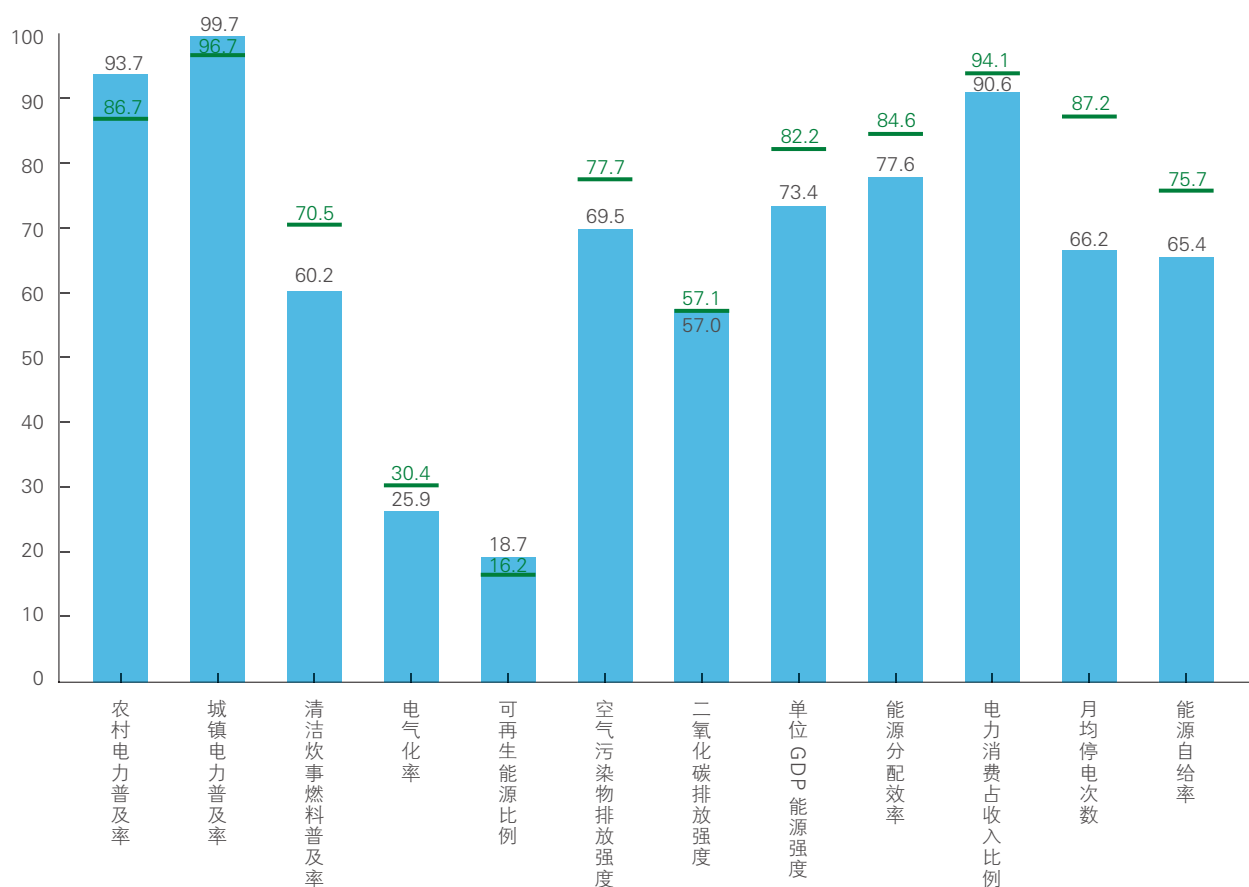
南亚地区的可再生能源比例为 14.2%，高于世界平均水平，其中 60% 来自于水电，40% 来自于风能及光伏发电。南亚地区的可再生能源比例在 7 个地区中居第 2 位，仅次于拉丁美洲地区，而继续提高可再生能源比例特别是风光发电比例也将是南亚地区未来能源发展的重点之一。但与此同时，南亚地区的空气污染物排放强度却在各地区中表现最差，碳排放强度得分也仅排在第 5 位，这说明南亚地区在化石能源使用的效率和污染控制方面存在较为严重的问题。此外，与撒哈拉以南非

洲相似，南亚地区同样也有高比例的传统生物质用能（约占能源总消费量的 28%），加剧了空气污染问题。因此，对于南亚地区来说，在继续提高可再生能源比例的同时，也需要提升对现有化石能源使用的管理水平，并且逐步淘汰传统生物质用能。

能源效率

南亚地区的单位 GDP 能源强度为 10.0MJ/\$（即 2.8kWh/\$），和前文所述撒哈拉以南非洲地区的强度相似，都明显高于世界平均水平，反映出了南亚经济体能源利用效率低的问题。

图 4-8 | 南亚各项指标得分（灰色为世界平均值）



这一现象一方面与能源利用效率本身有关，另一方面也离不开能源密集型产业造成的影响。与撒哈拉以南非洲不同的是，南亚地区的能源分配效率同样较低，损失在分配、传输和运输环节的能源占到了2.5%，其中最主要的能源损失来自于电能的传输与分配^[23]。这说明南亚地区的能源效率在用能和分配环节都存在着较大的提升空间。

可支付性

按每年人均电力消费 1000kWh 计算，在南亚地区的用电家庭，平均将有 6.1% 的可支配收入用在电费支出上（图 4-2），显著高于世界平均值。南亚地区的平均电力价格比世界平均值低 26% 左右，因此南亚地区较低的人均收入是导致可支付性表现较差的根本原因。在能源基础设施建设和能源普及取得了一定成果的情况下，能源成本造成的支出负担成为了推广现代能源的突出障碍。印度一项关于炊事燃料的调研指出，由于液化石油气的价格超过了其负担能力，有相当部分的印度家庭（主要分布在农村）在可以获取液化石油气的条件下仍然选择传统生物质作为炊事燃料^[22]，这也反映出了可支付性对于能源可持续转型造成的阻碍。

可靠性

南亚地区的能源可靠性总体表现较差，来源于其电力系统的低稳定性和能源进口的高依存度两个方面。南亚地区的月均停电次数达到了 25.5 次，其中表现最糟糕的孟加拉国和巴基斯坦更是达到了 60 次以上，意味着南亚的大部分地区缺少维持电力长期稳定供应的能力，这对于家庭用电和工商业部门

生产都带来了显著的负面影响，代表性的事件包括 2012 年的印度大停电^[24] 和 2022 年夏季在印度和巴基斯坦等南亚国家发生的大停电事件^[25, 26]，表明南亚地区能源系统在面对干扰和极端情况下缺乏稳定性与韧性。此外，南亚能源消费中有 34.7% 来自于进口，主要包括液化天然气、石油和煤炭，凸显出了南亚国家面对的能源安全挑战。



图 4-9 展示了南亚 5 国 2020 年的能源可持续性得分情况。可以看到，南亚国家的整体得分均在世界平均值之下。得分较高的斯里兰卡和印度分别以 64.5 和 63.8 分排在所有国家中的第 89 和 91 位，而得分较低的尼泊尔、孟加拉国和巴基斯坦均排在 100 位之后。总体来说，南亚国家间的能源可持续性差异不大，斯里兰卡较高的能源清洁度和印度较高的能源可及性使其能源可持续性得分略高于其他三个国家。尼泊尔的能源可及性和能源效率均为区域中的最低分，而孟加拉国与巴基斯坦在能源可靠性（特别是能源系统稳定性）方面表现糟糕，直接影响了两个国家的得分。

2011–2020 年间，南亚的能源可持续性得分一直保持上升趋势，由 2011 年的 53.3 分上升到

了 2020 年的 61.6 分，上升幅度达到了 15.6%，年均增长率为 1.6%，显著高于世界平均值（图 4-10）。

南亚地区能源可及性的快速提升是其能源可持续性得分的最主要动力（图 4-11）。能源可及性由 2011 年的 51.0 分提升到 2020 年的 69.9 分，其中农村电力普及率由 2011 年的 64.0% 提升到了 2020 年的 93.7%，实现了 3.6 亿农村人口的电力普及；清洁炊事燃料的普及率由 2011 年的 32.7% 提升到了 2020 年的 60.2%，标志着 5 亿人口从传统的生物质燃料转向使用液化石油气、天然气等更为清洁的炊事能源，城市电力普及率和终端用电电气化率也有了显著改善。可以说，南亚地区的现代能源快速普及是 2011–2020 年间全球能

图 4-9 | 南亚各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）

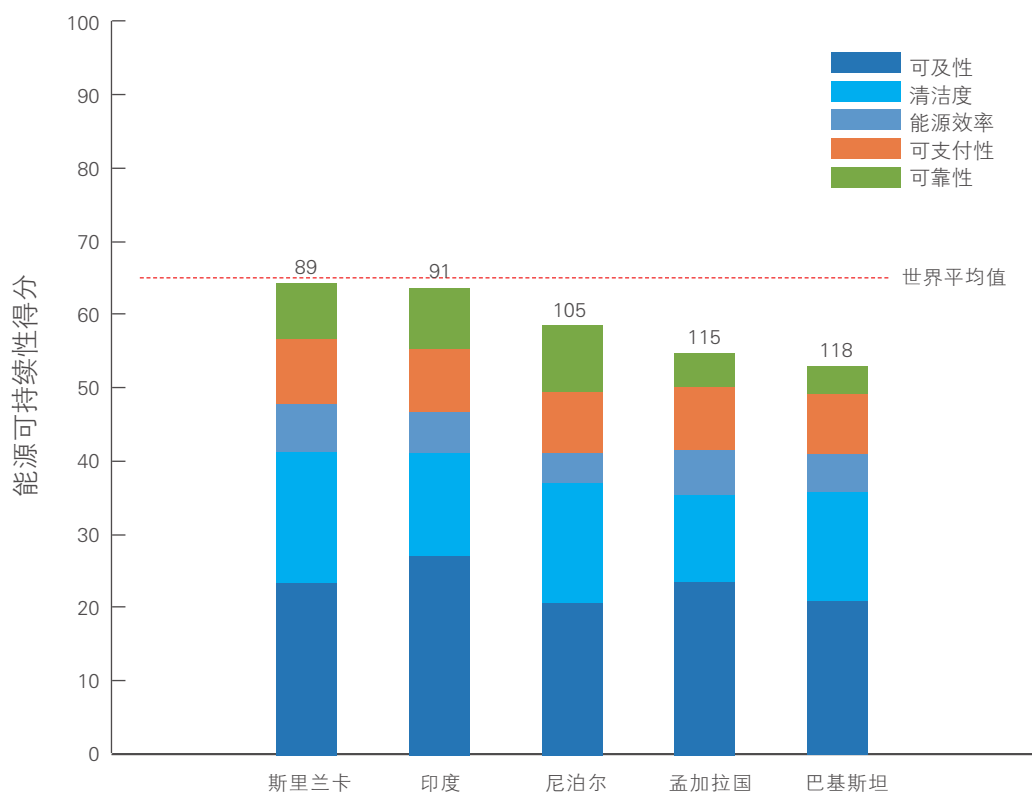


图 4-10 | 南亚 2011-2020 能源可持续性得分

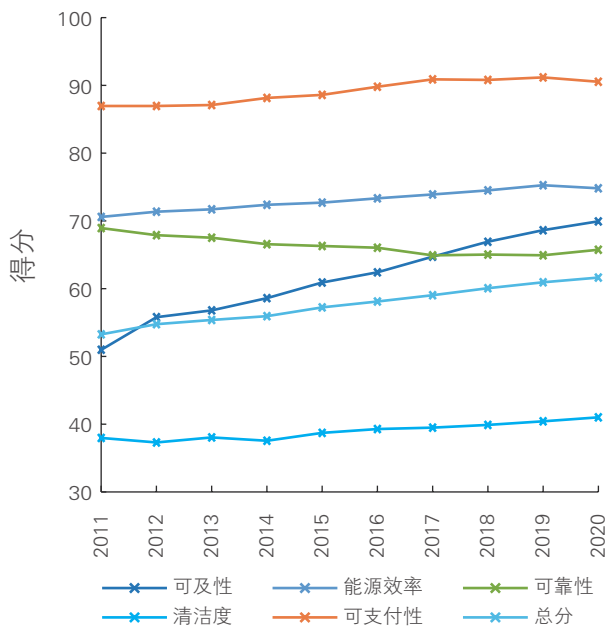
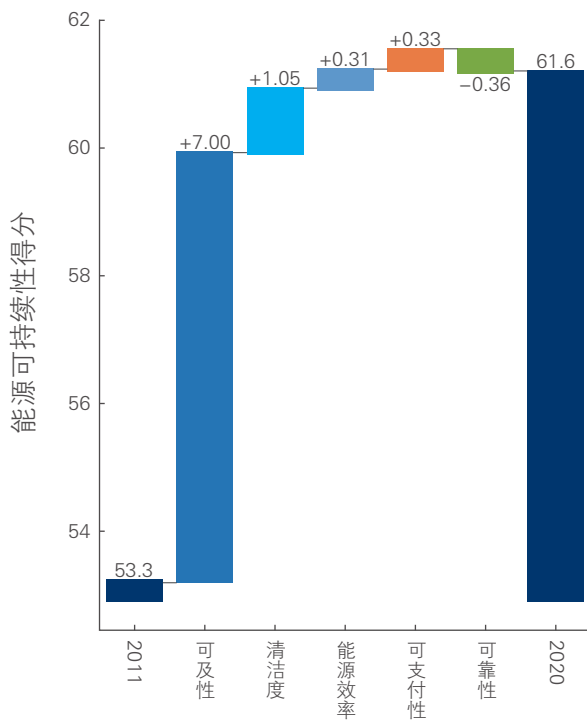


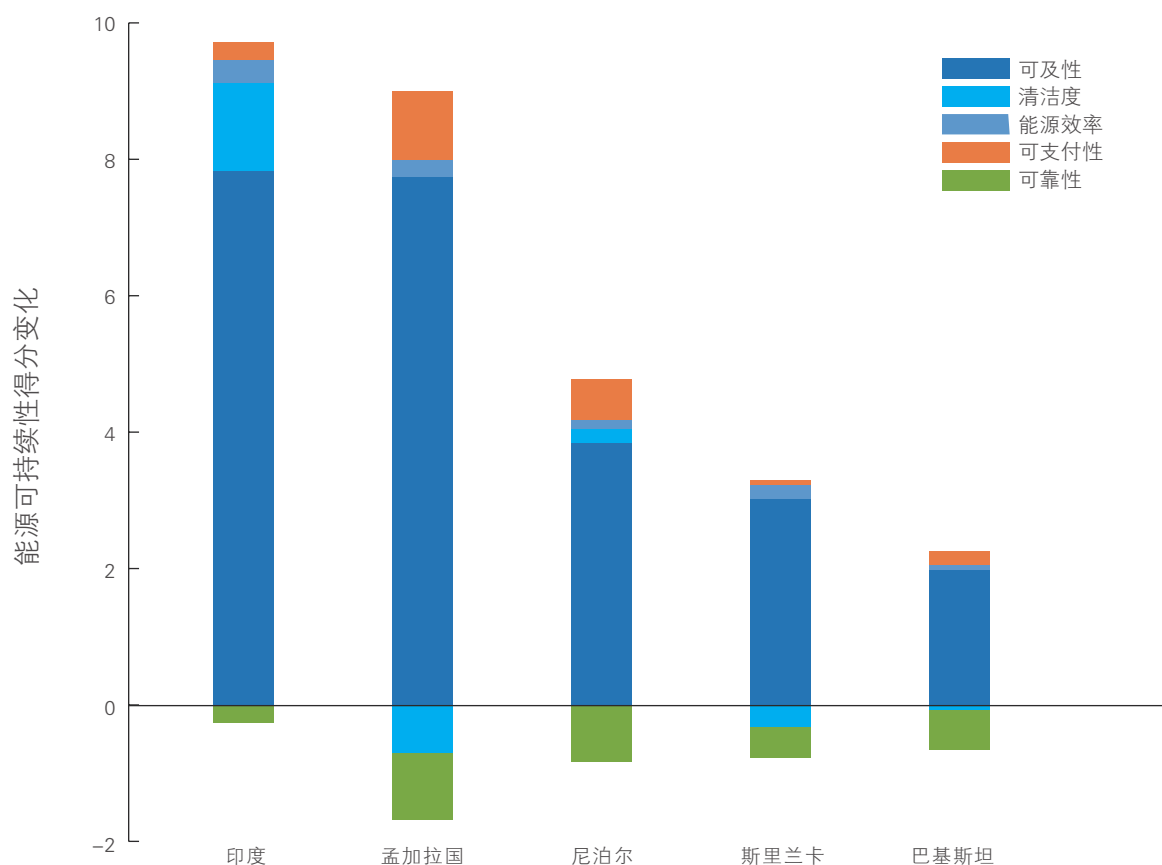
图 4-11 | 南亚 2011-2020 能源可持续性各维度变化



源可及性方面最为显著的成就。此外，在清洁度、效率和可支付性方面，南亚地区也有一定进步。但与此同时，南亚地区的能源可靠性出现了明显回落，其下降幅度甚至抵消了能源可支付性的上升，这一现象来自于化石能源进口比例的上升。在过去 10 年，随着能源系统特别是电力系统规模的扩张，南亚对化石能源的需求激增，也导致了能源安全问题的加剧。因此，在保证电力系统稳定性得到改善的前提下，遏制化石能源消费的进一步增长并推动可再生能源的替代，将会为提高能源清洁度和能源可靠性起到协同增效的作用。

南亚地区的 5 个国家在 2011-2020 年间能源可持续性均有增长，其中印度的增长幅度最大，达到了 17.5%，而增幅最小的巴基斯坦增长幅度仅有 3.2%。对于五个南亚国家来说，其共有的特征是能源可及性的提高和能源可靠性的下降。印度在能源可及性大幅上升的同时，还实现了能源清洁度的提升，可再生能源比例提高了 3.9%，污染物排放强度下降了 7.1%，能源效率和能源可支付性也稍有上升。相比之下，孟加拉国，斯里兰卡和巴基斯坦的能源清洁度都出现了一定程度的下降。此外，得益于经济发展和人均可支配收入的增长，孟加拉国和尼泊尔的能源可支付性也有一定程度的上升。

图 4-12 | 南亚各国 2011–2020 能源可持续性得分变化



4.3

Middle East and North Africa

中东与北非 (MENA)



16 个中东与北非国家被纳入到了本研究的评价范围中，其人口总数为 4.6 亿，占全球人口总数的 6.1%。中东与北非地区的人均 GDP 为 7304 美元（2020 年），略低于世界平均水平；地区内部的经济水平差异较大，既有人均 GDP 超过 2 万美元的以色列、巴林、沙特阿拉伯等国家，也有一些国家人均 GDP 仅有 4000–6000 美元（如伊拉克和利比亚）。

中东与北非地区 2020 年的能源可持续性总分为 66.3 分（图 3-4a），在全球 7 个地区中排在第 5 位。从能源可持续性的 5 个维度来看，中东与北非地区在可及性、可靠性和可支付性上高于世界平均水平（分别位于各地区中的第 3 位、第 5 位和第 4 位），而在清洁度和效率方面落后于平均水平，清洁度排在全球 7 个地区中的最后一位，而效率在各地区中排名第 6（图 4-13）。

可及性

中东与北非地区在农村电力普及率、城镇电力普及率和清洁炊事燃料普及率三个指标上都超过了 94%，基本实现了电力和炊事燃料的普及。该地区的电气化率落后于世界平均水平，进一步提升电气化率将是中东与北非地区下一阶段能源可及性方面的重点。

清洁度

中东与北非地区是全球 7 个地区中能源清洁度最差的地区，主要因为该地区极低的可再生能源占比（1.0%）。中东与北非地区拥有良好的油气资源禀赋，是全球最主要的石油与天然气生产与出口地区，这一方面意味着化石能源在这一

图 4-13 | 中东与北非能源可持续性各维度得分

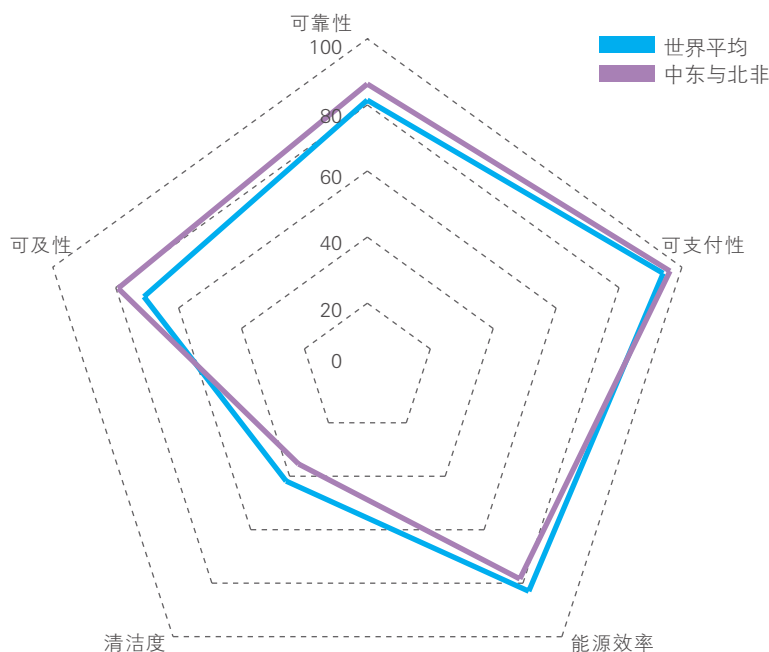
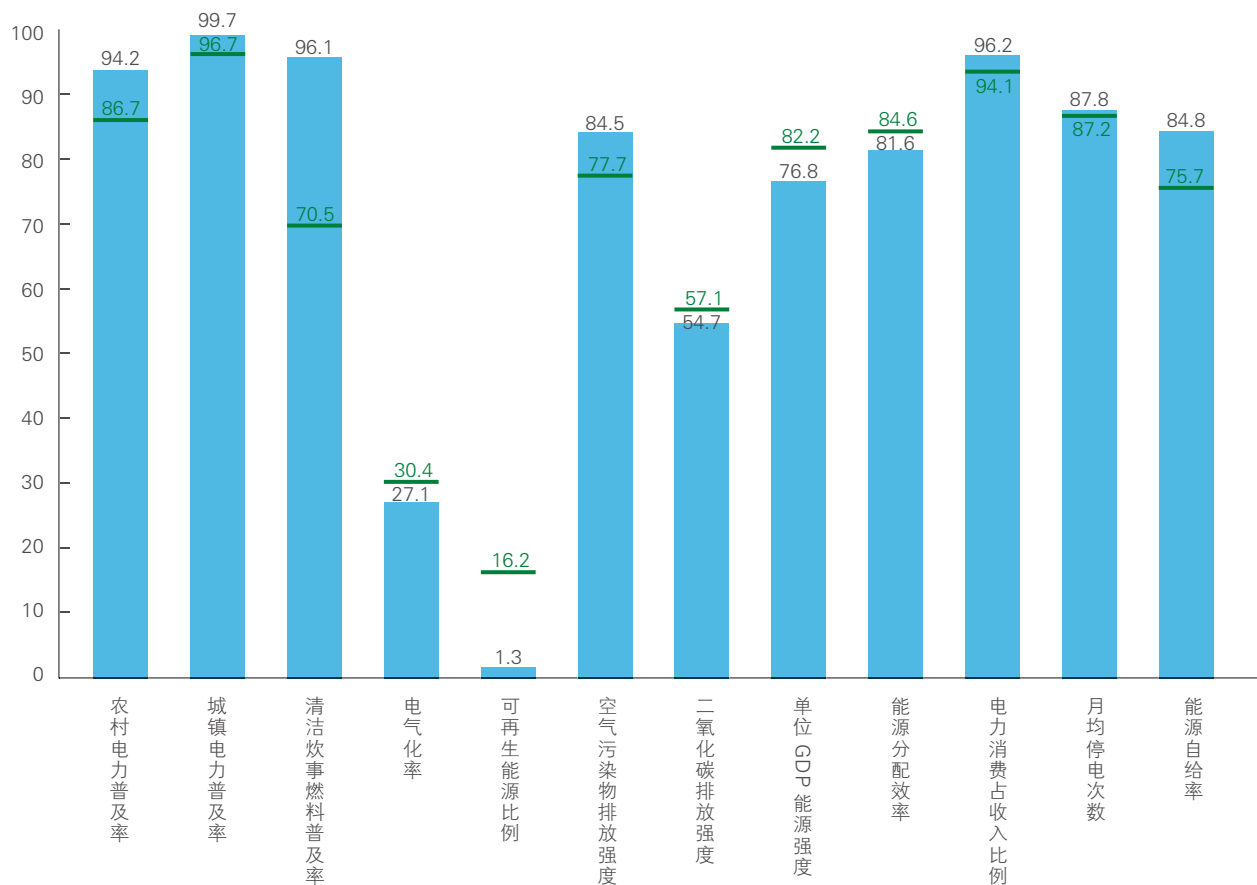


