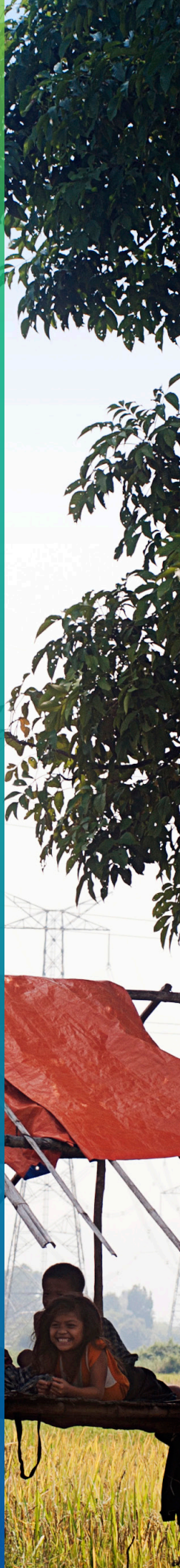
可持续投资项目系列

一带一路国家风光资源评估报告

全球能源互联网发展合作组织

2022年5月



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

全球能源互联网发展合作组织简介

2016年3月全球能源互联网发展合作组织经国务院批准在京成立，是中国发起的首个能源领域国际组织，致力于构建全球能源互联网，以清洁和绿色方式满足全球电力需求，推动世界能源可持续发展。

多年来，合作组织持续深化在清洁能源资源评估、开发利用，能源绿色转型发展、电网互联互通、低碳能源技术创新等领域研究，近年来面向全球发布了《破解危机》、《全球碳中和之路》和全球及各大洲能源互联网发展与展望、清洁能源开发与投资等创新成果，为全球清洁能源大规模开发利用提供指引和参考，为全球落实《巴黎协定》提供可复制、可推广、可实施的系统性减排方案。

课题成员

黄瀚、肖晋宇、赵杨、吴佳玮、侯金鸣、李鹏、安锐坚



北京 • 2022

封面: Photo by UNCTAD
扉页: Photo by Veejay Villafranca, Greenpeace

目录

第1章 资源评估的数字化方法 2
1.1 技术路线 2
1.2 数据与计算 5
1.2.1 基础数据 5
1.2.2 计算技术 6
1.3 风能资源评估模型 8
1.3.1 理论蕴藏量 8
1.3.2 技术可开发量 8
1.4 太阳能资源评估模型 17
1.4.1 理论蕴藏量 17
1.4.2 技术可开发量 17

第2章 BRI 国家可再生能源资源禀赋评估 22
2.1 基础条件 22
2.1.1 风速分布 22
2.1.2 水平面总辐射量分布 23
2.1.3 地面覆盖物 23
2.1.4 保护区分布 24
2.1.5 地形分布 25
2.1.6 交通设施 26
2.1.7 电网设施 27
2.2 风能资源评估结果 27
2.2.1 理论蕴藏量 28
2.2.2 技术可开发量 28
2.2.3 开发成本 29
2.3 光伏资源评估结果 34
2.3.1 理论蕴藏量 34
2.3.2 技术可开发量 35
2.3.3 开发成本 36

第3章 重点国家的可再生能源发展潜力 42
3.1 印度尼西亚 42
3.1.1 资源条件 42
3.1.2 开发条件 42
3.1.3 开发潜力 44
3.2 埃塞俄比亚 45
3.2.1 资源条件 45
3.2.2 开发条件 45
3.2.3 开发潜力 47

附录 地理信息运算关键算法 48
注释 51

第 1 章 资源评估的数字化方法

当前，全球能源行业正在加速推进低碳化绿色转型，水电、风电和光伏发电装机规模已经占到全部清洁能源装机规模的80%以上，是最为重要和最富发展潜力的清洁能源发电方式。报告对风能和太阳能资源进行评估，为加快清洁能源开发利用奠定了科学基础。

风能是空气流动所产生的动能，是太阳能的一种转化形式。太阳辐射以及地球和大气层的旋转造成地球表面各部分受热不均匀，引起大气层中压力分布不平衡，在水平气压梯度作用下，空气运动形成风。

太阳能是由太阳核聚变所产生的能量，经由电磁波形式在宇宙空间中传递，是地球表层能量的主要来源。分析太阳能资源需要包括太阳能年总水平面辐射量、水平面散射辐射量、年总法向直射辐射量等数据。本报告主要研究适宜开发光伏发电的太阳能资源。

1.1 技术路线

风速、太阳辐射、空气密度、温度等气象数据是评估风电、太阳能发电能力的关键。目前已有研究机构和企业完成了从原始气象资料到风、光气象资源数据的生产，并对数据的质量进行了有效管控与验证。基于此类商业化的资源数据开展研究，可以提高评估结果的准确性和工作效率。

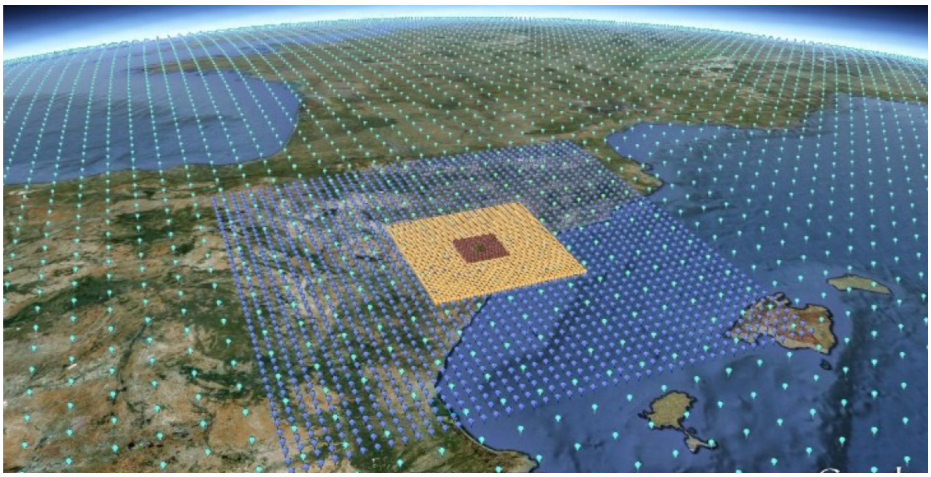
（1）数据来源

大范围的风资源数据一般采用大气模式数值模拟计算的方法获取。地球大气系统是一个极其复杂的非线性系统，其动力、热力过程可以通过偏微分方程组描述，但是方程组的复杂性导致难以获得解析解，采用差分数值法建立大气模式可以获得近似解。影响风机发电的天气与气候现象具有中尺度特性，所以一般使用中尺度模式开展模拟计算，并对原始方程模式进行必要简化以有效节省时间及计算成本。天气研究与预测模型[1]（Weather Research & Forecasting Model，WRF）作为中尺度气象模式的典型代表，能够有效捕捉大、中尺度的地球大气环流过程，适合宏观区域风能资源研究，能够开展从数十米到数千千米范围的气象数据分析，也广泛应用于大气研究和气象预报领域。随着大气探测技术、通信技术和计算机技术的不断发展，借助现代高性能计算集群进行大规模数值模拟计算，已成为最高效的风能资源气象数据的获取手段。

西班牙Vortex公司采用中尺度WRF模型，通过嵌套模拟链实现了从数百米到数千米空间尺度的覆盖[2]，其嵌套网格模拟如图1-2所示。模型采用的宏观尺度的气象数据来自三个不同的再分析数据源[3]，分别为美国国家环境预报中心的CFSR数据、美国航空航天局的MERRA-2数据和欧洲中尺度天气预报中心的ERA-Interim与ERA5数据；地形数据来源于美国航空航天局的SRTM数据[4]；陆地覆盖数据来源于欧洲航天局的GlobCoverLand Cover1[5]数据。Vortex公司把再分析生产的风速数据与全球超过250个站点的实测风速数据集进行了对比[6]，同时结合实际案例经验，在全球范围内测试了超过400个检查点进行对比分析[7]，全面检测校核了生产气象数据的准确性。总体上，Vortex公司通过数值模拟计算可以获得全球范围50~150m高度下的风能资源图谱及逐小时时间序列数据，分辨率为9km×9km，其数据成为世界银行（World Bank）Wind Atlas平台的基础数据之一，在全球获得广泛应用。经过对比分析，报告采用Vortex公司生产的全球风能资源数据作为风能资源评估的输入。

太阳能资源数据一般采用卫星遥感数据结合辐射传输模拟的方法获取。获取一个地区太阳能资源数据最简单，也

图 1-1 | Vortex嵌套网格模拟示意图



是最准确的方法就是利用地面辐射观测资料。然而，地面观测站点数量有限且空间分布不均匀。基于卫星遥感资料的物理反演方法是当前获取全球覆盖范围太阳能资源数据的主要方式，同时采用高质量的地面辐射观测数据对评估结果进行校准，可有效提高数据的时空分辨率和精确度。

欧洲SolarGIS公司采用卫星遥感数据结合辐射传输模拟的方法，利用卫星遥感、地理信息技术和先进的科学算法开展覆盖全球的太阳辐射反演模拟。SolarGIS公司采用气象卫星数据[8]、气象模式再分析数据 、天文模式、地理信息数据[10]，并结合地面观测数据，建立了包含一系列高分辨率气象要素的太阳能资源数据库。其中，太阳辐射数据包含水平面总辐射量（Global Horizontal Irradiance，GHI）、法向直接辐射量（Direct Normal Irradiance，DNI）和散射辐射（Diffuse Radiation，DIF）；气象参数包含气温、湿度、大气压强、平均风速和风向等。该数据库在高空间分辨率、高品质地面测量、高时间分辨率数据处理算法等方面处于全球先进水平，经过对照分析，GHI数据与地面实测数据的误差在±4%～±8%之间，DNI数据误差度在±8%～±15%之间。

