

“一带一路”国家 分布式光伏发展 潜力评估

ASSESSMENT OF DISTRIBUTED SOLAR
PV POTENTIAL IN BRI COUNTRIES

CHARLIE DOU (都志杰) 王珮珊 袁敏 苗红 宋婧



校对
谢亮 hippie@163.com

设计与排版
张烨 harryzy5204@gmail.com

目录

III 执行摘要

VII Executive Summary

1 第一章 分布式光伏对“一带一路”国家的意义

1 “一带一路”及“一带一路”国家基本情况

4 分布式光伏在全球的进展

5 在“一带一路”国家发展分布式光伏的重要性

7 第二章 “一带一路”国家分布式光伏发展潜力评估

7 分布式光伏潜力评估方法学综述

8 资源侧：建筑物屋顶分布式光伏潜力评估

12 需求侧：无电地区分布式光伏潜力评估

15 分布式光伏应用场景

18 小结

21 第三章 典型国家分布式光伏潜力评估

21 埃塞俄比亚

24 印度尼西亚

29 第四章 结论与建议

33 附录

34 缩写表

35 注释

36 参考文献



执行摘要

主要结论

- 近年来气候变化带来的灾难性极端天气更加频繁。作为主要的温室气体排放源，能源部门迫切需要从化石燃料向可再生能源转变。
- 由于经济欠发达，大多数“一带一路”国家¹应对气候变化更具挑战性。
- 分布式光伏技术成熟，成本下降，可应用于“一带一路”沿线国家的多种场景，为当地经济发展和能源转型带来显著效益。
- 本研究通过情景分析对分布式光伏在141个“一带一路”国家的发展潜力进行了评估，包括住宅和工商业建筑的屋顶光伏装机潜力以及用于满足无电地区电气化需求的离网光伏装机潜力。
- 评估结果显示，到2030年，“一带一路”沿线141个国家的分布式光伏新增装机容量为150~334GW，而离网光伏的装机潜力为6.4~14.0GW。

工业革命以来，全球地表平均气温升高导致的气候变化正在对世界各国社会经济发展造成越来越广泛的影响，如美国和澳大利亚的山火、埃塞俄比亚和印度尼西亚的干旱、中国河南郑州的特大暴雨灾害等。国际社会公认温室气体排放是导致气候变化的主因，而化石能源燃烧排放的二氧化碳占全球温室气体排放总量的76%¹。因此，加快世界各国能源系统由化石能源主导向可再生能源主导转变是全球应对气候变化的重中之重。

气候变化对脆弱群体造成的威胁更加显而易见。联合国难民署的数据显示，大约90%的难民来自最脆弱和对适应气候变化影响最缺乏准备的国家²。“一带一路”国家大多数为发展中国家，其中一部分国家（特别是非OECD国家）经济发展相对滞后，能源基础设施薄弱，仍有一定规模的人口无法获得电力。这些国家一方面需要大力发展经济，加快电力基础设施建设，改善民众生活；另一方面又受到气候变化带来的严峻挑战，需要在发展经济的同时采取有效措施减少温室气体排放。为应对全球气候变化，截至2021年11月，142个BRI国家中有139个国家提交了国家自主贡献（Nationally Determined Contributions, NDCs）文件，其中，超过80%的国家提出了可再生能源发展目标，约70%的国家制定了量化目标。

可再生能源分布式应用是与集中式电站并重的推广清洁能源发电的重要措施。2010年以来，光伏发电成本下降超过80%³，一些国家分布式光伏的平准化成本已显著低于居民用电价格，为大规模部署分布式光伏提供了可行性和广阔前景。但到目前为止，大部分BRI 141国家的非水可再生能源利用水平仍落后于全球平均水平。

中国是全球范围内能源领域最大的投资者和设备供应商。在发展国内可再生能源的同时，促进海外绿色能源投资尤为重要。除了在海外投资建设可再生能源电站，我们应该认识到分布式可再生能源，特别是分布式光伏，在“一带一路”沿线国家也有巨大的发展潜力和深远影响。例如，在住宅和工商业屋顶安装分布式光伏进行发电，也

可以通过离网光伏系统为无电地区的人群提供电力。投资开发分布式可再生能源可以直接改善当地居民的生活质量，为实现可持续发展目标7（确保所有人都能获得负担得起、可靠、可持续的现代能源）做出贡献。

本研究基于BRI国家的资源条件、经济发展阶段等因素，从分布式光伏在资源侧和需求侧的应用入手，通过构建“基础情景”和“积极情景”，重点对141个BRI国家屋顶光伏的开发潜力以及分布式光伏用于无电人口通电的开发潜力进行了测算，并选取埃塞俄比亚和印度尼西亚两个典型国家进行分析。评估结果可供BRI国家能源规划主管部门参考，也可为各国在海外进行可再生能源投资和开展清洁能源对外援助提供帮助。研究结果重在展示分布式光伏在BRI国家的开发潜力，而不是具体项目开发层面的分析。

评估结果显示，到2030年，141个BRI国家分布式屋顶光伏新增装机容量潜力为150~334 GW，满足无电人口通电要求的分布式光伏装机容量为6.4~14.0 GW。在无电地区，分布式光伏的社会意义远大于经济意义，它直接关系到联合国可持续发展目标中“消除贫困”和“提供经济适用的清洁能源”等多个目标能否顺利实现。

BRI国家开发利用分布式光伏的意义和潜力需要得到规划者、决策者、投资者等相关方的充分关注。建议BRI 141国家的能源规划部门和决策部门将分布式光伏纳入本国的能源规划，积极营造有利于分布式光伏开发利用的政策环境；建议城市、园区/社区管理者发挥资源整合的作用，促进分布式光伏项目开发企业、当地电网公司、电力用户、屋顶业主、金融机构之间的协调，探索可持续的项目开发建设和运营管理模式；建议来自全球、区域及国别层面的各类多/双边发展机构的资金与技术援助为无电地区发展分布式光伏提供有力支持，充分发挥发展机构在分布式光伏项目识别、孵化与援助投资方面的资源与组织优势，与BRI国家电力可及的需求切实对接，进一步探索与商业机构形成联合体等多方合作模式；建议中国的海外能



源投资企业充分认识到分布式光伏的巨大市场潜力，选择条件相对成熟的地区/园区开展项目试点，并复制推广。中国在发展分布式光伏方面积累了丰富的经验，在推动绿色“一带一路”建设的过程中，要加强与BRI国家的沟通分享，让中国经验真正有助于这些国家的能源绿色转型。

研究方法

屋顶分布式光伏 (Rooftop PV) 和无电地区分布式光伏是BRI国家分布式光伏的两种典型应用场景。对于前者，本研究采用建成区 (Built-up area) 面积法，在各类建筑屋顶投影面积的基础上，构建“基础情景”和“积极情景”，并考虑遮挡、屋顶坡度、朝向等影响太阳能利用的主要因素，测算出有效屋顶面积，进而估算出装机容量。对于后者，本研究采用国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 的无电人口最低供电标准 (Access to Energy -Our World in Data), 根据IEA (World Energy Outlook-2020) 提供的2019年BRI国家现存无电人口数量，对离网光伏在无电地区电力建设应用领域中的前景进行评估和预测。此外，本研究还选取了埃塞俄比亚和印度尼西亚两个典型国家进行深入分析，最后对分布式光伏潜力评估中的关键结论进行了总结。

数据来源

本报告的数据来源主要分为“直接引用数据”和“分析归纳数据”两大类：

- 直接引用数据。本报告的基本数据主要来源为如下国际组织或机构：联合国 (United Nations, UN)、世界银行集团 (World Bank Group, WB)、国际货币基金组织 (International Monetary Fund, IMF)、经济合作与发展组织 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)、人口资源局 (Population Reference Bureau, PRB)、Our World in Data (OWID)、国际能源署 (International Energy

Agency, IEA) 和国际可再生能源署 (International Renewable Energy Agency, IRENA)。

- 分析归纳数据。本报告中，关于BRI国家的一些相关数据 (文中未标注数据来源) 系本研究团队根据上述国际组织和机构的基本数据汇总后建立了BRI数据库，并在此基础上进行分析计算而得出的数据。

报告结构

本报告分为四个部分。

第一部分介绍BRI及BRI国家基本情况、全球分布式光伏发电发展现状、在BRI国家发展光伏分布式应用的重要性和光伏发电的主要应用方式。

第二部分概述了评估分布式光伏潜力的常见方法，分别从资源侧和需求侧构建了分布式光伏的潜力评估模型。资源侧屋顶分布式光伏的潜力评估采用建成区面积法，对“基础情景”和“积极情景”两种情景下BRI国家2030年分布式光伏的开发潜力进行评估。需求侧主要从满足无电地区用电缺口的角度出发，评估了离网型分布式光伏的开发潜力。在此基础上，本部分还介绍了适用于BRI国家的分布式光伏典型应用，包括在居民和工商业屋顶的应用、与两轮/三轮微型电动车充电桩的结合、与农业种植/养殖设施的结合等。

第三部分选取埃塞俄比亚和印度尼西亚作为“一带一路”合作的两个重点区域 (非洲和东南亚) 的代表国家，深入分析了这两个国家的能源供需与经济发展现状，从资源侧和需求侧对分布式光伏的开发应用潜力进行了评估，并识别了分布式光伏在这两个国家的主要应用场景。

第四部分总结了BRI国家分布式光伏潜力评估的关键结论，阐明了在BRI国家推进分布式光伏发展的现实意义，并对主要相关方提出了具体的行动建议。





EXECUTIVE SUMMARY

HIGHLIGHTS

- Climate change has made catastrophic extreme weather events more frequent in recent years. As the largest GHG emitter, the energy sector should shift from fossil fuels to renewables with urgency.
- It is more challenging for Belt and Road (BRI) countriesⁱⁱ, most of which are economically less developed, to tackle climate change.
- With technology growing mature and cost declining substantially, distributed solar PV could be applied to diverse scenarios in BRI countries, bringing significant benefits to both local economic development and energy transition.
- Scenario analysis has been conducted to evaluate the potential of distributed solar PV in 141 BRI countries, covering rooftop solar PV for residential and industrial/commercial buildings, as well as solar PV for rural electrification on the demand side where the local populations do not have energy access.
- The result shows that by 2030, the incremental capacity of distributed solar PV in 141 BRI countries could reach 150~334GW, while the potential demand for off-grid solar PV will be 6.4~14.0 GW.

Introduction

In recent decades, climate change has had widespread impacts on socio-economic development worldwide. Catastrophic extreme weather events such as mountain fires, droughts, and heavy rainstorms, occurred more and more frequently. It is well recognized that greenhouse gas emissions are the primary cause of climate change. Carbon dioxide emissions from fossil fuels account for 76% of total greenhouse gas emissions. Therefore, accelerating global energy transition from fossil fuels to renewables is the top priority for tackling climate change.

Populations in less-developed areas are more vulnerable to climate change. According to UNHCR, about 90% of refugees come from countries that are most vulnerable and least prepared for climate change adaptation. Most of the Belt and Road countries are developing countries with insufficient energy infrastructure, and significant portions of the local populations still lack access to electricity. It's challenging for these countries to balance economic development and the need to address climate change. As of November 2021, 139 out of 142 BRI countries submitted Nationally Determined Contributions (NDCs). Among these 139 countries, about 70% have set quantitative renewable energy (RE) targets.

Distributed renewable energy is complementary to centralized renewable energy in supporting the clean energy transition. The cost of solar photovoltaic (PV) has dropped by more than 80% since 2010. In some countries, the levelized cost

of distributed PV is already significantly lower than the price of residential electricity, which makes it more practical to scale up distributed solar PV around the world.

China is the top investor and equipment supplier in the energy sector on a global scale. It is extremely important for China to promote overseas green investment while developing domestic renewable energy. In addition to building large-scale renewable energy power plants overseas, we should realize that distributed renewable energies, particularly distributed solar, also have great potential in development and far-reaching impact in BRI countries. For example, distributed solar could generate electricity with residential, commercial, and industrial rooftop installations, and be easily installed to deliver electricity to populations without access to the grid. Investment and development of distributed renewable energy could directly improve the local life quality and further contribute to Sustainable Development Goal 7 (Ensure access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy for all).

About this report

This publication is based on existing analysis and provides a quantitative potential assessment focusing on distributed solar in BRI countries from residential, commercial, and industrial applications, as well as rural electrification. Chinese enterprises (both state-owned enterprises and private-owned ones), as the main



entities of overseas investment, could be better informed on country-specific resources and the demand situation. This publication is intended to provide a general landscape analysis with the aim of showing that there is huge market potential to develop distributed solar PV in BRI countries. As a preliminary potential analysis, this publication is not intended to conduct application-level analysis, due to operational and executional concerns.

Research Methods

Scenario analysis is applied to this research. We screened available rooftops in built-up areas and analyzed the growth trend in “base-line scenario” and “positive scenario” in the coming two decades, considering the main factors affecting solar energy utilization, such as shading, roof slope, and orientation, then calculated the potential installed capacity of distributed solar PV. Meanwhile, as off-grid solar system is well recognized as one of the best solutions to address the energy access issue, we also estimated the potential installed capacity of off-grid solar PV for those households which currently do not have access to electricity, assuming off-grid solar PV can meet 40%-60% of their lowest electricity demand. It should be noted that, there exists an overlap between results from “rooftop screening in built-up areas” and “off-grid solar system analysis”, so the two kinds of results should not be added up.

Data Sources

The main data sources include the United

Nations (UN), the World Bank Group (WB), the International Monetary Fund (IMF), the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), the Population Reference Bureau (PRB), Our World in Data (OWID), the International Energy Agency (IEA), and the International Renewable Energy Agency (IRENA).

Based on data directly cited from the above-mentioned international organizations, the research team developed the BRI database for analysis.

Structure of this report

This report has four chapters.

The first chapter provides basic information on the BRI and its member countries, the status quo of the globally distributed PV development, the significance of promoting distributed solar PV in BRI countries, and the main applications of the solar power system.

In the second chapter, the authors reviewed key evaluation methodologies of the potential distributed solar PV, developed scenarios for potential evaluation through “rooftop screening in built-up areas” and “off-grid solar system analysis”. Furthermore, typical application models of distributed solar PV in BRI countries are presented, including applications on residential and commercial/ industrial rooftops, integration with the charging system for e-mobility, and integration with agricultural facilities.



In the third chapter, Ethiopia and Indonesia are selected as representative countries of the two key regions (Africa and Southeast Asia) of the BRI. Based on the two countries' current economic development, energy supply and demand, this chapter assesses the potential of distributed solar PV from the rooftop resources and demand sides, and identifies the main application models of distributed solar PV in both countries.

The fourth chapter summarizes the key findings of previous chapters, emphasizes the significance of promoting distributed solar PV in BRI countries, and proposes recommendations to the main stakeholders.

Conclusion and recommendations

The assessment results show that by 2030, the potential incremental installed capacity of distributed solar PV capacity in 141 BRI countries could reach 150-334 GW, and 6.4-14.0 GW in installed capacity from off-grid solar systems is needed to meet the lowest electricity demand of populations currently without access to electricity. In terms of promoting off-grid solar systems in rural areas, the social implications far outweigh the economic ones, as it is directly related to the achievement of the UN Sustainable Development Goals (SDGs), such as "No Poverty" and "Affordable and Clean Energy."

The significance and potential of the development and utilization of distributed solar PV in BRI countries require sufficient attention from planners, policymakers, investors, and other stakeholders.

- Energy planning departments should incorporate distributed PV into their planning system. National and local policy-making authorities need to introduce appropriate guiding policies and measures to attract investors and project developers to enter the distributed PV market.
- Regulators from BRI countries' cities, industrial parks, and communities need to facilitate the coordination amongst distributed solar PV developers, local utilities, electricity consumers,

rooftop owners and financial institutions, and explore sustainable models for project development, construction, and operation management together.

- Multilateral/bilateral development agencies, with a unique role in project identification, incubation, and investment, should provide financial and technical assistance to promote distributed solar PV for energy access, connect supply with local demand, further explore multi-party cooperation mechanisms with commercial institutions.
- It is suggested that Chinese overseas energy investment enterprises pay more attention to the potential of the distributed solar PV market in BRI countries, develop pilot projects in regions/industrial parks with relatively mature conditions, and scale up the success.
- China has accumulated rich experience in the development of distributed solar PV. To promote the Green Belt and Road Initiative, it is necessary for China to strengthen communication and experience-sharing with BRI countries, contributing to the energy transition in those countries.