图 4-14 | 东与北非各项指标得分（灰色为世界平均值）



地区具有较大的成本优势，另一方面也使得大部分中东与北非国家的经济严重依赖油气生产和出口，实施能源转型所需要克服的惯性更大。从另一方面来说，中东与北非地区是面对气候变化最为脆弱的地区之一，利用该地区丰富的风光资源摆脱油气依赖既可以避免经济在全球化石能源需求下降的情况下遭受毁灭性打击，也有助于减缓气候变化对地区带来的负面影响^[27]。因此，如何克服化石能源依赖的惯性，实现能源的清洁转型，对于中东与北非地区来说将是其未来能源战略的核心议题。

能源效率

中东与北非地区单位 GDP 的能源强度为 8.5MJ/\$（即 2.4kWh/\$），是世界平均值 4.9MJ/\$ 的 1.7 倍，高于除南亚和撒哈拉以南非洲以外的各个地区。从能源分配效率来说，中东与北非在分配环节的能源损失高达 2.1%，同样高于世界平均水平。中东与北非的能源效率问题有多方面的原因，包括该地区广泛存在的化石能源补贴、经济结构中的重工业（特别是化工）依赖，以及制冷和海水淡化带来的额外能源需求等^[28, 29]。随着人口增长、经济发展以及气候变化影响的加剧，中东与北非地区未

来的能源需求将会进一步上升。因此，需要通过削减化石能源补贴、推广能效提升措施和调整经济结构等手段提高能源效率，以确保能源转型的实现^[30]。

可支付性

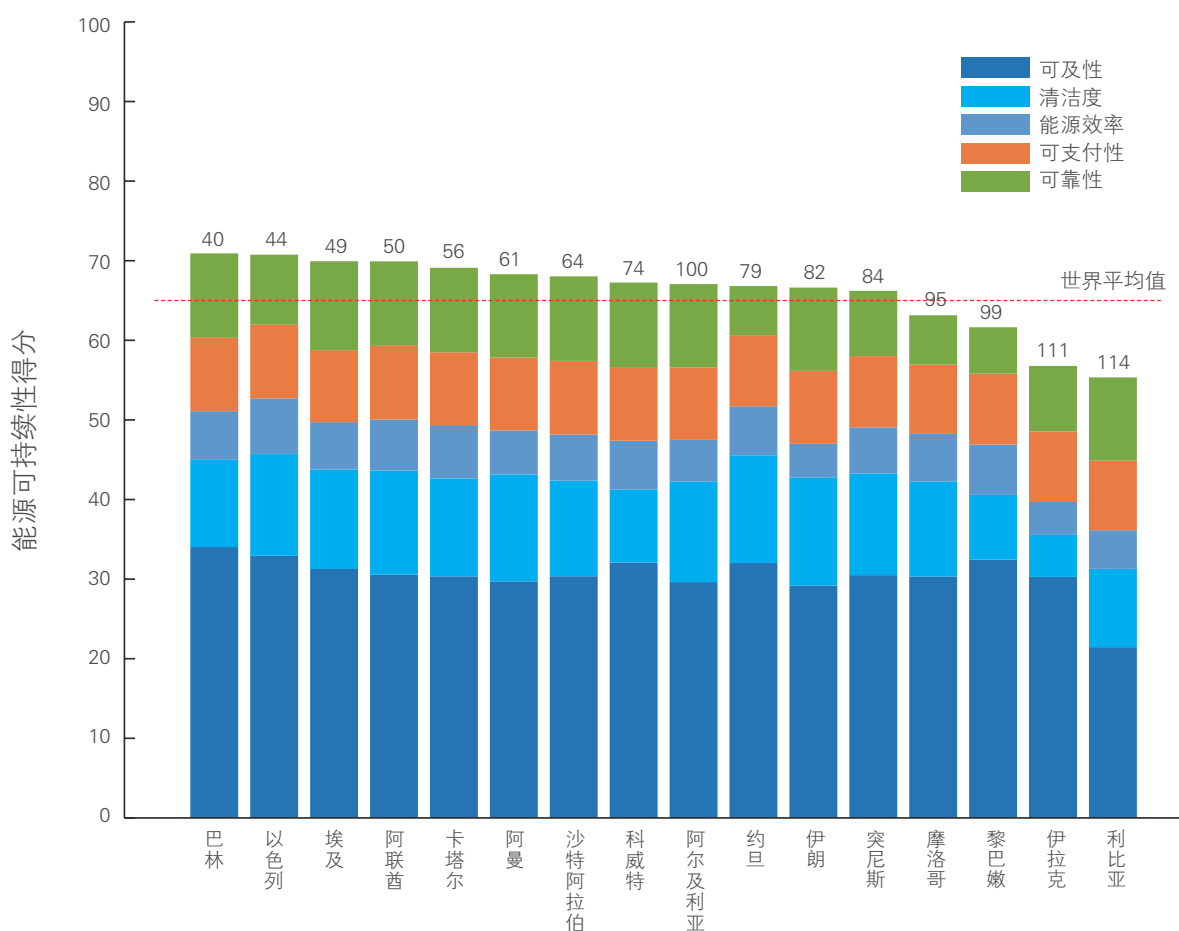
中东与北非地区的电费支出负担为居民平均收入的 2.4% 左右，低于 3.9% 的世界平均值。大部分国家的电价较低，电费支出负担在 2.5% 以下，只有摩洛哥，黎巴嫩，利比亚和伊拉克四个国家由

于居民收入较低，电费支出负担达到了 4% 以上。整体来说，中东与北非地区的能源可支付性较好，能源支出负担较重的问题主要出现在少数经济欠发达国家。

可靠性

作为主要的油气资源出口地区，中东与北非地区的能源自给率达到 84.8%，高于世界平均水平 and 大部分其他地区。从月均停电次数来说，中东与北非地区的表现与世界平均水平近乎持平，地区

图 4-15 | 中东与北非各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）



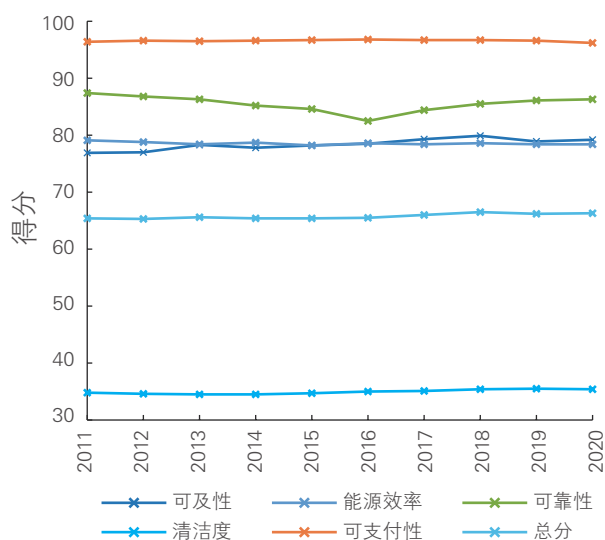
内的伊拉克、利比亚、伊朗等国表现较差，电力系统稳定性有待提升。

图 4-15 展示了中东与北非 16 个国家在 2020 年的能源可持续性得分。16 个国家中有 12 个得分位于平均值之上，其中得分最高的巴林以 70.9 分排在各国中的第 40 位，以色列、埃及、阿联酋和卡塔尔等国位居其后。得分最低的利比亚仅有 55.3 分，位于各国中的第 114 位，其能源可及性和能源可支付性方面的较差表现是得分低的主要原因。此外，黎巴嫩和伊拉克两个国家在能源清洁度方面的较差表现导致了其排名靠后。

中东与北非地区的能源可持续性在 2011–2015 年间变化不大，2016–2018 年呈现缓慢的上升趋势，2019 年有所回落，2020 年又恢复了增长。2011–2020 年间，中东与北非地区的能源可持续性得分由 65.4 上升到 66.3，增长幅度仅有 1.4%，年均增长率为 0.2%，是全球增长最慢的地区（图 4-16）。

在中东与北非的能源可持续性增长中，可及

图 4-16 | 中东与北非 2011–2020 能源可持续性得分



性的贡献最为显著，主要原因为摩洛哥、伊拉克和阿尔及利亚电力普及率的上升以及科威特、沙特阿拉伯、以色列和约旦电气化率的提高，使地区整体的农村电力普及率和电气化率分别增长了 4.8% 和 3.7%。在清洁度上，中东与北非国家的可再生能源比例在 2011–2020 年间没有增长，但空气污染物和 CO₂ 排放强度分别下降了 2.1% 和 2.5%，使得清洁度略有升高。在能源效率、可支付性和可靠性方面，中东与北非地区均出现了一定幅度的下降。从整体上看，中东与北非地区在 2011–2020 年间能源可持续性的进步十分缓慢，且主要来自于部分国家的能源可及性上升，而在能源可持续性的其他维度上提升不大，甚至出现了倒退。

在中东与北非的 16 个国家中，约旦在 2011–

图 4-17 | 中东与北非 2011–2020 能源可持续性各维度变化

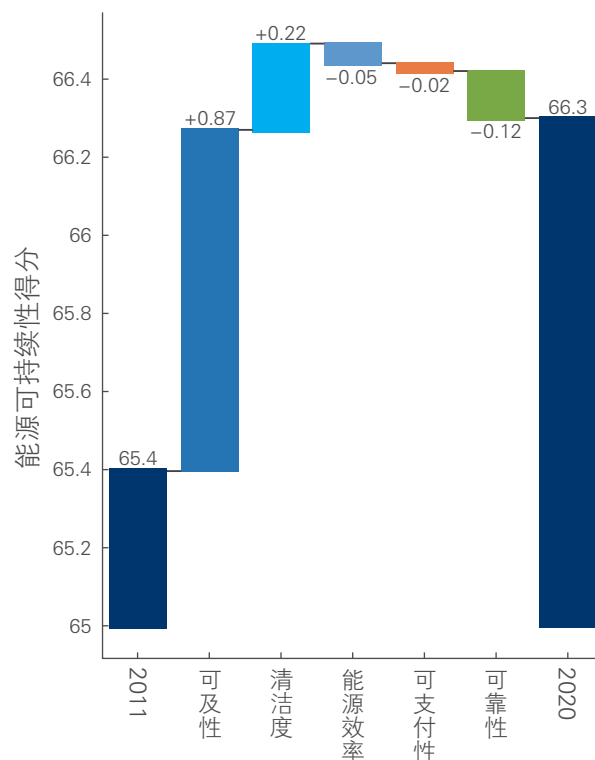


图 4-18 | 中东与北非各国 2011–2020 能源可持续性得分变化



2020 年间的进步最快，能源可持续性得分提升了 7.1%，主要源于其能源清洁度的上升。黎巴嫩和以色列在能源可靠性上均有显著上升，其中黎巴嫩的上升是由于其电力系统稳定性上升（停电次数下降），而以色列则是在能源自给率上有所改善。相比之下，突尼斯和伊拉克两个国家出现了较为明显的能源可持续性倒退，其中突尼斯的能源自给率在

十年间下降了 31.3%，其主要原因是国内石油和天然气产量的降低；而伊拉克的能源清洁度和能源效率下降显著，空气污染物和 CO₂ 排放强度大幅度上升，能源传输的损失率也由 4.8% 增长到了 11.6%，表明了伊拉克的能源基础设施在运行和维护方面出现的问题。



东亚与太平洋地区的 16 个国家 2020 年共有人口 23.2 亿，是 7 个地区中人口最多的，占全球人口的 30.7%，其中中国、印度尼西亚、日本、菲律宾四个国家的人口总数超过了 1 亿。东亚与太平洋地区的人均 GDP 为 11136 美元，高于世界平均值，但地区内部各个国家的经济水平差异巨大，既有日本、韩国、澳大利亚、新西兰、新加坡等发达国家，也有柬埔寨、老挝这样的最不发达国家，以及位于其间的中等收入国家。

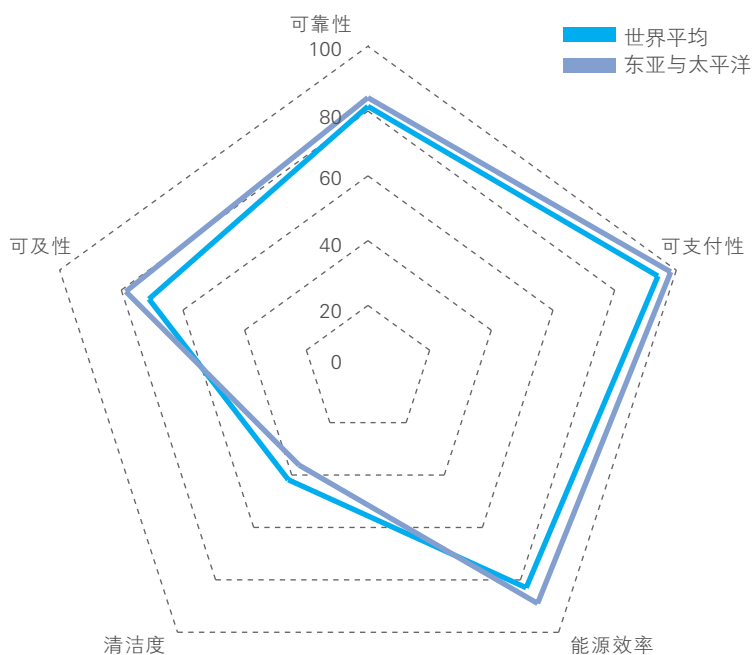
东亚与太平洋地区 2020 年的能源可持续性总分为 67.0 分（图 3-4a），在全球 7 个地区中位居第 4。从能源可持续性的 5 个维度来看，东亚与太平洋地区的可及性、效率和可支付性明显优于世界平均水平，在各地区中分别位于第 3 名、第 2 名和第 3 名，仅次于以发达国家为主的欧洲与中亚地区和北美地区。在能源可靠性上，东亚

与太平洋地区略高于平均水平，在各地区中排名第 5。东亚与太平洋地区在清洁度上的表现较差，在各地区中位于第 6 位，仅高于中东与北非地区（图 4-19）。

可及性

东亚与太平洋地区的农村和城镇电力普及率均达到了 95% 以上，基本上实现了电力的普及，仅在部分国家（如缅甸、柬埔寨、印度尼西亚）的农村地区还存在着一定比例的供电缺口（图 4-20）。东亚与太平洋地区清洁炊事燃料的普及率达到了 77.4%，其中未能实现清洁炊事燃料普及的国家包括除马来西亚和新加坡外的东南亚国家，以及中国和蒙古；电气化率达到了 25.8%，是各个地区中最高的（图 4-20）。总体来说，东

图 4-19 | 东亚与太平洋能源可持续性各维度得分



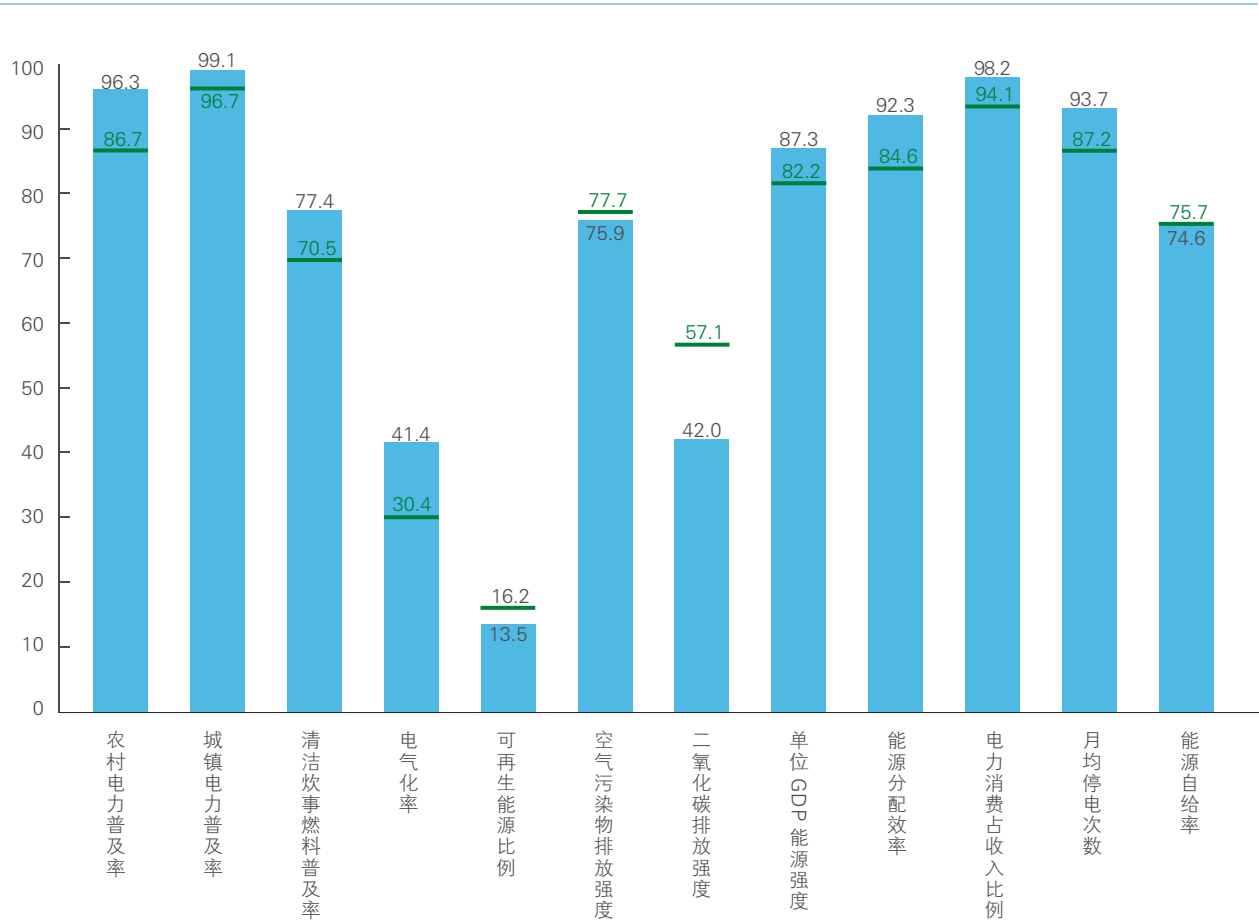
亚与太平洋地区的能源可及性较高，目前存在的问题主要集中在该地区发展较为滞后的国家。

清洁度

清洁度是东亚与太平洋地区能源可持续性的短板。东亚与太平洋地区的可再生能源占比为10.2%，在各个地区中排在第5位，而空气污染物和CO₂排放强度均为各地区中的最高值，显著高于世界平均水平。较低的可再生能源占比决定了东亚与太平洋地区能源清洁度的糟糕表现，而

以煤为主的化石能源结构也进一步加剧了能源清洁度问题。以其中的代表性国家中国为例，其2020年一次能源消费中有83.5%为化石能源消费，化石能源消费中又有超过2/3是煤炭消费。尽管中国等国家已经在通过提高末端控制水平等手段来减少燃煤的环境影响^[31]，其带来的污染物排放和碳排放仍然显著高于天然气。从另一个角度来说，这也意味着利用可再生能源替代化石能源（特别是煤炭）对于东亚与太平洋地区能源清洁化的收益更高。

图 4-20 | 东亚与太平洋各项指标得分（灰色为世界平均值）



能源效率

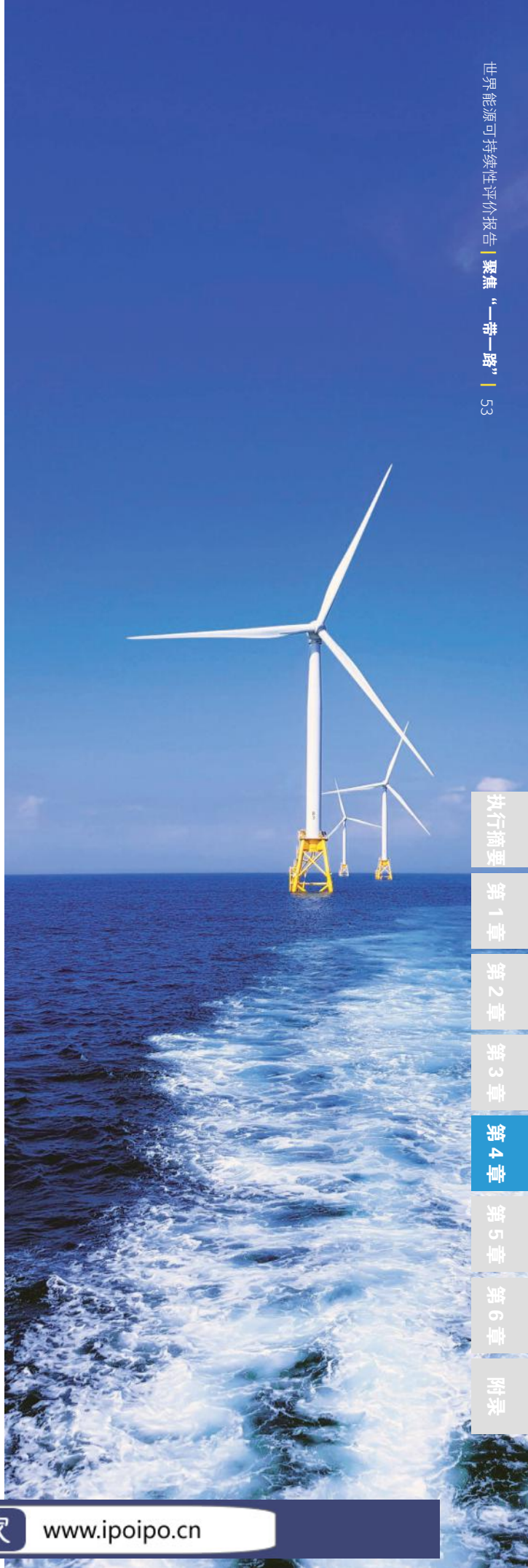
东亚与太平洋地区的单位 GDP 能源强度为 5.1MJ/\$（即 1.4kWh/\$），与世界平均水平接近；地区中经济发展较快的国家，如澳大利亚、新西兰、日本和新加坡，能源强度明显低于其他国家。能源分配效率则是各个地区中最高的，仅有 0.9% 的能源损失在了分配、传输和运输环节。对于东亚与太平洋地区来说，能源效率进一步提高的潜力主要在于提升地区内发展中国家的用能效率。

可支付性

按每年人均电力消费 1000kWh 计算，东亚与太平洋地区的用电家庭平均有 1.2% 的可支配收入用在电费支出上（图 4-2），低于世界平均值。东亚与太平洋地区的发达国家人均收入较高，而发展中国家的电力价格一般都低于世界平均水平（如中国和印度尼西亚），使得该地区电力支出造成的家庭经济负担较轻。特别地，对于柬埔寨和缅甸两个国家，需要关注其人均收入较低造成的电力可支付性问题。

可靠性

东亚与太平洋地区的电力稳定性明显高于世界平均水平，除了文莱、柬埔寨和缅甸三个国家外，其他国家的月均停电次数均低于 0.4 次。在能源安全方面，地区平均的能源自给率为 74.6%，略低于世界平均水平。日本、韩国和新加坡三个国家的能源安全问题尤其突出，其能源需求均有 80% 以上依赖于进口；越南、菲律宾、柬埔寨和泰国四个东



南亚国家的能源自给率在 40%–60% 之间；中国的能源自给率为 79.9%，其中 77.4% 的原油依赖于进口，考虑到中国能源消费量和能源进口量之大，中国的能源安全挑战同样严峻。

图 4-21 展示了东亚与太平洋 16 个国家在 2020 年的能源可持续性得分。其中，10 个国家高于世界平均值，6 个国家低于世界平均值。表现最好的新西兰得到了 77.8 分，位于所有国家中的第 9 位，明显高于地区中的其他国家，主要源于其能源清洁度方面的突出表现，可再生能源占比达到了 29.7%。相对应的，地区中柬埔寨、老挝、蒙古和缅甸等国家的能源可持续性表现较差，其中东南亚的柬埔寨、老挝和缅甸在能源可及性上还有明显的落后，而蒙古的能源效率和能源清洁

度都是整个地区中最差的，拉低了其能源可持续性得分。

东亚与太平洋地区的能源可持续性在 2011–2020 年保持上升趋势，由 2011 年的 62.6 分上升到了 2020 年的 67.0 分，增长幅度为 6.9%，年均增长率为 0.8%，增长速度在各地区中仅次于南亚地区（图 4-22）。

能源可及性的上升是推动东亚与太平洋地区 2011–2020 年能源可持续性变化的主要驱动力（图 4-23），过去十年间地区的能源可及性上升了 11.3%，地区的农村电力普及率上升了 2.9%，清洁炊事燃料普及率上升了 18.9%，电气化率上升了 6.5%，柬埔寨、蒙古、老挝和印度尼西亚等发展中国家电力和清洁炊事燃料的进一步普及