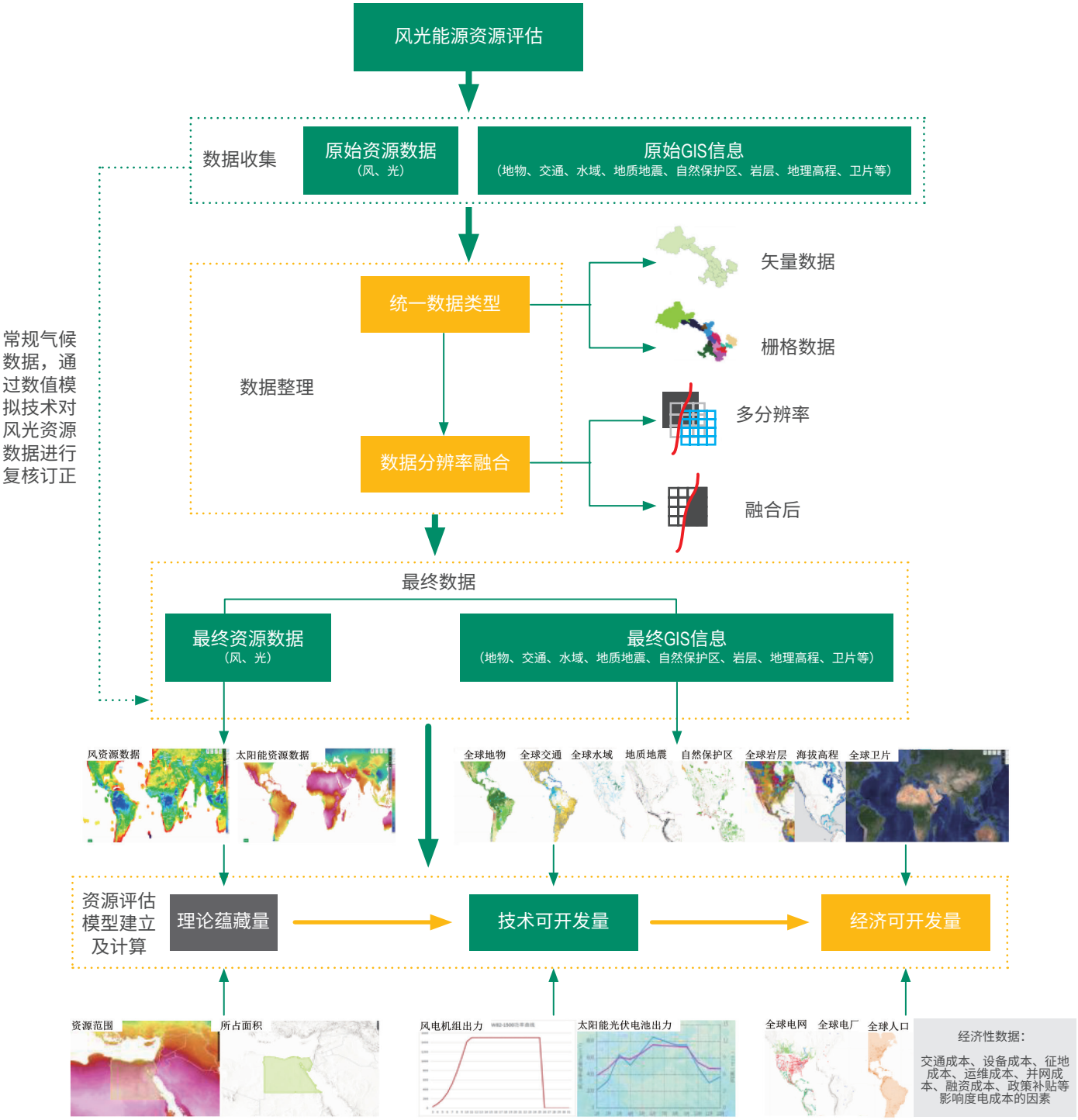
SolarGIS公司可以提供全球陆地主要太阳能资源开发区域内（北纬60°～南纬55°），陆地表面的太阳能资源逐小时时间序列数据，空间分辨率为9km×9km，已成为世界银行Solar Atlas平台的基础数据之一，在全球范围内已被广泛应用于太阳能项目的前期研究、资源评估和发电量计算。经过对比分析，报告采用SolarGIS公司数据库作为太阳能资源评估的输入。

（2）评估方法

风能与太阳能资源评估研究重点关注理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量3个指标的测算，其总体技术路线如图1-2所示。

首先，收集整理风、光资源数据，全球地形、数字高程、岩层地质等地理信息，地面覆盖物分布等高分遥感辨识信息，自然保护区、交通基础设施分布等人类活动信息，形成支撑资源评估的多元数据库。然后，基于地理信息数字计算，采用多分辨率融合及多类型混合计算等技术，将各类数据同化为可以进行量化评估的标准数据源。最后，构建多层次量化分析体系，实现从技术特性（理论蕴藏量与技术可开发量）到经济性水平（经济可开发量）的全面评估。

图 1-2 | 风能与太阳能资源评估技术路线图



1.2 数据与计算

1.2.1 基础数据

风速、太阳辐射、温度等资源数据是开展风能和太阳能源资源评估研究的必备基础。为实现数字化、多维度的风与光资源评估，引入了全球地面覆盖物分布等地理信息类数据，全球交通与电网基础设施分布等人类活动相关数据，可以在理论蕴藏量评估的基础上，进一步开展技术可开发量和经济可开发量等多维度的评估测算。总体上，报告建立了全球清洁能源资源评估基础数据库，共包含3类14项覆盖全球范围的数据信息，如表1-1所列。

• **资源类数据，主要包括全球中尺度风资源数据以及太阳能资源数据。全球风资源数据**为Vortex计算生产的全球风能气象资源数据[11]。**太阳能资源数据**为GeoModel Solar计算生产的全球太阳能气象资源数据[12]。

• **地理信息类数据，主要包括全球地面覆盖物、保护区、水库、湖泊湿地、主要断层、板块边界、历史地震频度、岩层等分布数据，地理高程与海洋边界等数据。全球地面覆盖物分类信息**来源于中国国家基础地理信息中心发布的覆盖北纬80度至南纬80度陆地范围的森林、草地、耕地等10个主要地表覆盖类型的辨识成果数据。**全球主要保护区分布数据**来源于国际自然保护联盟和联合国环境规划署世界保护监测中心联合发布的全球保护区数据集，报告结合中国保护区分类标准[13]进行了必要的翻译、归类和整理。**全球历史地震频度分布数据**来源于世界资源研究所，包含了自1976年以来里氏4.5级以上地震的地理分布。**全球主要岩层分布数据来源**于欧盟委员会、德国联邦教育与研究部、德意志科学基金会等机构的联合研究成果。**全球地形卫星图片数据**来源于谷歌公司产品。全球地理高程数据来源于美国国家航空航天局和日本经济贸易工业部的数字产品。**全球海洋边界数据数据**来源于比利时弗兰德斯海洋研究所，包含《联合国海洋法公约》中规定的200海里专属经济区、24海里毗连区、12海里领海区域等信息。

• **人类活动和经济性资料，主要包括全球人口、交通基础设施、电源和电网分布等数据。全球人口分布数据**来源于哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心，包含了2000、2005、2010和2015年的人口分布数据。**全球交通基础设施分布数据**来源于北美制图信息学会发布的全球铁路、机场、港口数据集以及由美国国家航空航天局社会经济数据和应用中心发布的全球公路网数据集。**全球电网地理接线图数据**来源于全球能源互联网发展合作组织，涵盖了欧洲、亚洲、美洲、非洲及大洋洲共147个国家截至2017年年底的主干输电网数据，包括110kV-1000kV的交流电网和主要的直流输电工程。**全球电厂信息及地理分布数据**来源于谷歌、斯德哥尔摩皇家理工学院和世界资源研究所的联合研究成果，包含截至2017年年底火电、水电、核电、风电、光伏发电、生物质发电等全球电站的位置分布与装机容量等信息。

表 1-1 | 2010-2019年全球可再生能源总投资（单位：亿美元）

序号	数据名称	空间分辨率	数据类型
1	全球中尺度风资源数据	9km×9km	栅格数据
2	全球太阳能资源数据	9km×9 km	栅格数据
3	全球地面覆盖物分类信息	30m×30m	栅格数据
4	全球主要保护区分布	/	矢量数据
5	全球主要断层分布	/	矢量数据
6	全球历史地震频度分布	5 km×5 km	栅格数据
7	全球主要岩层分布	/	矢量数据
8	全球地形卫星图片	0.5m×0.5m	栅格数据
9	全球地理高程数据 空间范围：南纬83°~北纬83°间陆地	30m×30m	栅格数据
10	全球海洋边界数据	/	矢量数据
11	全球人口分布	900m×900m	栅格数据
12	全球交通基础设施分布	/	矢量数据
13	全球电网地理接线图	/	矢量数据
14	全球电厂信息及地理分布	/	矢量数据

1.2.2 计算技术

在各类基础数据间开展的与地表面积、坡度等有关的地理信息计算是全球清洁能源资源评估系统的基础性算法。由于基础数据的空间分辨率不同、类型格式不同，必须解决多分辨率数据的融合以及多类型数据的计算两大关键问题，其目标是建立统一分辨率的基础数据集。根据全球大范围计算的实际情况，选择分辨率为500m×500m，将全球陆地划分为6.08亿个栅格开展计算。

（1）多分辨率数据的融合

不同栅格数据的分辨率不同，对所选区域的界定会产生偏差，影响计算准确性。报告采用归一法解决这一问题。归一法是将不同分辨率的像元栅格转化为同一分辨率像元，计算步骤主要包括：

- 选定最佳分辨率，统一全球坐标系统，标定初始点；
- 采用双线性插值法将低分辨率数据向高分辨率转化，如资源类数据、全球历史地震频度分布、全球人口分布等，采用加权平均法将高分辨率数据转化为低分辨率数据，如全球地理高程数据等。