第一章

分布式光伏对“一带一路”国家的意义

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2021年8月发布的报告指出“全球升温1.5℃或仅需二十年,未来十年的果断行动加速减排对于全球温升控制至关重要”。当前问题的核心不是全球气候是否在变暖,而是如何应对正在变暖的气候。2019年,全球的电力供应仍有62.2%来自化石燃料⁵,面对高碳排放的能源结构,我们需要促进可再生能源供电供热在工业、交通、建筑等重点领域的推广和规模化应用,尽早实现能源转型。当前,越来越多的国家对于可再生能源在脱碳领域的作用达成共识,并在NDC中提出了量化的可再生能源装机目标。这促进了太阳能和风能等可再生能源的快速发展。能源系统由以化石燃料为主的传统集中式结构体系向以清洁能源为主、集中式和分布式并举的新型能源体系转型已是大势所趋。

与传统的集中式化石燃料电站相比,分布式光伏的优势主要体现在以下几点:一是适应光伏资源分散性的特点;二是全生命周期内污染物排放和温室气体排放低;三是对远距离输电基础设施的投资需求大幅降低;四是消纳模式以自发自用为主,减少电力输送过程中的损失。因此,分布式光伏应用推广迅速,截至2020年,全球光伏累计装机容量为760.4GW⁶,其中分布式光伏为268GW,占比35.2%,但目前主要集中在发达国家。一些BRI141国家(如位于撒哈拉以南非洲、南亚、东南亚的国

家)虽然有较好的太阳能资源,但分布式光伏尚未得到规模化开发利用。本研究报告将对BRI国家的分布式光伏潜力及典型应用场景进行探讨。

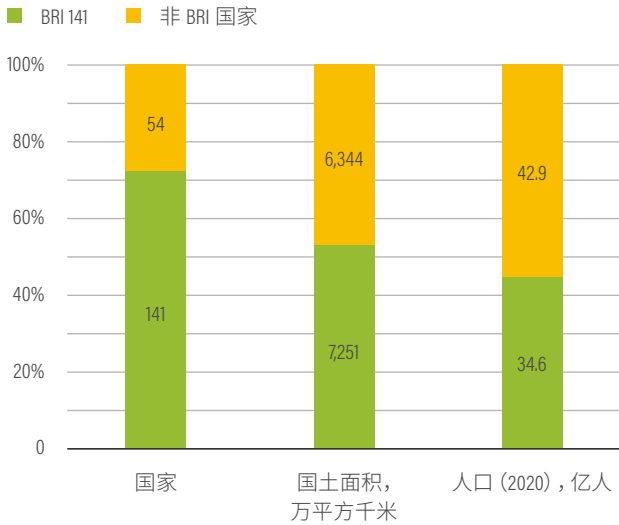
1.1 “一带一路”及“一带一路”国家基本情况

中国在2013年9月和10月分别提出了建设“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”的合作倡议,简称“一带一路”倡议(The Belt and Road Initiative, 以下或简称BRI, 指含中国在内的142个“一带一路”国家,而BRI 141国家指不含中国的其余“一带一路”国家),旨在积极促进与相关国家(地区)的经济合作伙伴关系,实现共同发展。截至2021年11月,已有141个国家和32个国际组织与中国签署了共建“一带一路”合作文件⁷。

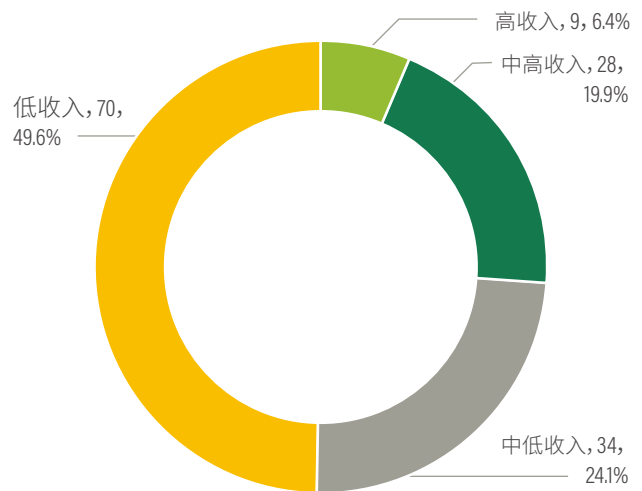
对官方数据和本团队分析进行整合可得:“一带一路”141个国家占全世界195⁸个国家数量的72.3%;全部国土面积合计7251万km², 占总国土面积的53.3%;2020年, BRI141国家人口合计34.6亿人, 占世界人口的44.6%。从BRI141国家经济发展水平来看,按世界银行⁹2020年7月1日开始执行的收入标准划分¹⁰,高收入国家共有9个,而中等偏下或者低收入国家共有104个,具体分布如图1.1所示。2020年, BRI141国家的人均GDP为5037美元,远低于同年全球人均GDP10926

图 1.1 | BRI141国家基本情况

BRI国家、国土和人口在世界的占比



BRI国家按世界银行收入标准分类



美元的水平。这些中等偏下和低收入国家的经济亟须得到发展，而经济发展离不开各种类型的生产经营活动以及能源电力的支撑。

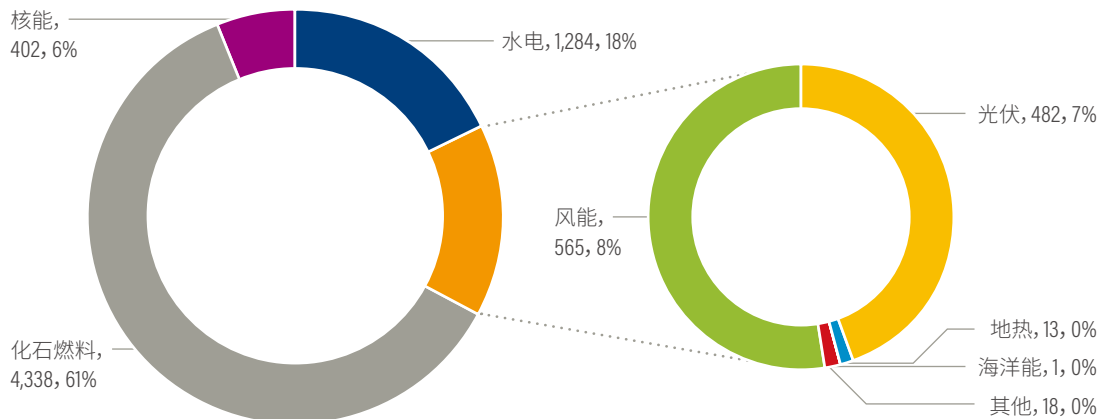
在能源消费方面，大多数BRI国家的可再生能源发展水平仍明显低于全球平均水平。BRI 141国家的人口占世界总人口的44.6%，而电力装机容量却仅占全球总装机容量的26.7%，太阳能发电装机容量只占全球光伏总装机容量

量的13.5%。发电量方面，BRI 141国家70 %的电力来自化石燃料，明显高于全球平均水平（62.2 %）；BRI 141国家非水可再生能源发电量占比仅为7 %（全球平均为11 %），其中太阳能光伏发电量仅占2 %，如图1.2所示。另外，许多BRI国家对水电的依赖度很高，然而由于气候变化导致的水资源变化使得水力发电的稳定性正受到日益严峻的挑战。这些国家需要探索可再生能源的多元化利用，重塑能源格局。

图 1.2 | 全球和BRI 141国家总装机容量及发电量和可再生能源装机容量及发电量

(a) 2018年全球各类发电累计装机容量及占比

单位:GW

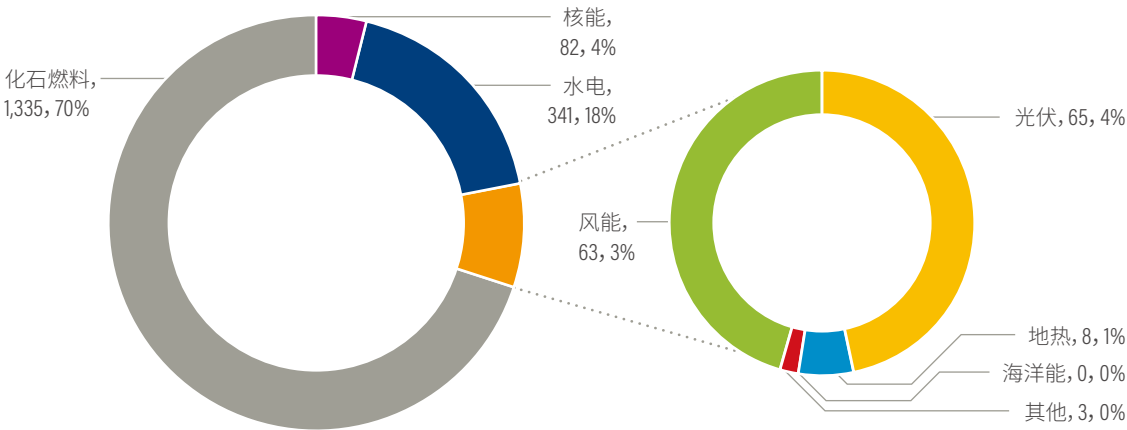


数据来源：UN Data - Energy Statistics Database 和 Our World in Data，本团队汇总分析

图 1.2 | 全球和BRI 141国家总装机容量及发电量和可再生能源装机容量及发电量(续)

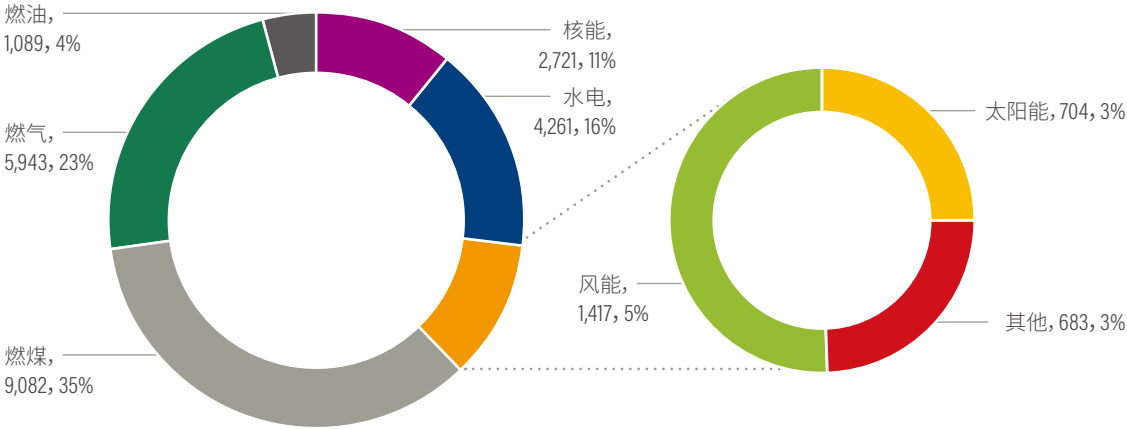
(b) 2018年BRI 141国家各类发电累计装机容量和占比

单位:GW



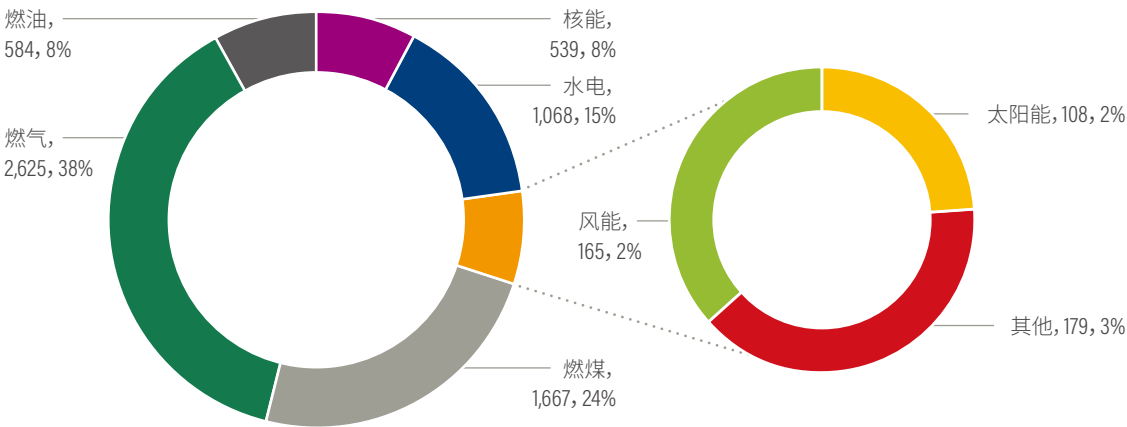
(c) 2019年全球各种能源发电量和占比

单位:TWh



(d) 2019年BRI 141国家各种能源发电量和占比

单位:TWh



数据来源: UN Data - Energy Statistics Database 和 Our World in Data, 本团队汇总分析

1.2 分布式光伏在全球的进展

光伏发电一般分为两类：集中式发电（大型公用事业规模，Utility-scale）和分布式发电（Distributed Generation, DG），如图1.3所示。从实际应用场景来看，分布式光伏发电主要应用于建筑屋顶和为偏远地区的无电人口提供电力服务。这两种应用既可以并网方式接入电网，亦可以离网方式作为独立电源发电。集中式发电与分布式发电的区别主要有以下三点：

- 装机容量不同：集中式发电的装机容量较大，而分布式发电规模相对小而零散。分布式光伏（特别是屋顶分布式光伏）发电系统的大小与建筑物形式密切相关，通常居民住宅屋顶分布式光伏的规模最小，在几百瓦到几千瓦，而工商业建筑物屋顶的分布式光伏系统可大可小，取决于建筑物屋顶的大小，通常在10kW以上，甚至是兆瓦级。

- 系统连接方式不同：集中式发电可接入电压等级较高的输电网络，而分布式发电通常接入低压配电网或以离网方式运行。

- 商业模式不同：集中式发电通常与电网或电力公司签订购电协议（Power Purchase Agreement, PPA）；而分布式发电大多是就地消纳，采用全额上网、自发自用或余电上网的模式运行。

2020年，全球新增光伏装机容量为139.4GW，累计达到760.4GW；分布式光伏新增装机容量约55GW，累计达到268GW。2020年新增分布式光伏装机容量占全球新增光伏装机容量的39.5%，如图1.4所示。影响分布式光伏装机容量规模的主要因素是政策和成本。在中国和欧美等国家政策的推动下，分布式光伏的装机规模快速扩大；技术进步加上规模效应使得光伏发电投资成本和平准化度电成本（Levelized Cost of Energy, LCOE）在过去十年里急剧下降，德国、日本、澳大利亚等国的分布式光伏平准化度电成本已显著低于居民电价¹⁰。

图 1.3 | 光伏发电的类型

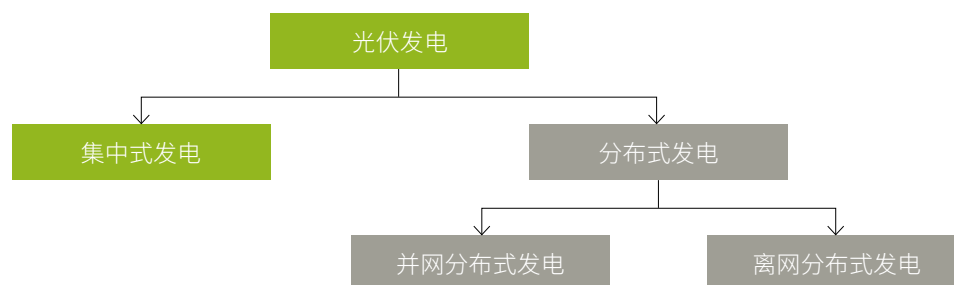
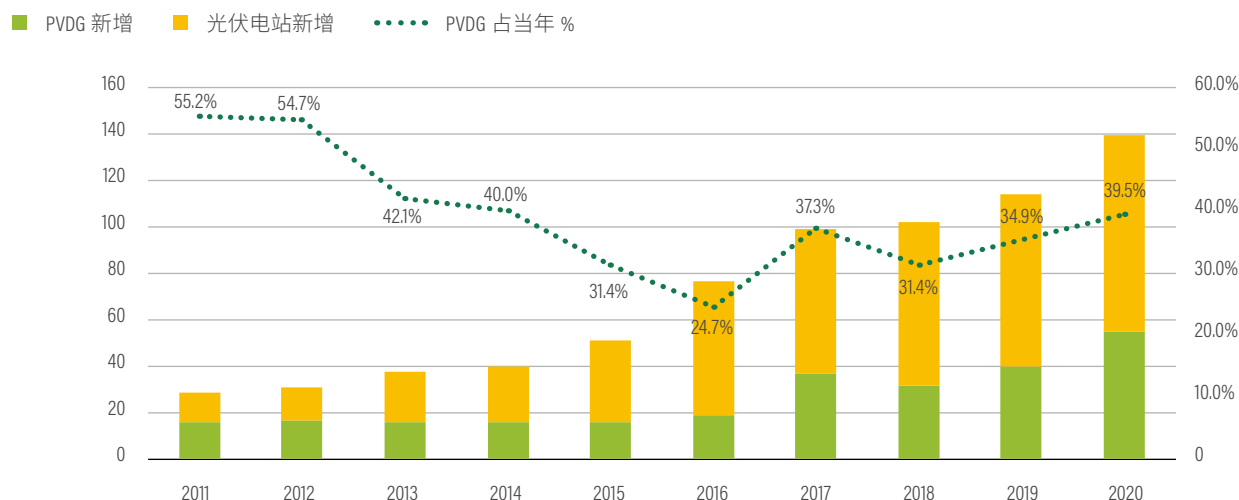


图 1.4 | 2011—2020年新增分布式光伏占当年新增光伏装机容量比例



数据来源：IEA PVPS 2020，IEA PVPS Snapshot 2021

1.3 在“一带一路”国家发展分布式光伏的重要性

在过去的十年中，光伏成本大幅下降，并且仍有进一步下降的空间，越来越多的国家正在将分布式光伏发电作为能源转型的重要技术手段。另外，分布式光伏发电系统建设周期短，能较快实现能源供给，这既有助于推进能源转型，又特别适合能源基础设施较薄弱的BRI国家的能源建设。