图 4-21 | 东亚与太平洋各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）

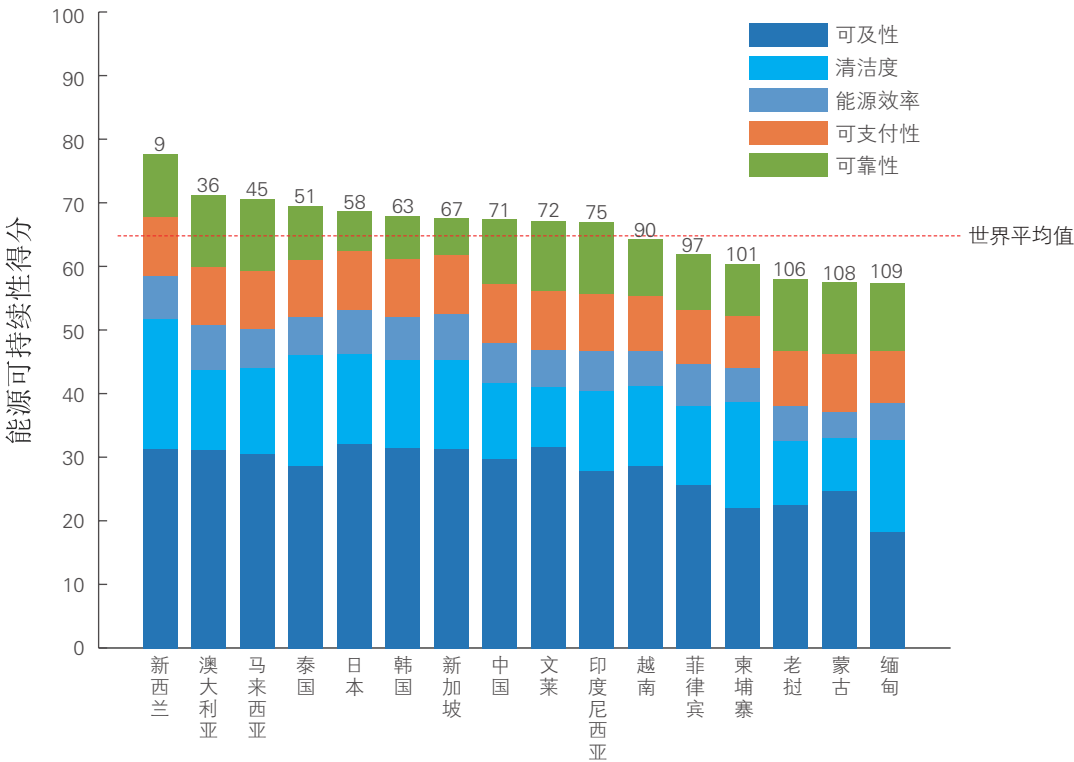


图 4-22 | 东亚与太平洋 2011–2020 能源可持续性得分

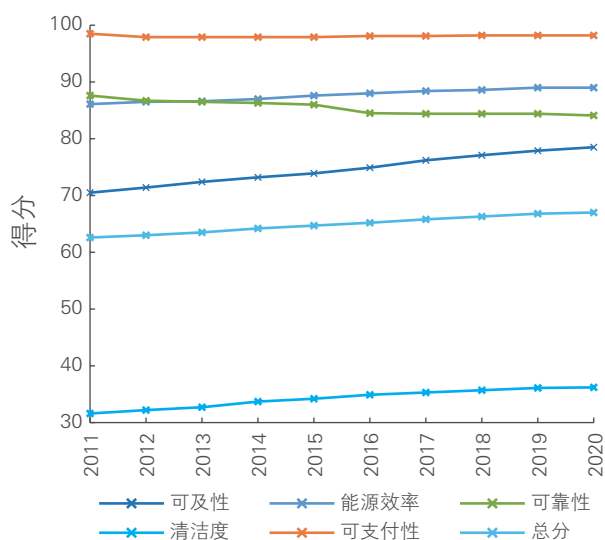
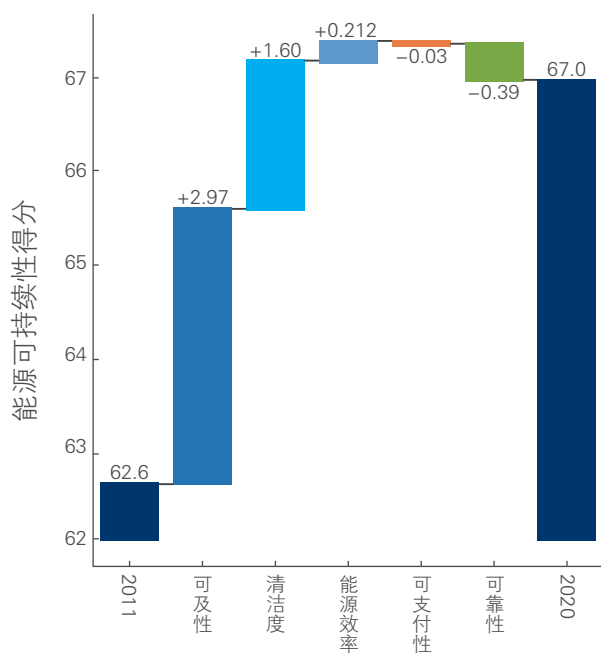


图 4-23 | 东亚与太平洋 2011–2020 能源可持续性各维度变化

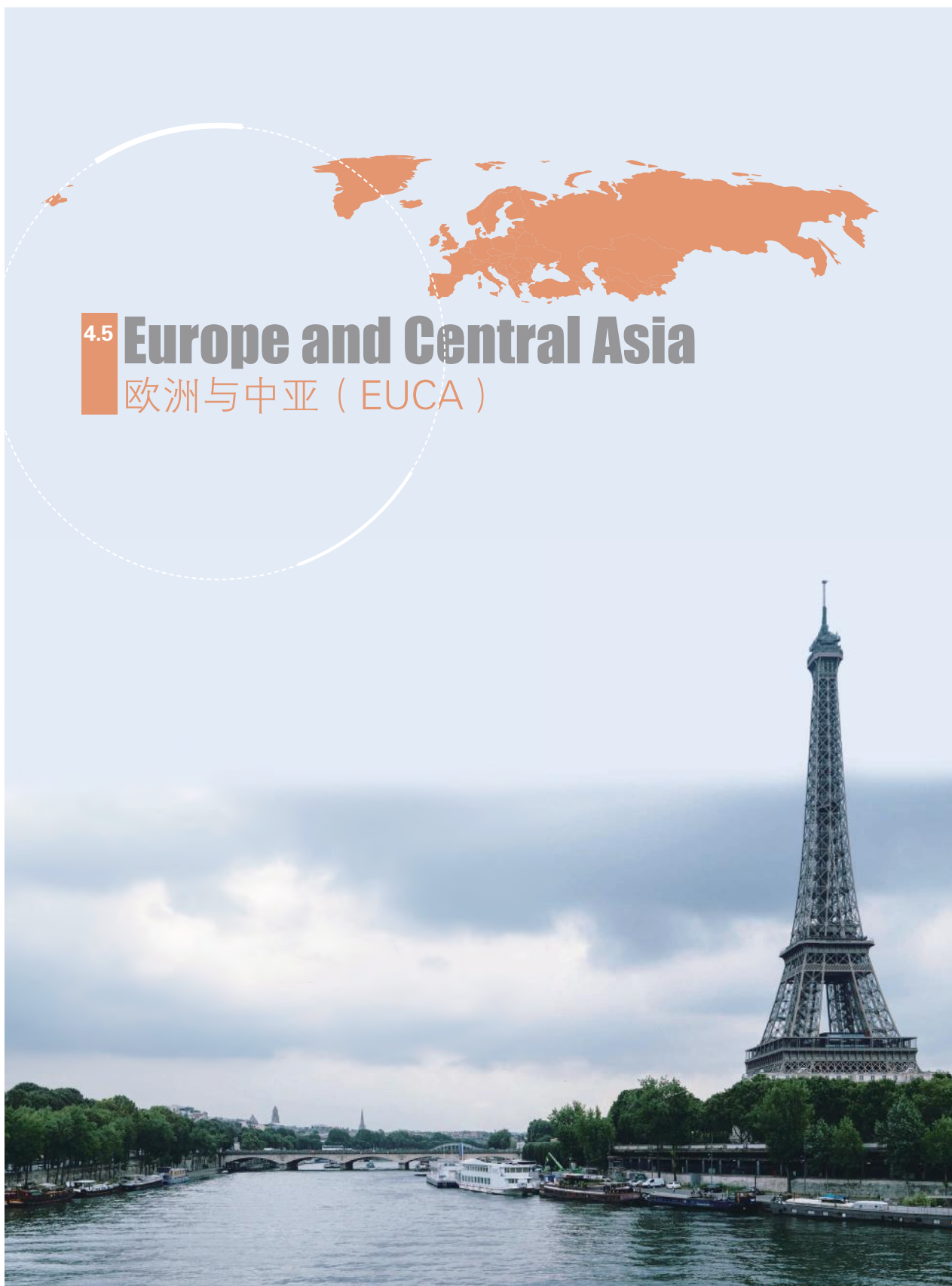


最为显著。在可及性之外，东亚与太平洋地区的能源清洁度也有了较为明显的改善，能源清洁度上升了 14.6%，可再生能源比例提高了 4.8%。地区在能源效率上略有提升，在可支付性和可靠性上则出现了一定程度的倒退，其中较为严重的是能源自给率下降反映出的能源安全挑战。从能源可持续性的整体视角来说，东亚与太平洋地区在能源可及性和能源清洁度的发展上取得了一定的进展，但在能源需求增加、化石能源进口量上升的背景下，能源可靠性下降带来的问题也日益凸显。

在东亚与太平洋的 16 个国家中，柬埔寨和蒙古 2011–2020 年的能源可持续性提升幅度最大，中国、印度尼西亚、缅甸和泰国等也都有明显的进步。其中，可及性的提高是这些国家能源可持续性提升的共同原因。缅甸、柬埔寨、老挝和蒙古的农村电力普及率提高了 20%–70%，而缅甸、中国、柬埔寨和印尼等国家的清洁炊事燃料普及率也有了 20%–40% 的增长。可以说，2011–2020 年是东亚与太平洋地区的部分国家快速摆脱能源贫困的阶段。此外，中国、柬埔寨、泰国和马来西亚等国在能源清洁度上也取得了一定进步，主要来自于其可再生能源占比的上升。相比之下，越南、文莱、老挝和新西兰四个国家的能源可持续性出现了下滑，其中越南、文莱和老挝三个国家能源清洁度的大幅下降抵消了其在能源可及性上的进步，特别是老挝，在实现了 42% 的农村通电率提升的同时，污染物排放强度上升了 1 倍有余，碳排放强度更是达到了之前的 5.7 倍，主要原因为化石能源消耗量的增长。这一现象也说明依靠化石能源来摆脱能源贫困的发展路径无法满足能源可持续转型的要求。

图 4-24 | 东亚与太平洋各国 2011–2020 能源可持续性得分变化





4.5 Europe and Central Asia

欧洲与中亚 (EUCA)

欧洲与中亚地区 2020 年的人口总数为 9.2 亿，占世界总人口数的 12.1%。地区内西欧国家以发达国家为主，东欧和中亚地区则多为发展中国家，地区的人均 GDP 为 22898 美元（2020 年），显著高于世界平均水平。东欧和中亚地区共有 47 个国家被纳入了评价范围。

欧洲与中亚地区 2020 年的能源可持续性总分为 71.1 分（图 3-4a），在全球 7 个地区中排在第 3 位。从能源可持续性的 5 个维度来看，欧洲与中亚地区在可及性、清洁度、能源效率和可支付性上均高于世界平均水平（图 4-25），其中可及性、清洁度和可支付性都位于世界各地区中的第 2 位，效率位于第 3 位。可靠性则低于世界平均水平，位于各地区中的第 6 位，仅高于南亚地区。

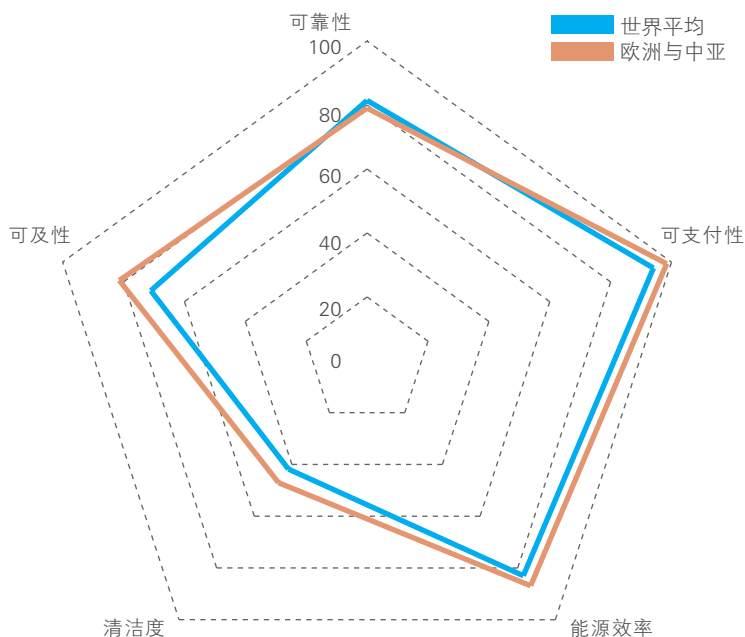
可及性

欧洲与中亚地区的农村和城镇电力普及率都达到了 100%，清洁炊事燃料普及率达到 95.2%，实现了现代能源的普及。在电气化率上，欧洲与中亚地区为 19%，与世界平均水平相近，其中北欧和西欧的电气化水平高于东欧。整体来说，欧洲与中亚地区的能源可及性较好，在电气化水平上存在着一定提升空间。

清洁度

欧洲与中亚地区可再生能源比例为 13.6%，在各地区中位于前列，但与欧洲地区的可再生能源目标还存在较大差距^[32]，且区域内部的差异较大，北欧和西欧的可再生能源占比明显高于东欧和中

图 4-25 | 欧洲与中亚能源可持续性各维度得分



亚地区。在污染物和碳排放强度上，欧洲与中亚地区均位列第2位，其中碳排放强度同样呈现出了明显的北欧、西欧优于东欧、中亚的特征，而空气污染物排放强度的地区内部差异不大。作为能源清洁度的领先地区，欧洲与中亚地区还需要进一步提高其可再生能源比例，以达成其国家、地区层面的目标并助力全球气候目标的实现。

反映出了欧洲与中亚地区能源效率方面的优势。但另一方面，欧洲与中亚地区的能源分配效率较差，平均有2.5%的能源损失在了分配、传输和运输环节。因此，对于欧洲与中亚地区，通过对能源基础设施的升级改造和维护，改善能源分配效率，是一个提升能源效率表现的潜在选项。

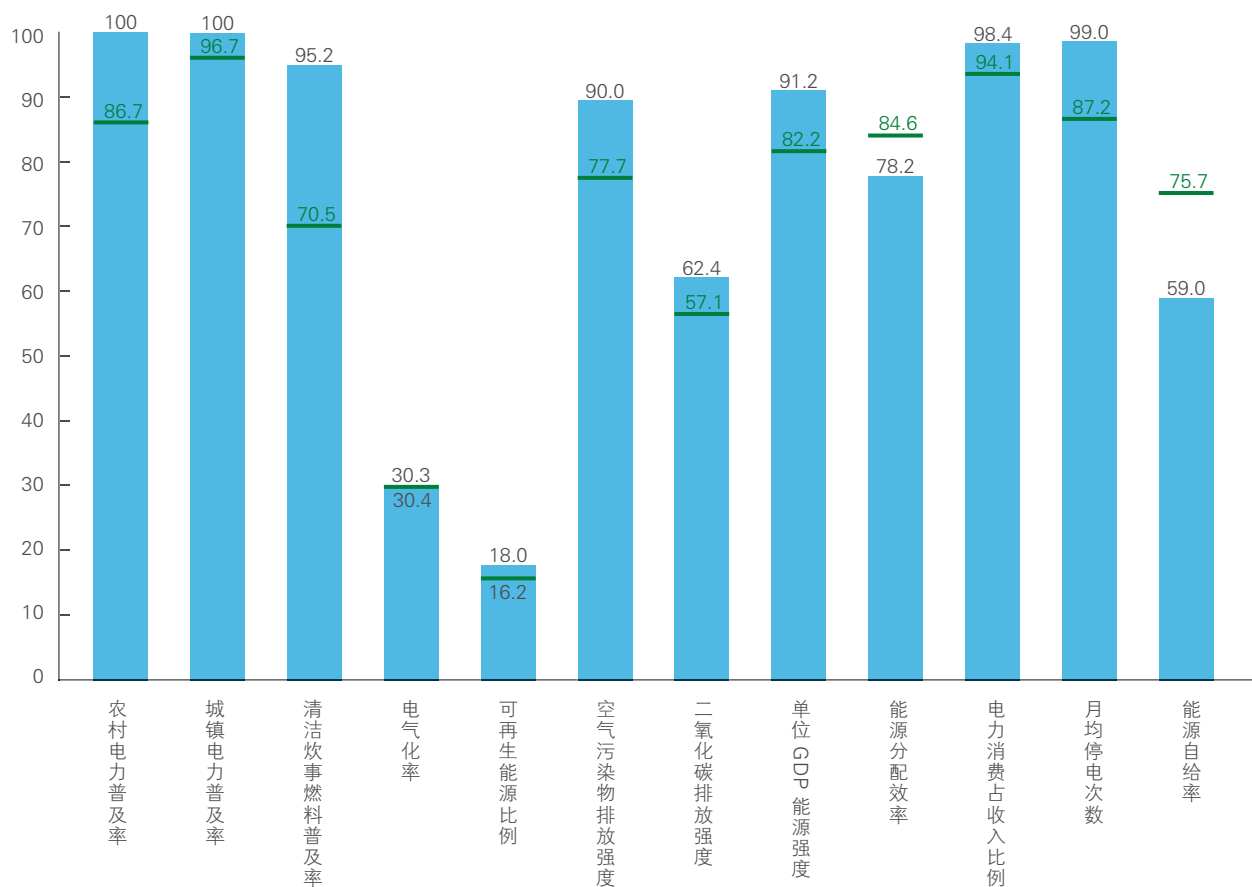
可支付性

能源效率

欧洲与中亚地区单位GDP能源强度为3.8MJ/\$（即1.1kWh/\$），低于世界平均值4.9MJ/\$，

欧洲与中亚地区的能源可支付性较高，2020年的电费支出仅占收入的1.0%，但这一结果掩盖了地区的能源价格问题，特别是西欧和北欧的能源

图 4-26 | 欧洲与中亚各项指标得分（绿色为世界平均值）



价格，明显高于世界的平均水平和地区中的其他国家。这一隐藏的危机在 2022 年初开始的俄乌冲突后出现了爆发：受到战争的影响，欧洲地区的能源价格迅速上升，这使得欧洲家庭的生活成本上升了 7%^[33]。在这样的背景下，欧洲国家应利用政策手段将能源价格调控在合理范围内，并通过制定长期的能源发展战略保持能源价格的稳定。

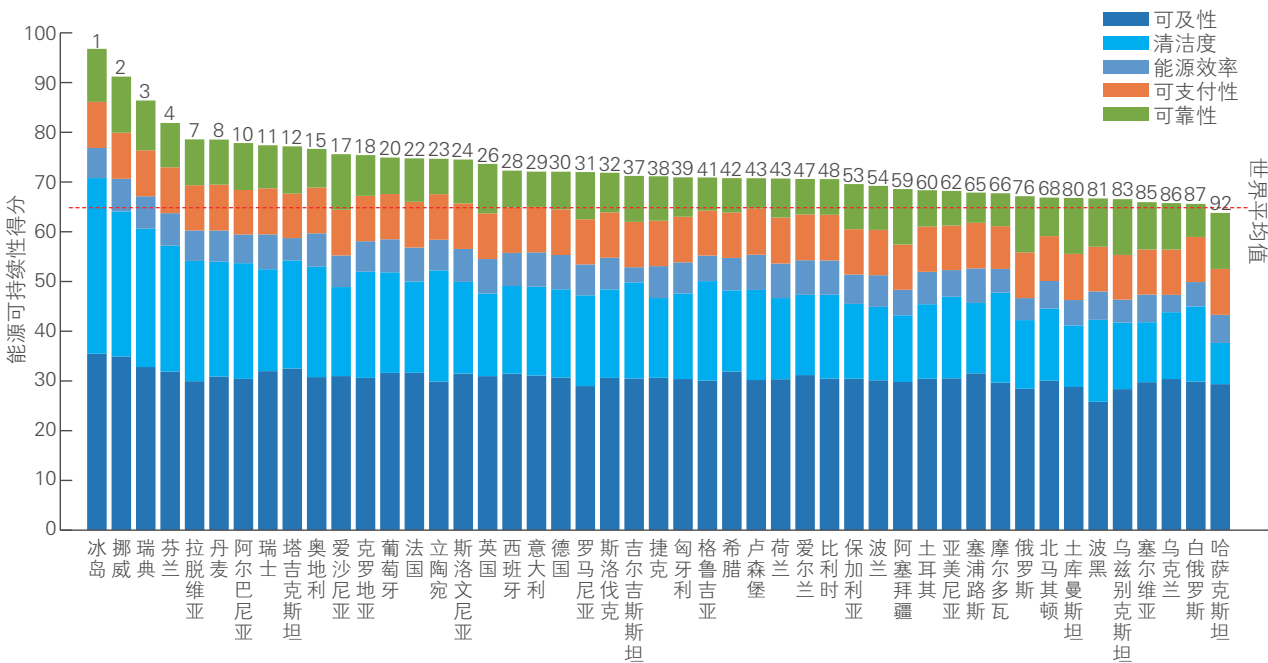
可靠性

欧洲与中亚地区的电力系统稳定性较好，其能源可靠性方面的问题主要体现在能源的高度进口依赖上。欧洲与中亚地区有 41% 的能源需求需要通过进口满足，以石油和天然气的进口为主。其中西欧国家的能源进口依赖现象最为严重，法国、德国、西班牙和意大利分别有 45.1%、

63.3%、68.4% 和 74.4% 的能源消费来自于能源进口，而大部分的东欧和中亚国家作为能源出口国，基本不存在这一问题。在俄乌冲突之后，能源安全成为欧洲能源领域最为重视的话题，针对这一问题，根本性的解决途径是实现化石能源的可再生能源替代，以此实现能源清洁化和能源安全的协同增效^[34]。

图 4-27 展示了 47 个欧洲和中亚国家 2020 年能源可持续性的得分。其中，除哈萨克斯坦以外的国家均在平均值之上。欧洲与中亚国家的地区内部排名主要由能源清洁度决定，地区中表现最好的一批国家，包括冰岛、挪威、瑞典和芬兰等，在全球 140 个国家中的排名同样位于最前列，能源清洁度是其表现良好的关键，冰岛、挪威、瑞典和芬兰的可再生能源占比分别达到了 81.1%、62.4%、52.9% 和 45.8%，显著高于其他国家。另一方面，

图 4-27 | 欧洲与中亚各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）



东欧和中亚国家在地区中的表现相对较差，如哈萨克斯坦，尽管能源可及性、能源效率、可支付性和可靠性都与冰岛相差不多，哈萨克斯坦的能源结构中只有 1.7% 的可再生能源，直接导致其能源可持续性在地区中位列末尾。

欧洲与中亚地区的能源可持续性得分在 2011–2020 年间保持了上升趋势，由 2011 年的 69.8 分上升到了 2020 年的 71.1 分，增长幅度为 1.9%，年均增长率为 0.2%，均低于世界平均值（图 4–28）。

对于欧洲与中亚地区来说，清洁度的改善是地区能源可持续性上升的主要原因。该地区的能源清洁度在 2011–2020 提高了 8.8%，其中可再生能源比例由 10.8% 上升到了 13.6%，碳排放强度相比于 2011 年水平下降了 11.9%。能源效率在单位 GDP 能源强度和能源分配效率增长的拉动下略