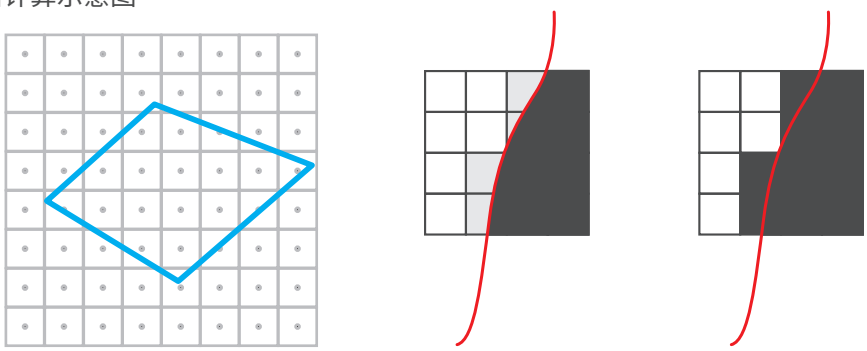
（2）混合类型数据的计算

全球18项基础信息数据主要包含矢量与栅格两种数据类型，开展地理信息计算时需要进行不同类型数据间的混合运算，以实现数据融合与量化分析。具体的，混合运算可分为两类。

第一类是固定矢量要素数据，如全球主要保护区分布、全球主要水库分布、全球主要岩层分布等，通过进行矢量数据的栅格化，实现矢量数据与栅格数据间的混合计算。

第二类是不断变化的矢量数据，在选取目标区域的过程中，区域范围的矢量数据将发生变化，矢量数据与栅格像元切割产生不规则邻域，一般可以采用0-1排除法、全面积法、中心点排除法进行计算。图1-4所示矢量选择栅格计算示意图，通过比较可知，0-1排除法涉及栅格矩形与矢量图形的几何图形计算，计算时间长，选择范围面积越小、误差越大；全面积法耗时长，空间存储量大；中心点排除法即判断选择范围矢量是否包含栅格中心点坐标，若包含则该点被选中，反之，则该点未被选中，具有计算量小，随栅格数据空间分辨率增加、误差逐渐减小的特点。报告采用中心点排除法进行变化矢量与栅格数据间的混合计算。地理信息运算的详细算法可参见附录。

图 1-3 | 矢量选择栅格计算示意图



（1）选择范围　（2）全面积法　（3）0-1-1排除法

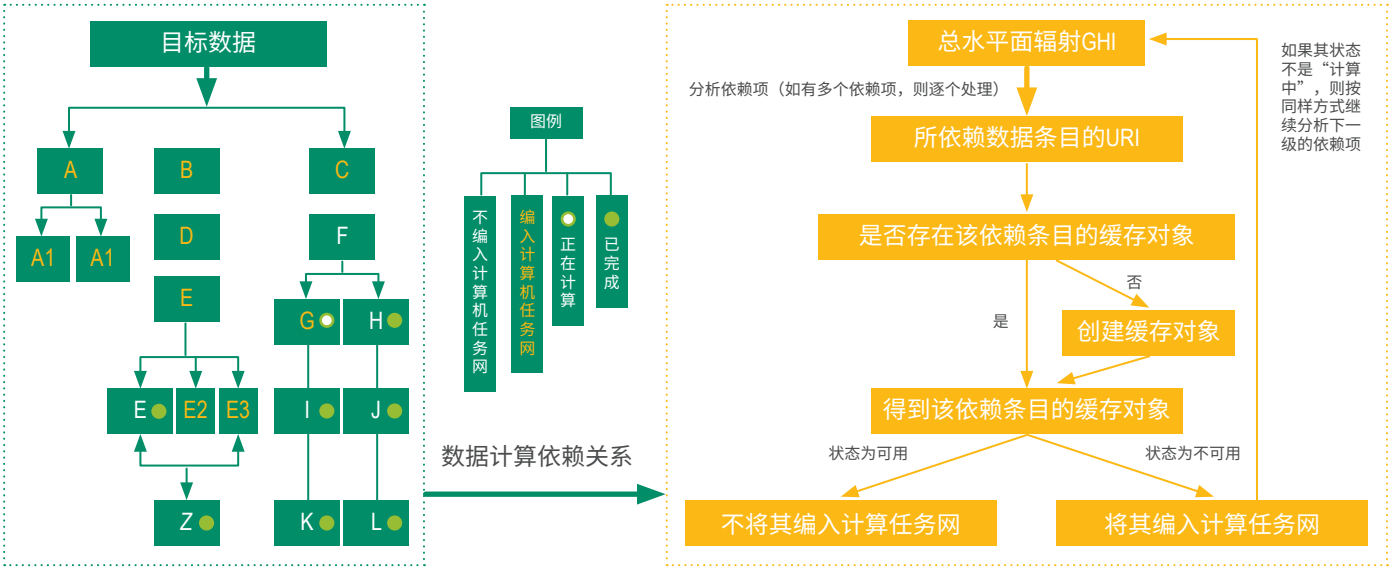
（3）并行计算体系

数据组织与并行计算体系的构建是高效数字化评估技术的核心难点，报告采用统一标准管理各类别数据，建立数据瓦片体系、数据缓存机制、任务队列体系，有效地解决了大数据量与高速稳定响应之间的矛盾。通过约定一系列标准的分辨率等级和对应的网格规则，可以开展不同数据的协同计算，实现简洁的多维数组运算以取代复杂空间叠加分析。采用数据缓存机制，可以实现数据的快速、多次调取，极大提高计算的可靠性与时效性，减少时间耗费和资源占用。数据组织架构可通过框架机制来自动处理算法间的依赖关系，便捷地实现并行处理，提高算法处理效率。

并行计算（Parallel Computing，PC），是并行机上采用多个处理器联合求解问题的方法和步骤，可以划分成时间并行和空间并行。时间并行即流水线技术，空间并行则是使用多个处理器执行并发计算。从数据组织与算法设计的角度看，并行计算又可分为数据并行和任务并行，数据并行是把大的任务化解成若干个子任务，采用多机并行或多线程并行的方式提高计算效率与可靠性。报告采用了空间并行和任务并行的算法框架，解决了超大流域面、区域面的水能、风能和太阳能等技术指标的测算问题。

报告设计并完成了一种新的并行计算体系，实现了核心指标的并行计算，即由决策判断层面处理全部与并行相关的事务，而数据算法更多关注业务逻辑，从而大幅减轻了核心算法的复杂度，提高了关键程序的复用性和执行效率。并行计算体系主要包含数据规划方式、数据依赖关系、计算任务网、任务队列、数据缓存等环节，其数据计算任务网如图1-5所示。

图 1-4 | 数据计算任务网示意图



首先，将目标数据对应的计算任务分解为一系列子任务单元A、B、C等，通过分布式任务队列可以完成多个任务单位的调度与并行处理，满足并行化计算需求。如图所示，各子任务将存在已完成、正在计算等多种状态，代表并行化计算过程。随后，各子任务单元的数据计算都将产生一个中间结果，通过缓存机制，将其作为缓存数据进行分类存储。每个子任务的计算逻辑只需关注其本身，对于其依赖的上一级数据，可以采用统一资源标识符（Uniform Resource Identifier，URI）模式标记并提交至计算框架完成处理。由于各计算任务单元间可能存在一个或多个的纵向依赖关系，众多任务单元往往会形成一个网状结构，将之命名为计算任务网，该体系与缓存机制共同满足了大数据量、多任务单元的高效并行计算要求。

1.3 风能资源评估模型

风能资源理论蕴藏量是指评估区域内一定高度上可利用的风的总动能。一般不考虑从动能到机械能乃至电能的能量转换效率。技术可开发量是指在评估年份技术水平下可以进行开发的装机容量总和。评估的关键在于剔除因资源禀赋、保护区、海拔与海深、地面覆盖物等限制而产生的不宜开发区域。经济可开发量是指在评估年份技术水平下，技术可开发装机容量中与当地平均上网电价或其他可替代电力价格相比具有竞争优势的风电装机总量。经济可开发量除与资源条件、风电开发技术水平相关外，还与影响发电成本的政策环境等因素密切相关。

报告选用理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量 3 个指标开展全球风能资源评估测算，并重点研究全球范围内适宜集中式开发的陆上风能资源。对于不具备集中式开发条件，但用电负荷相对较大的区域，提出了开展分散式风能开发的评估方法与参数；对于风能资源非常富集的海上区域，开展了海上风电基地的宏观选址研究。

1.3.1 理论蕴藏量

数字化评估风能资源理论蕴藏量，可将评估转化为计算待评估区域内每个栅格面积与该栅格对应风功率密度乘积的累加。假设风能转换装置的扫掠面积近似单位圆，风速经过转换装置后将明显下降，并在距离转换装置10倍直径外，方能基本复原。因此，风能计算时评估区域中100倍扫风面积内一般只安装1个风能转换装置，所以风能资源理论蕴藏量ETRWind的计算公式如下所示。

$$E_{TRWind} = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{8769} P_{ij} \cdot A_i \qquad 1\text{-}2$$