对于大部分BRI国家而言，发展经济、提升电能质量、尽早实现全民通电仍是首要任务。在BRI 141国家中，仍有85个国家未实现全民通电^{iv}，占BRI国家的60%，无电人口还有约6.85亿人^v，占全球无电人口的88.8%。这些无电人口大多数居住在由于经济性等原因电网难以到达或未能到达的偏远地区。让这些民众用上电是这些国家政府的一项兼具社会意义和经济意义的任

务。鉴于偏远地区的工程难度较大，电网延伸经济性较差，用离网分布式光伏和其他可再生能源发电解决无电问题是一条在很多国家已经实现的行之有效的途径。

分布式光伏发电既不依赖电网的长距离传输，又充分符合了太阳能资源和用电负荷分散的特点，还避免了集中式电站征地难的问题。在当前应对全球气候变暖的背景下，分布式光伏的发展潜力和推广应用具有很大的空间，既有必要性，也具可行性。





第二章

“一带一路”国家 分布式光伏潜力评估

分布式光伏的应用由并网和离网两种方式构成，并网应用包括了利用屋顶安装的分布式光伏和其他场地/设施上的光伏系统，比如家庭的院子或小片空地。IEA的研究报告^{[1],[2]}分别统计了2011—2019年全球屋顶分布式光伏（Rooftop PV）和全球分布式光伏（Decentralized PV）逐年的装机容量。数据表明，在2011—2019年间，全球屋顶分布式光伏装机容量占到分布式光伏总装机容量的92.1%，处于绝对主导位置。在需求侧方面，除无电地区电力建设方面可以应用分布式光伏外，发达国家居民也可以利用自己家庭空间的优势安装分布式光伏，解决一部分用电需求。目前全球尚有7.71亿人口无法获得电力服务，BRI 141国家占了9成。无电地区电力建设是光伏离网应用的一个非常重要的方面，且具有非常显著的社会效益。因此，本章主要关注资源侧的并网屋顶分布式光伏潜力研究和需求侧的无电地区离网型电力系统建设，对2030年分布式光伏的发展潜力进行评估。其中，资源侧评估以“建成区屋顶面积”为基础，通过假设推算出屋顶分布式光伏的安装潜力；需求侧评估则是以无电人口的电力需求量为基础，通过假设推算出分布式光伏满足无电人口用电需求的装机规模。同时，本章末梳理了分布式光伏在BRI国家的主要应用场景。

2.1 分布式光伏潜力评估方法学综述

一般来说，分布式光伏的潜力可以通过直接法或间接法进行评估测算。直接法主要通过科学技术

手段直接获取各类资源的分布情况，同步考虑其他影响开发的实际因素，估算屋顶分布式光伏的装机潜力；间接法则是从需求出发，利用一个国家的宏观社会经济发展情况估算分布式光伏的应用前景。本节简要梳理了屋顶光伏和无电地区光伏发展的常见评估方法，见表2.1。

简而言之，直接法能提供较为精确的估算数值，甚至可以精确到某个具体的城市、具体的建筑物，更具工程可操作性，但是估算工作量很大，需要投入很大的人力和物力；间接法能提供宏观、长远的前景，适合政府和有关部门的规划，但基本不具有工程指导意义。

分析2011—2019年期间逐年全球屋顶分布式光伏（Rooftop PV）的装机容量（IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3）和全球分布式光伏（Decentralized PV）装机容量（IEA: PVPS Trends in Photovoltaic Applications 2020），在2011—2019年间，全球屋顶分布式光伏装机容量占到分布式光伏总装机容量的92.1%，处于绝对主导位置。因此，本研究将屋顶分布式光伏作为PVDG的主要应用领域进行潜力分析推测。而可供的建筑物屋顶是发展屋顶分布式光伏的物理基础。因此，本研究采用建成区面积法从资源侧对BRI国家分布式光伏发展潜力做出评估。

在需求侧方面，全球尚有7.71亿人口无法获得电力服务，BRI 141国家占了9成。在无电地区推广分布式光伏是解决当地居民用电问题切实可行的路

表 2.1 | 分布式光伏潜力评估方法汇总

分类	名称	方法简述
直接法	航空摄影法 ¹³	通过航空摄影和计算器等为屋顶光伏安装位置提供视觉线索，然后进行手工计算。这种方法可提供最精确的总量估算，但耗时，且无法大规模复制
	GIS法 ¹⁴	大规模估算合适屋顶面积的最可靠方法是基于由正射摄影或光探测和测距 (LiDAR) 数据和地理信息系统 (GIS) 进行建模。这种方法为潜在安装部署提供了可能的上限
	建成区面积法 (Built-up area) ¹⁵	引用统计部门提供的建成区 (建筑物屋顶投影面积) 数据，考虑多种影响因素后进行估算。这种方法相对比较准确，且比航空摄影法和GIS法工作量小，但获取某个国家随时间更新的建筑物屋顶投影面积数据有难度，在缺乏即时数据时需根据历史数据推算
	分类建筑物占地统计法 ¹⁶	用分类建筑物占地统计数据估算。这种方法的前提是要掌握国土面积中不同类型建筑物所占的比例，在此基础上进行评估计算
间接法	按国家发展阶段进行评估 ¹⁷	基于电力需求与经济增长的密切相关性，可以用一个国家可再生能源分布式发展的不同阶段的需求与目标对分布式光伏潜力进行评估。估算过程较为简单，但是未能考虑具体国家的气候条件、居住特点等因素对分布式光伏推广的影响
	单位需求量法 ^{18,19}	以一个国家人均光伏拥有量结合国家总人口数量即可推算出未来的光伏装机容量潜力，亦可以人口或家庭为单位 (人、户) 的需求量结合人口数量或家庭户数推算需求总量。这种方法计算简单，具有宏观指导意义
	引用国际权威机构数据法 ^{20,21,22,23,24}	直接引用国际权威机构发布的数据，也可以用来验证各类评估和预测结果。这种方法计算简单，具有宏观指导意义

径，具有显著的社会效益。因此，本研究采用单位需求量法从需求侧对BRI国家分布式光伏发展潜力做出评估。

2.2 资源侧:建筑物屋顶分布式光伏潜力评估

2.2.1 资源侧潜力评估方法

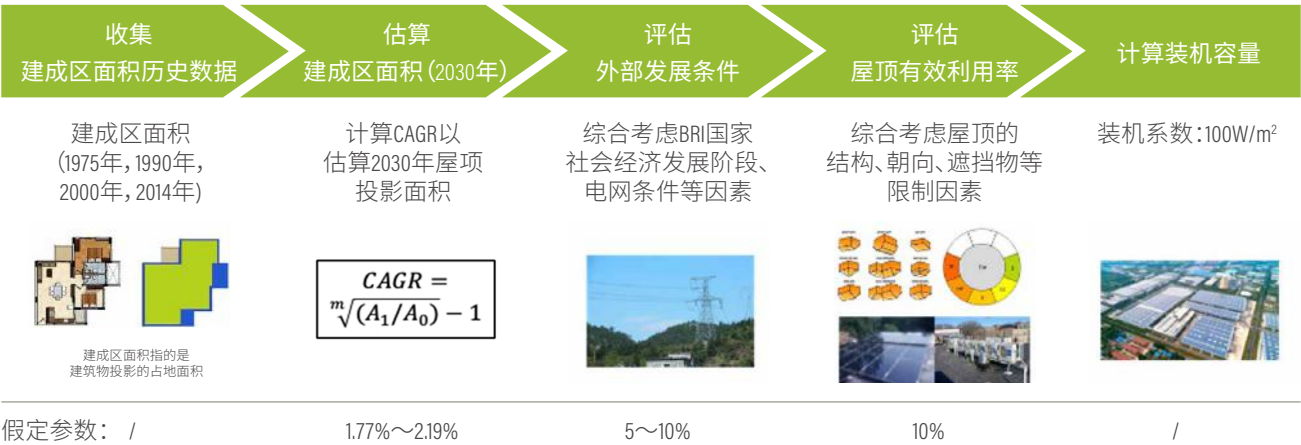
目前分布式光伏的主要应用是建筑物屋顶光伏发电。建筑物屋顶是发展屋顶分布式光伏的物理基础，是资源供给的要素之一。鉴于此，本节将采用表2.1中的建成区面积法对屋顶分布式光伏的发展潜力进行预测。除建筑物屋顶面积这一关键因素外，还有很多影响屋顶分

布式太阳能利用的因素需要考虑：

- 基本要素：建筑物的形状（投影），屋顶的形状、坡度、朝向，屋顶连续平面的大小，以及周边物体（其他建筑物、树木等）产生的阴影遮挡影响。
- 建筑物的结构强度和承载力（能否承重）。
- 大、中、小建筑物的比例。不同大小的建筑物的屋顶对分布式光伏来说利用率不一样。小型建筑屋顶利用的复杂程度远高于大、中型建筑。
- 将来采用的光伏组件的类型、规格（尺寸）、效率和安装方式等。

推算过程总体分为五步，如图2.1所示：

图 2.1 | 2030年建成区屋顶分布式光伏潜力测算流程



第一步：收集建成区面积历史数据。这里参考并使用OECD对于建成区的定义，即“带屋顶结构的建筑物”。

“该定义在很大程度上排除了城市环境或人类足迹中的其他部分，如铺砌的表面（道路、停车场）、商业和工业场地（港口、垃圾填埋场、采石场、跑道）和城市绿地（公园、花园）。”这里Built-up area是建筑物屋顶投影的占地面积，为避免混淆，本文称之为建成区面积。如果屋顶是平屋顶（Flat roof），这个面积约等于屋顶的实际面积，如果屋顶有倾斜角度，如斜屋顶（Gabled roof）、金字塔屋顶（Pyramidal roof）或三角形屋顶（Pitch roof），则屋顶实际面积会大于建成区面积，但由于朝向和坡度等原因，利用率反而可能下降。

第二步：估算建成区面积（2030年）。由于数据可获得性不佳，目前没有可获得的各国建成区面积逐年更新的数据。在此情况下，基于可获得的1975年、1990年、2000年和2014年的建成区面积数据，用公式（1）计算一个区域或者国家屋顶面积的年复合增长率（CAGR）^{vi}，再用公式（2）推算各区域或国家2030年的建成区面积。假设过去两个年份的建成区面积分别为 A_0 和 A_1 ， A_0 早于 A_1 ， A_0 与 A_1 的时间间隔为 m 年，则 A_0 和 A_1 间的CAGR可以计算如下：

$$CAGR = \sqrt[m]{(A_1/A_0)} - 1 \quad (1)$$

建成区面积为：

$$A = A_1 \times (1 + CAGR)^n \quad (2)$$

式中：

A 为目标年建成区面积， km^2 ；

$CAGR$ 为根据历史数据推算的年复合增长率，%；

n 为当前年距离基础年的间隔年数。

第三步：评估外部发展条件。屋顶分布式光伏的开发利用与每一个具体国家建筑物建设和屋顶分布式光伏的发展阶段、相关政策及经济能力有关，也与当地电网的实际条件相关。BRI国家多为发展中国家或欠发达国家，分布式光伏的发展大多处于起步阶段，还未形成强有力的推动政策、财政支持或稳健的输配电系统。在估算2030年屋顶光伏潜力时，基于上一步计算的2030年建成区面积，取基础情景（5%）^{vi}和积极情景（10%）作为两个情景推算，即可以理解为受政策、经济发展、国家可再生能源目标、成本降低等外部因素的推动，2030年将会有5%~10%的建成区面积可以安装屋顶光伏，记为 P_i 。

第四步：评估屋顶有效利用率。除了受外部/宏观因素的影响，还需考虑与屋顶相关的影响因素，如屋顶结构、屋顶朝向、屋顶周边的遮挡物/阴影，以及屋顶上

一些设备（电梯房、空调室外机）的占地等。基于上述限制因素，在宏观因素的基础上，取屋顶有效利用率 $E_i = 10\%$ ^{viii}，据此推算内外部条件允许的情况下，可用于安装屋顶光伏的实际面积。

第五步：计算装机容量。参考每单位面积可以安装的光伏组件量 $F_i = 100 \text{ W/m}^2$ ^{ix}，将上述假设代入公式（3），估算2030年BRI国家屋顶分布式光伏的潜在装机容量：

$$M_d = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \times E_i \times F_i \quad (3)$$

式中：

M_d 为屋顶分布式光伏预测装机容量，GW；

A_i 为某类建筑物屋顶的投影面积， km^2 ；

P_i 为可以用于安装屋顶光伏的建筑物比例，%；

E_i 为屋顶有效利用率，%；

F_i 为光伏面积利用系数，即每单位面积可以安装的光伏组件量， kW/m^2 或 GW/km^2 ；

i 为建筑物类型（如居民住宅或工商业建筑），建筑物类型与屋顶利用率 E_i 有关， $i = 1 \sim n$ 。

2.2.2 资源侧潜力评估结果

确定符合BRI国家发展情况的建成区面积CAGR是最重要的一步。根据OECD提供的全球和OECD国家1975年、1990年、2000年和2014年的建成区面积历史数据，可推算非OECD国家的建成区面积历史数据，然后计算1975—1990年、1990—2000年、2000—2014年间的累计增长率（ R_c ），并用公式（1）得到全球、OECD国家及非OECD国家在不同年份区间的年复合增长率（CAGR），见表2.2。由此可见，因OECD国家经济社会发展速度高于非OECD国家，其建成区面积增速于1975—1990达到峰值后放缓；而非OECD国家多数为发展中或欠发达国家，建成区面积增速将高于OECD国家。

用上述方法进一步分析BRI 141国家^x及其中OECD国家和非OECD国家在1975—2014年期间的建成区面积的CAGR，结果见表2.3。

由表2.3中的数据可以看出不同国家组的CAGR在1975—2014年间的变化趋势^{xi}。导致建成区面积年复合增长率变化的因素很多，如经济发展、人口增长、城镇化率提高、工商业发展和居住形式变化（原来多户平房变成高楼，人口、户数虽然增加，但屋顶面积反而减少），都会导致建成区面积年复合增长率的变化。

进一步分析BRI 141国家1975—1990年、1990—2000年和2000—2014年的CAGR，结果见表2.4。

表 2.2 | 全球、OECD国家和非OECD国家建成区面积累计增长率(Rc)和年复合增长率(CAGR)

年份	1975—1990年		1990—2000年		2000—2014年	
参数	R_c	CAGR	R_c	CAGR	R_c	CAGR
全球	37.9%	2.17%	25.3%	2.28%	20.3%	1.33%
OECD国家	27.76%	1.65%	22.39%	2.04%	16.34%	1.09%
非OECD国家	50.12%	2.74%	28.24%	2.52%	24.24%	1.56%

表 2.3 | BRI 141国家、BRI 141国家中的OECD国家和非OECD国家1975—2014年建成区面积的CAGR*

	1975年	1975—1990年	1990—2000年	2000—2014年
BRI141国家	1.24%	1.94%	2.19%	1.18%
BRI141国家中的OECD国家	1.45%	1.62%	1.93%	1.01%
BRI141国家中的非OECD国家	1.21%	2.87%	2.47%	1.61%

注释：*1975年的年复合增长率直接取自OECD提供的1975年增长率数据，1975—1990年、1990—2000年和2000—2014年间的CAGR根据年份区间内建成区累计增长值计算得到。

表 2.4 | BRI 141国家1975—1990年、1990—2000年和2000—2014年的CAGR

	1975—1990年	1990—2000年	2000—2014年	最小值	最大值	平均值
CAGR (%)	1.94%	2.19%	1.18%	1.18%	2.19%	1.77%

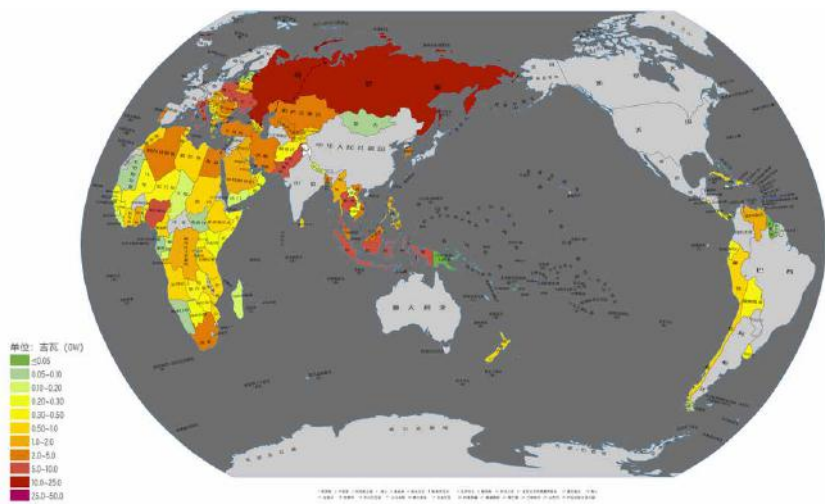
2014年BRI 141^{xii}国家建成区面积为24.5万平方千米，以此为基础，并选择BRI 141国家1975—2014年的三个CAGR的平均值（1.77%）为基础复合增长率，以最大值（2.19%）为积极复合增长率，对2019年和2030年的建成区面积进行预测。这些相对于2019年已有建成区的新增建筑物屋顶以及原来存在但尚未开发利用的屋顶都将是发展屋顶分布式光伏的物理基础。