图 4–28 | 欧洲与中亚 2011–2020 能源可持续性得分

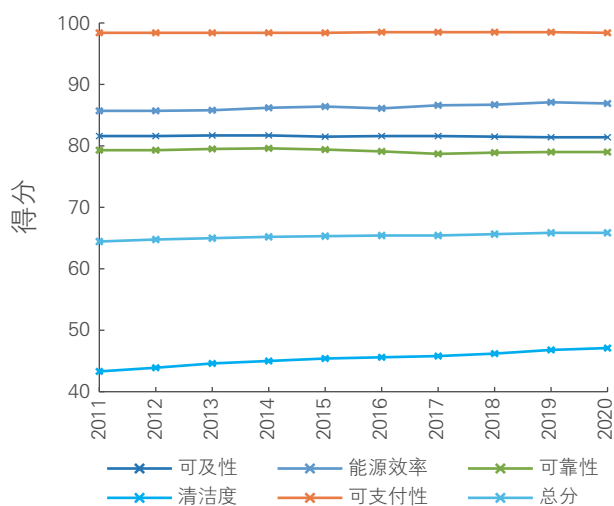
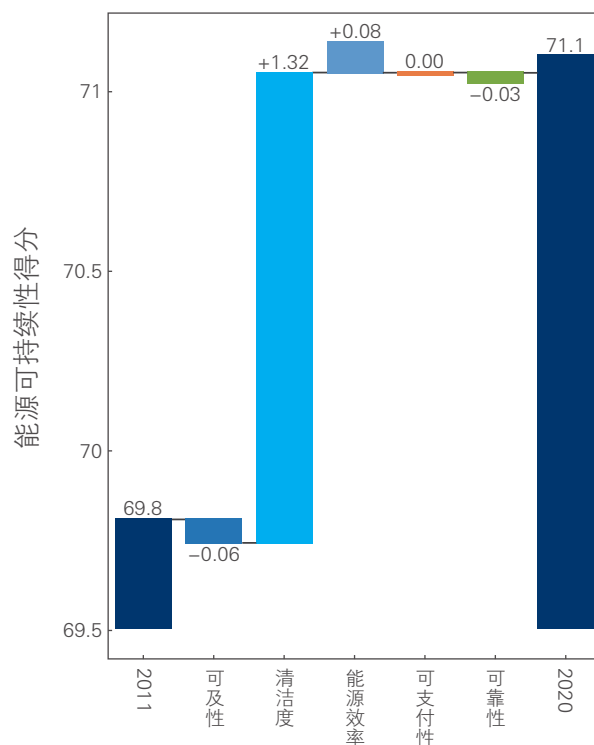


图 4–29 | 欧洲与中亚 2011–2020 能源可持续性各维度变化



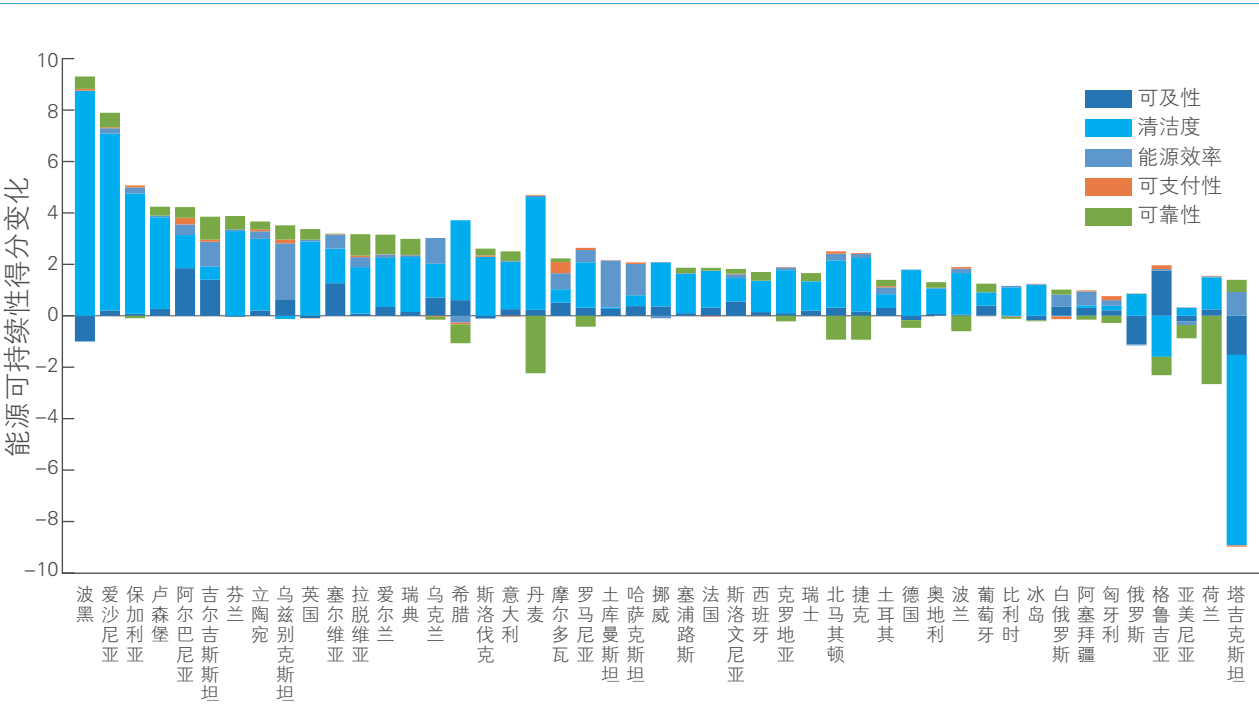
有提高。而能源可及性和可靠性则均出现了下降。其中，能源可及性的下降主要是由于俄罗斯的清洁炊事燃料利用率出现了 9.8 个百分点的回落，而能源可靠性的下降则来源于欧洲近十年来能源进口率的上升。总体来说，欧洲与中亚地区在 2011–2020 阶段的能源可持续性提升速度较慢，清洁度虽有一定进步，但增长幅度并不理想；此外，其他维度上出现的倒退趋势也值得注意。

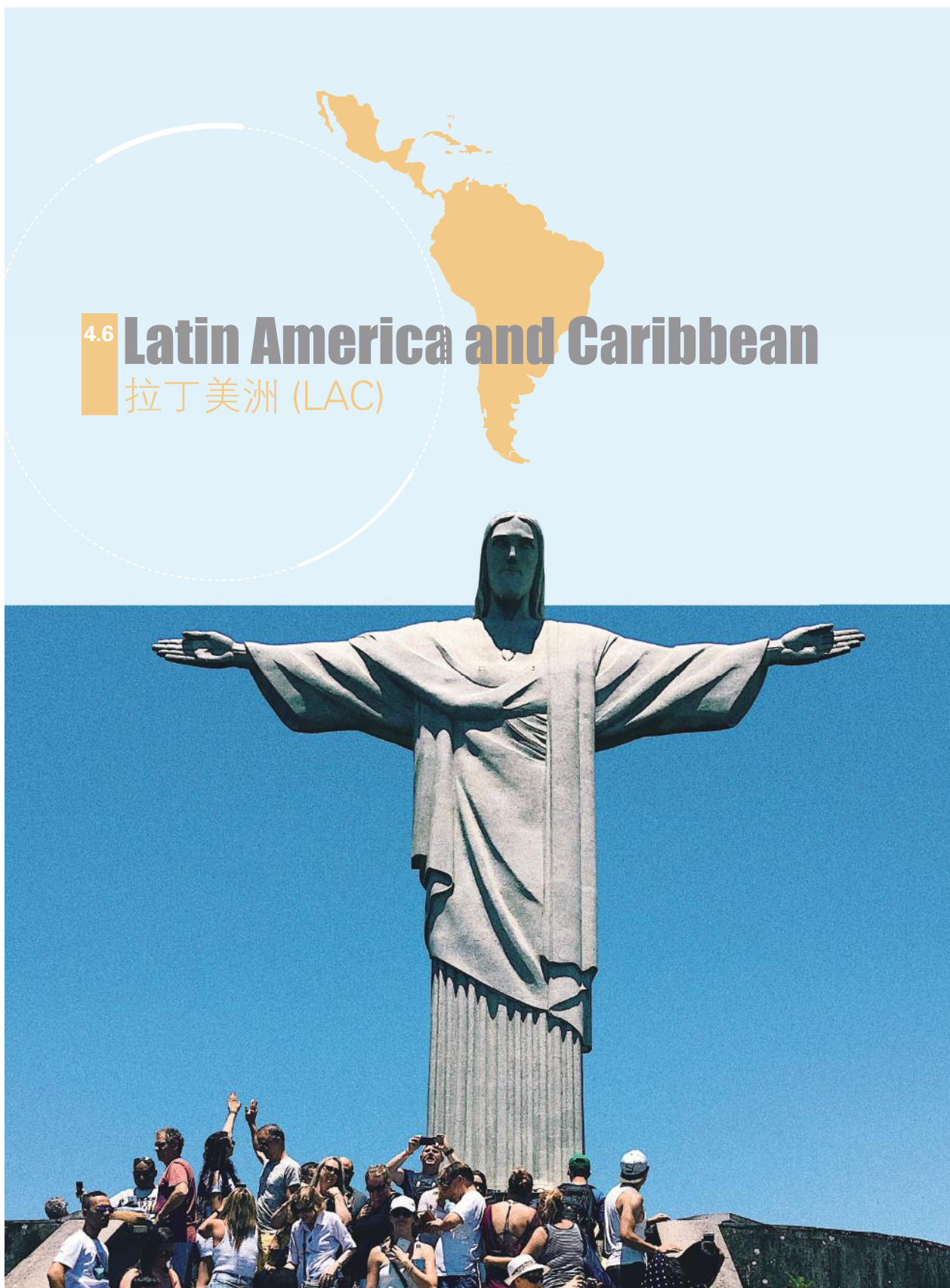
在欧洲与中亚地区的 47 个国家中，波黑在 2011–2020 年间的进步最快，能源可持续性得分的提升幅度达到了 14.2%，主要来自清洁度和可靠性的提升。此外，爱沙尼亚、保加利亚、卢森堡等国的能源可持续性得分也由于清洁度的得分上升而有了很大改善。另一方面，俄罗斯、格鲁吉亚、

亚美尼亚、荷兰和塔吉克斯坦 5 个国家的能源可持续性出现了下降，其中俄罗斯的下
降主要来自其清洁炊事燃料使用率和电气化率的下跌，亚美尼亚和荷兰两个国家的能源自给率出现了下降，而格鲁吉亚和塔吉克斯坦的下降则是由于能源清

洁度——特别是可再生能源比例的回落。下跌最为明显的塔吉克斯坦在 2011–2020 年间，煤炭消耗量增长到之前的 5 倍，石油消耗量增长到之前的 2 倍，增加的化石能源消耗使得可再生能源占比下降了 23.2%。

图 4-30 | 欧洲与中亚 2011–2020 能源可持续性得分变化





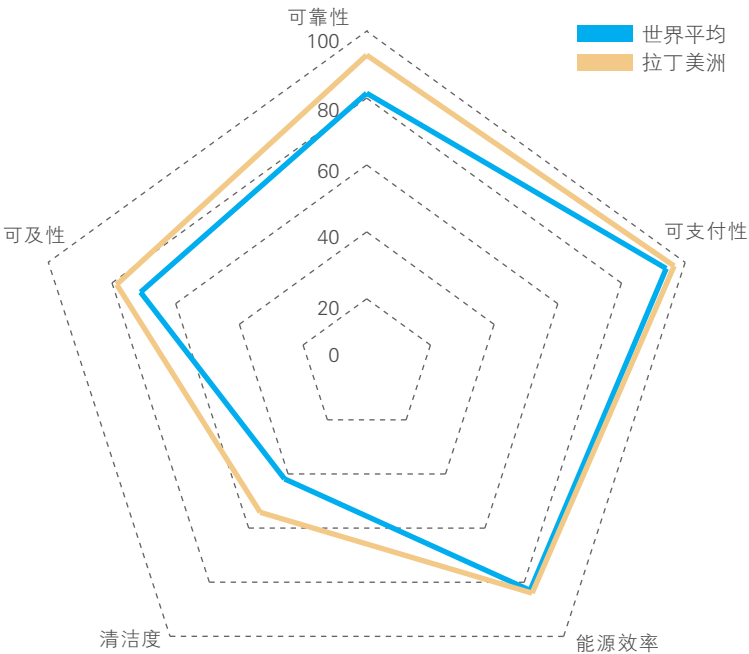
拉丁美洲与加勒比地区国家 2020 年的人口总数为 6.5 亿，占全球人口总数的 8.5%，以中等收入国家为主，地区的人均 GDP 为 8000 美元（2020 年），低于世界平均水平。22 个拉丁美洲国家被纳入了本研究的评价范围。

拉丁美洲 2020 年的能源可持续性总分为 73.7 分（图 3-4a），在全球 7 个地区中位列第 2。从能源可持续性的 5 个维度来看，拉丁美洲在各个维度上均高于世界平均值，其中清洁度上的表现最为突出，显著高于其他 6 个地区。可靠性位于各个地区中的第 2 位，高于除北美以外的其他地区。而可及性、能源效率和可支付性则处于中游，分别位于各地区中的第 5 位、第 4 位和第 4 位（见图 4-31）。

可及性

拉丁美洲较高的农村电力普及率、城市电力普及率和清洁炊事燃料普及率标志着地区内大部分人口能够获得充足的电力和清洁炊事燃料供应（图 4-32），但仍有部分国家表现不佳，其中包括危地马拉、尼加拉瓜和海地等发展较为落后的国家，这些国家的农村电力和清洁炊事燃料普及将是拉丁美洲下一阶段提高能源可及性的重点所在。此外，拉丁美洲地区的电气化率不高（图 4-32），电力消费占终端能源消费的比重仅有 20%，提高电气化率是拉丁美洲地区提高能源可及性需要解决的另一个问题。

图 4-31 | 拉丁美洲能源可持续性各维度得分



清洁度

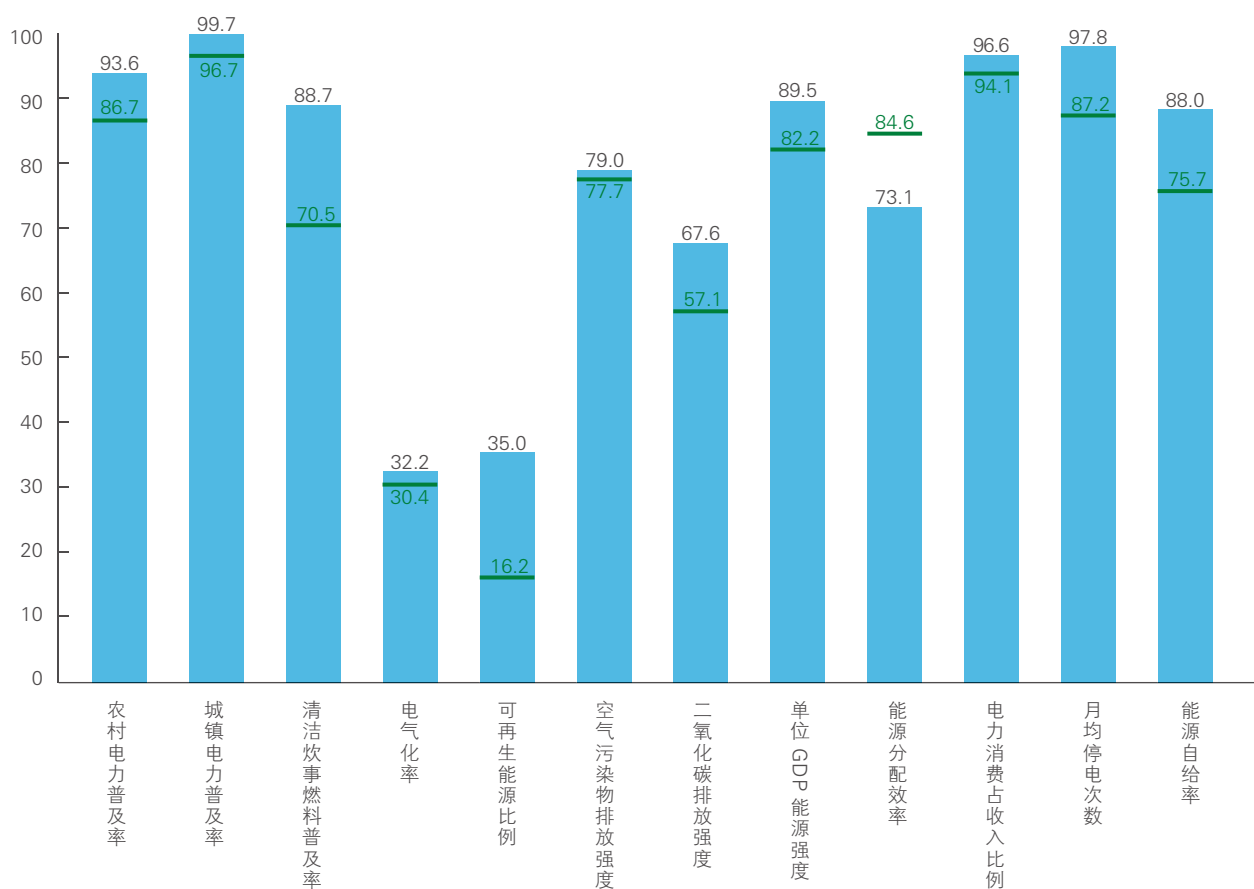
拉丁美洲拥有各地区中最高的能源清洁度得分，主要因为其高达 26.6% 的可再生能源占比，是世界平均水平的 2.3 倍（图 4-32）。拉丁美洲的可再生能源以大型水电和现代生物质为主，这得益于拉丁美洲地区丰富的自然资源；在风光发电快速发展的趋势下，拉丁美洲的可再生能源也在追求“多样化”，提高风电和光伏发电在能源结构中的占比^[35]。此外，拉丁美洲虽然拥有最高的可再生能源占比，但其空气污染物排放强度得分却只位列各地区中的第 4 名（图 4-32），说

明拉丁美洲国家在能源系统的空气污染物排放控制方面还存在较大的提升空间。

能源效率

拉丁美洲的单位 GDP 能源强度为 4.4MJ/\$（即 1.2kWh/\$），低于世界平均水平，反映出拉丁美洲经济体较高的能源利用效率（图 4-32）。但另一方面，拉丁美洲的能源分配效率是所有地区中最低的，能源损失在分配、传输和运输环节的比例是世界平均值的两倍。因此，对于拉丁美洲地区来说，提高能源传输效率是进一

图 4-32 | 拉丁美洲各项指标得分（灰色为世界平均值）



步提升能源效率表现的重要环节。

可靠性

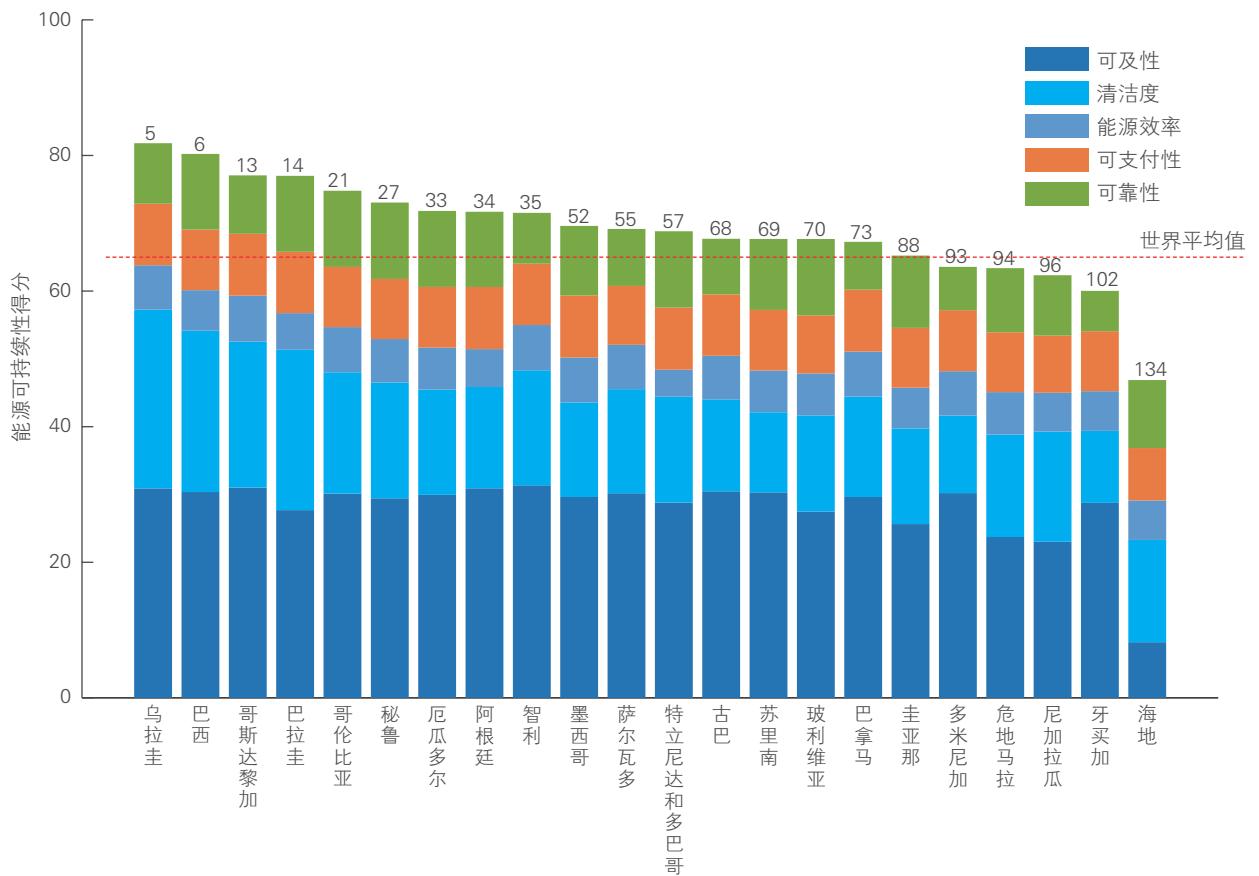
可支付性

按每年人均电力消费 1000kWh 计算，在拉丁美洲的用电家庭，平均将有 2.2% 的可支配收入用在电费支出上（图 4-32），略高于世界平均水平。具体来说，拉丁美洲的电力价格稍低于世界平均值，但人均收入同样较低，使得电费支出占收入的比例较高。

拉丁美洲的能源可靠性显著高于世界平均水平，月均停电次数和能源自给率都有着较好的表现。有少数国家，如乌拉圭、智利、古巴和牙买加等，能源自给率较低，提升这部分国家的能源自给率会对提高拉丁美洲地区的能源可靠性起到帮助。

图 4-33 展示了拉丁美洲各国在 2020 年的能源可持续性得分，22 个拉美国家的得分表现出了较大的差异性，得分最高的乌拉圭和巴西等国家跻身世界 140 个国家中的前列，而表现最差

图 4-33 | 拉丁美洲各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）



海地则位列世界各国中的第134位；22个国家中，有16个得分高于世界平均值。得分较高的国家，如乌拉圭、巴西、哥斯达黎加，在能源清洁度方面均存在明显优势，可再生能源占比均在40%以上。相对应的，拉丁美洲表现最差的国家——海地作为“最不发达国家”之一，其能源可及性和可支付性明显落后于其他国家，而牙买加、尼加拉瓜等其他表现较差的国家则主要是在能源清洁度上存在短板。

拉丁美洲地区的能源可持续性在2011–2020年间呈现增长趋势，由2011年的71.3分上升到了2020年的73.7分，增长幅度为3.4%，年均增长率为0.4%，低于世界平均值（图4-34）。

能源可及性的上升是拉丁美洲能源可持续性增长的主要贡献因素之一（图4-35）。拉丁美洲地区的能源可及性得分在2011–2020期间增长了5.7%，其中农村地区的电力普及率由83.7%提升到了93.6%，清洁炊事燃料的普及率由85.6%提升到了88.7%，电气化率由16.7%提升到了20.1%。拉丁美洲地区的能源清洁度在

2011–2015年有小幅回落，2015年之后则扭转为上升趋势，2020年的能源清洁度得分比2011年高出5.9%，其中最主要的原因是可再生能源比例的进一步上升。在其他三个维度，拉丁美洲地区的得分出现了下滑，说明拉丁美洲国家在发展能源可及性和清洁度的同时并未能很好地兼顾其他维度的发展。

在拉丁美洲的22个国家中，秘鲁在2011–2020年的进步最快，能源可持续性得分的提升幅度达到了9.6%，主要来自能源可及性的改善（农村电力普及率提升了35.5%，清洁炊事燃料普及率提升了17.6%），能源清洁度也有一定上升。乌拉圭在能源清洁度上进步明显，可再生能源比例上升了近10%。对于大部分其他国家来说，能源可持续性的上升来自于能源可及性的进步。拉