式中，A_i为第i块所选区域面积；n为选择区域内栅格数量；P_{ij}为第i块栅格第j小时的风功率密度。

1.3.2 技术可开发量

（1）评估流程与推荐参数

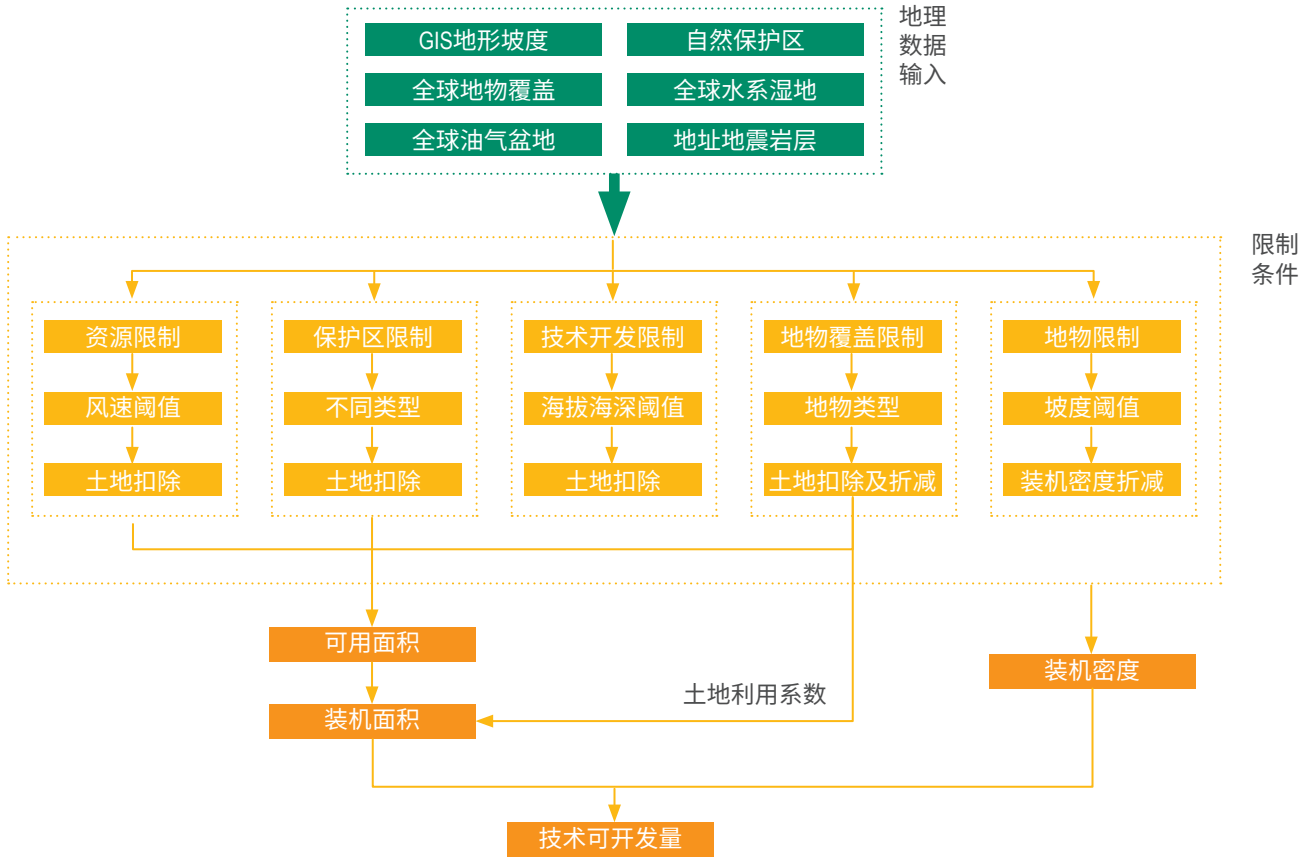
技术可开发量评估的关键在于剔除因资源禀赋、保护区、海拔与海深、地面覆盖物等限制而产生的不可利用面积，再根据不同地形坡度条件设定的装机密度，计算得到技术可开发风电装机容量。评估分析主要包括可用面积计算、装机面积计算、装机密度计算3个关键环节，分析流程如图1-5所示。

计算可用面积。风能资源开发可用面积是指剔除资源匮乏、保护区、海拔与地面覆盖物限制等不宜开发区域后的土地面积，计算公式如下。

$$A_{available} = A_{sum} - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} A_{reserveij} - \sum_{i=1}^{n} A_{low_resourcei} - \sum_{i=1}^{n} A_{high_altitudei} - \sum_{i=1}^{n} A_{ground_objecti} \qquad 1\text{-}3$$

式中，$A_{available}$为可用面积；A_{sum}为评估区域总面积；$A_{reserveij}$为区域内第i种类型、第j块保护区面积；$A_{low_resourcei}$、$A_{high_altitudei}$和$A_{ground_objecti}$为区域内因资源匮乏、海拔限制以及地物覆盖物限制等不宜开发区域的面积。

图 1-5 | 风能资源技术可开发量评估流程示意图



计算装机面积。风能资源开发装机面积是指在可用面积内，考虑不同地面覆盖物对实际开发条件的折减影响，通过设定土地利用系数得到有效装机面积，计算公式如下。

$$A_{effective} = \eta_{area} \cdot A_{available} \quad 1\text{-}4$$

式中，$A_{effective}$为装机面积；η_{area}为土地利用系数，即为不同地物类型对应的土地利用系数。

一般的，根据风能资源开发方式的差异，技术可开发量评估模型中计算可用面积与装机面积时往往需要考虑不同的技术指标，表1-2给出了选用的主要指标及推荐参数。

具体的，可用面积计算时：①剔除风能资源条件差的地区，结合工程建设实践，一般认为年均风速低于5m/s的地区，不宜进行集中式风电开发，而风速低于5m/s但高于4.5m/s的地区可以进行分散式低风速风电开发。②剔除各类保护区，包括自然生态类保护区、野生生物类保护区等。③剔除当前技术水平下不宜开发的地区，例如海拔超过4000m的高原，空气稀薄，风功率密度下降，同时多有冰川分布，建设难度大，严重影响自然环境；海深超过150m的海域，需要采用漂浮式风电基础，离岸超过200海里的远海区域，开发的风电电力需要长距离海底电力电缆输电，在目前技术水平下开发难度大、经济性差，不推荐进行开发。④剔除因地面覆盖物原因不宜开发的地区，森林、耕地、湿地沼泽、城市、冰雪等不宜进行集中式开发；但是森林、耕地等区域，可以考虑合理利用田间地头、森林边缘等区域布置风机，进行分散式风电开发。

计算装机面积时，结合各国风电开发经验，不同地表覆盖物类型可开发风电的适宜程度存在差异，遵循全面性、层次性、可操作性、敏感性和科学性原则，在可持续发展、保护生态平衡的前提下，报告提出灌丛、草本植被以及裸露地表3种区域类型适宜集中式风电开发，其土地利用系数的建议值分别为80%、80%与100%。结合各国实际情况，按照因地制宜的原则，建议利用森林、耕地进行分散式风电开发时，土地利用系数取值分别10%与25%。

表 1-2 | 风能技术可开发量评估模型采用的主要指标和推荐参数

类型	限制因素	阈值	集中式开发 土地利用系数	分散式开发 土地利用系数
资源限制	分散式开发	> 5 m/s（集中式）	-	-
		> 4.5 m/s（分散式）	-	-
技术开发限制	陆地海拔	< 4000 m	-	-
	近海海深	< 150 m	-	-
保护区限制	自然生态系统	不宜开发	0%	0%
	野生生物类	不宜开发	0%	0%
	自然遗迹类	不宜开发	0%	0%
	自然资源类	不宜开发	0%	0%
	其他保护区	不宜开发	0%	0%
地面覆盖物限制	森林	不宜集中式开发	0%	10%
	耕地农田	不宜集中式开发	0%	25%
	湿地沼泽	不宜开发	0%	0%
	城市	不宜开发	0%	0%
	冰雪	不宜开发	0%	0%
	灌丛	适宜开发	80%	0%
	草本植被	适宜开发	80%	0%
	裸露地表	适宜开发	100%	0%

计算装机密度。风能资源开发装机密度是指不同地形坡度对单位土地面积上的装机能力的折减影响，通过设定坡度影响因子计算得到实际装机密度。以适合开发的资源条件[14]进行测算，平坦地表区域内单位面积上的装机容量Punit约5MW/km^2。风电开发的实践表明，装机密度受地形坡度影响较大，陡坡的装机密度要明显小于平坦地面，参考中国风资源评估技术标准及其他技术机构和国际组织有关成果，在500米分辨率下对0-30度间不同坡度条件，设定了坡度影响因子，如表1-3所示。

表 1-3 | 不同坡度对风机装机容量的影响

GIS坡度 (°)	坡度影响因子α
0~1.7	1
1.8~3.4	0.5
3.5~16.7	0.3
16.8~30	0.15
>30	0

风能资源技术可开发量的数字化评估即为计算每个栅格的有效装机面积与单位面积装机容量、坡度影响因子的乘积，累加得到区域的风电技术可开发量，计算公式为如式1-5。

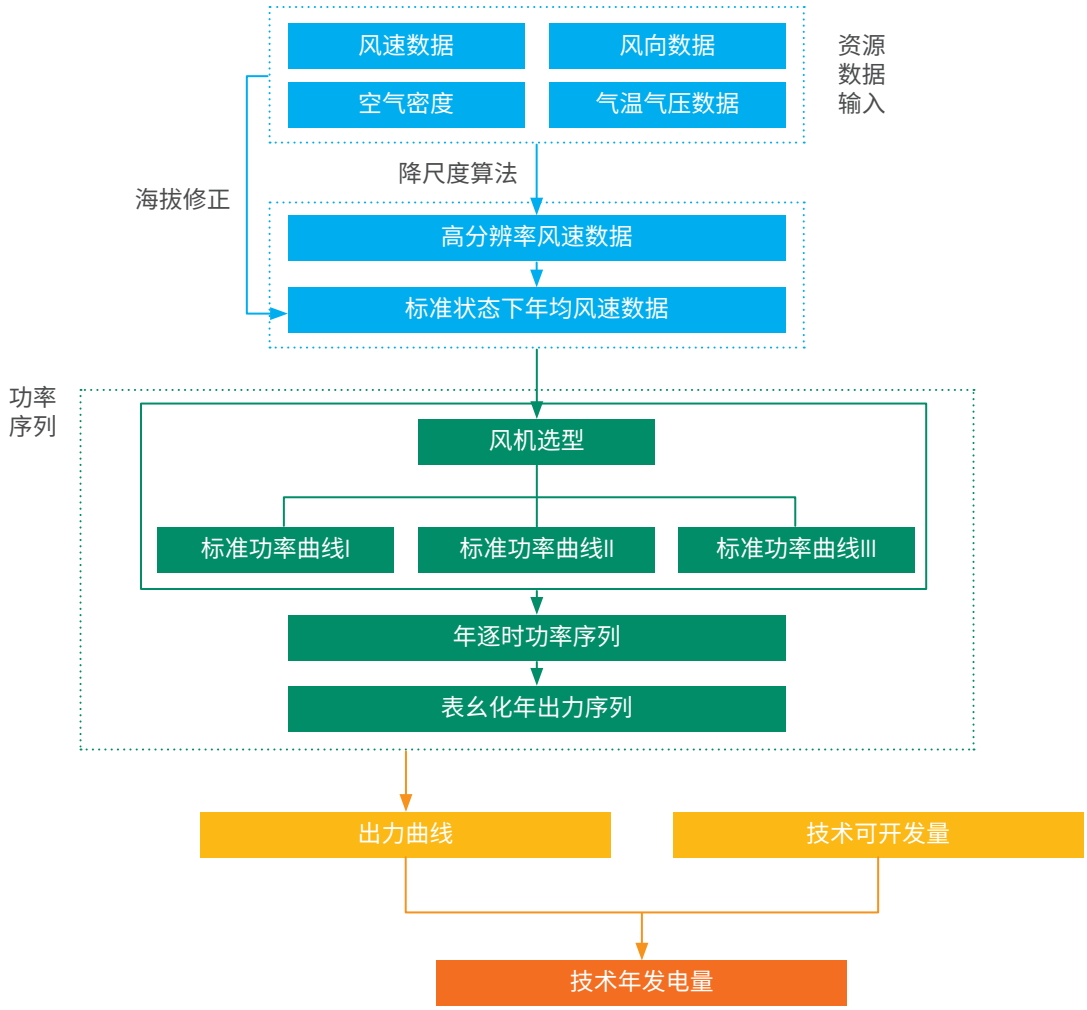
$$P_{TPGWind} = \sum_{i=1}^{n} A_{effectivei} \cdot \alpha_i \cdot P_{unit} \qquad 1\text{-}5$$