在此基础上，结合上述对BRI 141国家鼓励发展屋顶分布式光伏的政策、经济能力和电网接纳情况等外部因素的考虑，再结合屋顶本身面积的有效利用率及单位面积光伏装机容量，按图2.1的估算流程测算，则2030年BRI 141国家的累计屋顶分布式光伏装机容量可达162~346GW。并进一步根据联合国千年发展指标地区10个分组（见表2.5），对BRI 141国家中各组分布式光伏的2030年前景进行了具体分析。在此基础上，根据BRI141国家潜在装机容量的范围，绘制了分布式光伏2030年装机容量潜力基础情景分布图（图2.2）和积极情景分布图（图2.3）。

表 2.5 | 联合国千年发展指标地区10个分组²⁵ (具体国家分组见附录)

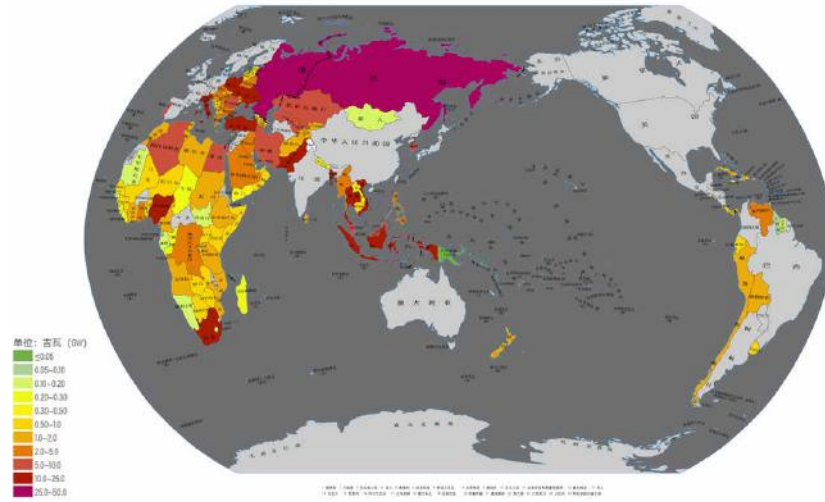
千年发展指标地区分组	国家数量	基础情景装机容量潜力 (GW)	积极情景装机容量潜力 (GW)	千年发展指标地区分组	国家数量	基础情景装机容量潜力 (GW)	积极情景装机容量潜力 (GW)
东亚	2	3.13	6.68	北非	5	6.66	14.24
东南亚	11	22.95	49.06	撒哈拉以南非洲	42	20.87	44.60
南亚	7	14.79	31.62	拉丁美洲和加勒比地区	19	6.66	14.23
西亚	10	9.07	19.39	大洋洲	10	0.03	0.07
高加索和中亚	7	8.18	17.48	发达地区	28	69.38	148.28

图 2.2 | BRI 141国家屋顶分布式光伏装机容量潜力——基础情景



说明: 本图仅为分布式光伏分布装机容量的大致分布情况, 由于图幅尺寸的限制, 一些国土面积较小的国家 (包括一些海岛国家) 无法在图上显示; 本图不代表任何国家/政体的疆域划分, 下同。

图 2.3 | BRI 141国家屋顶分布式光伏装机容量潜力——积极情景



据IEA²⁶统计,截至2019年,全球累计分布式光伏装机容量为222 GW,其中非BRI国家为146GW,中国为64GW, BRI 141国家仅为12GW。据此,如果扣除现有分布式光伏装机容量,则到2030将新增150~334GW。IRENA预测,2030年全球的光伏装机容量将达到2840GW²⁷,此方法预测的BRI 141国家屋顶分布式光伏总装机容量(162~346GW)约占IRENA预测2030年全球光伏总装机容量的5.7%~12.2%,这一比例虽然仍不高,但基本符合发展中国家和欠发达国家对于光伏发展的期待。

2.3 需求侧:无电地区分布式光伏潜力评估

2.3.1 需求侧潜力评估方法

要使一个社区脱贫致富,必须具备或创造一定的基本条件,这些条件包括清洁卫生的饮水、基本的医疗和

教育设施、必要的交通和通信基础设施等,而提供电力服务(能源脱贫)是获得和进一步完善这些基本条件的先决条件。联合国2030年可持续发展目标(SDG)第七项目标指出,到2030年,要实现:确保普遍获得负担得起的、可靠的现代能源服务;根据各国的资助方案,扩大基础设施并升级技术,为发展中国家(特别是最不发达国家、小岛屿发展中国家和内陆发展中国家)的所有人提供现代和可持续的能源服务。本文采用前述“单位需求量法”,从需求侧出发,通过计算使现存无电人口达到通电标准的电力缺口总量,“自下而上”地推算出满足这些需求所对应的分布式光伏装机容量。

完成从电力需求量到装机容量的计算,大致可以分为以下六步,如图2.4所示。

第一步:分别计算BRI 141国家中各国的城市无电人口数和乡村无电人口数。根据IEA²⁸和世界银行²⁹的数据,截

图 2.4 | 分布式光伏为BRI 141国家无电人口通电的发展潜力测算流程

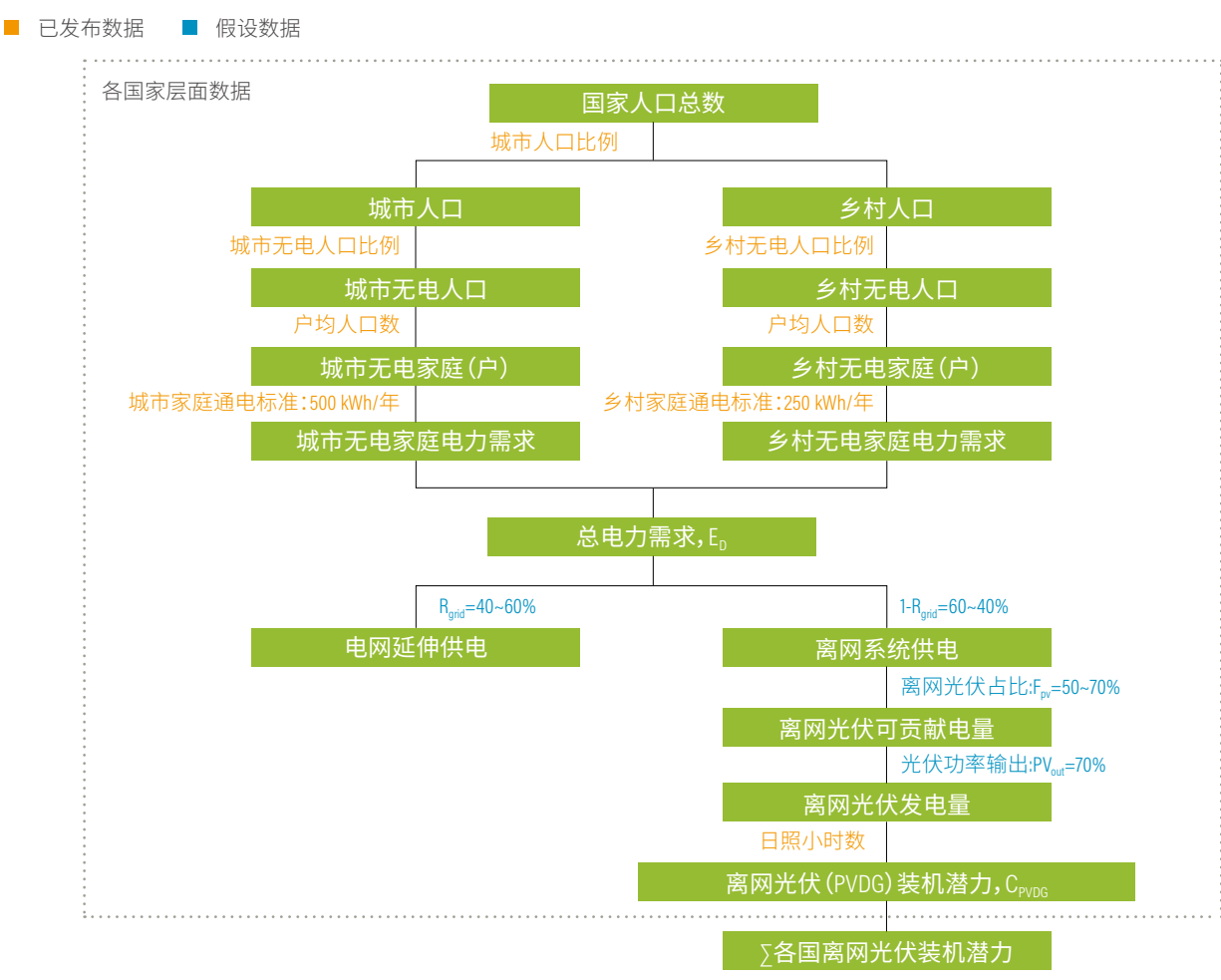
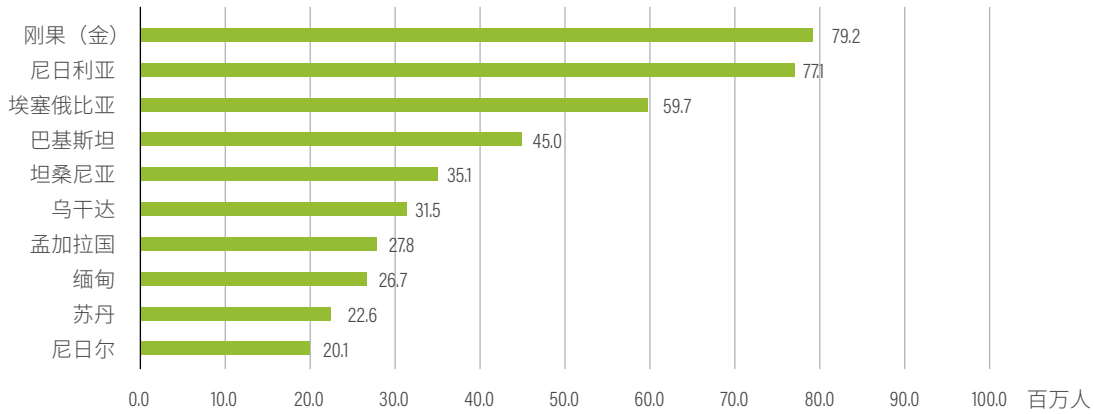
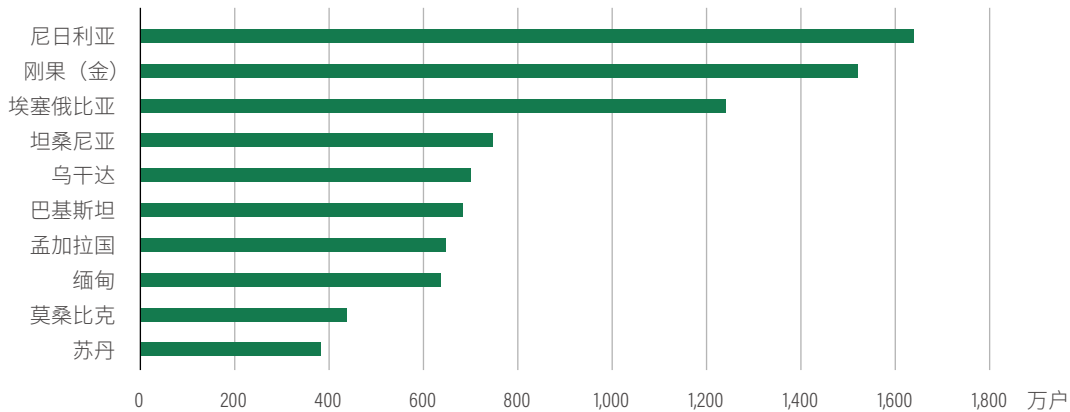


图 2.5 | 2019年BRI 141国家的无电人口排名(上)和无电家庭排名(下)

2019年BRI 141国家无电人口排名



2019年BRI 141国家无电家庭排名



至2019年底，在BRI 141国家中，尚有85个国家没有实现全民通电。因此，基于各国的城市人口数及城市人口通电率、农村人口数及农村人口通电率，可得BRI 141国家中有无电人口的国家的城市无电人口和乡村无电人口数。

第二步：根据各国的户均人口数，分别计算以上国家的城市无电家庭和乡村无电家庭数。根据这些国家平均每户的家庭成员人数（简称户均人口数），可得85个国家的城市无电家庭为2552万户，农村无电家庭为11324万户，总计13876万户，排名前十位的国家具体分布如图2.5所示。

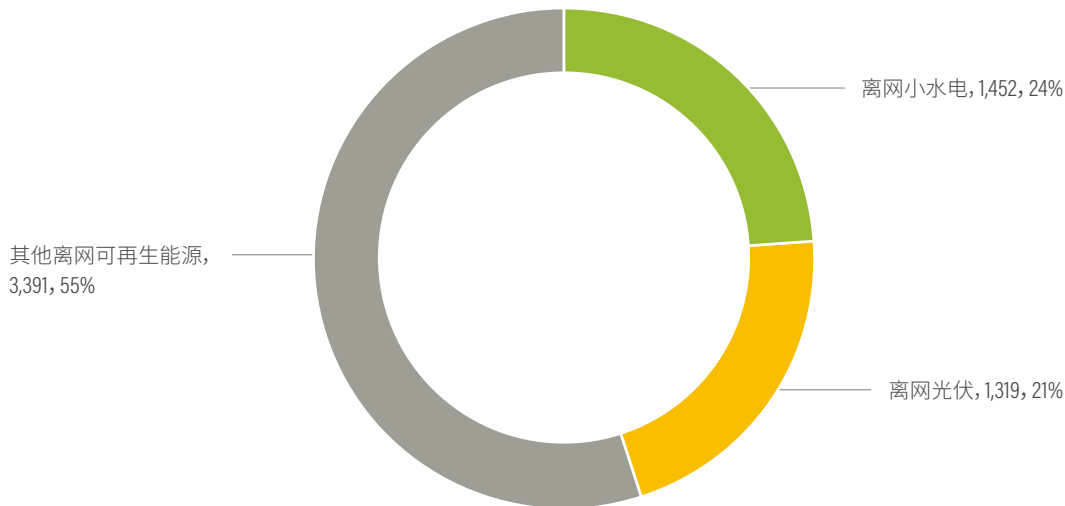
第三步：根据IEA定义的通电标准计算各国无电家庭的电力需求。IEA定义的无电地区电力建设是不仅要让无电家庭用上电，还要求其用电水平达到最低用电水平，IEA建议对于农村家庭，最低阈值为每年250kWh，对于城市

家庭则为每年500kWh。由此计算以上各国无电家庭达到通电标准的电力需求，加总可得这1.39亿户无电家庭每年的电力需求（ E_D ）约为41.1TWh。

第四步：推算离网系统使无电人口通电的比例。使无电人口通电主要通过两种途径，即电网延伸和离网系统。影响电网延伸比率的因素有很多，如无电人口与电网的距离、当地的地形、当地的负荷水平、基础设施建设的资金来源，以及政府的政策力度等。这些因素都会影响电网延伸比率，进而影响无电人口通电的比例。基于此，本报告主要参考了中国^{xiii}和埃塞俄比亚^{xiv}的通电情况，以此估算出适合BRI国家的电网延伸比例区间（ U_{grid} ）为40% ~ 60%，即40%的电力需求可以通过电网延伸满足作为电网基础情景，60%的电力需求可以通过电网延伸满足作为电网积极情景，则离网系统使无电人口通电的比例亦是40% ~ 60%。

图 2.6 | 尚未完全通电的BRI国家离网型可再生能源装机容量 (2019年)

单位:MW



第五步：推算离网系统中离网光伏的比例。离网供电技术也是多样的，其中当属离网小水电、离网光伏和柴油发电机最为常见。但是，考虑到柴油发电机的购置成本和燃料成本较高，使用其供电的为少部分村落离网集中供电系统，或家庭比较富裕、已通电可能性较高的人群，或需要借助柴油发电提高电能质量的人群，或需要提供动力电的乡村小微企业。基于此考虑，无电人口通过柴油发电机通电的比例（ U_d ）较低，在此假设为5%，则通过非柴油发电机的离网技术比例为35%~55%。根据IRENA研究报告³⁰，截至2019年，BRI 141国家的离网累计装机容量为5897MW，其中光伏为2314MW，占比约为40%。图2.6给出了2019年末尚未完全通电的BRI 141国家中离网光伏系统的装机容量。随着光伏发电技术的突破与成本的快速下降，2030年离网光伏系统在离网系统中的占比将会进一步提升，推测可达50%~70%，记为 F_{pv} 。

第六步：推算可贡献于无电人口通电的离网光伏装机容量。根据以上计算和假设，参考BRI国家的光伏功率输出（ PV_{OUT} ），并在考虑了逆变器、蓄电池、导线和利用率等因素后，假设离网光伏系统的总效率为70%，用“单位需求法”按照图2.4所示流程和公式（4）和（5）可分别测算离网分布式光伏为BRI 141国家无电人口提供电力的上下限值：

光伏装机容量高比例情景：

$$C_{pv-high} = E_D \times (1 - U_{grid-low} - U_d) \times F_{pv-high} / PV_{实际发电量} (GWh/GW) \quad (4)$$

光伏装机容量低比例情景：

$$C_{pv-low} = E_D \times (1 - U_{grid-high} - U_d) \times F_{pv-low} / PV_{实际发电量} (GWh/GW) \quad (5)$$