图4-34 | 拉丁美洲 2011–2020 能源可持续性得分

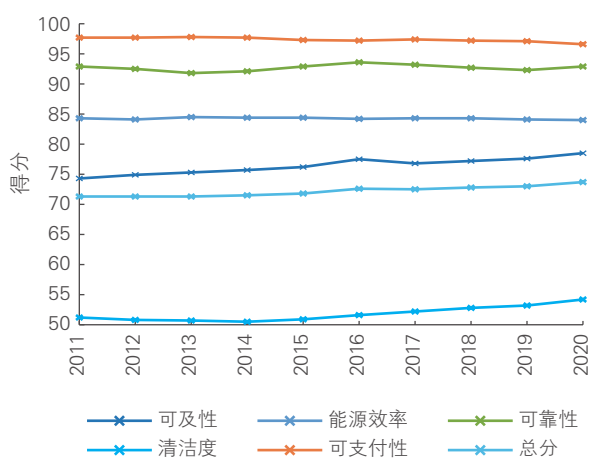
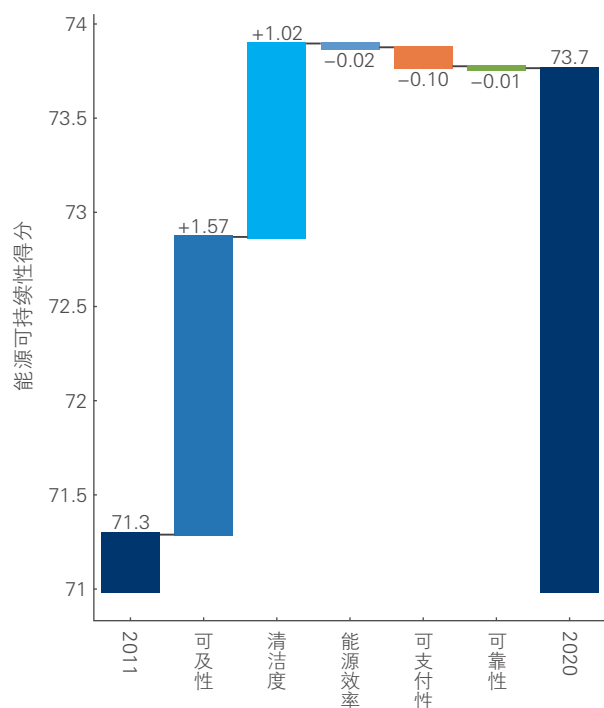


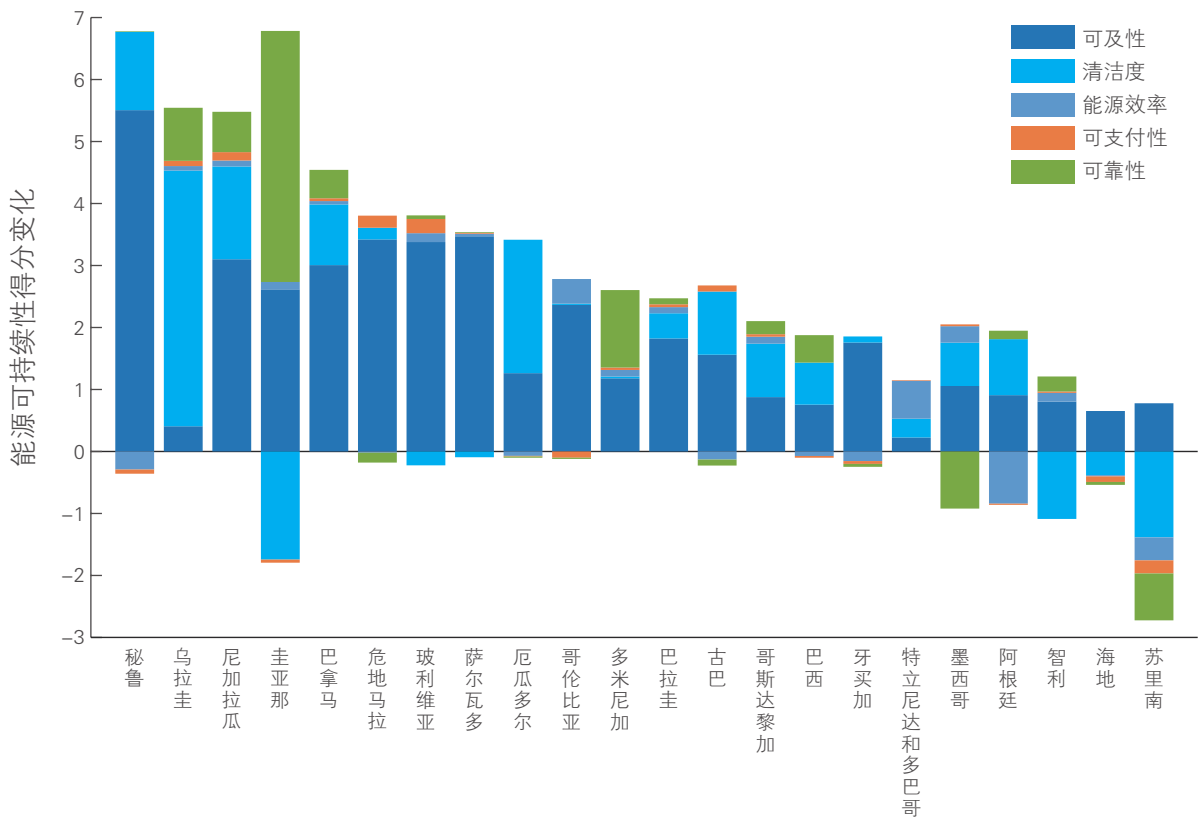
图4-35 | 拉丁美洲 2011–2020 能源可持续性各维度变化



丁美洲地区的苏里南是地区中唯一出现能源可持续性下降的国家，主要因为其能源清洁度和能源可靠性的倒退；苏里南的可再生能源比例下降了 8.4%，能源自给率则下降了 10.2%，主要原因是苏里南石油产品的消耗量和进口量逐年增长，

而可再生能源没有得到充分发展的石油产品消耗。值得注意的是，能源清洁度的下降并非个例，智利、海地、圭亚那等国都在能源可及性增长的同时出现了能源清洁度的下降，与这些国家化石能源（特别是石油）的消费增长有直接关系。

图 4-36 | 拉丁美洲各国 2011-2020 能源可持续性得分变化





本研究中的北美地区包括美国和加拿大两个国家，2020 年共有人口 3.7 亿，约占全球人口的 4.9%，是 7 个地区中人口最少的；北美地区的国家均属于发达国家，人均 GDP 为 56441 美元，是各个地区中最高的。

北美地区 2020 年的能源可持续性总分为 74.6 分（图 3-4a），是 7 个地区中最高的。从各个维度的角度来看，北美在可及性、效率、可支付性和可靠性 4 个维度上均为各地区中的最高分，在清洁度上，北美位于各个地区中的第 3 位，仅低于拉丁美洲地区以及欧洲与中亚地区（图 4-37）。

可及性

北美地区的电力普及率和清洁炊事燃料普及率都达到了 100%，实现了现代能源的普及，可

及性方面唯一存在提升空间的指标是电气化率，22.4% 的电气化率虽然高于世界平均值，但距离实现 SDG7 目标的要求（26%）以及 1.5℃ 气候目标的要求（49%）仍有一定距离^[20]。

清洁度

北美地区的可再生能源比例为 11.8%，与世界平均水平接近，CO₂ 排放强度略低于世界平均水平，空气污染物排放强度则显著低于世界平均水平，这一方面与北美地区化石能源消费中较高的天然气占比有关，另一方面也说明了北美地区能源系统较高的空气污染物排放控制水平。考虑到北美地区在能源可持续性其他维度上的良好表现，提升能源系统清洁度，特别是可再生能源占比，将是北美能源可持续发展战略的主要方向。

图 4-37 | 北美能源可持续性各维度得分

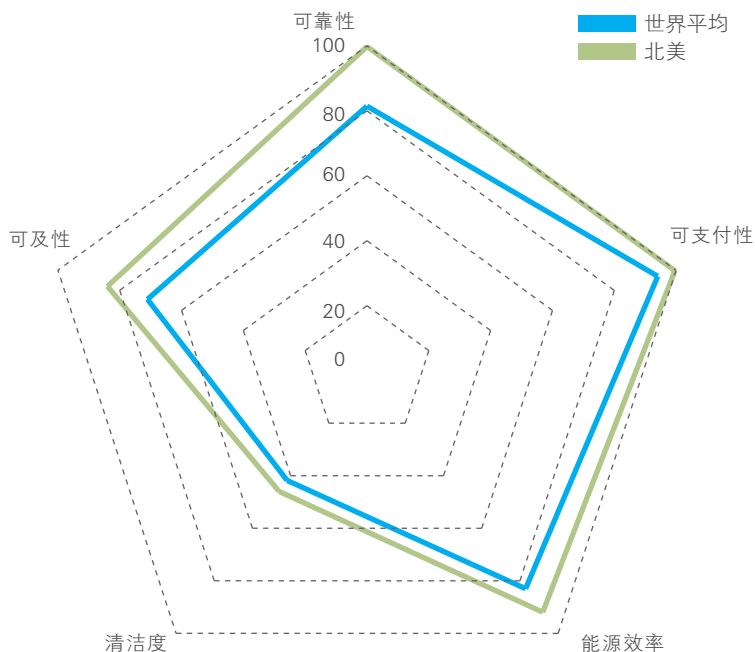
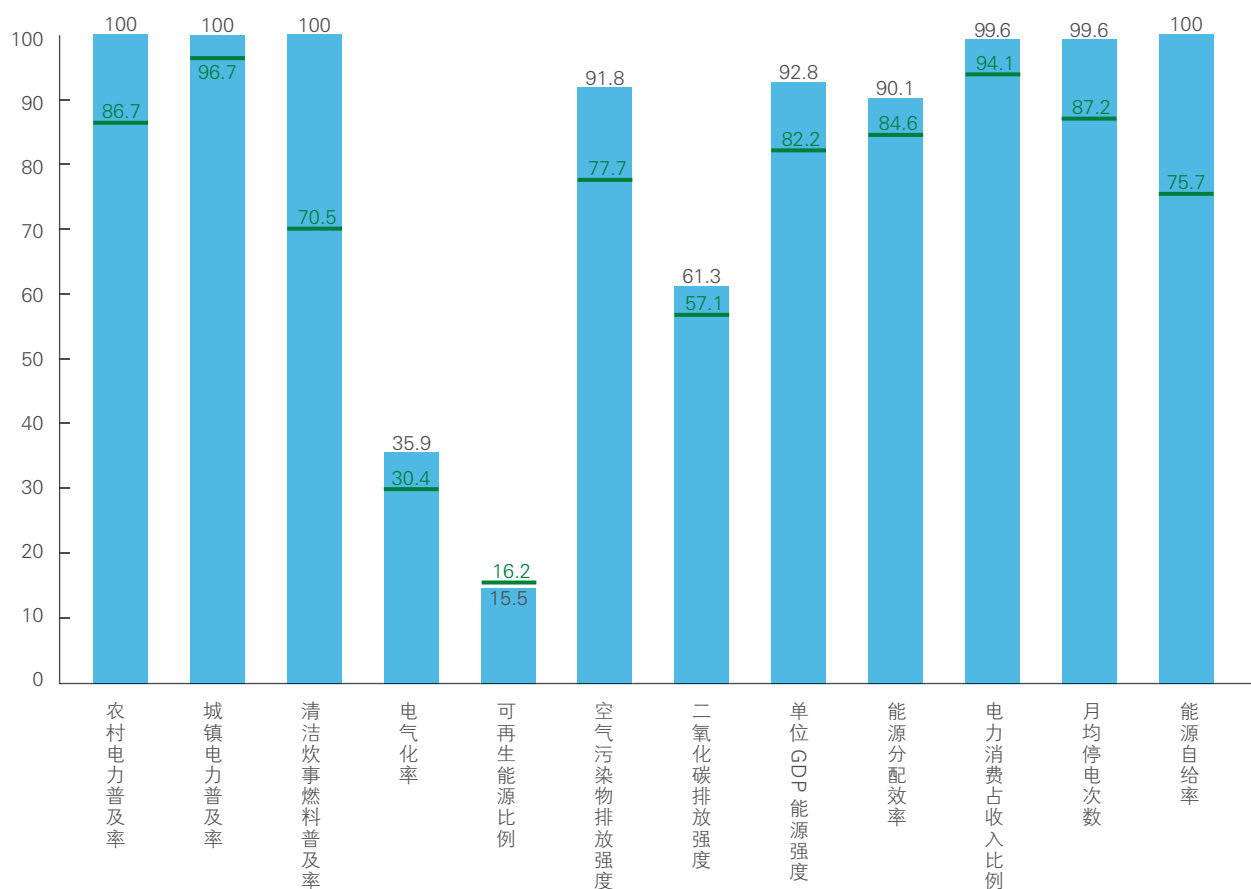


图 4-38 | 北美各项指标得分（灰色为世界平均值）



能源效率

北美地区单位 GDP 能源强度为 3.3 MJ/\$（即 0.9kWh/\$），是各地区中的最低值，反映出了北美地区良好的能源效率表现。损失在分配、传输和运输环节的能源仅有 1.2%，同样低于世界平均水平。综合来看，北美地区的能源效率表现较好。

可支付性

作为人均可支配收入最高的地区，北美地区的能源可支付性同样是最高的，按每年人均电力

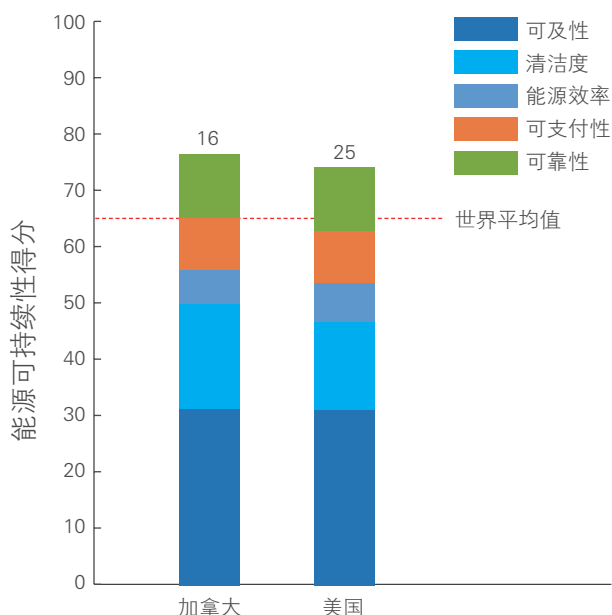
消费 1000kWh 计算，北美用电家庭的电费支出仅占可支配收入的 0.3%。

可靠性

北美地区的电力系统稳定性在各个地区中列于首位，能源自给率同样领先于其他地区，是唯一实现 100% 能源自给率的地区，目前是天然气的主要出口地区之一。

图 4-39 展示了加拿大和美国两个北美国家在 2020 年的能源可持续性得分。加拿大和美国都取得了较好的能源可持续性得分，分别以 76.6

图 4-39 | 北美各国 2020 能源可持续性得分（图中数字为各国能源可持续性得分在 140 个国家中的排名）



和 74.3 分位列 140 个国家中的第 16 位和第 25 位。两个国家在各个维度的表现均较为良好，加拿大因其在可再生能源占比方面的优势（29.1%，明显高于美国的 13.7%）得分略高于美国。

北美地区的能源可持续性在 2011–2020 年间保持了上升趋势，由 2011 年的 72.2 分上升到了 2020 年的 74.6 分，增长幅度为 3.2%，年均增长率为 0.4%，增长速度低于世界平均值（图 4-40）。

北美地区能源可持续性的改善主要来自于清洁度以及可靠性的提升（图 4-41）。清洁度在 2011–2020 期间稳步增长了 8.5%，其中可再生能源比例由 9.0% 上升到 11.8%，体现出北美地区在能源清洁转型方面取得的进展。可靠性的提高则来自于美国能源自给率的进步，由 77.8% 增加至 100%，大大降低原油进口量的同时实现了由天然气的净进口国到净出口国的转变。这样

的进步主要来自于“页岩气革命”，北美地区由于技术突破导致页岩气开采成本骤降、开采量上升^[36]。这也说明了关键技术的突破对于各国乃至世界达成 SDG7 的重要意义。

北美地区的两个国家中，美国在 2011–2020 年间的能源可持续性进步更为显著（图 4-42），能源可持续性得分的提升幅度为 3.6%，主要来自于清洁性和可靠性的提升。清洁性的提升主要体现在可再生能源比例的升高和能源碳排放强度的改善，而可靠性的提升则来源于能源自给率的升高，与前文所述的“页岩气革命”有直接关系。加拿大的可及性和清洁度均有上升，可及性方面的上升来自于电气化率的升高，而清洁度方面的提升则源于污染物和碳排放强度的改善。值得一提的是，加拿大的能源效率得分出现了一定下滑，特别体现在其能源分配效率的下降上。

图 4-40 | 北美 2011–2020 能源可持续性得分

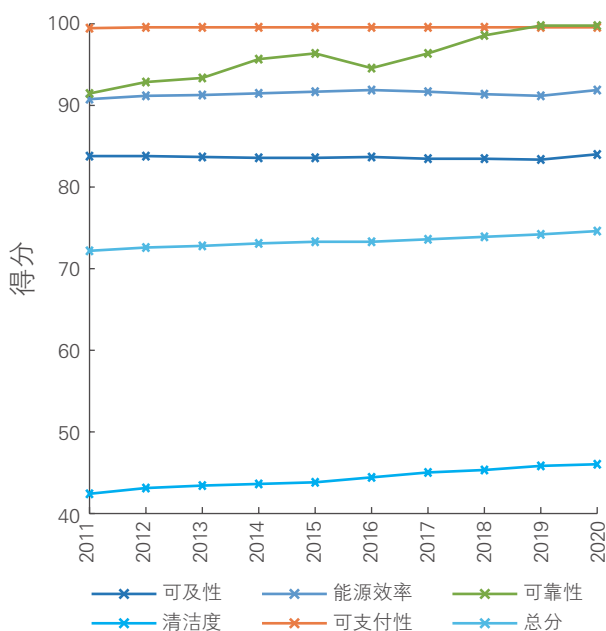


图 4-41 | 北美 2011-2020 能源可持续性各维度变化

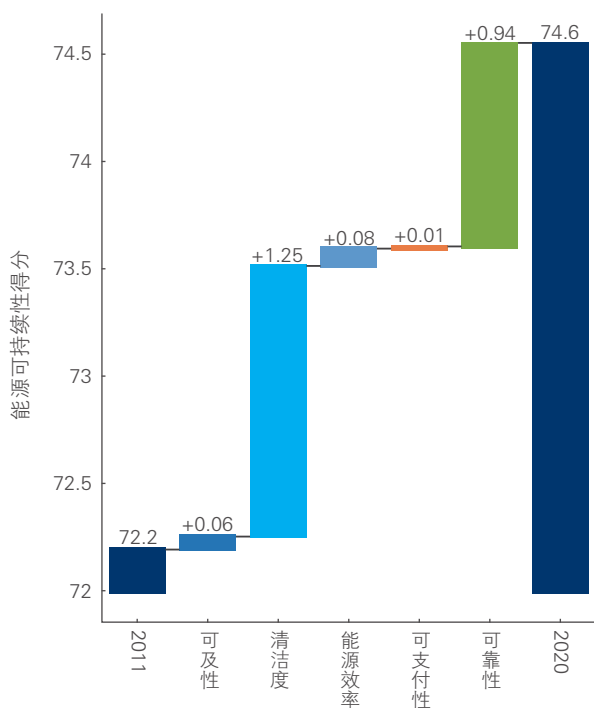
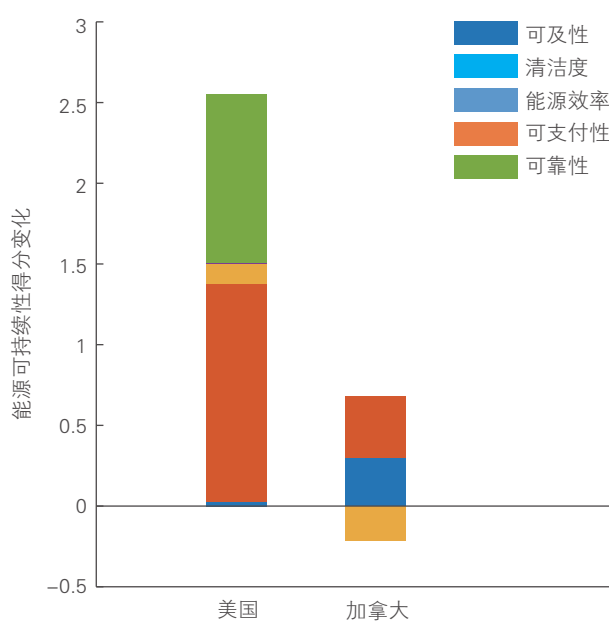


图 4-42 | 北美 2011-2020 能源可持续性得分变化



**“一带一路”
沿线国家能源
可持续性评价**

5.1 “一带一路”能源可持续性现状

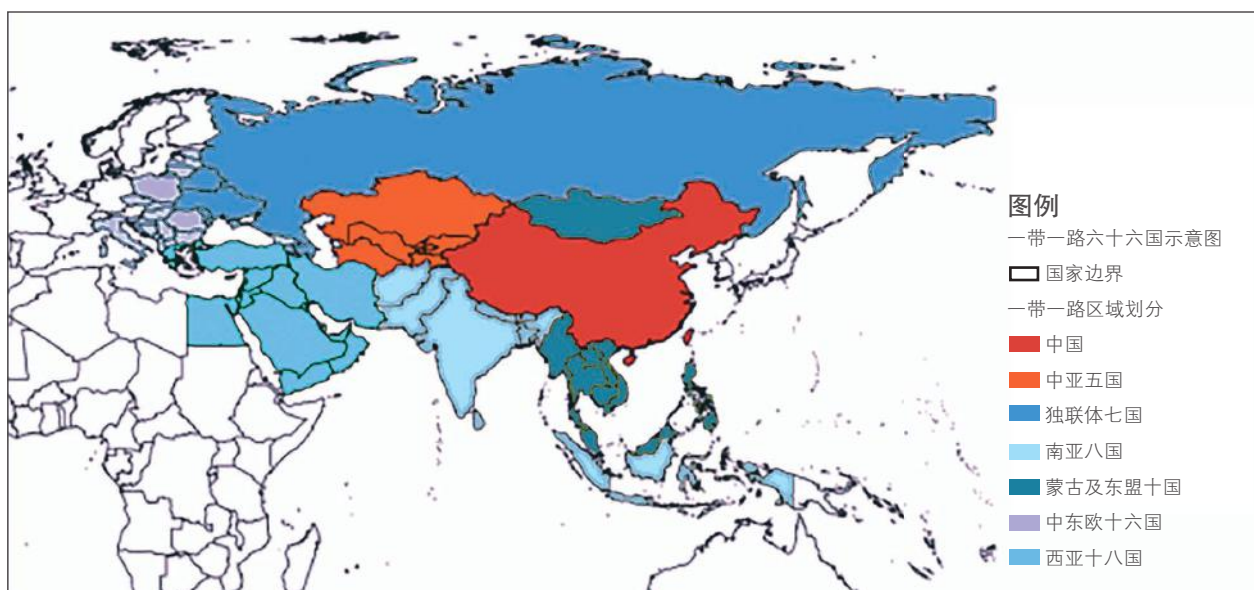
2013 年，中国国家主席习近平于哈萨克斯坦和印度尼西亚两地的演讲中先后提出共建“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”（以下简称“一带一路”）的重大倡议，标志着“一带一路”这一关键词正式进入历史舞台^[37]。

“一带一路”作为开放包容的合作平台，涵盖但不限于古代丝绸之路的范围，各国和国际、地区组织均可参与，因此并不存在官方界定的参与国家范围。本研究中采用最常用的“一带一路”沿线国家列表（不包括中国）确定本章中“一带一路”国家的范围（见图 5-1）^[38]。“一带一路”沿线国家（以下简称“一带一路”国家）有 66 个，

其中基于数据可得性而被纳入本研究范围的有 58 个，具体国家和地区列表见附录。从经济发展程度来看，大部分的“一带一路”国家属于发展中国家，东西两端连接着活跃的亚太经济圈和发达的欧洲经济圈，两端向内辐射欧亚大陆中间的广袤腹地，经济发展潜力巨大。

2015 年 3 月 28 日，国家发展改革委、外交部、商务部联合发布了白皮书《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》，系统化地阐述了“一带一路”的合作框架，提出了“开放合作、和谐包容、市场运作、互利共赢”的四大合作原则和“政策沟通、设施联通、贸易

图 5-1 | “一带一路”沿线国家示意图



畅通、资金融通、民心相通”的五大合作重点^[39]。从合作原则和合作重点来看，“一带一路”的理念与联合国 2030 年可持续发展议程具有高度一致性，而能源作为可持续发展议程的支柱，同样也是“一带一路”合作开展的重点领域。中国在“一带一路”能源领域的投资与建设占到了总投资的 40% 左右，使得能源成为“一带一路”投资占比最高的行业^[40]。在这一背景下，有必要对“一带一路”国家的能源可持续性单独开展研究与讨论，厘清“一带一路”能源可持续性的发展现状与趋势，从而为“一带一路”国家的能源战略制定和能源合作做出贡献。

与 OECD 国家代表的发达国家水平相比，占全球人口 44%、以发展中国家为主的“一带一路”国家在经济发展水平上相对滞后，能源可持续性得分也较低（图 5-2，图 5-3）。2020 年“一带

一路”国家的能源可持续性评分为 64.6，接近世界平均值（65.0），距离 OECD 国家的平均得分（73.3）尚有一定差距（图 5-3）。

从能源可持续性的各维度上来看，“一带一路”国家在除能源效率以外的各个维度上都已接近世界平均值，但与 OECD 国家相比，“一带一路”国家在能源可及性、清洁度和能源效率上都有显著的差距，分别只达到了 OECD 国家得分的 87.0%、81.3% 和 83.9%，而能源可支付性和可靠性与 OECD 国家的差距则相对较小（图 5-3）。