式中，$P_{TPGWind}$为风能技术可开发量；$A_{effectivei}$为第i个栅格的装机面积；α_i为第$_i$个栅格对应的坡度影响因子；P_{unit}为平坦地表单位面积装机容量。

（2）发电量计算

根据风能资源禀赋，通常采用年平均风速作为技术指标，结合当前技术条件下的风机发电出力特性进行机组选型，按照选定的风机功率曲线，采用插值法计算年逐时功率序列，通过标幺化计算并考虑折减系数得到出力曲线，进而获得年技术可开发电量，分析流程如图1-6所示。

图 1-6 | 风能年发电量评估流程



$$E_{TPGWind} = A_{effective} \cdot \alpha_i \cdot P_{unit} \cdot \sum_{j=1}^{8760} P_j \quad 1\text{-}6$$

式中，$E_{TPGWind}$为年技术可开发电量；P_j为出力序列，即第j个小时典型风机平均发电出力，累加8760小时对应的P_j，即得到风电单位装机的年发电量。

1.3.3 经济可开发量

评估风能资源经济可开发量时，报告采用平准化度电成本（Levelized Cost of Energy，LCOE）作为评估指标。评估过程中，将每个地理栅格视为一个计算单元，分别计算各栅格单元对应的度电成本，通过与给出的综合参考电价进行对比，将具有经济性的栅格的装机容量按照地域面积进行累加，即可得到该区域的风电经济可开发量。

（1）评估模型与影响因素

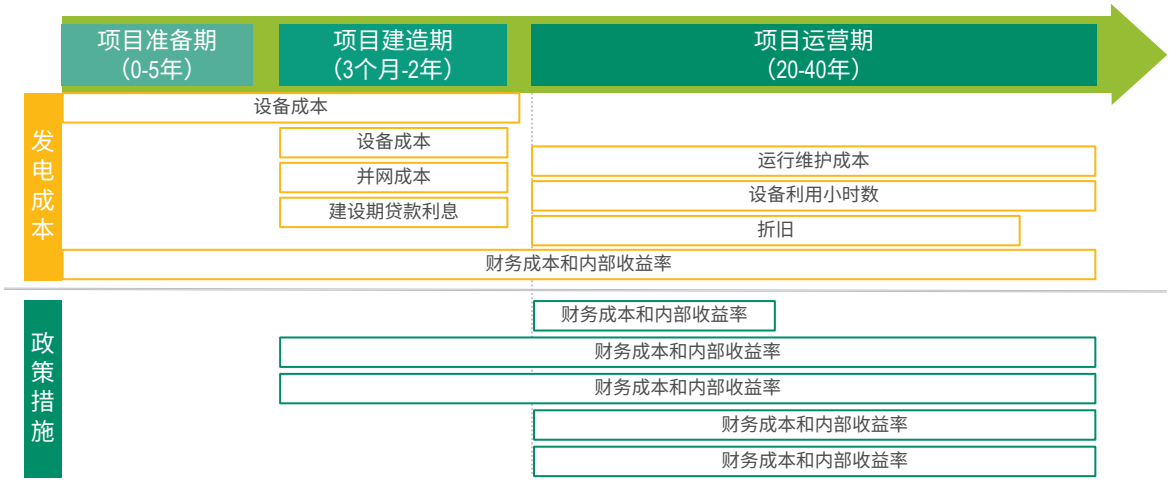
平准化度电成本是将项目生命周期内的全部资本投入、贷款、运维等成本折算成现值并记为总成本，将总成本按照生命周期内全部发电量进行分摊得到的平均成本，计算公式如下。

$$LCOE = \frac{I_o + \sum_{n=0}^{N}(D_n + R_v + V_n + W_n - B_n)(1+r)^{-n} - C \cdot (1+r)^{-N} + R_E}{\sum_{n=0}^{N} A_n (1+r)^{-n}} \quad 1\text{-}7$$

式中，I_0为初投资，包括设备成本、建设成本、并网成本等；D_n为第n年电站折旧费用；R_n为第n年电站年运行成本；V_n为第n年税费；W_n为第n年项目贷款还本付息成本；B_n为第n年其他来源的收入，如可再生能源补贴等；C为项目残值；RE为外部因素风险成本，主要包括财税、金融政策等外部因素变化所引发的成本；A_n为第n年的发电量；n为年份；N为项目全生命周期；r为基准折现率。

基于平准化度电成本法的风电经济性分析模型主要考虑了技术和运行参数、财务参数和政策因素等3方面影响，计算内容如图1-7所示。

图 1-7 | 风电平准化度电成本模型的计算内容



技术和运行参数。技术参数主要影响设备成本和运维成本，需要根据不同国家、不同设备选型进行确定。风电项目的生命周期取值20-25年。

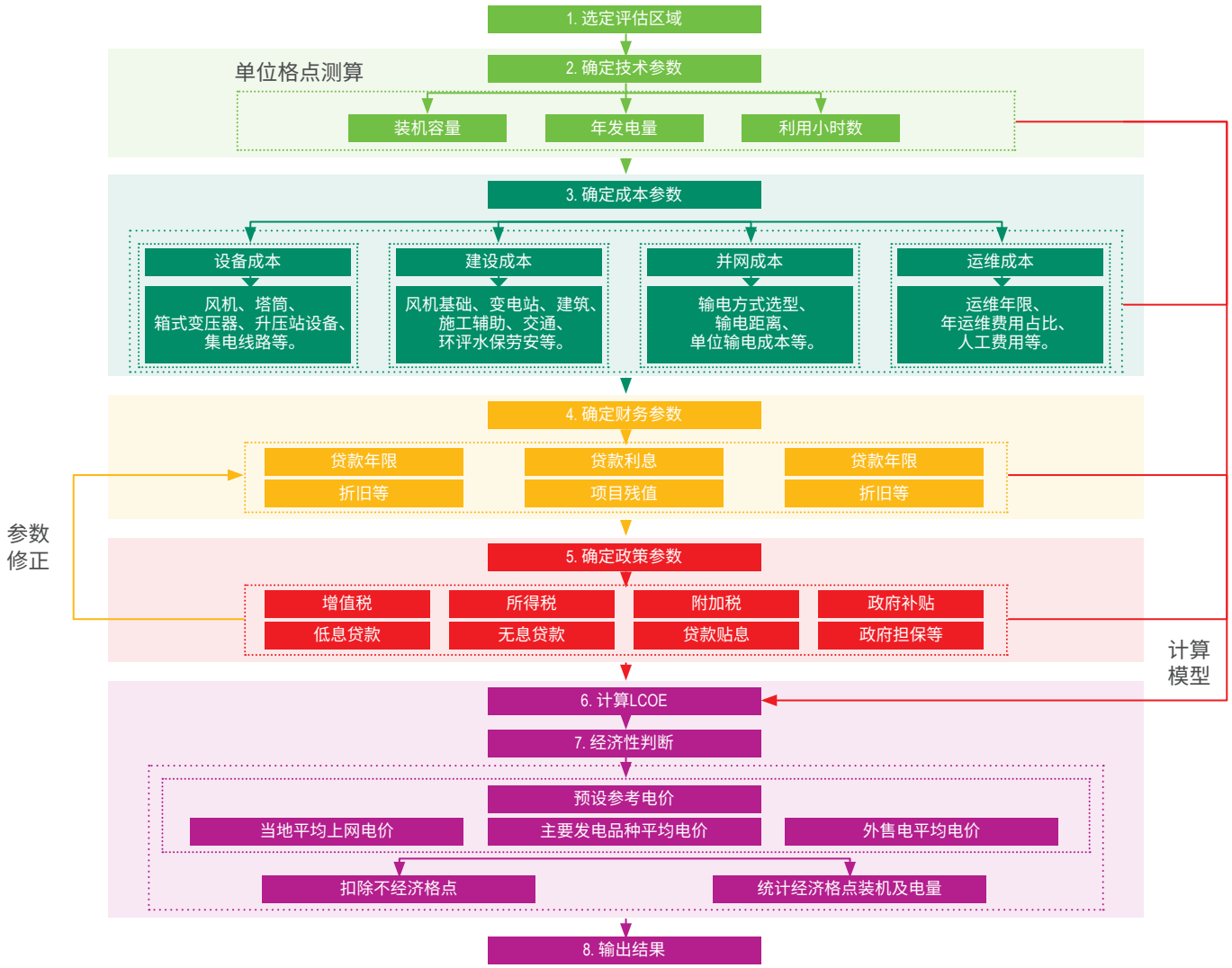
财务参数。财务参数包括基准折现率、贷款资本金比例、贷款利率、贷款期限、折旧率、折旧年限、固定资产残值率等。根据各国税率政策的不同，需要个性化设置，一般财务成本约占项目全寿命周期成本的30%左右。基准折现率是企业、行业或投资者以动态的观点所确定的、可接受的投资项目的最低标准收益水平。一般在货币通胀率低、投资风险小的国家，基准折现率在3%-8%；在货币不稳定、投资风险大的国家，需要采用更高的折现率以控制投资风险。

政策因素。影响度电成本的政策主要包括：项目开发政策、电价政策、税收政策、金融政策、全额保障性收购政策、绿色证书交易机制等。对于政策影响的量化研究，既可以根据各国不同的政策调整有关财务参数和运行费用参数，也可以在计算中设置一个与初投资或年运行费用相关的非技术成本，从而影响度电成本结果。

（2）评估流程与推荐参数

通过选定待评估地区、确定技术参数、确定成本参数、确定财务参数、确定政策参数、计算度电成本、经济性判断和输出结果8个主要流程实现风能资源经济可开发量评估，其基本框架如图1-8所示。