其中：

$C_{pv-high}$ 和 C_{pv-low} 分别为光伏在无电人口通电装机容量（GW）中的高比例和低比例情景；

E_D 为各国无电人口电量需求之和；

U_{grid} 为电网延伸的比例，40%~60%；

U_d 为柴油发电机所占比例，5%；

F_{pv} 为光伏在离网供电中的占比，50%~70%；

$PV_{实际发电量} = PV_{out} \times 70\%$ 。

2.3.2 需求侧潜力评估结果

计算可得，为85个拥有无电人口的BRI141国家解决通电问题，光伏可贡献的装机容量为6.4~14.0GW。尚未完全通电国家分布式光伏装机容量潜力的分布如图2.7和图2.8所示（图中不同颜色的色块代表装机容量潜力大小）。绝大部分通电需求位于非洲地区。尽管6.4~14.0GW的光伏装机容量在当前光伏快速发展的背景下占比较小，但是这一应用的推广将产生深远的影响。

本分析预测的是，如果2030年解决目前尚存无电人口的通电问题，其中通过分布式光伏实现的那一部分潜在装机容量的大小。对于以上结果，需要说明注意的是，此研究的计算基础为可获得的最近年份的无电人口数据，未对2030年无电人口情况做出预测，主要考虑到

图 2.7 | BRI 141 国家中尚未完全通电国家分布式光伏为无电人口供电的潜在装机容量——基础情景 (光伏低比例)

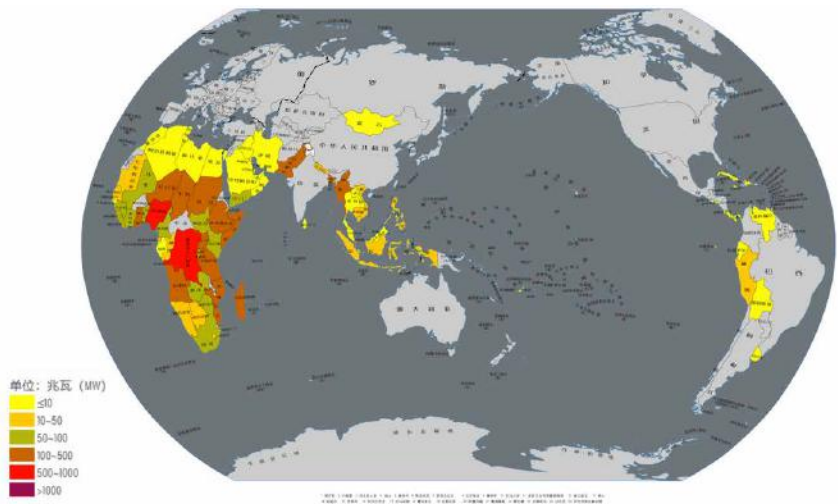
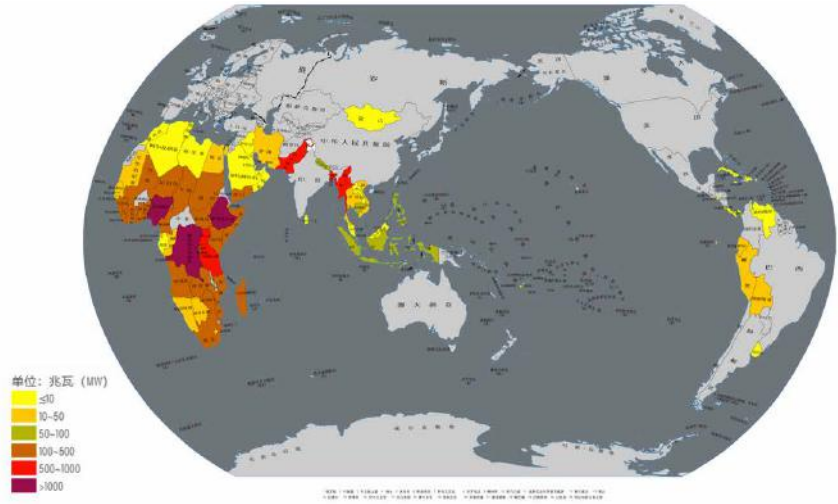


图 2.8 | BRI 141 国家中尚未完全通电国家分布式光伏为无电人口供电的潜在装机容量——积极情景 (光伏高比例)



一方面无电人口数在逐年减少，另一方面由于新增无电人口数和家庭裂变会产生新的无电家庭，新增无电家庭的趋势和变化需要进行更详细的分析。

2.4 分布式光伏应用场景

全球生产的电力主要供应于工业生产、居民住宅、商业和公共服务使用。分布式光伏因其靠近负载、便于安装、通常没有建设额外输配电网的要求等特点，可与多种电力应用场景相结合，并适合在电网较薄弱的“一带一路”国家推广。

2.4.1 居民屋顶分布式光伏应用

住宅屋顶光伏系统通常为2~10 kW，安装在建筑物的屋顶上。由于各个国家的发展阶段不同，分布式光伏的开发应用模式也不尽相同，总体来说主要有三种模式：完全自发自用、自发自用余电上网和全额上网。对于大部分BRI国家来说，电网灵活性和市场机制还处于发展阶段，完全自发自用和全额上网两种模式应用较为广泛。未来，随着光伏技术的突破以及成本的不断下降，屋顶分布式光伏有望成为一种“标配”。例如，建筑类法律法规中可能会规定新建房屋必须具有太阳能光伏系统作为电源^{xv}。

图 2.9 | 10MW分布式光伏在山东省一工业园区屋顶的应用



照片来源：阳光电源股份有限公司

2.4.2 工商业分布式光伏应用

BRI 141国家2018年消耗的电能中，41.9%用于工业生产，21.5%用于商业和公共服务，两者之和为63.4%，即工业、商业和服务业的耗电占据了全部用电量的将近2/3。近年来，工业园区（Industrial Park, IP）在全球蓬勃发展。工业园区将密集的工业活动聚集在一片土地上，是各国吸引投资的重要途径，随着全球经济转型，工业园区亦处在转型进程中³¹。在工业、商业和服务业中，工业园区往往是用能大户，大多配备了可共享的能源基础设施，具有使用寿命长，耗能集中，且更依赖于传统能源供热供电等特点^{xvi}。工业厂房或者公共服务楼宇的屋顶面积更大且更平坦，利用率更高，如图2.9所示。

由于规模效应，工商业屋顶光伏项目的安装、管理和售后服务成本更低，收益更好。在光照资源丰富的地区安装光伏发电系统，可以满足工业园区内一部分生产

生活用能。随着近年来很多BRI国家均提出了绿色发展的目标和更有雄心的NDC，工业园区的绿色低碳化发展将是推动国家实现减排目标的重要途径，也为工业园区推广分布式光伏发电提供了广阔前景³²。在BRI国家工业、商业和服务业中推广分布式光伏主要通过以下三个途径（见图2.10）：

■ **用能方式转化：**推动电动/电气化，用电能替代原来直接消耗的化石燃料

推动电动/电气化就是引导原来直接消耗一次能源（化石燃料）并产生碳排放的用能方式向电气化过渡，提高电能占终端能源消费比重的同时，提高可再生能源占电力消费的比重，以降低大气污染物排放和温室气体排放为目标，根据不同电能替代方式的技术经济特点，因地制宜，形成清洁、安全、智能的新型能源消费方式，提高社会用能效率。

图 2.10 | 通过发、用电方式的转变实现园区电力系统低碳化

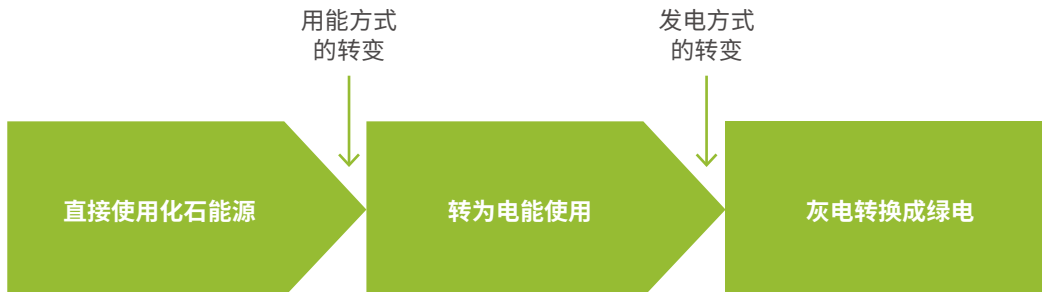


图 2.11 | 分布式光伏+储能、电动摩托和充电桩的有效绿色组合



照片来源：Paul Willerton, Solar Powered Electric Bike Rental Stations

- **发电能源替代：**用清洁的光伏发电替代原来的化石能源发电，特别是在工业园区

除了大型光伏电站和屋顶太阳能外，通过建设中小规模的分布式光伏电站来替代原来的化石能源发电，也可以实现电力系统的低碳化。工业园区的供能设备一般为共享，相对集中，便于管理。

- **发展分布式光伏：**在多能互补、智能电网和微网建设中起到支撑促进作用

可再生能源（光伏、风能和水能等）的特征之一是波动性（日波动和季节波动等）。除了可以配备适当的储能设施克服这一短板外，因地制宜发展多能互补的智慧能源系统，也是工业园区实现能源系统低碳化转型的一个解决方案。

工商业屋顶分布式光伏的推广和应用很大程度上取决于东道国的政策和激励措施、当地的电价机制、电力公司/电网对于分布式电源的接受度，以及电网的稳定性和灵活性。

2.4.3 交通领域分布式光伏应用

以电动汽车替代燃油车，并进一步用清洁的电取代传统电力，是交通领域实现电气化和低碳化的重要途径。当前，电动汽车主要市场在中国和欧美国家，近年来各国雄心勃勃的政策对于提升主要市场中的电

动汽车普及率至关重要。值得注意的是，在汽车和公交车随电气化技术进步普及的同时，“微电动出行”（Micromobility）已迅速推广。两/三轮摩托车成为BRI国家民众出行的主要交通工具，近年来，电动摩托车（E motorcycles）、共享电动踏板车（e-scooters）、电动自行车和电动助力车已经在全世界50余个国家、600多个城市中快速普及。发展电动汽车和微电动出行的先决条件是充电的便捷性，即充电桩建设。2019年，全球约有730万个充电桩，其中绝大部分是家庭、多栋房屋和工作场所中的轻型车辆慢充桩³³。随着光伏发电技术的普及，将光伏发电与充电桩结合，依附于建筑物屋顶或有条件的充电设施周边，将会是一个非常有效的组合，如图2.11所示。对于大部分BRI国家而言，在推广绿色交通的背景下，实现分布式光伏充电与电动出行同步发展应是经济可行的方案。

2.4.4 其他“光伏+”应用

“光伏+”是指光伏与其他生产结合的一种应用模式，是分布式光伏发电的延伸应用。这些延伸应用既可以是光伏与车棚、停车场、充电桩相结合，也可以是光伏与农业大棚、水产养殖结合，上、中、下多层空间充分利用，实现发电、农作物种植、水产养殖融合发展；既可以并网运行，也可以是离网模式。图2.12列出一些比较典型的“光伏+”应用场景。随着光伏相关技术的进步，如跟踪支架等智能技术的推广，还会有更多的“光伏+”应用有待开发。

图 2.12 | “光伏+”的应用场景



表 2.6 | BRI 141国家分布式光伏2020—2030年潜在新增装机容量

BRI 141国家	2020—2030年新增分布式光伏装机潜力（GW）
资源侧：屋顶分布式光伏新增装机容量	150 ~ 334
需求侧：无电地区通电光伏贡献装机容量	6.4 ~ 14.0

2.5 小结

从资源侧推算，本研究依据已知的建成区面积作为发展分布式光伏的物理基础，计算各阶段建成区的CAGR，并从中选取未来发展中代表基础情景和积极情景的两个CAGR，预测2030年建成区屋顶面积的发展情况，从而计算得出2030年分布式光伏累计新增的装机容量潜力约为150 ~ 334GW。如果到2030年这一预测的屋顶分布式光伏装机容量能实现，届时屋顶分布式光伏将会占到全部光伏装机容量的5.7% ~ 12.2%。特别是随着各国分布式光伏发展力度的加大，这一比例还有可能增加。

从需求侧推算，本研究根据BRI 141国家中尚未完全通电国家中的无电人口，具体分析了这些无电人口在城市和乡村的数量，并以此计算出该国城市和农村的无电家庭数，依据IEA建议的城市和农村的通电最低标准，测算出

满足这些无电家庭用电需求的离网分布式光伏装机容量为6.4 ~ 14.0GW。这部分潜在装机容量虽然很小，而且在资金投入方面往往需要政府或国际支持，但必须指出，无电地区电力建设的社会意义远大于经济意义，直接关系到实现联合国可持续发展目标中的“消除一切形式的贫困”（SDG1）、“实现性别平等，为所有妇女、女童赋权”（SDG5）、“确保人人获得可负担、可靠和可持续的现代能源”（SDG7）、“促进持久、包容、可持续的经济增长”（SDG8）和“促进有利于可持续发展的和平和包容社会”（SDG16），有利于实现社会的多样性、公平性和包容性。实现无电地区通电是各级政府面临的一项艰巨挑战，建设成本不断下降的分布式光伏将成为经济上和技术上行之有效的解决途径。

BRI 141国家分布式光伏2030年潜在新增装机容量前景见表2.6。

全球的电力系统都处在变革中，传统的模式单一、负荷可控的集中式电力系统正在向多元化、分散化的综合能源系统转变，分布式光伏是未来新型电力系统中不可或缺的元素。作为主要的电力消费场所和温室气体排放来源，工业园区亟须用分布式光伏等清洁能源替代传统的化石能源；燃油汽车和摩托车将逐步被电动汽车和微电动出行替代，对电力的需求将大幅上升，分布式光伏与充电桩的结合将迎来广阔的发展空间；同时，光伏与更多产业及终端用电场景的结合（简称“光伏+”）都将推动分布式光伏的快速发展。

需要说明的是，本研究的预测结果考虑了一些影响分布式光伏装机容量潜力的因素，但主要是宏观层面上的分析。如果考虑具体国家和地区的政策法规、电网的结构和容量、当地的电价水平、建筑物的结构强度、分布式光伏开发的商业模式等方面，需要做更为具体的项目可行性研究。同时需要说明，建成区和无电人口都是在动态变化的，随着社会经济发展和能源结构转型加速，预测每过一段时间要进行调整。另外，屋顶分布式光伏的建筑物屋顶可能与离网无电计算的屋顶重复，在宏观评估装机容量潜力时不宜简单叠加。

如果到2030年这一预测的屋顶
分布式光伏装机容量能实现，届时
屋顶分布式光伏将会占到全部光伏
装机容量的5.7% ~ 12.2%。





第三章

典型国家分布式光伏潜力评估

非洲和东南亚是“一带一路”发展的两个重点区域，本研究分别选取埃塞俄比亚和印度尼西亚作为非洲和东南亚的代表国家做深入分析，希望达到以下目的：

- 通过实例对一个国家的能源结构和现状进行分析。
- 具体展现对一个国家分布式光伏发展潜力按“供给侧”要素和“需求侧”目标进行评估的方法。
- 以“基础情景”和“积极情景”对一个国家2030年分布式光伏装机容量的潜力进行评估，测算出到2030年分布式光伏装机容量在该国的发展潜力区间，识别出潜在的应用场景。
- 分析一个国家分布式光伏的现状与潜在发展前景的差距，明确发展障碍及行动方向。
- 以此为例，为BRI141国家开展分布式光伏潜力评估提供分析框架和方法学，推动本国能源政策的调整，提升外国投资者在目标国进行可再生能源投资的积极性。
- 给中国“走出去”企业在BRI 141国家中发展分布式光伏提供一定的前景信息。
- 给中国有关政府部门制定鼓励企业在海外绿色发展的政策提供一定的参考信息。

3.1 埃塞俄比亚

埃塞俄比亚位于非洲东北部，境内以山地高原为主，高原占全国面积的2/3，平均海拔较高，有“非洲屋脊”之称。截至2019年，埃塞俄比亚总人口约1.12

亿人，其中无电人口约有5970万人，占全国总人口的53%。埃塞俄比亚是非洲增长最快的经济体之一，而能源供给和消费是支撑经济发展最重要的基础。从一次能源结构来看，生物质与废弃物供能占比高达88%，而风能和太阳能仅占0.11%³⁴。

埃塞俄比亚于2017年3月提交了NDC，并在2021年7月提交了更新版的NDC目标，其中包括到2030年将温室气体排放量减少12%，但主要是发展水电。³⁵

3.1.1 电力结构

埃塞俄比亚拥有丰富的可再生能源。根据埃塞俄比亚电力公司数据，2019年全国电力系统总装机容量为4549MW，其中水电装机容量为4068MW，占比约89%；从发电量来看，水力发电约占68%，其次是生物质与废弃物，占9%，技术成熟、成本大幅下降的风能和太阳能尚未得到规模化开发利用。

由于埃塞俄比亚的经济快速增长，能源需求正在急剧增加。目前，埃塞俄比亚政府为推动经济发展，正在实施第二阶段的成长和转型计划³⁶（Growth and Transformation Plan II，简称GTP II），以扩大基础设施规模，使埃塞俄比亚成为制造业中心并吸引外国直接投资。该计划于2016年出台，并明确提出具有雄心的目标：将电力装机容量从2017年的4.5GW提升到2020年的17.3GW，其中水电13.8GW、风电1.2GW，光伏仅为300MW；并于2025年实现全民通电（65%的人口通过电网延伸获得电力，35%的人口通过离网解决方案获取电