可及性

在电力普及率方面，“一带一路”国家农村和城镇电力普及率分别达到了 94.6% 和 99.6%，大部分人口可以获取电力供应，但与 OECD 国家

图 5-2 | “一带一路”国家与 OECD 国家经济水平与能源可持续性得分对比

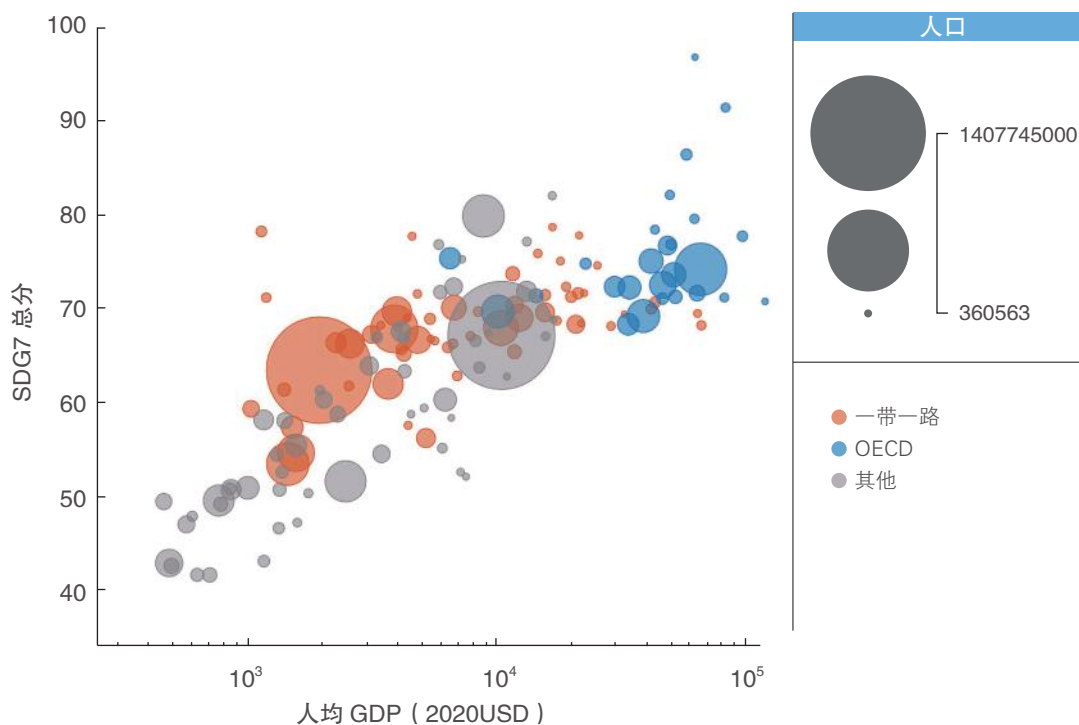
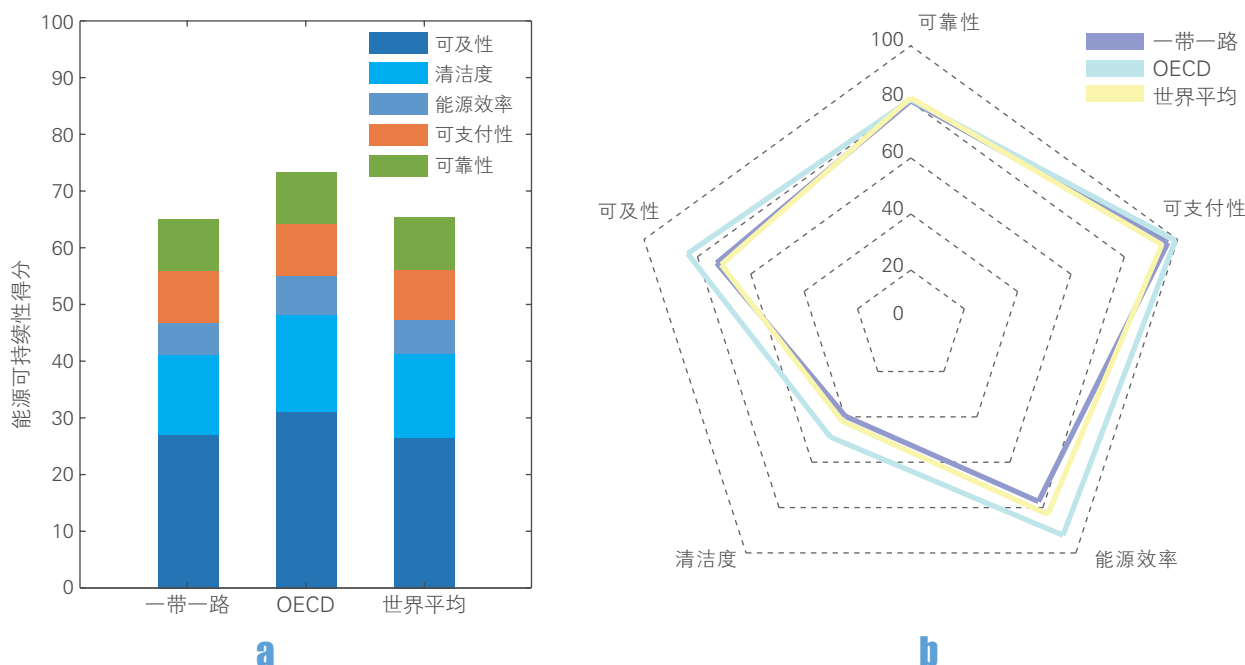


图 5-3 | “一带一路”国家与 OECD 国家各维度对比



相比，尚未实现电力的完全普及（特别是农村地区）。而在其他两项指标，即清洁炊事燃料普及率和电气化率上，“一带一路”国家的得分则和 OECD 水平有较为明显的差距，分别只有 70.5% 和 16.6%（图 5-4），说明“一带一路”国家在除电力普及外的能源可及性方面还存在提升空间。

清洁度

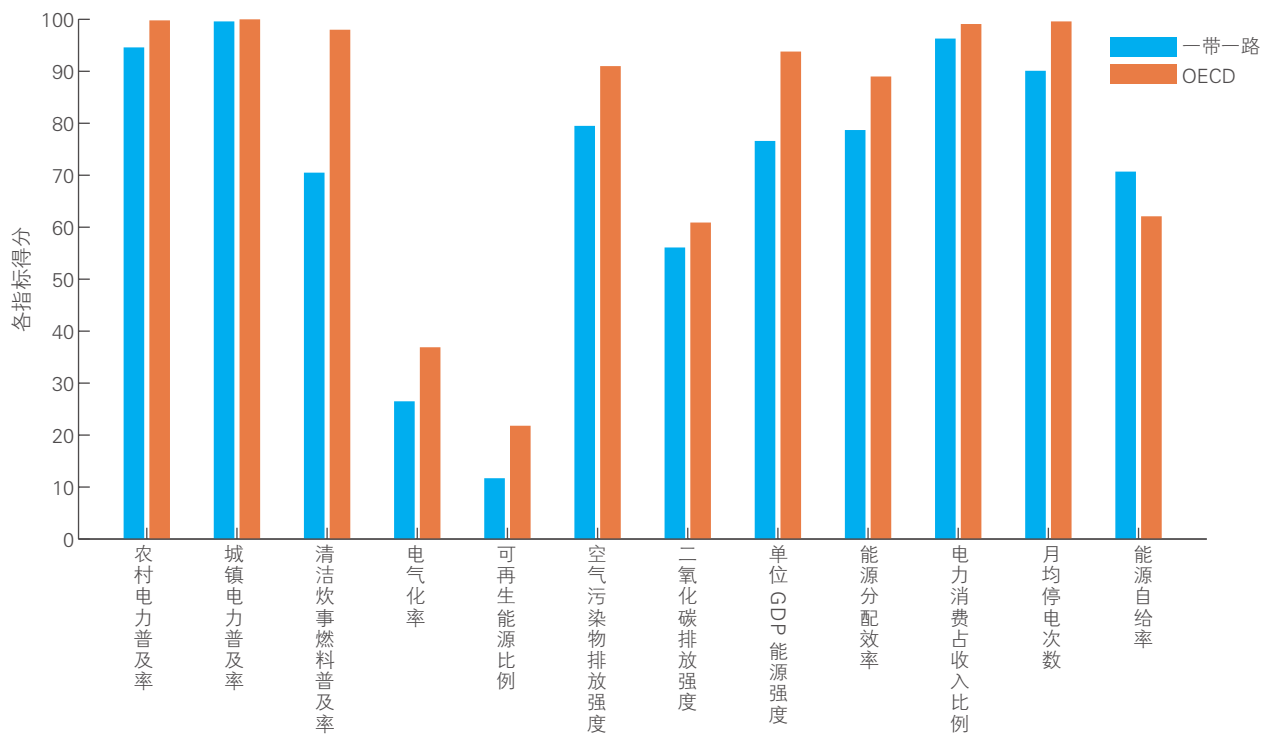
清洁度是“一带一路”国家和 OECD 国家差距最大的维度，从具体的指标来看，“一带一路”国家在可再生能源比例、空气污染物排放强度和 CO₂ 排放强度三个指标上全面落后于 OECD 国家。“一带一路”国家的整体能源结构中可再生能源仅占 8.9%，是 OECD 国家可再生能源占比的一半，单位能源消耗的空气污染物（包

括 SO₂、NO_x 以及 PM_{2.5}）排放强度是 OECD 国家的 1.7–3.7 倍，单位能源消耗的 CO₂ 排放强度比 OECD 国家高出 12.0%（图 5-4）。总的来说，能源清洁度是限制“一带一路”国家能源可持续性的最主要维度。

能源效率

“一带一路”国家的能源效率得分为 77.3 分，低于世界平均值（83.0）以及 OECD 水平（92.2），其中单位 GDP 能源强度和能源分配效率两项指标均低于 OECD 水平，且单位 GDP 能源强度的差距更大。“一带一路”国家 2020 年的能源强度为 8.5MJ/\$，是 OECD 水平（3.0MJ/\$）的 2.8 倍，暴露出了“一带一路”经济体用能强度高的问题。

图 5-4 | “一带一路”与 OECD 各项指标对比



可支付性

“一带一路”国家的能源可支付性得分略低于 OECD 水平。在能源价格（电力价格）方面，“一带一路”国家显著低于 OECD 国家，其较低的能源可支付性得分主要来自于人均收入上的差距。因此，随着“一带一路”国家未来的经济发展，可支付性差距也将会进一步缩小。

可靠性

“一带一路”国家的能源可靠性与 OECD 水

平及世界平均值都很接近，但各项具体指标上又有着明显的差别。“一带一路”的月均停电次数高于 OECD 国家，说明其电力系统的稳定性还有待提高，特别是第四章中提到过的南亚国家，频繁的停电成为影响电力供应的严重问题；在能源自给率上，“一带一路”国家相比于以欧洲国家为主的 OECD 国家有着较为明显的优势。因此，对于“一带一路”国家来说，能源可靠性提高的重点在于在保证能源自给率（通过减少化石能源消耗和发展可再生能源）的前提下，解决能源供应的稳定性等问题。

5.2 2011–2020 “一带一路” 能源可持续性发展趋势

“一带一路”国家能源可持续性在 2011–2020 年间呈现出了稳定、快速的增长趋势。从 2011 年的 59.7 分到 2020 年的 64.6 分，“一带一路”国家能源可持续性得分增长了 8.2%，增长幅度高于 OECD 国家（3.0%）和世界平均值（6.8%）（图 5-5）。从历年的增速来看，以《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》正式发布为关键节点，2015–2020 年“一带一路”国家的年均能源可持续性增速（0.8%–1.0%）相比于 2012–2014 年的年均增速（0.6%–0.7%）有明显提升。2020 年，由于新冠疫情和世界经济波动等因素的影响，“一带一路”国家的能源可持续性增速相比于 2015–2020 年有所下降（0.6%），

但仍然保持着高于世界平均水平的增长势头。相比之下，OECD 国家在 2011–2020 年的年均增速都较为缓慢（0.1%–0.4%），但在 2020 年，由于新冠疫情造成的一系列短期影响，如整体能源需求下降、可再生能源比例的上升、电力消费占比升高等^[41]，OECD 国家的能源可持续性增速反而达到了新高（0.8%），这也体现出了“一带一路”国家和 OECD 国家能源发展所属阶段的不同。

图 5-6 展示了“一带一路”和 OECD 国家能源可持续性得分与增长幅度的对比。所有 OECD 国家的 2020 年能源可持续性得分均高于世界平均值，但其能源可持续性增速也普遍低于世界平均值。而与之相比，“一带一路”国家在能源可持续

图 5-5 | “一带一路”与 OECD 2011–2020 年能源可持续性变化

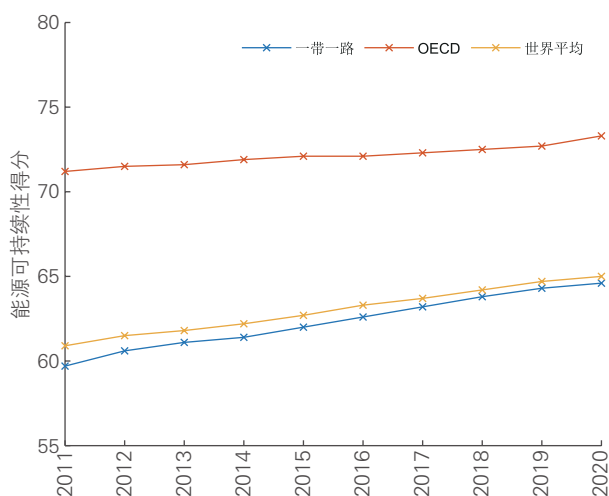


图 5-6 | “一带一路”与 OECD 各国能源可持续性得分与增长幅度对比

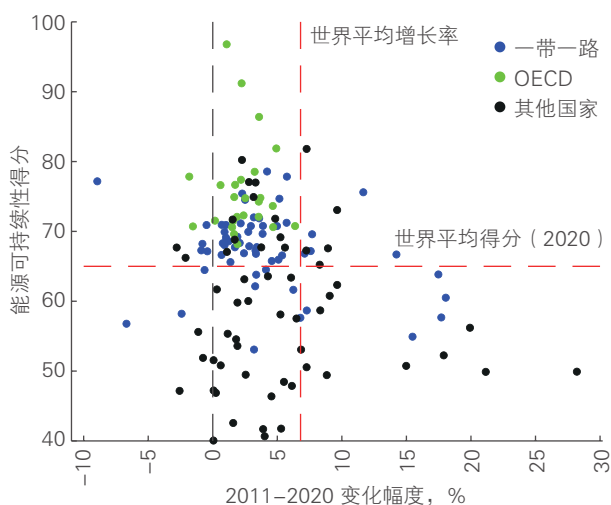
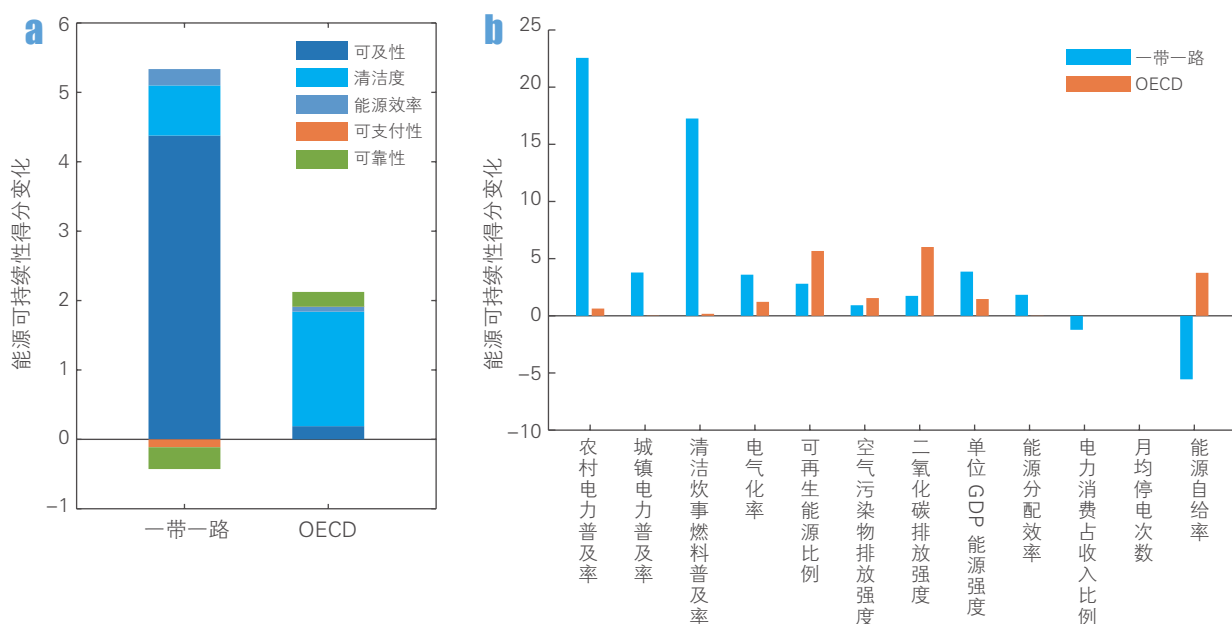


图 5-7 | “一带一路”与 OECD 国家各维度及各指标 2011-2020 变化值对比



性得分和增长幅度上的分布差异更大，以 2020 年得分来说，大部分“一带一路”国家的得分高于世界平均值，且有少数国家的得分达到了 OECD 水平，但同样有一定数量的国家得分低于世界平均水平；从增长幅度来说，“一带一路”国家中既有增长远超平均速度的快速发展国家，也有能源可持续性倒退最为严重的几个国家。上述特征充分体现了“一带一路”国家内部能源发展的多样性和差异性。

“一带一路”国家 2011-2020 年能源可持续性的增长来自于多个维度的贡献，包括能源可及性、清洁度和能源效率的提升，其中可及性提升的贡献最大，占到了提升总量的 89.2%（图 5-7a）。从具体的指标来看，可及性的提升主要来自于农村电力普及率和清洁炊事燃料普及率的上升，这两个指标在 2011-2020 年分别上升了 22.6 个百分点和 17.3 个百分点（图 5-7b），反映出了“一带一路”

国家在摆脱能源贫困方面取得的成就。此外，“一带一路”国家的清洁度也有了一定增加（图 5-7a），可再生能源占比提高了 2.8 个百分点，空气污染物和 CO₂ 排放强度得分也相应地有了一些提高，但清洁度的提升幅度仍显著低于 OECD 国家水平（图 5-7b）。能源效率方面，能源强度和能源分配效率都有提升，特别是能源强度，由 2011 年的





9.5MJ/\$ 下降到了 2020 年的 8.5MJ/\$，下降幅度达到 10.1%。

但从另一方面来看，“一带一路”国家 2020 年的能源可靠性和可支付性相比于 2011 年都出现了一定程度上的下滑（图 5-7a）。由于化石能源需求的上升以及其导致的化石能源进口量增加，“一带一路”国家的能源自给率由 2011 年的 76.8% 下降到了 2020 年的 70.7%，而同期的 OECD 国家能源自给率则上升了 3.7%（图 5-7b），这一变化体现出来的潜在能源安全风险应当得到

重视。从可支付性上来说，“一带一路”国家的能源价格波动不大，但人均收入的上升十分缓慢，且在新冠疫情的影响下，2020 年的人均收入同比下降，导致能源可支付性出现了倒退（图 5-7）。然而，即使不考虑新冠疫情因素，2011-2020 年“一带一路”国家的人均可支配收入增长速度也并不理想，与其能源可持续性快速增长的趋势脱节。“如何让能源系统的发展建设更加有效地带动国民收入的增长”这一问题，有必要在“一带一路”国家未来能源战略的制定中得到更多重视。

5.3 “一带一路” 能源发展重点国家与地区分析

纳入平均范围的 58 个“一带一路”国家呈现出了较大的能源可持续性得分差异（图 5-8）。2020 年得分最高的“一带一路”国家拉脱维亚以 78.6 分在全球 140 个国家中位列第 7，而得分最低的巴基斯坦仅有 53.1 分，在全球排第 118 位。除了拉脱维亚以外，“一带一路”中得分位于前列的国家还包括阿尔巴尼亚（77.8 分）、塔吉克斯坦（77.2 分）、爱沙尼亚（75.6 分）、克罗地亚（75.4 分）等。不难看出，排名靠前的“一带一路”国家主要为中东欧国家，其能源可持续性得分的特点为在可及性不落后于平均水

平的同时，清洁度领先于其他国家。另一方面，得分最低的国家除巴基斯坦外，还包括孟加拉国（54.9 分）、伊拉克（56.8 分）、缅甸（57.6 分）和蒙古（57.7 分）等亚洲的中低收入国家，其普遍存在的问题是可及性低于其他地区，巴基斯坦和孟加拉国的可靠性以及伊拉克、蒙古等国家的清洁度也有明显的落后。

图 5-9 展示了 2011-2020 年间“一带一路”各国的能源可持续性得分变化情况。“一带一路”国家中，印度的能源可持续性增长最为明显，增长幅度达到了 9.5 分，此外柬埔寨（+9.3 分）、



图 5-8 | “一带一路” 各国 2020 能源可持续性得分

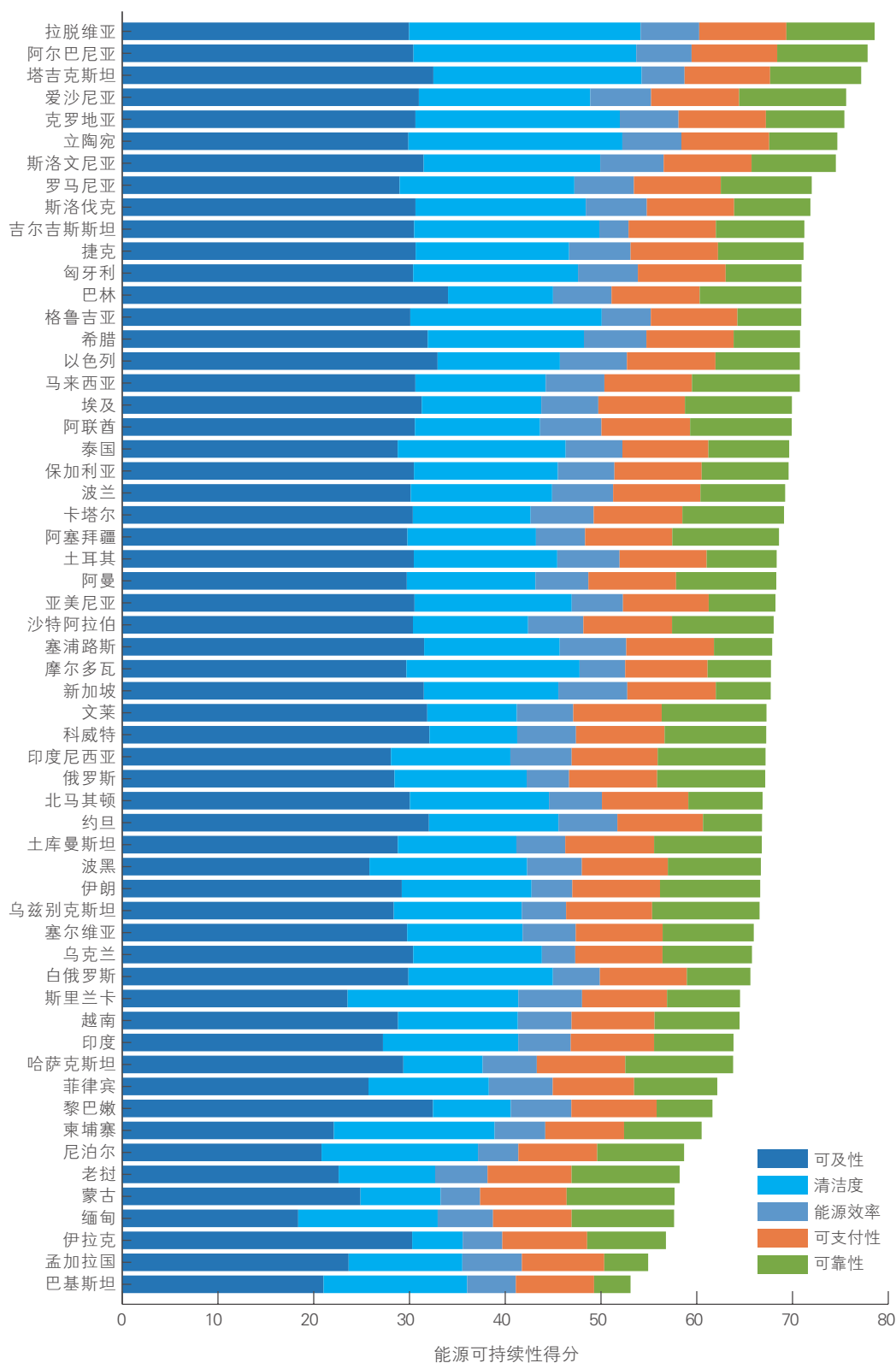
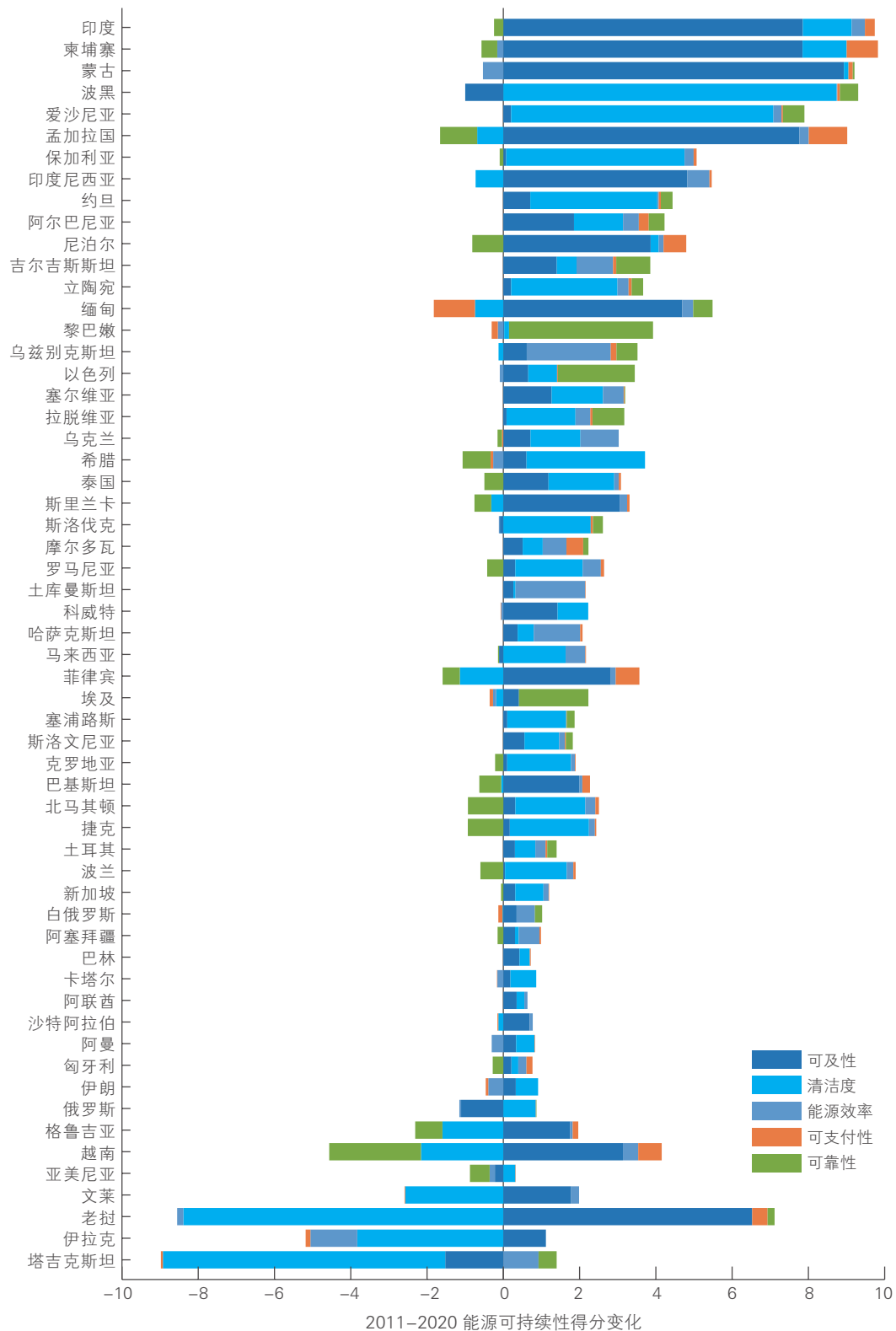