图 1-8 | 基于平准化度电成本的经济可开发量评估流程



1）选定待评估的地区。将选中区域的每个栅格视为1个风电项目进行经济指标测算。

2）确定技术参数。从技术可开发量评估模型获取栅格的风电装机容量、年发电量等技术参数。

3）确定成本参数。确定风电场的设备成本、建设成本和并网成本等初始投资，明确风电场的运维成本参数。

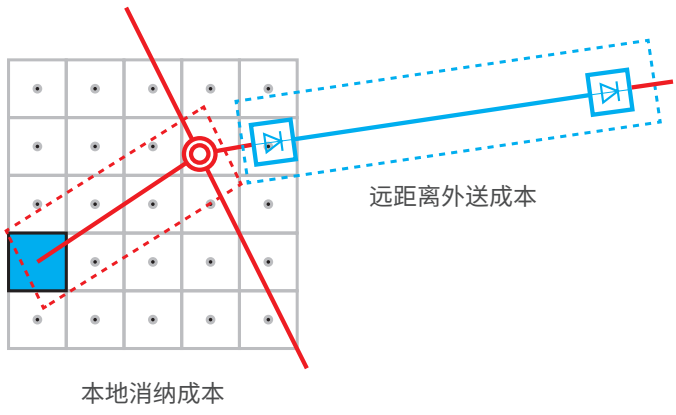
风电初投资。需要对规划水平年的风电投资水平与开发经济性进行评估，需要预测未来的风电投资水平，具体方法见2.6。2020-2035年风电综合初始投资预测结果，见表1-4。

表 1-4 | 2020-2035年风电综合初始投资预测结果

	2020年		2035年	
	海上风电	陆上风电	海上风电	陆上风电
亚洲	2061～2634	981～1254	1197～1386	646～748
欧洲	2575～3062	1300～1559	1490～1642	872～961
非洲	2651～3348	1341～1656	1454～1683	808～935
北美洲	2670～3175	1305～1559	1548～1706	872～961
南美洲	2466～3096	1206～1514	1435～1631	798～907
大洋洲	2622～3036	1340～1551	1509～1617	892～956
全球平均	2385～2995	1089～1367	1397～1617	732～847

并网成本是指将开发的清洁能源发电资源接入电网所需新增建设电网设施的费用。一般清洁能源发电工程多建设在远离城镇的人口稀疏地区，需要修建更长的并网工程，增加了开发投资成本。并网成本主要受栅格风电接网与消纳方式影响，需要开展针对性测算。**本地消纳的风电，**并网成本是风电场到最近电网接入点的输电成本，与接入电压等级和距离有关，多采用交流输电方式，包括受端变电站和输电线路的成本。**需要远距离外送消纳的风电，**并网成本是风电场到本地电力汇集站及远距离外送工程的输电成本之和。外送工程多采用直流输电方式，输电距离不同，输电成本也不同，包括送受端换流站和直流线路成本。风电开发并网成本测算构成如图 1-9所示。

图 1-9 | 风电开发并网成本测算构成示意图



不同规模、不同距离的电源并网需要采用不同的输电方式和电压等级，相应的成本水平差异较大。近年来，随着中国输电技术和电力装备在全球不断推广，报告基于中国工程经验，提出了不同的输电方式、电压等级的并网成本因子，结合待评估栅格的最短并网距离，量化测算了并网条件对不同区域清洁能源资源开发成本的影响。具体的，报告参照中国电网技术标准和输变电工程造价，给出了清洁能源开发并网的陆上和海上输电方式选型条件、不同类型远距离输电工程的单位输电成本等经济性参数的推荐取值，见表 1-5和表 1-6。

表 1-5 | 输电方式选型

基地所处位置	距离主网架距离（km）	输电方式
陆上	<500	交流
	≥500	±800kV直流
海上	<150	220千伏交流
	≥150	±320kV柔性直流

表 1-6 | 清洁能源开发并网经济性参数推荐取值

陆上交流输电		
电压等级（kV）	输电距离（km）	单位输电成本（美元/km/kW）
1000	500	0.28
745~765（750）	400	0.34
500	300	0.39
380~400（400）	220	0.59
300~330	200	0.65
220	150	1.06
110~161（110）	100	1.37

陆上直流输电		
电压等级（kV）	输电距离（km）	单位输电成本（美元/km/kW）
±1100	3000-5000	0.14
±800	1500-3000	0.15
±500	800-1200	0.30

海上交流输电		
电压等级（kV）	输电距离（km）	单位输电成本（美元/km/kW）
220	150	3.33

海上交流输电		
电压等级（kV）	输电距离（km）	单位输电成本（美元/km/kW）
±320	150-400	1.26

场外交通成本是指为开发清洁能源发电资源而新增建设从现有交通设施路网（包括公路、铁路等）到资源地的交通设施费用。报告主要考虑公路交通设施，由于一般大型清洁能源发电基地与现有公路之间有一定距离，需要修建必要的场外引接公路才能满足工程建设需要，这部分增加的建设成本应计入资源的开发总成本。采用交通成本因子法，基于覆盖全球的公路路网数据，计算待开发资源栅格到最近外部路网的运输道路的长度，即最短公路运距，再利用场外运输道路的平均单位里程成本，可以量化测算场外交通对风电资源开发成本的影响。

报告基于中国工程经验，综合考虑山地、平原、一级公路建设费用水平，测算提出风电开发单位装机容量的场外交通成本为800美元/（km·kW）。

4）确定财务参数。包括资本金比例、贷款利息、折旧、项目残值、内部收益率等财务参数，按照计算栅格所在国家可以进行单独设置。

5）确定政策参数。包括增值税、所得税、附加税、创业或引导基金、低息贷款、无息贷款、贷款贴息、政府贷款担保等，测算过程中主要体现为对财务参数的修正，并贯穿项目生命周期始终。

6）计算平准化度电成本（LCOE）。根据计算模型和各种输入参数，测算栅格风电全生命周期的平准化度电成本。

7）经济性判断。将每个栅格的风电LCOE结果与设置的参考电价进行比较，低于参考电价即可视为具有开发的经济性。对选定的区域，扣除不具备经济性的栅格后，区域整体的经济性指标采用各栅格发电量与其LCOE的加权平均成本来表示。

参考电价的确定并没有统一的规定，可以是当地平均上网电价，或当地主要发电品种的平均上网电价，或接受外来电的平均电价，或当地清洁能源的交易电价等。报告采用这四种电价的加权平均作为参考电价，不同的国家、地区或者项目可以设置个性化的权重系数调整综合参考电价，具体计算公式如1-8所示。

$$P_{comprehensive} = \alpha_{area} \cdot P_{local_grid} + \beta \cdot P_{local_main} + \gamma \cdot P_{cross_region} + \lambda \cdot P_{clean_energy} \quad 1\text{-}8$$

式中，$P_{comprehensive}$为经济性判断所用综合参考电价；P_{local_grid}、P_{local_main}、P_{cross_region}和P_{clean_energy}分别当地电网平均上网电价、主要发电品种平均上网电价、外受电平均电价以及清洁能源交易电价，α、β、γ与λ为对应权重系数。

8）输出结果。将具有经济性的栅格容量和年发电量按照地域面积进行累加，得到该区域的风电经济可开发量，计算公式如下。

$$P_{EPGWind} = \sum_{i=1}^{n} P_{EPGWindi} \cdot \eta_i \quad 1\text{-}9$$

$$\eta = \begin{cases} 0 & LOCE > P_{comprehensive} \\ 1 & LOCE \le P_{comprehensive} \end{cases} \quad 1\text{-}10$$

式中，$P_{EPGWind}$为风电经济可开发量；P_{TPGi}为第i个栅格的技术可开发量；η为经济性判断因子，当栅格测算LCOE大于综合参考电价时，认为开发不经济，取值为0，否则取值为1。

1.4 太阳能资源评估模型

太阳能光伏资源理论蕴藏量是某一区域地表接收到的太阳能量完全转化为电能的能量总和（不考虑发电转化效率的损失）。**技术可开发量**是指在评估年份技术水平下，选定区域面积上可安装光伏装机容量的总和。**经济可开发量**是指在评估年份技术水平下，技术可开发装机中与当地平均上网电价或其他可替代电力价格相比具有竞争优势的光伏装机总量。

报告选用理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量3个指标开展全球太阳能光伏资源的评估测算，并重点研究全球范围内适宜集中式开发的陆上太阳能光伏资源。

1.4.1 理论蕴藏量

数字化评估光伏发电资源理论蕴藏量，可将评估转化为计算待评估区域内每个栅格面积与该栅格对应太阳水平面总辐射量乘积的累加。光伏资源理论蕴藏量ETRPV的计算公式如下所示。

$$E_{TRPV} = \sum_{i=1}^{n} GHI_i \cdot A_i \tag{1-11}$$

式中，GHI是栅格对应的太阳能年水平面总辐照量；A_i为第i块栅格面积；n为选择区域内栅格数量。

1.4.2 技术可开发量

（1）评估流程与推荐参数

技术可开发量评估的关键在于剔除因资源禀赋、保护区、地形坡度、地面覆盖物等限制而产生的不可利用面积，在此基础上结合地理位置、地形条件设定光伏方阵（又称光伏阵列）排布原则，计算理论单位面积光伏发电装机密度，最终得到技术可开发光伏发电装机容量。评估分析主要包括可用面积计算、装机面积计算、装机密度计算3个关键环节，评估流程如图1-10所示。

计算可用面积。光伏资源开发可用面积是指剔除资源匮乏、保护区、海拔、坡度与地面覆盖物限制等不宜开发区域后的土地面积，计算公式如下。

$$A_{available} = A_{sum} - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} A_{reserveij} \cdot \sum_{i=1}^{n} A_{low_resourcei} - \sum_{i=1}^{n} A_{high_altitudei} - \sum_{i=1}^{n} A_{high_gradienti} - \sum_{i=1}^{n} A_{ground_objecti} \tag{1-12}$$

式中，$A_{available}$为可用面积；A_{sum}为评估区域总面积；$A_{reserveij}$为区域内第i种类型、第j块保护区面积；$A_{low_resourcei}$、$A_{high_altitudei}$、$A_{high_gradienti}$和$A_{ground_objecti}$分别为区域内因资源匮乏、海拔、坡度限制以及地面覆盖物不宜开发的面积。

计算装机面积。光伏发电资源开发的装机面积是指在可用面积内，考虑不同地面覆盖物对实际开发条件的折减影响，通过设定土地利用系数得到有效装机面积，其测算公式与风能资源评估所采用的公式1-4相同，参数指标见表1-7。