力)。而根据IRENA报告,截至2019年底,埃塞俄比亚实际累计可再生能源装机容量为4450MW,仅达到计划目标的29%,其中太阳能光伏装机容量仅有11MW(主要是离网光伏)。

自2020年新冠肺炎疫情暴发以来,世界各国的民生和经济发展都受到了挑战,埃塞俄比亚也不例外。在有限的政府资金和工程建设的背景下,要实现通电和经济发展的目标,推广以分布式光伏为主的解决方案是一种经济可行的方式。

3.1.2 资源侧：建筑屋顶分布式光伏潜力评估

埃塞俄比亚国土面积为113万km²,2014年全国的建成区面积仅为493.73km²,占国土面积的0.04%。利用建成区分析法从资源侧对埃塞俄比亚的屋顶分布式光伏开发前景进行分析预测。根据OECD数据可得埃塞俄比亚建成区面积历史数据,见表3.1。

由此可得1975—1990年、1990—2000年和2000—2014年建成区面积的年复合增长率(CAGR)分别为5.9%、6.7%和3.1%。取其平均值5.25%作为基础情景预测;考虑到近年来埃塞俄比亚的经济在快速发展,取最大值6.7%作为积极情景预测,则到2030年建成区面积增至1120~1394km²。用建成区分析法和假设参数评估资源侧潜力,在基础情景下,可利用的屋顶面积为5.60km²,屋顶分布式太阳能装机容量为560MW;而在积极情景下,屋顶分布式太阳能装机容量为1394MW,这两个结果分别是现有装机容量的51倍和127倍。

3.1.3 需求侧：无电地区分布式光伏潜力评估

2019年,埃塞俄比亚的总人口数约为1.12亿人,尚有无电人口5970万,占全国总人口的53%,户均人口数为4.8人。据联合国预测,到2050年,埃塞俄比亚人口将增长至1.9亿人³⁷,成为世界上人口增长最快的国家之一。但2019年埃塞俄比亚只有47%的人口能获得电力服务,农村和城市电网覆盖率差异明显,城市地区可达96%,而农村地区则仅为33.5%,这表明仅有少数农村住户可直接从电网获取电力。同时,由于本地电网较为薄弱,大多数并网用户每周要经历4~14次停电³⁸。同步于电网延伸的进程,埃塞俄比亚同时也

在发展离网独立系统和小型电网,解决无电人口通电问题。根据2.3小结所述的方法从需求侧推算,城市和乡村无电家庭分别为19.8万户和1223万户;据IEA发布的无电地区通电标准计算,使以上无电家庭达到通电标准的年需电量为3.16 TWh。埃塞俄比亚的光伏输出(PV_{out})为4.7kWh/kW.d,用公式(4)和(5)从需求侧“单位需求法”进行预测可得,用于无电人口通电的离网光伏装机容量为460~1012 MW。

3.1.4 分布式应用

从IEA公布的2018年埃塞俄比亚的能源消费结构来看,有89%的终端能源用于居民消费,而交通领域、工商业和服务业消费占比共为5%,整体消费总量基数较小,还有很大的增长空间。

工商业领域,2016年中国在埃塞俄比亚援建完成了该国的第一个(也是非洲第一个)工业园区:华沙工业园(Hawassa Industrial Park)。埃塞俄比亚政府把当时全国电力的37%(1600MW)分配给了这个工业园区³⁹。与此同时,工业耗电将伴随经济发展而大幅增加,并主要集中在工业园区,工业厂房的屋顶结构比较平坦且面积充裕,在其顶部铺盖光伏板不仅可以提供清洁电力,还可以起到隔热作用,减少制冷用电等支出。分布式光伏将在工业园区用电中扮演非常重要的角色。

图 3.1 | 光伏+冰箱在非洲的应用



表 3.1 | 埃塞俄比亚建成区面积历史数据

年份	1975年	1990年	2000年	2014年
建成区面积 (km ²)	70.81	16787	320.41	493.73

交通出行领域，埃塞俄比亚千人汽车保有量仅为2.11辆，远低于美国的838辆、日本的649辆，以及中国的200辆⁴⁰。截至2020年，埃塞俄比亚全国共登记了120万辆机动车，其中摩托车占比最高（20.3%），其次是乘用车和货车，分别占注册车辆总数的19.7%和18.3%。尽管该国近年来也开始投资于铁路交通领域，但因其道路交通较为滞后，且公共交通欠发达，摩托车是现阶段人们出行的主要交通工具。有预测估计⁴¹，如果摩托车以5%的年增长率保持增长势头，到2030年，埃塞俄比亚的摩托车保有量将达到40万辆。近年来，该国电动摩托占全部摩托车的比例也不断攀升，考虑到该国拥有非常清洁的电力结构，是推广电动摩托车的最好基础。在电网延伸有限的背景之下，离网光伏系统是最经济可行的供电来源。

卫生医疗领域，突然暴发的新冠肺炎疫情对卫生电力基础设施建设提出了更高的要求。光伏+诊所、光伏+防疫、光伏+冷藏（见图3.1）等创新应用模式为防疫服务提供电力，可以使新冠肺炎疫苗得到冷藏以延长使用寿命，为维护公众健康发挥切实作用。

3.1.5 小结

埃塞俄比亚在可再生能源资源禀赋方面遥遥领先于其他邻国或地区，尽管当前光伏装机容量和应用有限，却是非洲最具潜力的太阳能市场之一。当前埃塞俄比亚的电力系统强烈依赖于水电，但近年来干旱灾难频发，该国对水电的依赖可能会在未来导致严重供电风险。埃塞俄比亚政府已经预见到了这一问题，并开始关注其他形式的可再生能源，而太阳能则是其中最重要的发展方向，在一定程度上，光伏资源在水力资源相对枯竭的季节为其提供了较好的互补性，如图3.2所示。

当前，世界银行国际金融公司（International Finance Corporation）已在埃塞俄比亚启动了Scaling Solar^{xvii}项目和Lighting Africa^{xviii}项目，分别用来支持并网和离网光伏的发展。毫无疑问，屋顶分布式光伏的普及以及离网光伏系统的建设将在清洁电力供应和为无电人口通电方面发挥重要作用。本文从资源侧和需求侧对埃塞俄比亚分布式光伏发展潜力进行了评估，见表3.2。

图 3.2 | 埃塞俄比亚水力资源和太阳能资源在季节上的互补性⁴²

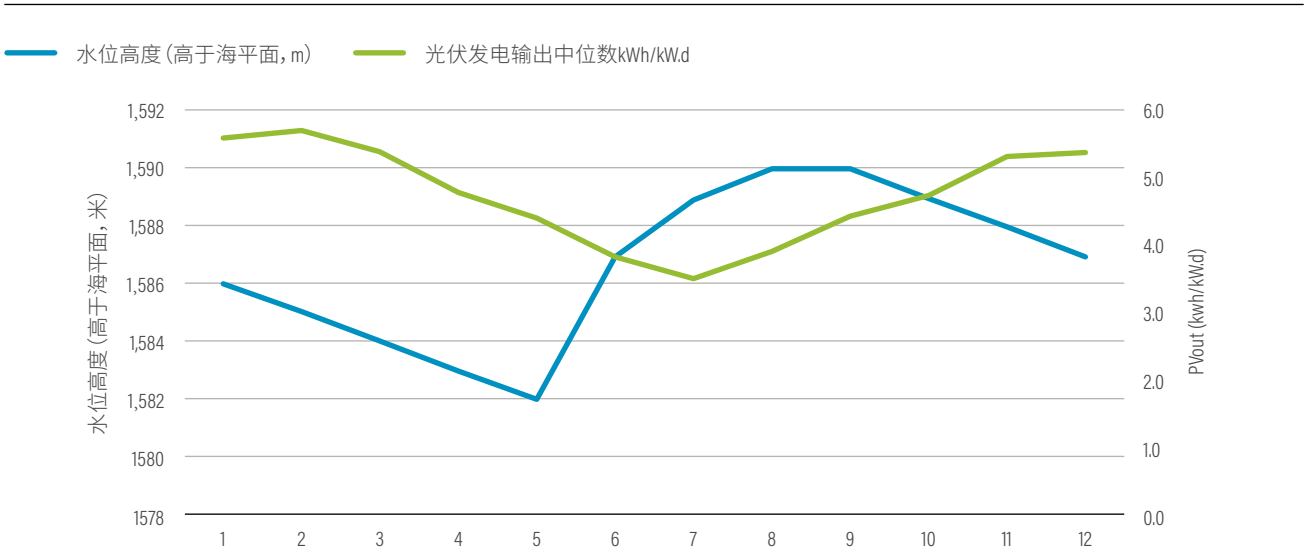


表 3.2 | 埃塞俄比亚2030年分布式光伏潜力预测及装机容量占比

2030年分布式光伏潜力预测及装机容量占比	基础情景	积极情景
建成区屋顶光伏装机容量	0.56 GW	1.39 GW
无电人口通电光伏装机容量	0.460 GW	1.012 GW
建成区屋顶光伏装机容量占发电装机总容量比例	2.2%	5.6%
无电人口通电光伏装机容量占发电装机总容量比例	1.8%	4.0%
2030年发电装机总容量 ⁴³	25 GW	

在埃塞俄比亚，光伏应用还处于发展初期，市场仍面临诸多挑战，如产品和服务质量有待提升、消费者对优质产品的其他好处缺乏认识，以及用户缺乏融资渠道等。对投资者而言，项目能否顺利运行并产生稳定的现金流仍存在不确定性，加上金融机构对风险回报的要求，导致可再生能源项目的整体融资成本依然较高。在国家层面，几乎完全缺乏对可再生能源应用的经济可行性及其相对于传统替代方法的竞争力的分析，对于技术是否存在潜在市场或如何开发这些市场，缺乏大量调查，迫切需要外部力量给予支持，进行能力建设⁴⁴。

总之，并网和离网分布式光伏在埃塞俄比亚的普及与推广将推动埃塞俄比亚的电力供应，以满足高速经济发展的需求，使能源结构向更合理的方向转变，实现埃塞俄比亚既定的NDC目标。分布式光伏在应对气候变化方面做出贡献的同时，可以逐步满足农村无电人口的用电需求，提升他们的生活水平。

3.2 印度尼西亚

印度尼西亚地处东南亚地区，是世界上最大的群岛国家，由17508个岛屿组成，首都为雅加达。截至2019年，印度尼西亚总人口2.71亿人，是世界第四人口大国，通电率为99.5%，仍有少部分无电人口。印度尼西亚是东南亚最大的经济体，近年来该国经济保持稳定增长，人均收入处于中等偏上水平。印度尼西亚的一次能源消耗以化石燃料为主：石油占34%，煤炭占24%，天然气占17%，三者合计占75%；风能与太阳能仅占10%⁴⁵。

印度尼西亚在2016年11月提交了NDC，并在2021年7月提交了更新。印度尼西亚设定了到2030年无条件减排29%的目标和有条件减排41%的目标。并承诺到2025年将可再生能源在其能源结构中的比重提高到23%，到2030年，可再生能源发电量达到132.74 TWh⁴⁶，力争于2060年或更早实现碳中和的目标。

3.2.1 电力结构

印度尼西亚可再生能源资源禀赋良好，拥有丰富的地热、风能、太阳能及水力等资源。2019年该国的发电结构

以火力发电为主，燃煤、燃气、燃油发电共占84%，可再生能源发电量占全国发电量的16%，其中风电光伏发电量仅为0.2%。受新冠肺炎疫情的影响，2021年发布的“2021—2030电力发展规划⁴⁷”较上一版下调了电力需求增长的预期，并上调了可再生能源新增装机容量的目标，2025年可再生能源发电量占比达到23%的目标保持不变。为了实现这一目标，印度尼西亚政府将大力发展水电（10.4GW）、光伏（4.7GW）和地热（3.4GW）等其他可再生能源，于2030年实现可再生能源新增装机容量为20.9GW，并将结合社区参与和政府支持的方式，推动光伏为农村人口提供电力、用光伏系统替代柴油发电机，以及并网的光伏电站的应用与推广。

3.2.2 资源侧：建筑屋顶分布式光伏潜力评估

印度尼西亚国土面积191.9万km²，2014年全国的建成区面积仅为1.40万km²，占国土面积的0.7%。参考建成区分析法从资源侧对印度尼西亚的屋顶分布式光伏开发前景进行分析预测。根据OECD数据，印度尼西亚建成区面积历史数据见表3.3。

由此可得1975—1990年、1990—2000年和2000—2014年建成区面积的年复合增长率（CAGR）分别为1.66%、3.30%和1.21%。取其平均值2.06%作为基础情景预测；考虑到近年来印度尼西亚的经济在快速发展，取最大值3.30%作为积极情景预测，到2030年建成区面积将可增至19358~23484km²。用建成区分析法和假设参数评估屋顶光伏发展潜力：在基础情景下，可有效利用的屋顶面积为96.8km²，屋顶分布式光伏装机容量约为9.7GW；在积极情景下，可有效利用的屋顶面积为234.8km²，屋顶分布式光伏装机容量约为23.5GW。

结合光伏资源和建筑物分布情况来看，开发潜力最大的省份是东爪哇、西爪哇、中爪哇、北苏门答腊、万丹、雅加达、楠榜、南苏拉威西、南苏门答腊和廖内，其中爪哇岛中的三个省开发潜力最大。此外，雅加达的州政府建筑、部长级大楼、州立医院、大学和大型购物中心的屋顶光伏发电潜力高达22MW。作为印度尼西亚首都，雅加达以及附近的Bogor、Depok、Tangerang和

表 3.3 | 印度尼西亚建成区面积历史数据

年份	1975年	1990年	2000年	2014年
建成区面积（km ² ）	6662	8534	11811	13969

Bekasi等城市，共有57万~63万户家庭的屋顶可安装光伏发电系统。如果每个家庭安装2kW，其总装机容量将达到1.2GW左右⁴⁸。

3.2.3 需求侧：无电地区分布式光伏潜力评估

印度尼西亚的城市人口已基本实现100%通电，乡村人口通电率为98.8%，现存的无电人口数量尚有150多万人，该国户均人口为3.5人，计算可得无电家庭约有45.6万户，城市和乡村无电家庭分别为4.76万户和40.8万户；根据IEA无电地区通电标准计算，使以上无电家庭达到通电标准的年需电量为0.126 TWh。印度尼西亚的光照资源量取3.77kWh/kW.d，用公式（4）和（5）从需求侧“单位需求量法”进行预测可得，用离网光伏系统为剩余的无电家庭供电需要22.9~50.3MW的光伏装机容量。

3.2.4 分布式应用

从2019年印度尼西亚不同领域的电力消费来看，居民和工业消费占比相当，分别达到了39%和36%，商业与服务占比约为24%，交通领域用电仅占比0.11%。尽管工业耗电量仍在增长，其比重却在下降。目前爪哇岛和苏门答腊岛电力需求在全国电力需求中占比约90%，印度尼西亚政府和电力公司希望未来能提高东部地区岛屿的电力需求。

工业方面，近年来因其经济集群发展迅猛，工业区的数量也急速扩张。据印度尼西亚工业区协会（HKI）统计，现有103个工业区在运营，其中位于爪哇岛和苏门答腊岛的工业区分别有61个和30个⁴⁹。该国政府也制定了多种激励措施和税收减免计划，在建设以爪哇岛为核心的工业区的同时，也促进在爪哇岛以外地区的投资。当前印度尼西亚的工业区多为资源利用型工业区，主要集中于能源、矿业和农业领域，未来以高科技产业园为主的新兴工业将有望成为发展趋势。

交通出行方面，伴随印度尼西亚经济水平和人均收入的持续增长，该国的汽车行业开始进入快速发展的通道，同时两轮摩托车正在成为交通出行的主要方式。2018年印度尼西亚注册登记的摩托车为1.15亿辆，乘用车为1600万辆，即千人拥有450辆摩托车和60辆乘用车⁵⁰。根据世界汽车工业协会统计数据，全球平均的千人汽车保有量是180辆，印尼是每千人约80辆（2019），印度尼西亚千人汽车保有量远低于全球平均水平，这意味着印度尼西亚汽车保有量还有很大的增长空间。2019年，该国的摩托车保有量略有下降，为1.07亿辆，千人摩托车保有量随之降为395辆，仍远大于千人汽车保有量。据OECD预测，2030年印度尼西亚的人口将增长至近3亿⁵¹，假设千人摩托车保有量增长至500辆，则摩托车的保有量可达1.5亿辆，与2019年相比，以3.12%的年复合增长率持续扩大市场。

随着印度尼西亚可再生能源的发展与电气化的普及，电动摩托车和电动汽车将会代替传统机动车，逐步占领市场。印度尼西亚IESR预测了三种情景（当前情景、适当发展情景、积极情景）下电动摩托车和电动汽车（混合动力汽车、插电式混合动力汽车、纯电动汽车）的市场占有率/渗透率，见表3.4和表3.5。