图 5-9 | 2011-2020 “一带一路” 各国能源可持续性得分变化

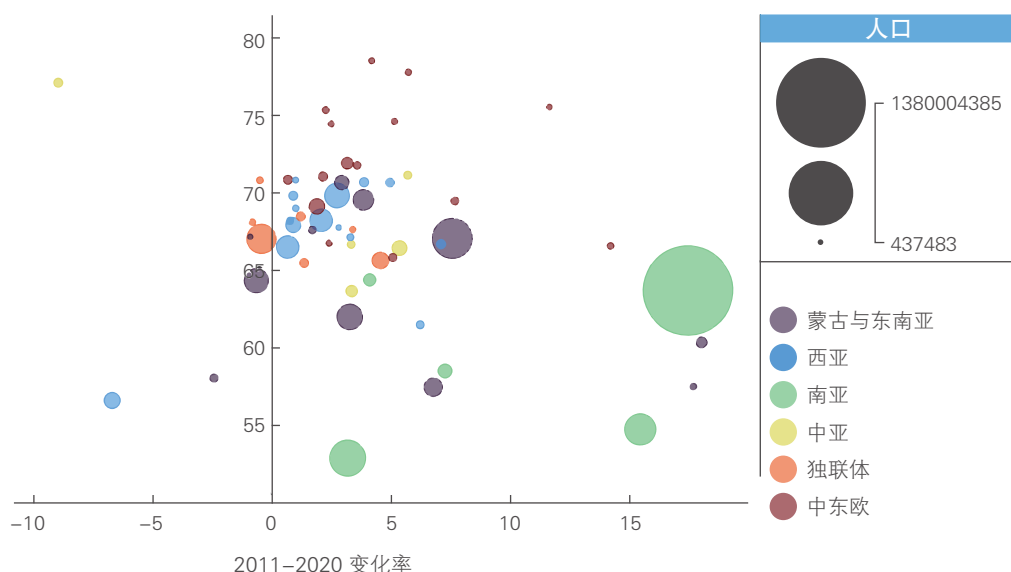


蒙古(+8.7分)、波黑(+8.3分)和爱沙尼亚(+7.9分)等国的增长也都位于“一带一路”国家前列。其中,印度、柬埔寨和蒙古等亚洲国家的能源可持续性增长主要来自于可及性的改善,而波黑、爱沙尼亚和保加利亚等国的能源可持续性提升则得益于清洁度的提升。另一方面,塔吉克斯坦成为了2011–2020年间能源可持续性倒退最为严重的“一带一路”国家,能源可持续性减少了7.6分;其他国家,包括伊拉克(-4.1分)、老挝(-1.4分)、文莱(-0.6分)、亚美尼亚(-0.6分)、越南(-0.4分)、格鲁吉亚(-0.3分)和俄罗斯(-0.3分),能源可持续性在2011–2020年间也出现了一定下降。纵观这些能源可持续性出现下降的国家,大部分国家的能源可持续性下降都主要源于能源清洁度的下降,其中伊拉克、老挝、文莱和越南等国家在可及性方面有明显提升,但这一提升被其清洁度的下降抵消,导致这些国

家的能源可持续性总分下降;此外,越南的可靠性、俄罗斯的可及性等维度也出现了下降。这一现象对部分“一带一路”国家的能源发展模式提出了警示,尽管解决能源贫困问题、提升能源可及性是能源可持续发展的重要内涵之一,但这一过程不能以牺牲能源可持续性的其他侧面为代价,否则仍然无法全面实现能源系统的可持续发展。

图5-10进一步总结了“一带一路”内部不同地区与国家的特点。可以看到,中东欧国家的能源可持续性得分表现突出,西亚、中亚和独联体的大部分国家虽然能源可持续性得分处在较高水平,但其增长幅度普遍较小,还有部分国家出现了可持续性的倒退;而拥有大量人口的蒙古与东南亚以及南亚国家,虽然能源可持续性得分较低,但其2011–2020年间的增长幅度普遍较大,是推动“一带一路”乃至世界能源可持续性进步的重要动力。

图 5-10 | “一带一路”各国 2011–2020 变化率及 2020 能源可持续性得分对比





结果与讨论

06

6.1 主要结果

针对当前能源可持续性指标领域的不足，本研究构建了涵盖能源可持续性5个维度（可及性、清洁度、效率、可支付性、可靠性）、12个指标的能源可持续性指标体系，并建立了覆盖140个国家2011–2020年数据的指标数据库，以计算各国能源可持续性指标得分，从而揭示了全球各个国家与地区——特别是“一带一路”国家能源系统可持续性的时空分布特征。研究在世界各个地区以及“一带一路”层面分别得到了以下主要结果：

空间格局方面

世界各个地区的能源可持续性得分呈现出了明显的地区差异，各地区的得分与其经济发展水平

显著相关，地区得分从低到高分别为撒哈拉以南非洲、南亚、中东与北非、东亚与太平洋、欧洲与中亚、拉丁美洲、北美。

各地区能源可持续性的分维度特征既有共性又有个性。共性体现在清洁度对世界各个地区而言都是掣肘SDG7实现的重要因素，而低清洁度的主要原因是可再生能源占比较低；个性则包括以下方面：对撒哈拉以南地区来说，能源需求的满足，包括可及性和可支付性是能源可持续性的最大短板；南亚、中东与北非和东亚三个中等水平地区的共性问题表现为能源清洁度过低，但具体原因各不相同，南亚、中东与北非以及东亚地区最大的问题分别出现在污染物排放强度、可再生能源占比以及碳排放强度三个指标上，对南亚地区，可靠性同样



构成了限制 SDG7 实现的重要因素；欧洲和美洲地区的能源可持续性表现较好，目前实现 SDG7 的瓶颈在于清洁度能否进一步提升，且欧洲在可靠性（能源安全）方面也存在一定问题。

时序特征方面

2011–2020 年间，全球和各地区的能源可持续性均呈现上升趋势，但上升幅度各不相同，南亚和东亚的少数发展中国家是拉动全球能源可持续性增长的主要动力，而其他地区的增长较为缓慢，大部分国家的增长幅度低于世界平均值。从维度上来说，全球能源可持续性上升的主要动力来自于南亚、东亚和撒哈拉以南非洲国家的可及性增长，东亚、欧洲和北美等地区的清洁性提升也有一定贡献；但与此同时，部分地区分维度的能源可持续性出现了下降，特别是除北美外的各地区的可靠性都有所下滑。

结合 2030 目标来看，2011–2020 世界能源可持续性上升的幅度和速度并不理想，如果保持 2011–2020 阶段的增速，2030 年世界能源可持续性得分仅能达到 SDG7 目标值的 90.3%，而实现 SDG7 目标需要 2021–2030 阶段的能源可持续性以原增速 2.4 倍的速度上升。

针对“一带一路”

以发展中国家为主、占全球人口 44% 的“一带一路”国家在能源可持续性水平上接近世界平均

水平，但与代表着发达国家的 OECD 国家仍然存在差距。“一带一路”国家在可及性、清洁度和效率上显著低于 OECD 国家，其中可及性中的清洁炊事燃料普及率和电气化率、清洁度中的可再生能源占比和空气污染物排放强度，以及能源效率中的单位 GDP 能源强度，是“一带一路”与 OECD 国家差距最大的指标

2011–2020 年“一带一路”国家能源可持续性快速增长，增长幅度达到 8.2%，高于 OECD 国家（3.0%）以及世界平均水平（6.8%），以《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》正式发布为关键节点，2015–2020 年“一带一路”国家的能源可持续性增速相比之前有明显提升。“一带一路”国家能源可持续性的增长主要来自于可及性的提升，特别是农村电力普及率和清洁炊事燃料普及率的升高；清洁度和效率提升也有一定贡献；可支付性和可靠性则出现了下降，特别是能源自给率出现明显下滑。

“一带一路”各国的 2020 年能源可持续性同样有着较大差异，中东欧国家领先于其他国家，而东南亚和南亚国家能源可持续性相对较低；从 2011–2020 年的能源可持续性发展来看，大部分“一带一路”国家的能源可持续性有所增长，以印度、柬埔寨、蒙古等部分东南亚和南亚国家的发展最为迅速；但与此同时，也有“一带一路”国家的能源可持续性出现了下滑，包括塔吉克斯坦、伊拉克、老挝等，其共同特点是化石能源消耗量的突增导致清洁度大幅下跌。

针对各地区

撒哈拉以南非洲：

作为能源可持续性落后地区，撒哈拉以南非洲面临的重大挑战仍是以可及性和可支付性为代表的能源贫困问题，这一问题在 2011–2020 年间有所改善。

南亚：

南亚地区 2011–2020 年能源可持续性增长迅速，主要来自于可及性的上升，能源清洁度和能源可靠性成为能源可持续发展面临的主要问题。

中东与北非：

中东与北非地区的首要问题是可再生能源比例过低，且其能源可持续性在 2011–2020 年间增长十分缓慢。

东亚与太平洋：

在经历了 2011–2020 年间的可及性和清洁度提升后，东亚与太平洋地区目前最大短板仍在于较低的能源清洁度。

欧洲与中亚：

在能源清洁转型之外，欧洲与中亚地区的能源可持续性发展还面临着能源安全方面的挑战。

拉丁美洲：

作为能源清洁度领先的地区，拉丁美洲需要在进一步提升清洁度的同时，兼顾其他能源可持续性维度的发展。

北美：

北美地区的能源可持续性全面领先于其他地区，进一步提升能源清洁度将是北美能源发展的主题。

6.2 讨论

能源系统的加速转型与协同发展

研究结论表明，现有的能源发展路径和能源转型政策并不足以满足 SDG7，特别是能源清洁度相关的目标，这一点也与联合国^[1]、IPCC^[5]、IEA^[42]等机构针对 1.5℃ 气候目标的研究结论一致。因此，抓住 2030 年前的最后窗口期，综合利用行政命令、财税、金融等政策工具，加大对清洁能源的支持，是全球实现 SDG7 的必由之路。与此同时，推进能源的清洁转型也要充分考虑与

能源可持续性其他维度的协同发展。清洁转型会创造多维度协同发展的机遇，包括通过清洁能源解决能源贫困问题和能源安全问题，升级改造现有的能源基础设施以提高能源效率等；但清洁转型也会在其他维度带来潜在的挑战，这些挑战包括清洁能源大规模发展可能带来的材料短缺问题，电网波动问题以及能源可支付性问题等^[42]。本研究的结果表明，片面关注能源发展的单一维度所导致的能源可持续性其他维度上的倒退，会削弱甚至抵消这一维度上的发展成果，例如“一





带一路”中的越南、老挝和伊拉克等国，2011–2020 年间可及性虽有上升，但清洁度和可靠性方面的倒退使得整体的能源可持续性不增反降。因此，对于各级政策制定者，应充分考虑清洁发展与能源可持续性其他维度协同发展的机遇与挑战，并将其明确纳入到清洁发展的战略规划文件中。

各类国家能源战略的侧重点

对于低收入国家来说，能源可及性的不足严重限制了其能源可持续性的表现。例如，在撒哈拉非洲以南地区，2020 年仍有 7.5 亿人无法用电，26 亿人未能使用清洁的炊事燃料能源^[1]，使得能源可及性成为最大短板。因此，低收入国家的能源战略应将能源贫困的解决列为重点。当前，可再生能源中的陆上风电与光伏在技术和经济性上已达到成熟水平，而越来越多的政府和金融机

构承诺不再投资化石能源项目，在这一背景下，可再生能源应成为解决低收入国家能源贫困问题的主要手段。中等发达国家在过去十年间新增了大量以化石能源为主的能源基础设施，这些能源基础设施对清洁度、效率和可靠性的影响在本研究中得到了直观体现，同时这些高碳能源基础设施还会带来大量的锁定碳排放，阻碍能源系统的低碳发展^[7]。因此，现有能源基础设施的升级改造和有序淘汰将与清洁能源的发展一道成为中等发达国家推进能源可持续发展的重要抓手。对于能源可持续性较为领先的高收入国家，特别是在 2022 年经历了能源危机的欧洲国家来说，提升可再生能源比例，实现能源清洁转型是当前能源发展的重点所在^[43, 44]。在这一过程中，高收入国家应重点关注清洁度提升与其他维度的协同发展（如上一段所述），确保能源可持续性的其他维度在清洁转型过程中同样得到发展。

关键技术进步对能源可持续性的推动

能源可持续性指数的提高与关键技术的进步密不可分。例如，2011 年以后全球能源清洁度得分的提升，很大程度上要归功于风电和光伏产业在组件效率、材料强度、生产优化等方面的技术迭代，从而使得 2010 以后的风光平准化度电成本快速下降到接近甚至低于化石能源的水平^[45]，极大地促进了可再生能源的部署；北美能源可靠性的逆势增长，源于水平钻井和水力压裂等多种开采技术的进步，这使得页岩气和页岩油的开采具备经济可行性，从而显著增加了北美的天然气本地产量，使得美国由天然气净进口国变为净出口国，大大缓解了其能源安全问题^[36]。因此，在当前全球能源可持续性进步速度仍显不足的背景下，推动储能、工业与交通电气化、碳捕集利用与封存(CCUS)和氢能等能源关键技术的进步^[46]，使其由示范性阶段快速进入商业化应用，将是在 2030 年前拉动全球——特别是以“一带一路”国家为代表的发展中国家摆脱化石能源依赖型的发展模式，实现 SDG7 的关键所在。

全球及地区层面的国际合作

研究结果揭示了过去十年间全球能源可持续性发展在地区和国家层面的不平衡性，这一问题的解决需要世界各国在能源和气候领域开展更为密切和实际的合作，包括治理体系、金融投资、技术研发等各个方面的一致行动。在 2022 年 11 月《联合国气候变化框架公约》第 27 次缔约方大会（COP27）达成的决议文件中，能源与气候领域的国际合作得到了着重强调；决议中还包括设立“损失与损害”基金的突破性协议，以及对加速能源转型这一共识的重申，标志着能源与气候领域国际合作取得的进展^[2]。“一带一路”是国际合作有力推动能源可持续性发展的另一个例证，指数结果显示，自 2015 年“一带一路”倡议正式提出后，“一带一路”国家的能源可持续性发展速度显著加快，表明“一带一路”合作的开展与各国能源可持续性进步间存在正向关联。在这些成果的基础上，下一阶段的国际合作应重点关注合作倡议的落地，如加大对可再生能源项目的投资力度、促进发达国家对发展中国家的技术分享与援助、以及设立国际清洁能源专项基金等。



6.3 研究展望

以本研究为基础，未来的改进和长期发展可以聚焦于以下 4 个方向：

数据时空范围的扩大。空间上，本研究的数据覆盖了全球 140 个主要国家，在全球和地区层面上已经具有很强的代表性，但对于一些特定的国家来说，国家层面数据的补充会对其本国的能源战略起到更为重要的作用。同时，本研究缺失数据的国家均为发展中国家，这部分国家在未来对于全球能源可持续性特征的影响将随着其经济发展而增大。因此，对缺失国家开展针对性的数据补充将有助于本研究的进一步完善。时间上，研究采用了可得数据中最新的 2020 年数据，随着相关数据库的逐年更新，这些指标相应的及时更新将是下一步工作需要关注的重点之一。此外，针对报告的长期发展，可以随着相关数据库的更新，定期（如每年或每两年）更新评价结果，以年度报告的形式发布，并将新的结果与之前结果作对比，从而确保研究的连贯性。

能源可持续性评价研究在地方级别（如省级和州级）的延伸。本研究重点探究了全球能源可持续性的时空特征，而在中国、美国等内部地区性差异较大的国家，进行地方级别的研究对于识别国家内部的能源可持续性时空特征同样有着重要意义。以中国为例，国内各个省份之间在能源禀赋、能源结构、能源效率和经济发展水平等方面都存在明显的差异，引入省级的能源可持续性指标可以更加系统地探究这种地区异质性，从而

为各地方政府的能源战略制定提供科学参考。开展地方级的研究需要建立起地方级别的指标数据库，这一过程要通过更加广泛地调研目标国家和地方的统计数据来实现。

模型结构与方法的不确定性分析。能源可持续性指标构建过程中，权重的分配和数据标准化方法的选择等步骤都会带来不确定性。研究利用蒙特卡洛方法针对权重分配这一不确定性的最主要来源开展了分析，而对于其他较为次要的不确定性来源，在未来展开进一步的讨论将有助于更全面地揭示研究的不确定性，同时也能为研究方法的潜在改进提供洞见。在数据标准化方法的选择上，本研究采用了最为广泛使用的极值法，将各个指标的数据标准化到 [0,1] 区间中以进行相互比较，而数据标准化的方法除了极值法之外，还包括 Z 分数法，缩尾法（winsorization），box-cox 法等。未来研究中，应通过采用不同的数据标准化方法重复指标计算过程，并对比各方法下产生的结果，从而刻画数据标准化方法的选择对结果的影响。

能源可持续性指数与其他影响因素的关联研究。本研究建立的能源可持续性指数提供了表征国家与地区的能源可持续性的工具，在这一基础上，后续的研究可以将其他影响能源发展的因素与能源可持续性指数关联起来，更加深入地探索能源可持续性背后的驱动因素。例如，对于“一带一路”国家来说，通过“一带一路”平台收到

的能源领域国外直接投资（Foreign Direct Investment, FDI），是影响该国能源发展的重要因素，通过相关性分析、回归分析等手段探索 FDI 与能源可持续性指数的关系，将有助于揭示 FDI 对能源可持续性发展的驱动作用，进而论证

“一带一路”投资在能源发展方面的贡献；此外，还可以将能源可持续性指数结果与其他表征能源各维度特性的数据，如表征电力可及性的夜间卫星灯光图等联系起来，从而印证不同表征方法间的相互一致性。



附录

A 地区与国家列表

世界各国家（140个）

区域	区域所对应的国家和地区 *
撒哈拉以南非洲（32）	安哥拉、贝宁、博茨瓦纳、喀麦隆、刚果（布）、科特迪瓦、刚果（金）、赤道几内亚、厄立特里亚、埃塞俄比亚、加蓬、加纳、肯尼亚、毛里求斯、莫桑比克、纳米比亚、尼日尔、尼日利亚、塞内加尔、南非、苏丹、坦桑尼亚、多哥、赞比亚、津巴布韦、布基纳法索、乍得、马达加斯加、马里、毛里塔尼亚、卢旺达、乌干达
南亚（5）	孟加拉国、印度、尼泊尔、巴基斯坦、斯里兰卡
中东与北非（15）	阿尔及利亚、巴林、埃及、伊朗、伊拉克、以色列、约旦、科威特、黎巴嫩、利比亚、摩洛哥、阿曼、卡塔尔、沙特阿拉伯、突尼斯、阿联酋
东亚与太平洋（16）	澳大利亚、文莱、柬埔寨、中国、印度尼西亚、日本、韩国、老挝、马来西亚、蒙古、缅甸、新西兰、菲律宾、新加坡、泰国、越南
欧洲与中亚（47）	阿尔巴尼亚、亚美尼亚、奥地利、阿塞拜疆、白俄罗斯、比利时、波黑、保加利亚、克罗地亚、塞浦路斯、捷克、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、格鲁吉亚、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、摩尔多瓦、荷兰、北马其顿、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、俄罗斯、塞尔维亚、斯洛伐克、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、塔吉克斯坦、土耳其、土库曼斯坦、乌克兰、英国、乌兹别克斯坦
拉丁美洲（22）	阿根廷、玻利维亚、巴西、智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、古巴、多米尼加、厄瓜多尔、萨尔瓦多、危地马拉、圭亚那、海地、牙买加、墨西哥、尼加拉瓜、巴拿马、巴拉圭、秘鲁、苏里南、特立尼达和多巴哥、乌拉圭
	加拿大、美国

* 表格内未出现的其他国家和地区未包括在本报告研究范围内

“一带一路”国家（58个，不含中国）

区域	区域所对应的国家和地区 *
蒙古与东南亚（11）	蒙古、新加坡、马来西亚、印度尼西亚、缅甸、泰国、老挝、柬埔寨、越南、文莱、菲律宾
西亚（15）	伊朗、伊拉克、土耳其、约旦、黎巴嫩、以色列、沙特阿拉伯、阿曼、阿联酋、卡塔尔、科威特、巴林、希腊、塞浦路斯、埃及
南亚（5）	孟加拉国、印度、尼泊尔、巴基斯坦、斯里兰卡
中亚（5）	哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦
独联体（7）	俄罗斯、乌克兰、白俄罗斯、格鲁吉亚、阿塞拜疆、亚美尼亚、摩尔多瓦
中东欧（15）	波兰、立陶宛、爱沙尼亚、拉脱维亚、捷克、斯洛伐克、匈牙利、斯洛文尼亚、克罗地亚、波黑、塞尔维亚、阿尔巴尼亚、罗马尼亚、保加利亚、北马其顿

* 表格内未出现的其他国家和地区未包括在本报告研究范围内

B 方法学详解

选取和筛选指标

通过对 SDG7 的原文表述“确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源”进行分析，以及结合已有研究对能源可持续性的定义，研究提炼出了衡量能源可持续性的 5 个方面，即能源普及（确保尽可能多的人能够使用电力等现代能源）、清洁度（减少能源的生产和使用对环境的影响）、能源效率（能源的单位投入应带来尽可能多的产出）、可支付性（能源消费支出的负担尽可能小）、可靠性（确保能源系统有稳定可靠的供应）。基于指标选取的 5 个原则和 SDG7 的 5 个方面，研究以联合