图 1-10 | 太阳能光伏技术可开发量评估流程

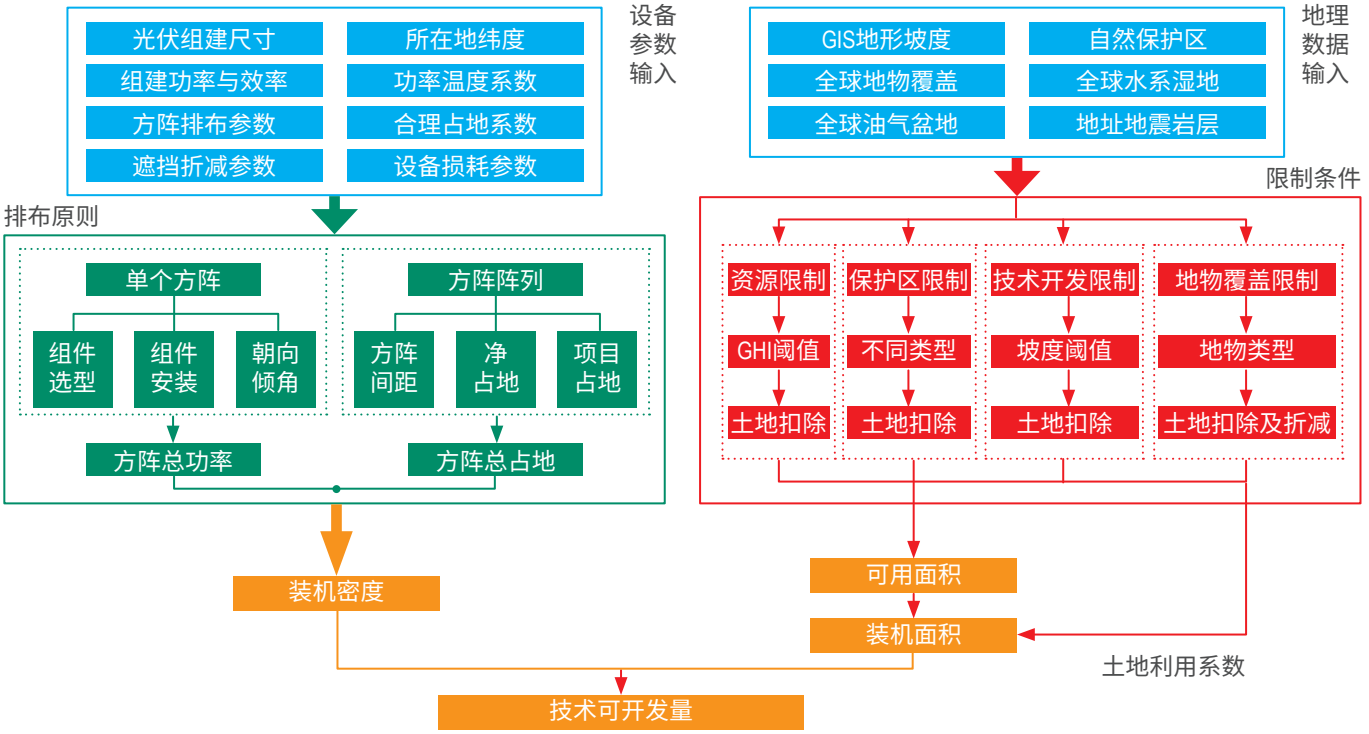


表 1-7 | 太阳能光伏技术可开发量评估模型采用的主要指标和推荐参数

类型	限制因素	阈值	集中式开发参数	分布式开发参数
资源限制	GHI	> 1000 kWh/m2	-	-
技术开发限制	陆地海拔	< 4500 m	-	-
保护区限制	自然生态系统	不宜开发	0%	0%
	野生生物类	不宜开发	0%	0%
	自然遗迹类	不宜开发	0%	0%
	自然资源类	不宜开发	0%	0%
	其他保护区	不宜开发	0%	0%
地面覆盖物限制	森林	不宜开发	0%	0%
	耕地农田	不宜集中式开发	0%	10%
	湿地沼泽	不宜开发	0%	0%
	城市	不宜集中式开发	0%	25%
	冰雪	不宜开发	0%	0%
	灌丛	适宜开发	50%	0%
	草本植被	适宜开发	80%	0%
	裸露地表	适宜开发	100%	0%
地形坡度限制	>30°	不宜开发	0%	0%

具体的，可用面积计算时一是剔除太阳能资源条件差的地区，结合工程建设实践以及当前光伏组件技术水平，一般认为水平面总辐照量低于1000kWh/m2的区域为低资源区，光照条件不理想，开发经济性差，不宜进行光伏利用开发。二是剔除各类保护区，包括自然生态类保护区、野生生物类保护区等。三是剔除当前技术条件下不宜规模化开发的地区，例如海拔超过4500m的高原地区多有冰川、常年冻土等分布，影响工程建设，光伏开发技术难度大、经济性差，同时高原生态脆弱，大型工程建设后的地表植被恢复困难。四是剔除因地表覆盖物原因不宜开发的地区，森林、耕地农田、湿地沼泽、城市、冰雪等不宜进行集中式开发；对于耕地、城市，可以考虑合理利用田埂、鱼塘、建筑物屋顶、工业园区空地等区域进行分布式光伏开发。五是地形坡度大于30°的区域，在目前技术水平下开发难度大、经济性差，不宜进行开发。

结合各国光伏开发经验，不同的地表覆盖物类型可开发光伏的适宜程度存在差异。遵循全面性、层次性、可操作性、敏感性和科学性原则，在可持续发展、保护生态平衡的前提下，报告提出灌丛、草本植被以及裸露地表3种区域类型适宜集中式光伏开发，其土地利用系数的建议值分别为50%、80%与100%。结合待评估地区具体情况，调整相关参数亦可得到当前技术水平下分布式光伏的可开发装机规模，报告提出耕地与城市可以考虑进行分布式开发，土地利用系数的建议值分别10%与25%。

计算装机密度。光伏资源开发装机密度是指以当前技术条件下光伏发电组件的设备参数和最佳排布为原则，计算单位面积上的光伏发电设备排布方阵的总功率，从而得到的光伏装机密度。

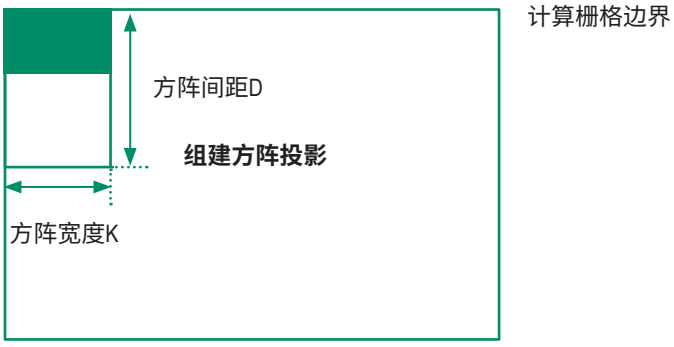
研究选用目前主流的300W单晶光伏组件作为典型代表，给出了光伏阵列纵向、横向的典型排布参数，如表1-8所示。单个方阵组件的总功率为26.4kW。

表 1-7 | 太阳能光伏技术可开发量评估模型采用的主要指标和推荐参数

器件类型	单组件功率	组件长度	组件宽度	纵向排布数	横向排布数
单晶硅	300W	1.956m	0.992m	4	22

方阵排布原则为：北半球方阵朝向正南，南半球朝向正北；当栅格地形倾角大于当地纬度时，方阵倾角为栅格地形倾角，当栅格倾角小于当地纬度时方阵倾角为当地纬度；方阵间距应满足方阵前后排在当地的冬至日上午9点和下午3点之间互不遮挡的要求。根据纬度和方位，方阵间距示意如图1-11所示。

图 1-11 | 光伏方阵间距示意图



光伏方阵间距D受方阵倾角、栅格地形倾角及纬度等影响，其计算方法可参见2.5.4的相关内容。

每个地理栅格有效装机面积与装机密度乘积的累加即为栅格的光伏发电技术可开发量PTPGPV，计算公式如下：

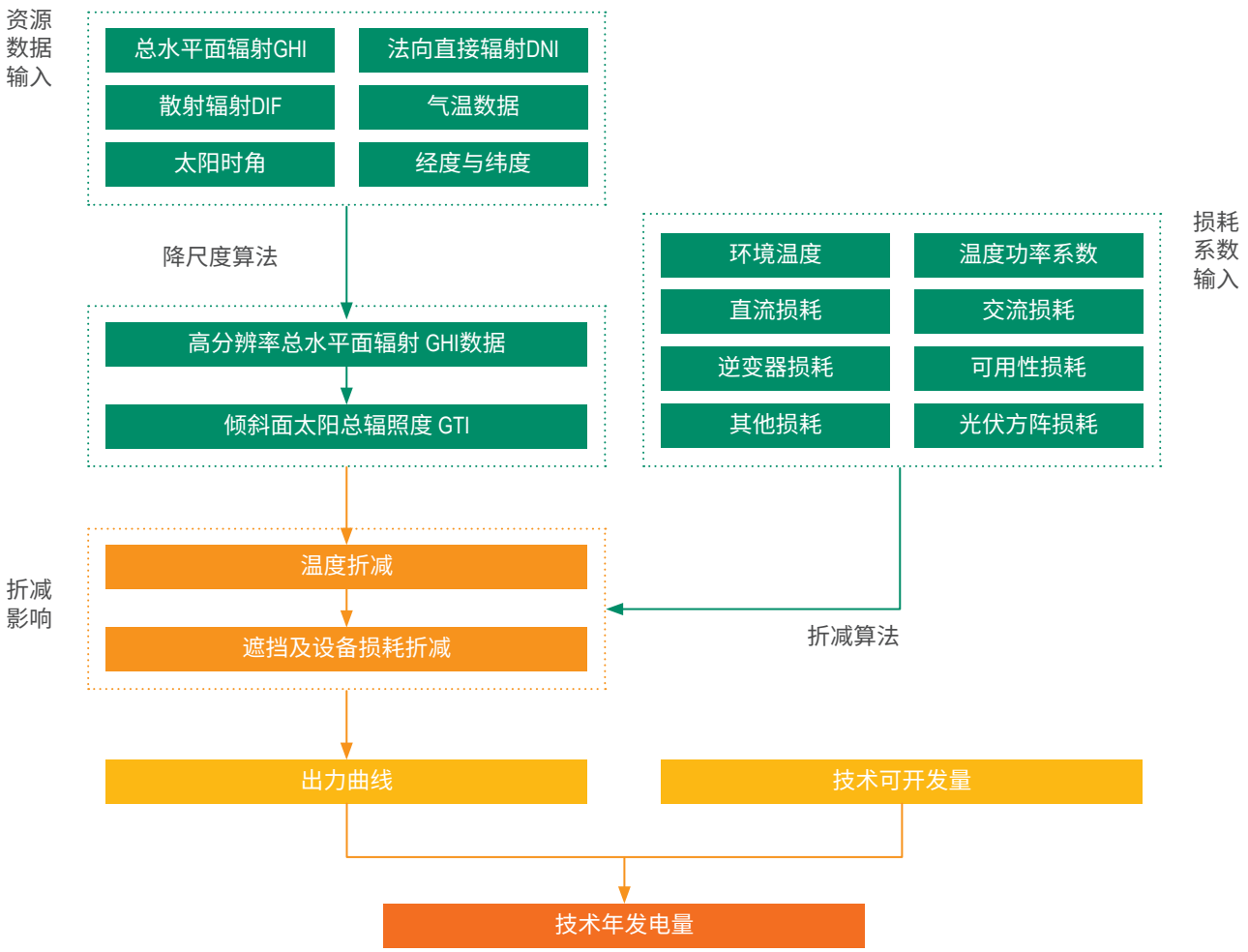
$$P_{TRGPV} = \sum_{i=1}^{n} A_{effectivei} \cdot P_{unit} \quad 1\text{-}13$$