基于上述预测，结合电动摩托车售价较低、使用寿命周期较短、适用性强等特点，我们认为，到2030年，电动摩托车的市场占有率将显著提升；相比之下，印度尼西亚的电动汽车市场还处于早期增长阶段，对于2030年不同的发展情景下预测的不同车型的发展趋势而言，不确定性较大。如果想要推广插电式混合动力汽车或纯电动汽车，在考虑其成本、充电桩等配套设施的建设，以及电网为大功率充电桩提供的输配能力等因素之外，还应制定配套的财政和税收激励政策，同时提升发电侧的可再生能源供给，才是实现交通领域绿色发展的长久之计，此举也会给分布式光伏带来很好的应用前景。

表 3.4 | 不同情景对电动摩托车市场占有率的预测

发展情景	2020年	2025年	2030年
当前情景	0.0%	73%	32.7%
适当发展情景	0.0%	8.0%	376%
积极情景	0.0%	171%	60.2%

表 3.5 | 不同情景对电动汽车市场占有率的预测

发展情景	电动汽车类型	2020年	2025年	2030年
当前情景	混合动力汽车	0.0%	0.2%	0.3%
	插电式混合动力汽车	0.0%	0.1%	0.2%
	纯电动汽车	0.0%	0.0%	0.0%
适当发展情景	混合动力汽车	0.0%	0.0%	0.1%
	插电式混合动力汽车	0.8%	2.1%	3.1%
	纯电动汽车	0.0%	0.0%	1.0%
积极情景	混合动力汽车	0.0%	0.0%	0.0%
	插电式混合动力汽车	1.6%	23.9%	18.6%
	纯电动汽车	0.0%	17.2%	38.8%

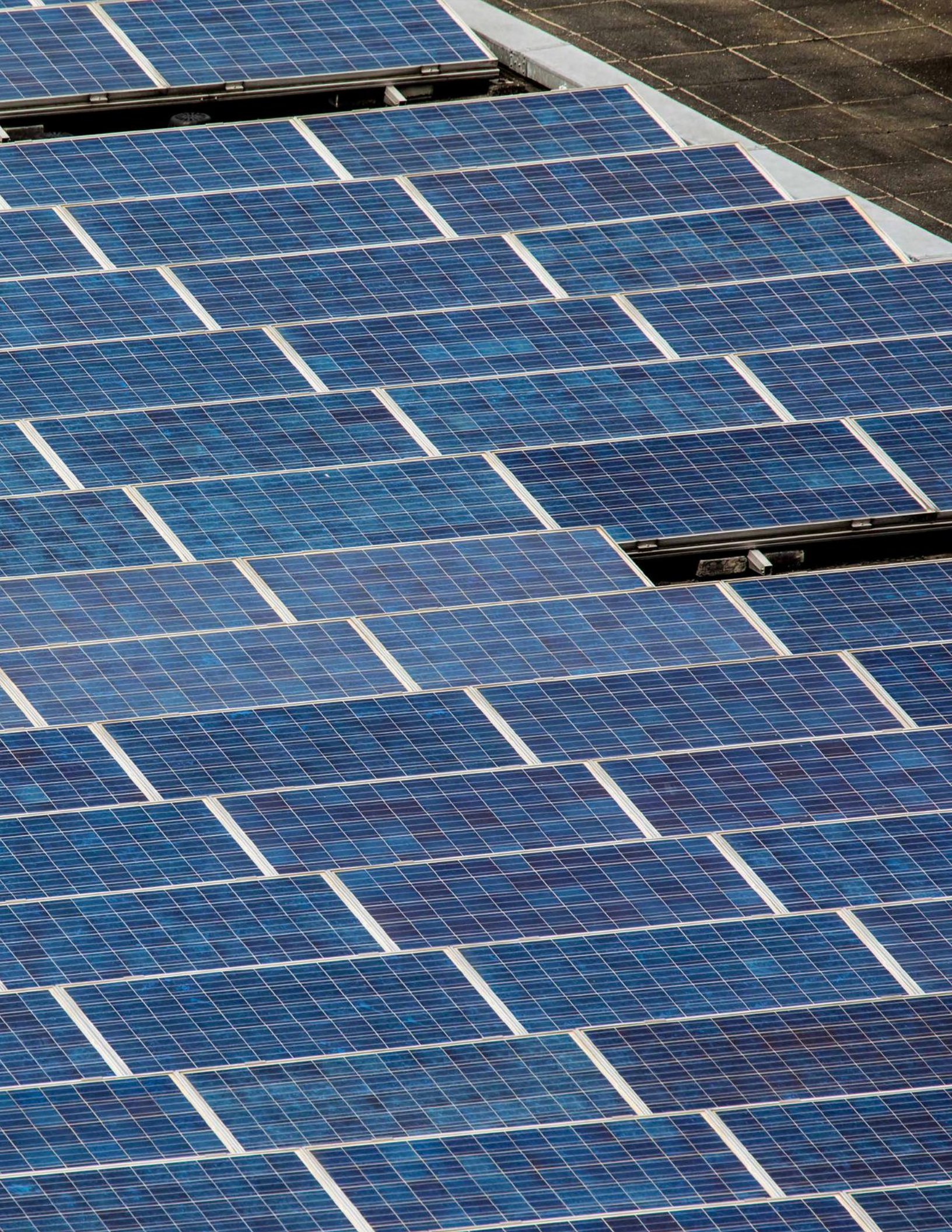
3.2.5 小结

印度尼西亚是东盟第一大经济体和世界第四人口大国，是可再生能源领域发展潜力巨大的国家。在传统能源发展模式上增加可再生能源发电比重，进而实现NDC和碳中和目标的方式，将不能满足印度尼西亚能源体系变革在确保能源安全、提高能源效率和促进新能源消纳等方面的要求，因此亟须构建以新能源为主体的新型电力系统，以实现能源电力

行业的绿色转型。在印度尼西亚所有的可再生能源中，太阳能是极具吸引力的投资方向之一、并拥有很大的发展潜力。从装机容量来看，印度尼西亚政府提出了到2030年光伏新增容量4.7 GW的目标；本研究结合屋顶光伏建设和为无电人口通电的应用两方面，对印度尼西亚分布式光伏发展潜力进行评估，见表3.6。印度尼西亚最大的分布式光伏潜力来自建成区屋顶光伏，不论是替代柴油机发电，还是满足交通领域的电气化需求，分布式光伏都有广阔的发展空间。

表 3.6 | 印度尼西亚2030年分布式光伏潜力预测及装机容量占比

2030年分布式光伏潜力预测及装机容量占比	基础情景	积极情景
建成区屋顶光伏装机容量	9.7GW	23.5 GW
无电人口通电光伏装机容量	0.023GW	0.050GW
建成区屋顶光伏装机容量占发电装机总容量比例	9.3%	22.6%
无电人口通电光伏装机容量占发电装机总容量比例	0.022%	0.048%
2030年发电装机总容量 ^{xix}	104 GW	





第四章

结论与建议

BRI 141国家中有相当多一部分国家（特别是非OECD国家）经济发展相对滞后。这些国家一方面需要大力发展经济，加快电力基础设施建设，改善民众生活；另一方面又受到气候变化带来的严峻挑战，需要在发展经济的同时采取有效措施减少温室气体排放。这些国家拥有较为丰富的太阳能资源，大部分国家在NDC目标中提到要发展包括光伏在内的可再生能源，到目前为止，BRI 141国家中的非OECD国家的非水可再生能源利用水平仍落后于全球平均水平。

分布式光伏主要的应用模式有两种：以并网方式运行的屋顶分布式光伏和用于无电地区的离网型分布式发

电。本研究把建成区面积作为发展屋顶太阳能光伏的物理基础，采用“建成区面积法”并结合其他影响因子对并网分布式光伏主要应用之屋顶太阳能光伏的装机潜力进行了分析预测；同时根据无电地区的用电需求，按IEA户均最低供电标准预测了在解决这些无电人口用电问题中离网分布式光伏的装机潜力。这些方法适用于一个区域或一个国家对太阳能光伏分布式潜力的预测和规划。

应用上述方法，基于BRI国家的现实情况，以“基础情景”和“积极情景”两种情景对BRI 141国家以及埃塞俄比亚和印度尼西亚2030年分布式光伏装机容量分别进行了评估，评估结果见表4.1。

表 4.1 | BRI 141以及两个典型国家2030年分布式光伏累计装机容量

	2030年分布式光伏潜力预测	基础情景（GW）	积极情景（GW）
BRI 141国家	建成区屋顶分布式光伏新增装机容量	150	334
	无电地区通电光伏贡献装机容量	6.4	14.0
埃塞俄比亚	建成区屋顶光伏装机容量	0.56	1.39
	无电人口通电光伏装机容量	0.460	1.012
印度尼西亚	建成区屋顶光伏装机容量	9.7	23.5
	无电人口通电光伏装机容量	0.023	0.050

注释：需要说明的是，无电地区分布式光伏与屋顶分布式光伏有可能部分重合，预测结果不能做简单叠加。

进一步，根据光伏系统成本的进一步下降趋势，按2021—2030年间分布式光伏系统的平均成本为2.04美元/W^{xx}，则BRI 141国家2030年分布式光伏累计投资额为3060亿~6814亿美元。

本报告分析典型国家案例的方法也同样适用于其他地区或国家。

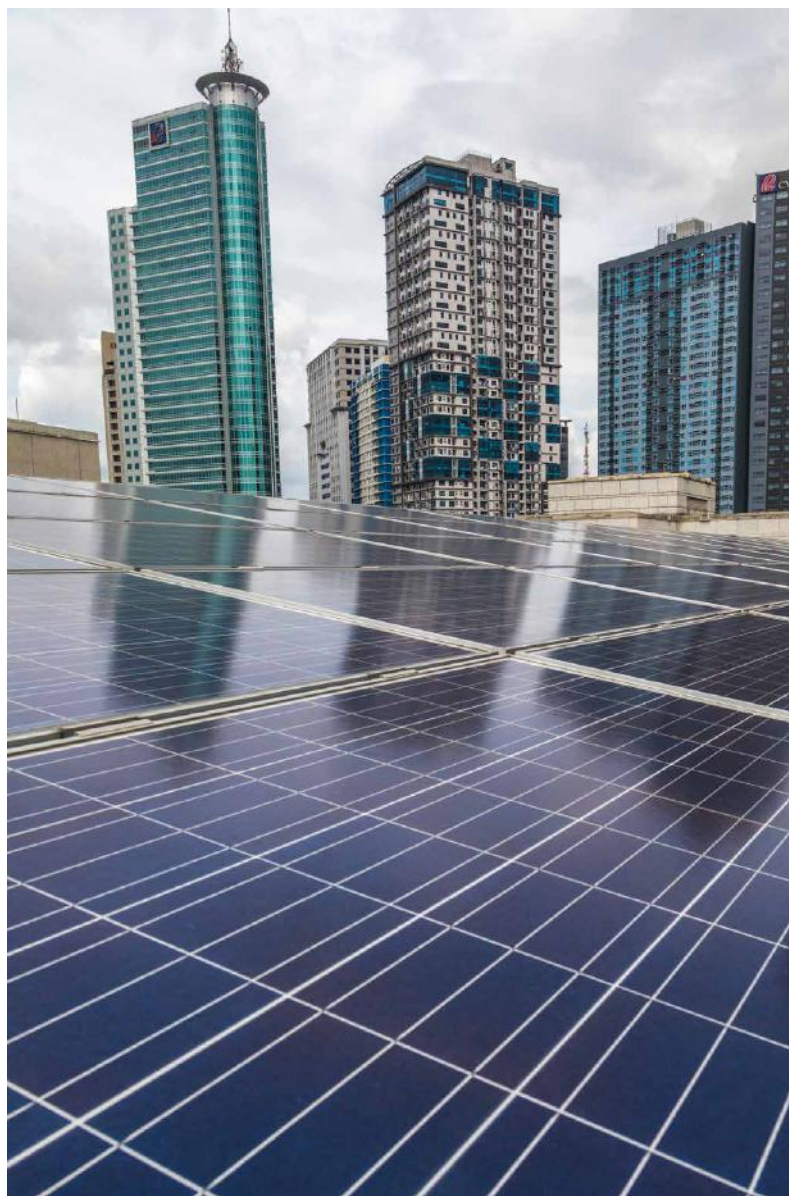
本研究构建的分布式光伏潜力评估模型及结果仅代表一种对BRI 141国家分布式光伏未来市场潜力的测算方法和可能的装机容量增长空间。该模型具体应用到某个国家时，还需要根据各国的实际情况，尤其是各国政府的能源规划、激励政策、光伏组件和系统的技术发展和在该国的具体成本等动态变化进行必要的调整。毋庸置疑的是，在光伏技术成本快速下降的当下，加快推进分布式光伏在BRI国家的开发应用，对于用清洁能源带动BRI国家经济发展，以及提升无电地区的电力可获得性，都具有显著的现实意义。“小而美”的分布式光伏值得受到各相关方的关注。

为此，本研究在潜力评估的基础上，对有可能推动分布式光伏发展的主要相关方提出如下行动建议：

- BRI 141国家的能源规划部门和决策部门：将分布式光伏纳入本国的能源规划，开展细致深入的摸排调研，制定循序渐进的发展目标，出台配套支持政策，鼓励企业和国际投融资机构增加可再生能源投资比例，为可再生能源产业走出去在融资和关税政策上提供差异化的激励机制，营造有利于分布式光伏开发利用的政策环境，促进可再生能源的积极发展。
- BRI 141国家的城市、园区/社区管理者：发挥资源整合的作用，搭建平台，促进分布式光伏项目开发企业、当地电网公司、电力用户、屋顶业主、金融机构之间的沟通对话，探索可持续的项目开发建设和运营管理模式。一些BRI 141国家可能缺乏对分布式光伏应用的经济效益、环境效益和社会效益的研究和认识。对这样的国家，应在深入调研的基础上开展详尽的分析，提出符合目标国国情的分布式光伏项目开发模式和经济、社会、环境效益分析，在推进项目的同时，助力目标国的能力建设。
- 在中国政府明确将不再新建境外煤电项目的政策背景下⁵²，海外能源投资企业要充分认识到分布式光伏的巨大市场潜力，选择条件相对成熟的地区/园区开展项目试点，并复制推广。针对当前海外可再生能源项目由于风险评估条件不足导致融资成本偏高的问题，建议加强相关方的信息沟通，探索整合解决方案，降低交易成本，公共和多边资金使用去风险化工具撬动私营部门投资。

- 在无电地区将分布式光伏开发成纯商业项目具有一定挑战，在这种情况下，来自全球、区域及国别层面的各类多/双边发展机构的资金与技术援助可以提供强力支持。建议充分发挥发展机构在分布式光伏项目的识别、孵化与援助投资上的资源与组织优势，与BRI国家电力可及的需求切实对接，进一步探索与商业机构形成联合体等多方合作模式，共同参与无电地区分布式光伏项目的开发、建设与运营。

- 中国在发展分布式光伏方面积累了丰富的经验，政策设计、技术整合、商业模式等方面都有值得分享的实践案例，分布式光伏也为中国解决边远地区电力普及问题做出了重要贡献。中国在推动绿色“一带一路”建设的过程中，要加强与BRI国家的沟通分享，让中国经验真正有助于这些国家的能源绿色转型。要切实研究目标国的NDC和碳中和目标，特别是光伏在未来能源结构中的地位和需求，结合分布式光伏在具体国家的应用场景，提出切实可行的实施路线图。



BRI 141国家中有相当多一部分国家（特别是非OECD国家）经济发展相对滞后。这些国家一方面需要大力发展经济，加快电力基础设施建设，改善民众生活；另一方面又受到气候变化带来的严峻挑战，需要在发展经济的同时采取有效措施减少温室气体排放。





附录

BRI国家按联合国千年发展指标地区分组列表 (BRI国家列表更新于2021年11月26日)

千年发展指标地区分组	国家数量	具体国家
东亚	3	中国、蒙古、韩国
东南亚	11	文莱、柬埔寨、印度尼西亚、老挝、马来西亚、缅甸、菲律宾、新加坡、泰国、东帝汶、越南
南亚	7	阿富汗、孟加拉国、伊朗、马尔代夫、尼泊尔、巴基斯坦、斯里兰卡
西亚	10	巴林、伊拉克、科威特、黎巴嫩、阿曼、卡塔尔、沙特阿拉伯、土耳其、阿联酋、也门
高加索和中亚	7	亚美尼亚、阿塞拜疆、格鲁吉亚、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦
北非	5	阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥、突尼斯
撒哈拉以南非洲	42	安哥拉、贝宁、博茨瓦纳、布隆迪、喀麦隆、佛得角、乍得、科摩罗、刚果(金)、刚果(布)、科特迪瓦、吉布提、赤道几内亚、埃塞俄比亚、加蓬、冈比亚、加纳、几内亚、几内亚比绍、肯尼亚、莱索托、利比里亚、马达加斯加、马里、毛里塔尼亚、莫桑比克、纳米比亚、尼日尔、尼日利亚、卢旺达、塞内加尔、塞舌尔、塞拉利昂、索马里、南非、南苏丹、苏丹、坦桑尼亚、多哥、乌干达、赞比亚、津巴布韦
拉丁美洲和加勒比地区	19	安提瓜和巴布达、巴巴多斯、玻利维亚、智利、哥斯达黎加、古巴、多米尼克、多米尼加、厄瓜多尔、萨尔瓦多、格林纳达、圭亚那、牙买加、巴拿马、秘鲁、苏里南、特立尼达和多巴哥、乌拉圭、委内瑞拉
大洋洲	10	库克群岛、斐济、基里巴斯、密克罗尼西亚联邦、纽埃、巴布亚新几内亚、萨摩亚、所罗门群岛、汤加、瓦努阿图
发达地区	28	阿尔巴尼亚、奥地利、白俄罗斯、波黑、保加利亚、克罗地亚、塞浦路斯、丹麦、爱沙尼亚、希腊、匈牙利、意大利、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、马耳他、摩尔多瓦、黑山、新西兰、北马其顿、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、乌克兰
合计	142	