国原有指标体系、WETI、ETI 和相关的能源可持续性指标研究等为基础，初步选取了以下指标，如附表 1 所示。

对初选指标的筛选主要考虑了两个问题，一是指标与其他指标的相关性，对于与其他指标有明显相关的指标进行筛选。初选指标中，“能源价格”与“电力消费占家庭收入的比例”具有较强的相关关系（电力消费占家庭收入的比例直接取决于电力的价格和当地的家庭收入），而“人均能源进口量”与“能源自给率”（即能源消费中不来自进口能源的比例）也直接相关（能源自给率直接取决于国家的能源进口总量与能源消费总量）。因此对这两个指标予以剔除。第二个考虑的问题是指标数据的可得性，

附表 1 | 初选指标

能源可持续性维度	初选指标	筛选结果
可及性	农村人口的电力普及率	保留
	城镇人口的电力普及率	保留
	清洁炊事燃料的普及率	保留
	终端能源消费的电气化率	保留
清洁度	终端能源消费中现代可再生能源占比	保留
	空气污染物排放强度	保留
	CO ₂ 排放强度	保留
	能源行业带来的水资源压力	删除（可得性不足）
	其他环境影响	删除（可得性不足）
能源效率	单位 GDP 的能源排放强度	保留
	能源分配效率	保留
可支付性	电力消费占居民收入的比例	保留
	能源价格（电力、化石能源）	删除（与其他指标强相关）
可靠性	电力消费者经历的年均停电次数	保留
	能源自给率	保留
	人均能源进口量	删除（与其他指标强相关）
	能源系统的抗风险能力	删除（可得性不足）

对于数据可得性不足，无法获得全球尺度数据的指标进行筛选。初选指标中“能源行业带来的水资源压力”、“其他环境影响”和“能源系统的抗风险能力”缺少在全球尺度上的，具有统一标准的数据量度，因此予以剔除。最终确定的指标体系如正文中表 2-1 所示：

指标数据的收集与处理

指标数据的来源包括国际能源署（IEA）的世界能源平衡表、世界能源价格和能源温室气体排放数据库，世界银行的世界发展指数数据库，以及全球大气研究排放数据库（EDGAR）的污染物排放数据库。在完成数据收集后，研究识别了数据中的缺失值和异常值，并采用以下原则与方法进行处理，以便后续分析的开展：

对于同一个国家缺失部分年份数据的情况，当数据呈现显著的时间变化趋势时，采用线性插值与外推的方法填补缺失值，利用这一方法处理的数据包括年均停电次数；当数据未呈现显著的时间变化趋势时，采用最接近年份的数据代替缺失值，利用这一方法处理的数据包括污染物清洁炊事燃料的普及率、污染物排放强度以及能源价格。

对于一个国家所有年份数据均缺失的情况，当缺失的指标数据较少时，采用所处地理区域或收入分组的平均值代替，清洁炊事燃料的普及率、年均停电次数以及能源价格中部分数据的处理应用到了这一方法。最后，对于指标缺失过多的国家，研究不将其纳入评价范围内。

为将各指标数据转化成可以相互对比的形式，研究采用极值处理法对数据进行了标准化，具体计算过程如下：

效益型指标：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})}$$

成本型指标

$$y_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})}$$

其中， x_{ij} 代表标准化前的数据， y_{ij} 代表标准化后的数据。

确定指标权重

本研究具有以下相关的特点：

（1）针对研究目的，本研究采用的方法应具有透明度和可重复性。

（2）研究收集了世界大部分国家的数据，属于较为完整的样本。

（3）体系的各个指标间具有较为复杂的联系。

朱喜安 2020 年的研究对比了几种赋权方式的特点以及适用范围，其结果显示在透明度较高的客观方法中，熵权法在样本数据完整和指标间具有复杂联系时的表现最好^[18]。因此本研究选用熵权法作为权重确定的主要方法。针对客观赋权法的潜在问题，研究在完成权重确定后对结果进行主观分析，以判断得到的结果是否与评价工作的整体取向一致。

熵权法的基本原理是根据各项指标观测值提供的信息量大小来确定指标权重。熵权法借用了信息论中“信息熵”的概念和计算方法，利用信息熵来衡量各指标提供的信息量大小^[19]。其具体计算过程如下^[47]：

标准化：

对共有 m 个个案， n 个指标的数据，计第 i

个个体的第 j 项指标数据为 y_{ij} , 则标准化后的指标为:

$$Y_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}$$

计算指标的信息熵值 e 和信息效用值 d :

第 j 项指标的信息熵值 e 为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (Y_{ij} \cdot \ln Y_{ij})$$

信息效用值:

$$d_j = 1 - e_j$$

根据信息效用值确定权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}$$

在本研究中, 考虑到各个指标携带信息量的量级差别较大, 直接将所有指标的信息效用值进行对比可能会导致一些指标和维度权重极小, 从而在综合评价中被忽略的情况, 与评价的基本取向相悖, 因此研究参考了 R.M.Elavarasan 等人 2022 年研究的方法^[12], 先将每个维度下的各个指标利用平均权重 (由于 SDG7 原有的指标在联合国可持续发展议程中起着决定性的作用, 因此分配给这些指标更大的权重) 的方法合成, 得到各个维度的得分结果, 再对 5 个维度的数据使用熵权法, 得到 5 个维度在综合指标中的占比。熵权法得到的权重分配结果如正文中表 2-2 所示。可以看到, 在 5 个可持续性维度中, 能源可及性和清洁度得到了较高的权重, 这与前文所述的能源系统, 特别是“一带一路”能源系统最大的两个问题, 及能源需求的满足与能源的低碳转型相吻合, 因此与评价工作的整体取向相符, 可以应用在本研究中。

不确定性分析

进行不确定性分析的第一步是识别不确定性的来源。在能源可持续性指标体系的建立过程中, 不确定性的主要来源包括标准化方法的选择、权重的不确定性和集结函数的选择等。其中, 权重确定对于结果不确定性的影响最为重要^[12], 且其他两个步骤的不确定性难以通过选用其他方法的方式进行直接对比。因此本研究将不确定性研究的范围聚焦在权重分配的不确定性上。

在过往的综合评价研究中, 研究权重不确定性的方法主要是通过设置不同的权重分配情景, 对比不同情景下的结果来分析不确定性影响, 这一方法存在的问题是由于情景的数量有限, 难以覆盖到权重变化带来影响的全貌。针对这一问题, 本研究借鉴了在排放清单不确定性分析中常用的蒙特卡洛方法, 开展不确定性分析^[48, 49]。蒙特卡洛方法开展不确定性分析的具体应用过程如下^[50]:

(1) 确定待分析数据的先验分布。在本研究中, 需要确定先验分布的数据即为权重系数。由于权重系数的先验分布并不可知, 因此研究结合考虑了权重系数具有一定主观性、不确定性大、有明确分布区间 $[0, 1]$ 的特点, 结合有关研究对选取先验分布函数的结论^[48], 选取在原权重系数基础上变化 $[-30\% + 30\%]$ 的均匀分布作为权重系数的先验分布。

(2) 对于已确定先验分布的各个权重系数, 在权重系数的先验分布内进行 10000 次随机采样, 并将采样结果归一化 (即让权重系数之和为 1), 得到 10000 组权重分配的结果。

(3) 计算各国能源可持续性指数、对能源

可持续性发展的贡献值等主要结果在 10000 组权重分配下的得分分布情况，从而得到其 95% 置信区间以及不确定性大小。

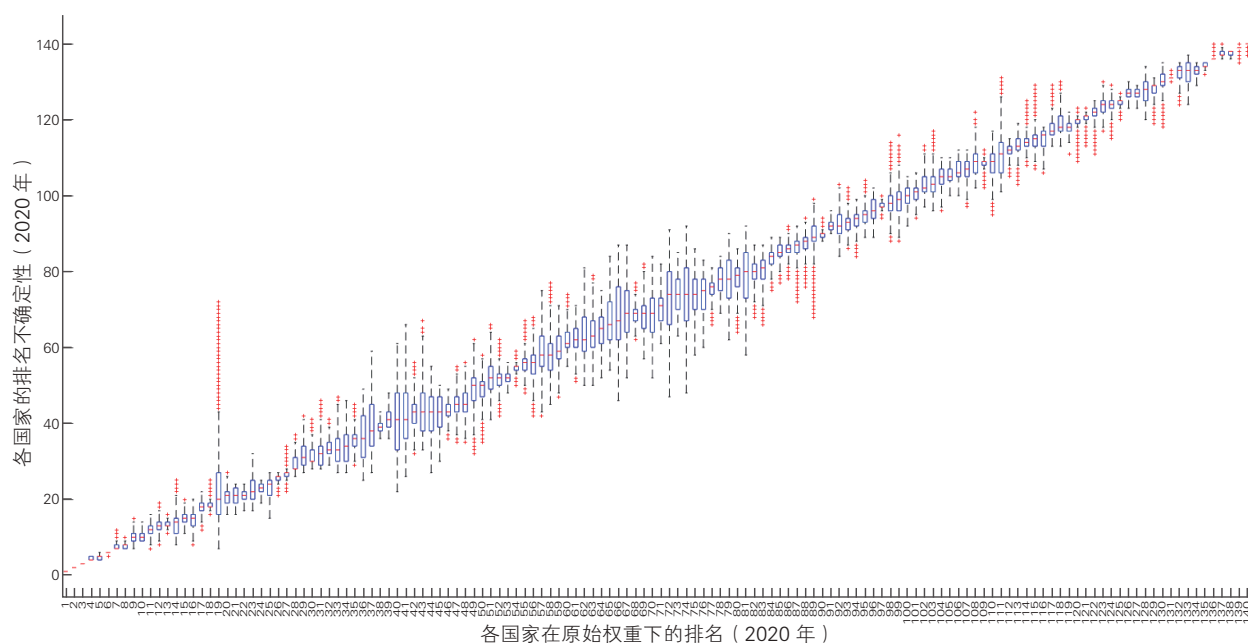
C 不确定性分析结果

研究计算了在蒙特卡洛方法下各地区 2020 年能源可持续性得分排名。在 10000 组参数取样对应的结果下，有 90.1% 的结果中，各地区的能源可持续性排名和原结果保持一致，即撒哈拉以南非洲 < 南亚 < 中东与北非 < 东亚与太平洋 < 欧洲与中亚 < 拉丁美洲 < 北美。在其余 9.9% 的结果中，南亚和撒哈拉以南非洲的排名互换，其余 5 个地区的排名不变。在这 9.9% 的结果中，能源清洁度的权重都达到了 40% 以上，成为最重要的一个维度，这导致在清洁度方面表现不佳

的南亚成为了全球能源可持续性得分最低的地区。因此，从地区层面来说，权重（特别是清洁度权重）的不确定性对低得分地区的表现有一定影响，但对地区分布的整体特征影响不大。

研究还探讨了权重设置在国家层面上产生的影响。附图 1 展示了 2020 年 140 个国家在不同权重设置下，能源可持续性排名的不确定性。权重设置对各国排名的平均影响为 $[-5.5, 5.5]$ （负数表示排名上升，正数表示排名下降，下同），即在不同权重下，同一个国家的能源可持续性排名的变化范围约为上下 5.5 位。相比于排名最为靠前和最为靠后的国家，权重不确定性对能源可持续性得分处于中等水平的国家带来的影响更大。具体来说，对于原排名中 1–30 名的国家和 101–140 名的国家，权重变化带来的排名不确定性分别为 $[-2.4, 3.9]$ 和 $[-4.3, 3.7]$ ，而 31–

附图 1 各国能源可持续性排名的不确定性（红线表示中位数，蓝色箱子的底部和顶部分别表示 25 和 75 分位数，虚线表示除离群值外的极值范围，红色加号表示离群值，即距离箱子底部或顶部超过 1.5 倍四分位差的值）



100 名的国家，其不确定性达到了 [-7.6, 7.3]。因此，进一步完善权重的设定，对于能源可持续性处于中等水平的国家（包括大部分的“一带一路”国家）更加重要。

此外，研究对于正文中的其他重要结论也进行了不确定性分析。正文 3-1 第三段中，衡量能源可持续性得分和人均 GDP 间线性对数关系的系数 $R^2 = 0.60$ ，其在蒙特卡洛方法下的不确定性范围为 [0.53, 0.65]。各地区对全球能源可持续性增长的贡献（3-2 第二段）及其不确定性分别为：南亚 48.5%，[45.5%，50.9%]；东亚与太平洋 32.4%，[31.1%，33.9%]；撒哈拉以南非洲 6.0%，[5.0%，6.8%]；拉丁美洲 5.1%，[4.8%，5.5%]；欧洲与中亚 3.9%[2.7%，5.5%]；北美 2.8%[2.1%，3.7%]；中东与北非 1.3%[1.2%，1.4%]。正文 3-3 部分的结果显示，如果之后仍以 2011-2020 阶段的速度增长，2030 年世界能源可持续性得分仅能达到 SDG7

目标值的 90.3%，这一结果的不确定性区间为 [88.5%，92.4%]。总体来说，权重设置的不确定性对上述主要结论的影响不大，意味着本研究取得的一系列主要结论对于权重设置具有较强的稳健性。

D 能源可持续性评价指标与 SDG7 原指标对比

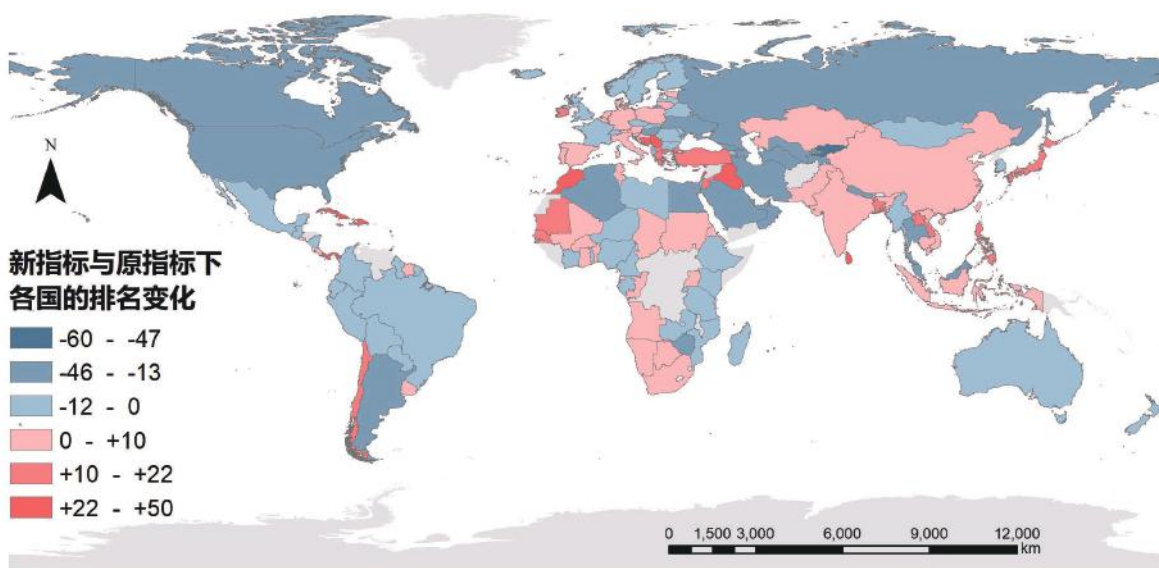
与 SDG7 原指标相比，本研究构建的能源可持续性评价指标（下称新指标）补充了可及性、清洁度和能源效率方面的指标（如在可及性中考虑到了电气化率，清洁度中考虑了空气污染物排放等），并且通过引入可支付性和可靠性指标，覆盖到了这两个在原指标体系中被忽略的维度（见附表 2），结合更加明确的权重分配方式，实现了对能源可持续性更加全面的评价。

附图 2 中展示了在新指标与原指标下，各

附表 2 | 能源可持续性评价指标与 SDG7 原指标对比，深蓝色标注的为原指标

能源可持续性维度	指标
可及性 (37.1%)	农村人口的电力普及率
	城镇人口的电力普及率
	清洁炊事燃料的普及率
	终端能源消费的电气化率
清洁度 (34.9%)	终端能源消费中现代可再生能源占比
	空气污染物排放强度
	CO ₂ 排放强度
能源效率 (7.4%)	单位 GDP 的能源排放强度
	能源分配效率
可支付性 (9.3%)	电力消费占收入的比例
可靠性 (11.3%)	电力消费者经历的年均停电次数
	能源自给率

附图 2 | 新指标与原指标下各国的排名变化，蓝色代表新指标下排名上升，红色代表排名下降



个国家能源可持续性排名的变化。通过新加入的指标和维度，新指标显示出了原指标未能覆盖的问题，使得一些国家的排名相比于原指标下降。例如，欧洲国家的排名相对下降主要是由于能源安全指标的引入；亚洲国家则在新加入的空气污染物和碳排放强度指标上表现不佳，从而出现排名下降；撒哈拉以南非洲国家在可支付性这一新维度上的问题也反映在了其排名的下降中。从新指标和原指标区域分布的差异中，新指标的全面性得到了更直观的体现。

E 能源可持续性 2030 目标值的设定

为了衡量世界能源可持续性距离 2030 年可持续发展目标的进度，研究根据联合国可持续发展议程中提出的发展目标，结合 IEA《零碳

2050》研究报告的结果，为全球能源可持续性的 12 个指标设定了其在 2020 年的目标值。具体来说，农村电力普及率、城市电力普及率和清洁炊事燃料普及率三个指标根据联合国可持续发展议程设定为 100%，电气化率和可再生能源占比根据《零碳 2050》中实现 1.5℃情景路径下的结果，分别设定为 26% 和 30%；空气污染物排放强度和 CO₂ 排放强度则根据可再生能源占比的变化设定了新的目标值；2030 年的单位 GDP 能源强度根据《零碳 2050》报告设定为 2019 水平的 62.4%。其他四个指标，包括能源分配效率、电力支出占收入比例、停电频率和能源自给率，由于缺少合适的目标参照值，故设定为与 2020 年水平保持不变，因此本研究的 2030 能源可持续性目标值是一个偏保守的估计。

参考文献

- [1]The Sustainable Development Goals Report 2021 [R]: United Nations, 2021.
- [2]UNFCCC. Sharm el-Sheikh Implementation Plan [Z]. UNFCCC. 2022
- [3]Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development [R]: United Nations, 2015.
- [4]Elavarasan R M, Pugazhendhi R, Jamal T, et al. Envisioning the UN Sustainable Development Goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the post-COVID-19 world [J]. Applied Energy, 2021, 292: 116665.
- [5]Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC, 2022.
- [6]Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, et al. Global Carbon Budget 2021 [J]. Earth Syst Sci Data, 2022, 14(4): 1917-2005.
- [7]Tong D, Zhang Q, Zheng Y, et al. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 ° C climate target [J]. Nature, 2019, 572(7769): 373-7.
- [8]World Energy Trilemma Index 2021 [R]: World Energy Council, 2021.
- [9]Fostering Effective Energy Transition 2021 edition [R]: World Economic Forum, 2021.
- [10]Shortall R, Davidsdottir B. How to measure national energy sustainability performance: An Icelandic case-study [J]. Energy for Sustainable Development, 2017, 39: 29-47.
- [11]Singh H V, Bocca R, Gomez P, et al. The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system [J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 26: 100382.
- [12]Elavarasan R M, Pugazhendhi R, Irfan M, et al. A novel Sustainable Development Goal 7 composite index as the paradigm for energy sustainability assessment: A case study from Europe [J]. Applied Energy, 2022, 307: 118173.
- [13]Rusydiana A S, Laila N, Tubastuvi N, et al. Energy efficiency in OIC countries: SDG 7 Output [J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2021, 11(1): 74.
- [14]Su W, Zhang D, Zhang C, et al. Sustainability assessment of energy sector development in China and European Union [J]. Sustainable Development, 2020, 28(5): 1063-76.
- [15]Altintas K, Vayvay O, Apak S, et al. An extended GRA method integrated with fuzzy AHP to construct a multidimensional index for ranking overall energy sustainability performances [J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1602.
- [16]Siksnyte I, Zavadskas E K, Bausys R, et al. Implementation of EU energy policy priorities in the Baltic Sea Region countries: Sustainability assessment based on neutrosophic MULTIMOORA method [J]. Energy Policy, 2019, 125: 90-102.

- [17]郭亚军. 综合评价理论、方法及拓展 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18]朱喜安. 综合评价方法优良标准研究 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2020.
- [19]易平涛, 李伟伟, 郭亚军. 综合评价理论与方法 (第二版) [M]. 北京: 经济管理出版社, 2019.
- [20]Net Zero by 2050 [R]. Paris: IEA, 2021.
- [21]Karekezi S, Lata K, Coelho S T. Traditional biomass energy: improving its use and moving to modern energy use; proceedings of the International conference for renewable energies, F, 2004 [C].
- [22]Mani S, Shalu Agrawal, Abhishek Jain and Karthik Ganesan. State of Clean Cooking Energy Access in India: Insights from the India Residential Energy Survey (IRES) 2020 [R]. New Delhi: Council on Energy, Environment and Water, 2021.
- [23]Ram M. Shrestha T R L, Bijay Bahadur Pradhan, Amnaya Paudel, and Pratik Karki. Energy Efficiency in South Asia [R]. Philippines: Asian Development Bank, 2021.
- [24]India blackouts leave 700 million without power [N]. The Guardian, 2012-.
- [25]Pakistanis pray in the dark as power outages of up to 12 hours hit country during Ramadan: reports [N]. The Indian Express, 2022-.
- [26]Coal shortage and heatwave spark India's power woes [Z]. BBC News. 2022
- [27]IEA. The case for energy transitions in major oil- and gas-producing countries [Z]. Paris
- [28]Energy Efficiency in MENA: Status and Outlook [R]. Abu Dhabi: Clean Energy Business Council, 2021.
- [29]Aman E A. Energy Efficiency Perspectives for MENA [Z]. 2022
- [30]Poudineh R, Sen A, Fattouh B. An integrated approach to electricity sector reforms in the resource rich economies of the MENA [J]. Energy Policy, 2020, 138: 111236.
- [31]Yizhong W, Ye H, Qunwei W, et al. Cleaner production vs end-of-pipe treatment: Evidence from industrial SO₂ emissions abatement in China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111429.
- [32]Renewable energy targets [Z]. European Commission. 2022
- [33]Ari A, Arregui N, Black S, et al. Surging energy prices in europe in the aftermath of the war: How to support the vulnerable and speed up the transition away from fossil fuels [J]. 2022.
- [34]Mišík M. The EU needs to improve its external energy security [J]. Energy Policy, 2022, 165: 112930.
- [35]Regional Action Plan for Latin America [R]. Abu Dhabi, United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [36]Kirat Y. The US shale gas revolution: An opportunity for the US manufacturing sector? [J]. International Economics, 2021, 167: 59-77.
- [37]朱磊, 陈迎. “一带一路” 倡议对接 2030 年可持续发展议程——内涵, 目标与路径 [J]. 世界经济与政治, 2019, 4.

- [38]姜彤, 王艳君, 袁佳双,等. “一带一路” 沿线国家 2020—2060 年人口经济发展情景预测 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(2): 155.
- [39]推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动 [Z]//国家发展改革委 外, 商务部. 2015
- [40]Wang C N. China Belt and Road Initiative (BRI) Investment Report 2021 [R]. Shanghai: Green Finance & Development Center, FISF Fudan University, 2022.
- [41]Chong C T, Van Fan Y, Lee C T, et al. Post COVID-19 ENERGY sustainability and carbon emissions neutrality [J]. Energy, 2022, 241: 122801.
- [42]IEA. World Energy Outlook 2022 [R]. Paris: IEA, 2022.
- [43]IEA. A 10-Point Plan to Reduce the European Union ' s Reliance on Russian Natural Gas [R]. Paris: IEA, 2022.
- [44]Commission E. 2022 State of the Energy Union report [R]. Brussels: European Commission, 2022.
- [45]Renewable Power Generation Costs in 2020 [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- [46]Energy Technology Perspectives 2020 [R]. Paris: IEA, 2020.
- [47]Cuiyun C, Chazhong G. Green development assessment for countries along the belt and road [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110344.
- [48]2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]: IPCC, 2006.
- [49]Shi G, Lu X, Zhang H, et al. Air pollutant emissions induced by rural-to-urban migration during China's urbanization (2005–2015) [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2022, 10: 100166.
- [50]McMurray A, Pearson T, Casarim F. Guidance on applying the Monte Carlo approach to uncertainty analyses in forestry and greenhouse gas accounting [J]. Winrock International: Arlington, VA, USA, 2017: 26.



2023 世界能源可持续性评价报告

—— 聚焦 “一带一路”

免责声明

本报告受方法和数据所限，不当之处在所难免。报告相关结论和政策建议仅代表作者团队个人观点，不代表作者所在单位和机构及报告资助方观点。

更多免费行业报告

并购家

www.ipoiipo.cn