缩写表

缩写	英文全文	中文
BRI	the Belt and Road Initiative	“一带一路”倡议
BRI 141	the Belt and Road Initiative 141	不含中国的141个“一带一路”国家
CAGR	Compound Annual Growth Rate	年复合增长率
DG	Distributed generation	分布式发电
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program	能源部门管理援助计划
GDP	Gross Domestic Product	国内生产总值
GHG	Greenhouse gas	温室气体
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
GTP	Growth and Transformation Plan	埃塞俄比亚增长和转型计划
GW	Gigawatts	千兆瓦
IEA	International Energy Agency	国际能源署
IESR	Institute for Essential Services Reform	印度尼西亚智库基础服务改革研究所
IMF	International Monetary Fund	国际货币基金组织
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	政府间气候变化专门委员会
IRENA	International Renewable Energy Agency	国际可再生能源署
kWh/kW.d	kWh/kW.day	每千瓦光伏日发电量
LCOE	Levelized Cost of Energy	平准化度电成本
MW	Megawatts	兆瓦
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国国家航空航天局
NDCs	Nationally Determined Contributions	国家自主贡献
NREL	National Renewable Energy Laboratory	美国国家可再生能源实验室
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development	经济合作与发展组织
OWID	Our World in Data	我们的数据世界
PLN	Perusahaan Listrik Negara	印度尼西亚国家电力公司
PPA	Power Purchase Agreement	购电协议
PV	Photovoltaic	太阳能光伏
PVDG	Photovoltaic Distributed generation	太阳能光伏分布式发电
PVout	Photovoltaic Power Output	光伏发电量
PVPS	IEA Photovoltaic Power Systems Programme	国际能源署光伏发电系统计划
RUPTL	Electricity Supply Business Plan (Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik)	印度尼西亚国家电网电力供应商业计划
SDG	(UN) Sustainable Development Goals	联合国可持续发展目标
UN	United Nations	联合国
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development	联合国贸易和发展会议(简称贸发会议)
WB	World Bank Group	世界银行集团
WRI	World Resources Institute	世界资源研究所

注释

- i. 本研究中的“一带一路”国家指的是签订了“一带一路”合作文件的国家，简称BRI国家。截至2021年11月，包括中国在内共有142个BRI国家。考虑到中国人口、GDP和可再生能源发展体量较大，易使其他国家评估结果失真，故本研究针对除中国之外的141个BRI国家（简称BRI 141）开展分布式光伏的潜力评估。
- ii. The Belt and Road countries in this study refer to those countries that have signed BRI cooperation documents (BRI countries for short). As of November 2021, there are 142 BRI countries including China. This study evaluates the potential of distributed PV in 141 BRI countries except China (BRI 141 for short).
- iii. 世界银行2020年7月1日开始执行新的按国家人均收入划分国别标准：人均年收入低于1036美元的为低收入国家，人均年收入1036~4045美元的为中低收入国家，人均年收入4046~12535美元的为中高收入国家，人均年收入高于12535美元的为高收入国家。
- iv. 在估算时对原始数据中小于1%的数据的按0.5%计算。
- v. 应用IEA无电人口统计数据时，如果IEA标注比例数据大于99%，则取99.5%进行估算；同理，如果数据小于1%，则取0.5%；数值小于1（百万），则取估值0.5（百万）。
- vi. CAGR=Compound Annual Growth Rate，即年复合增长率。
- vii. 根据IEA_PVPS_2020报告发布的27个PVPS成员国到2019年末的累计屋顶分布式光伏装机容量，用本报告中的方法进行推算，计算出这些已安装的屋顶分布式光伏累计装机容量需占用的建成区面积，同时推算这些国家2019年的建成区面积，结果显示27个国家屋顶分布式光伏的平均建成区面积占比为4.1%。采用同样的分析方法可以得出，中国2019年屋顶分布式光伏的建成区面积占比为3.6%，得益于整县推广等项目的开展，2021年中国屋顶分布式光伏的建成区面积占比增长为5.8%。因此，基础情景占比取5%。考虑到光伏系统成本未来的进一步下降和各国的政策驱动，积极情景占比取10%。
- viii. NREL对美国128个城市屋顶进行了分析，结论是住宅屋顶面积的22%~27%和商业屋顶面积的60%~65%适合安装光伏。考虑到BRI141国家大多数是发展中国家，其建筑物（尤其是赤道附近的居民住宅）面积偏小、结构强度偏弱，不能提供足够的屋顶面积用于安装屋顶分布式光伏，故取较小的有效利用率（10%）。
- ix. 按单个光伏组件的不同功率（一般组件到大功率组件），每平方米的屋顶面积可以安装光伏100~200W。考虑到发展中国家在获得大功率组件方面可能存在的一些不利条件，这里按较保守的100W/m²进行估算。在今后实际项目的开发中，应按当时可获得的组件单位面积功率计算总装机容量。
- x. 中国是BRI的倡导国和重要成员，但中国的国家体量与其他BRI国家相比反差太大。为了减少在分析BRI国家时某一个国家权重太大而导致趋势失真，本报告在分析BRI国家某些总体趋势时不包括中国。
- xi. 这里拟合的CAGR曲线在节点处的拟合误差R²>0.999。后面推算2030年建成区面积采用了1975—1990年、1990—2000年和2000—2014年三个CAGR的平均值和最大值。
- xii. 说明：这里采用BRI 141国家，表明不包含中国；同时根据科摩罗、斐济、萨摩亚、塞舌尔和瓦努阿图五个国家1975年和2014年的两个数据对缺损数据（1990年、2000年）进行补充；纽埃暂无相应数据。以上几个国家所占权重极小，可以视为不影响整体估算和预测结果。
- xiii. 2015年，中国国家电网在解决最后273万无电人口通电问题时，154万人通过电网延伸获得供电，119万人则是通过光伏独立系统获得供电，占比分别为56%和44%。
- xiv. 根据埃塞俄比亚2019年出台的National Electrification Program 2.0规划，该国到2025年计划通过电网延伸的方法使65%的无电人口通电，其余35%的无电人口将通过离网技术（光伏离网系统和小型电网）解决通电问题。
- xv. 例如，美国加利福尼亚州的太阳能法规就是一项新的建筑法规，要求新建房屋必须具有太阳能光伏系统作为电源。该法规于2020年1月1日生效，适用于最高三层的单户住宅和多户住宅。
- xvi. 清华大学在2014年年底对中国1604个工业园区能源基础设施的调查研究发现，按装机容量计算，87%是燃煤机组，这表明工业园区对煤炭的依赖程度高于全国平均水平（2014年全国装机容量的61%为燃煤机组），燃气机组仅次于燃煤机组，占总装机容量的8.2%。可再生能源驱动机组占比仅为0.92%，其余4.1%的装机容量基于其他燃料。
- xvii. <https://www.scalingsolar.org/active-engagements/ethiopia/>
- xviii. <https://www.lightingafrica.org/country/ethiopia/>
- xix. 截至2020年，印度尼西亚的电力装机容量为63.3GW；2021版“电力发展规划”计划于2030年新增电力装机容量40.6GW，故根据现有规划，2030年累计电力装机容量约为104GW。
- xx. 分布式光伏的系统成本由三部分构成：硬件成本、安装成本和软成本（软成本包括盈利、财务费用、系统设计、申请许可、激励申请和寻求客户等），影响分布式光伏系统成本的因素很多。本研究主要探讨BRI国家到2030年分布式光伏的安装潜力（功率），未对系统成本的发展趋势进行深入分析。在2020年的系统成本中，硬件成本约为1美元，在居民屋顶系统成本中占38%左右，在工商企业屋顶系统成本中占60%左右⁵³。硬件成本将继续下降，到2030年估计会再下降15%~25%左右⁵⁴。取平均值20%为下降幅度，即硬件部分将降至0.8美元/Wdc，假设安装成本和软成本的总和保持不变（劳动力成本可能会上升，但政府鼓励分布式光伏发展的政策可能会导致软成本的下降），则2030年居民屋顶和工商业屋顶的系统成本约为2.54美元/Wdc和1.54美元/Wdc，取平均值2.04美元/Wdc作为2030年分布式光伏系统的单位成本值。

参考文献

1. Center for Climate and Energy Solution (2019). Global Emissions: <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
2. 联合国难民署：被迫流离失所是气候变化最具破坏性的影响之一，<https://news.un.org/zh/story/2021/11/1094042>
3. IRENA (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019
4. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
5. Our World in Data, Fossil Fuels, <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>
6. IEA Photovoltaic Power Systems Programme, Snapshot of Global PV Markets 2020: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf
7. 中国一带一路网：已同中国签订共建“一带一路”合作文件的国家一览，https://www.yidaiyilu.gov.cn/info/il-ist.jsp?tm_id=126&cat_id=10122&info_id=77298（此列表动态更新，当前获取日期为2021年11月）
8. Worldometer: <https://www.worldometers.info/united-nations/>
9. N. Hamadeh et al. 2021. New World Bank country classifications by income level: 2021-2022. <https://blogs.worldbank.org/opendata/new-world-bank-country-classifications-income-level-2021-2022>
10. 袁敏、苗红等，长三角地区分布式可再生能源发展潜力及愿景. 世界资源研究所，2021年3月
11. IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3.pdf
12. IEA PVPS Trends in Photovoltaic Applications 2020, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/11/IEA_PVPS_Trends_Report_2020-1.pdf
13. Ordóñez, J., E. Jadraque, J. Alegre, and G. Martínez. 2010. "Analysis of the Photovoltaic Solar Energy Capacity of Residential Rooftops in Andalusia (Spain)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2122-30.
14. Melius, J., R. Margolis, and S. Ong. 2013. "Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques." Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-60593.
15. OECD (2021), "Built-up area" (indicator), <https://doi.org/10.1787/7c06b772-en>
16. Solar Energy Research Institute of Singapore. (2013), Solar PV Roadmap for Singapore (A Summary)
17. H钱纳里等，工业化和经济增长的比较研究，上海三联书店，1989
18. 清华大学社会科学学院，全球每人一千瓦光伏倡议书，2019.4
19. IEA (2020), Defining energy access: 2020 methodology, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/defining-energy-access-2020-methodology>
20. IEA (2019), Solar Energy: Mapping the Road Ahead, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-energy-mapping-the-road-ahead>
21. IRENA. (2019), Resource Assessment: IRENA's geospatial services <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2019/Dec/Session-4---Imen-Gherboudj---IRENA.pdf?la=en&hash=B1E18867BF8C91AD47ABE10041B0E26A26C252C0>
22. NREL. (2008), Solar Resource Assessment <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42301.pdf>
23. NASA, NASA Surface Meteorology and Solar Energy: Global Data Sets
24. World Bank/ESMAP/SOLARGIS. (2020) Global Solar Atlas
25. UN stats, The list of the official MDG Regional Groupings and their corresponding countries, United Nations Statistics Division, 07 July 2014
26. IEA_PVPS_2020, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf
27. IRENA. (2019), FUTURE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf
28. IEA (2020), World Energy Outlook 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
29. World Bank, World Development Indicators
30. IRENA. (2020) Renewable Capacity Statistics 2020
31. UNCTAD: World Investment Report 2019, <https://unctad.org/web-flyer/world-investment-report-2019>
32. Guo, Y., Tian, J. & Chen, L. (2020), Managing energy infrastructure to decarbonize industrial parks in China. *Nat Commun* 11, 981 <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14805-z>
33. IEA. (2020), Global EV Outlook 2020 Entering the decade of electric drive?
34. IEA-Data and statistics: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser>
35. Ethiopia's updated NDC targets 12% GHG emissions cut by 2030, 6 Jan 2021 <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/ethiopias-updated-ndc-targets-12-ghg-emissions-cut-2030.html>
36. Federal Democratic Republic of Ethiopia. (2016) Growth and Transformation Plan II (GTP II)
37. United Nations. (2017) World Population Prospects: Key findings & advance tables, https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf
38. USAID, Off-Grid Solar Market Assessment Ethiopia, Power Africa - PAOP-Ethiopia-MarketAssessment-Final_508, 10.1.2019
39. Yohannes Anberbir, Gov't allocates 1,600MW for industrial parks, The Reporter, 20 May 2017
40. Wikipedia, (2021), https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_vehicles_per_capita

致谢

41. Ethiopia Two Wheeler Market, By Vehicle Type, By Company and By Geography, Forecast & Opportunities, 2025 (2020)
42. Ethiopia Energy Situation, https://energypedia.info/wiki/Ethiopia_Energy_Situation
43. IEA (2019), Ethiopia Energy Outlook, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/ethiopia-energy-outlook>
44. Energypedia. (2020) Ethiopia Energy Situation, https://energypedia.info/wiki/Ethiopia_Energy_Situation, 3 May 2021
45. IEA Countries and regions, <https://www.iea.org/countries>
46. Indonesia's updated NDC keeps 2030 targets unchanged, 23 Jul 2021, <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/indonesias-updated-ndc-keeps-2030-targets-unchanged.html>
47. PT PLN (PERSERO). (2021) Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
48. IESR, Indonesia's vast rooftop potential, PV Magazine, 2019.8
49. Himpunan Kawasan Industri Indonesia (HKI): <https://hki-industrial-estate.com/data-of-location>
50. Institute for Essential Services Reform (IESR). 2020, The Role of Electric Vehicles in Decarbonizing Indonesia's Road Transport Sector
51. OECD. Stat (2021) Population Projections <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=POPPOPJ>
52. WRI, 中国不再新建境外煤电项目标志着全球“脱煤”再进一步, 2021.9.22 https://mp.weixin.qq.com/s/ngvx-rErnz_i8krjNxLPgQ
53. DAVID WAGMAN, Costs for all types of PV systems continue to fall, NREL benchmark report says, <https://pv-magazine-usa.com/2021/11/15/costs-for-all-types-of-pv-systems-continue-to-fall-nrel-benchmark-report-says/>, NOVEMBER 15, 2021
54. Wood Mackenzie, How solar is central to the energy transition, Mar 18, 2021, <https://www.forbes.com/sites/woodmackenzie/2021/03/18/how-solar-is-central-to-the-energy-transition/?sh=2250ce955d04>

在本研究开展过程中, 项目团队得到了诸多外部专家的大力支持。包括: 水电水利规划设计总院严秉忠主任、张木梓处长、夏婷博士、邓振辰博士、刘雪琪工程师, 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司董占飞高工, 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司刘琳教授级高工、陶湘明高工, 中国长江三峡集团上海勘测设计研究院有限公司殷杰高工、路继宁高工, 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司叶丰衣高工, 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司李运龙工程师, 循环经济协会可再生能源专委会的马丽芳研究主任, 国家发展改革委能源研究所可再生能源发展中心陶冶副主任, 在此向他们表示诚挚感谢。

作者感谢以下专家(排名不分先后), 他们在本论文的评审过程中提供了宝贵的专业建议和意见:

胡润青	国家发展改革委能源研究所
李 丹	循环经济协会可再生能源专委会
夏 婷	水电水利规划设计总院
吴佳玮	全球能源互联网研究院
周李焕	世界资源研究所
薛露露	世界资源研究所
曾 辉	世界资源研究所
温新元	(原)世界资源研究所

同事张黛阳为分布式光伏潜力评估结果绘制了地图, 赵亮为英文摘要的校对工作提供了帮助, 在此一并表示感谢。

感谢谢亮为本报告做了校对, 感谢张烨为报告设计做出的贡献。

作者介绍

Charlie Dou（都志杰），世界资源研究所（美国）北京代表处特聘国际专家，邮件：cdou60@gmail.com

王珮珊，（原）世界资源研究所（美国）北京代表处，助理研究员

袁敏，世界资源研究所（美国）北京代表处，能源转型项目总监，邮件：minyuan@wri.org

苗红，世界资源研究所（美国）北京代表处，可持续投资部主任，邮件：hong.miao@wri.org

宋婧，世界资源研究所（美国）北京代表处，可持续投资部研究员，邮件：jsong@wri.org

关于世界资源研究所

世界资源研究所是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

我们的工作方法

量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析、识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过决策者交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。

图片说明

Cover flickr/asiandevlopmentbank; pg. i flickr/6000; pg. ii, iv, v flickr/asiandevlopmentbank; pg. v irena; pg. vi flickr/asiandevlopmentbank; pg. viii flickr/jedavillabali; pg. viii flickr/internationalrivers; pg. ix, xi, xii flickr/asiandevlopmentbank; pg. 5 flickr/worldbank; pg. 6, 19 flickr/asiandevlopmentbank; pg. 20 flickr/jamesharrisanderson; pg. 27, 28, 30 flickr/asiandevlopmentbank; pg. 31 flickr/carlosoliveirareis; pg. 32 flickr/afdbprojects.



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

世界资源研究所(美国)北京代表处
北京市东城区东中街9号
东环广场写字楼A座7层K-M室
邮编:100027
电话:+86 10 6416 5697
WWW.WRI.ORG.CN

审图号:GS 京(2022) 0224 号