式中，$A_{effective}$为有效装机面积，P_{unit}为单位面积光伏装机容量。

（2）发电量计算

在测算太阳能光伏资源技术可开发量的基础上，需考虑遮挡、设备损耗以及气温等因素造成的光伏发电出力损失，计算光伏逐小时发电功率，进而计算得出年技术可开发电量，分析流程如图1-12所示，具体计算公式见式1-14与式1-15。

图 1-12 | 太阳能光伏技术年发电量评估流程



$$P_{pv} = \frac{GTI}{1000} \cdot k \cdot [1 + \xi \cdot (T - 25)] \quad 1\text{-}17$$

$$E_{TRGPV} = A_{effective} \cdot P_{unit} \cdot \sum_{i=1}^{8760} P_{PVi} \quad 1\text{-}18$$

式中，P_{pv}为考虑气温对光伏出力折减以及设备综合损耗后的光伏出力序列，累加8760小时对应的P_{pvi}，即得到光伏装机的年发电量；GTI为倾斜面太阳总辐照度；ξ为组件功率温度系数，一般选取-0.3%/°C；k为光伏方阵损耗系数；T为评估区域当地环境温度；E_{TPGPV}为年技术可开发电量。

1.4.3 经济可开发量

与风电类似，光伏发电经济性评估同样采用了平准化度电成本测算法，主要包含选定待评估地区、确定技术参数、确定成本参数、确定财务参数、确定政策参数、计算度电成本、经济性判断和输出结果8个主要流程，其基本框架与风电经济性评估相同，如图1-10所示。评估的主要差别在于确定技术参数及成本参数的具体内容有所不同，技术与运行参数方面，光伏发电项目生命周期一般取25~30年；成本参数中，光伏发电基地建设投资除设备成本、建设成本（不含场外道路）、运维成本等外，与风电相似，同样需要计算并网成本和场外交通成本。

光伏发电资源开发的并网成本测算方法与风电类似，参见图 1-11，输电方式选型条件及单位输电成本等经济性参数的推荐取值同表1-5与表1-6；场外交通成本同样采用交通成本因子法，按照中国工程经验，综合山地、平原、二级公路建设费用水平测算提出光伏发电单位装机容量的交通成本为1000美元/（km·kW）。

报告需要对规划水平年的光伏发电投资水平与开发经济性进行评估，需要预测未来的光伏发电投资水平，具体方法见 2.6 的相关内容。2020—2035 年光伏发电综合初始投资预测结果，见表 1-9。

表 1-9 | 光伏电站初始投资预测结果 (单位：美元/kW)

洲别	2020年	2035年
亚洲	580～702	380～440
欧洲	686～791	480～529
非洲	684～828	447～517
北美洲	686～791	480～529
南美洲	665～780	437～497
大洋洲	647～726	441～473
全球平均	599～712	399～462

第 2 章 BRI 国家可再生能源资源禀赋评估

全球风能资源丰富，开发潜力大。受大气环流、地形等因素的影响，全球风能资源分布不均，多集中在沿海地区（如非洲东部、北部沿海、南美洲南部沿海等）和易形成狭管效应的开阔大陆的收缩地带（如肯尼亚北部、阿富汗西部等）。综合资源特性和开发条件，东非红海沿岸、南美洲南部地区和欧洲北海风电集中式开发条件极佳，是全球的“风极”。肯尼亚、阿根廷等国风能资源优异，风电开发潜力大。

全球太阳能资源充沛，开发潜力巨大，可为人类发展提供不竭能源。受太阳辐射角度、大气散射、日照时长等因素的影响，太阳能资源主要集中在赤道至南北回归线附近，且常年受副热带高压控制的干旱地带。中东地区、北非撒哈拉沙漠和南美阿塔卡玛沙漠地区太阳能资源极为丰富，集中式开发条件优越，是全球的“光极”。沙特阿拉伯、埃及、智利等国光伏发电开发潜力大，市场前景广阔。

2.1 基础条件

风速、地面覆盖物、保护区分布影响开发利用风能、太阳能的技术可行性，公路、电网等基础设施条件影响风能开发的经济性水平。报告基于覆盖全球的数据、信息，采用统一标准和参数完成了全球风能资源的评估研究。

2.1.1 风速分布

报告采用Vortex公司计算生产的风能资源数据开展资源评估测算，资源数据包括风速、风向、空气密度和温度等。

全球距地面100m高度全年风速范围为2-14m/s，年平均风速大于7m/s的区域较多，广泛分布在亚洲东部蒙古高原（Mongolian Plat.）和青藏高原（Qingzang Gaoyuan）、中部里海（Caspian Sea）沿岸和北部尼谢伊斯卡亚高地（Nisayskaya Highlands）以及喀拉海（Kara Sea）沿岸地区，欧洲北海（North Sea）沿岸与巴伦支海（Barents Sea）沿岸以及格陵兰岛地区，非洲北部沿海和环撒哈拉沙漠地区，北美洲中部大平原（Great Plains）、东北部拉布拉多高原（Labrador Plateau）以及西部白令海（Bering Sea）沿岸地区，南美洲南部的巴塔哥尼亚高原（Batagonia），大洋洲的西南部沙漠地区。

而位于亚洲南部的喜马拉雅山脉南缘、东南部的中南半岛与马来群岛（Malay Archipelago），非洲中部的刚果盆地（Congo Basin）、南美洲北部的亚马孙平原（Amazon Plain）等区域年均风速低于4m/s，风能资源禀赋较差。

2.1.2 水平面总辐射量分布

报告采用SolarGIS计算生产的太阳能资源数据开展光伏资源评估测算，资源数据包括：水平面总辐射量、法向直接辐射量和温度等。全球蕴藏着巨大的太阳能开发潜力。

全球太阳能资源丰富，全球太阳能水平面总辐射量范围700-2700kWh/m2，年水平面总辐射量大于2000 kWh/m2的区域主要集中在亚洲中东地区、非洲北部撒哈拉沙漠、非洲西南部、北美洲南部、南美洲西南部及大洋洲澳大利亚北部等低、中纬度地区。

受地球纬度影响，欧洲北部、亚洲北部、北美洲北部的高纬度地区，水平面总辐射水平基本在1000kWh/ m2以下，太阳能资源禀赋相对较差。

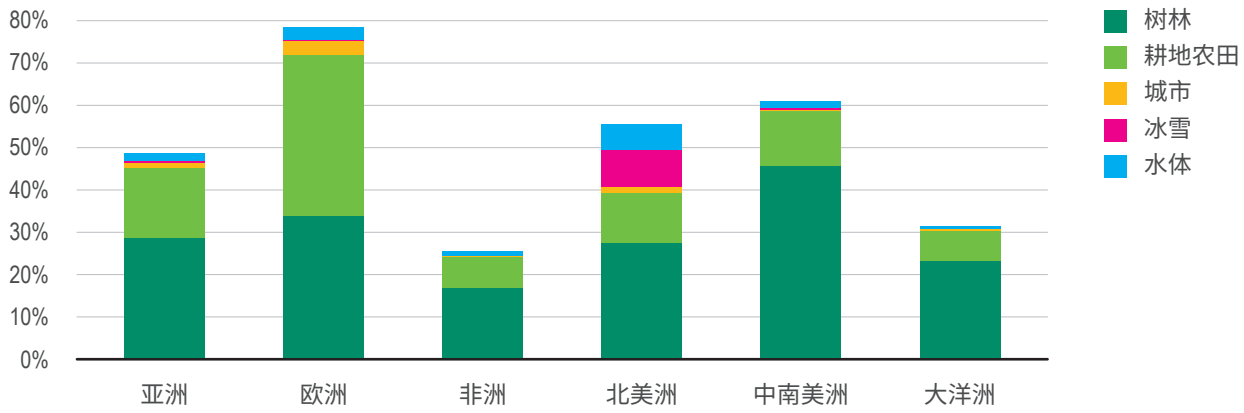
2.1.3 地面覆盖物

地球上的陆地和海洋总面积约5.1亿平方千米，其中海洋面积约3.61亿平方千米，陆地面积约1.49亿平方千米，占全球总面积的29%。对于陆上风能资源的开发利用，区域内地面覆盖物的类型与分布情况具有重要影响。从适宜大规模集中开发的土地资源角度分析，森林、耕地农田、湿地水体、城市和冰川是影响风电资源集中开发的主要地面覆盖物限制性因素。

森林。从全球来看，森林一方面多分布在南美洲亚马逊平原、非洲刚果盆地和几内亚湾沿岸、亚洲的马来群岛大部和马来半岛南部等赤道附近的热带雨林气候地区，上述区域终年高温多雨，年平均气温在20℃以上，树林密布、植被种类丰富；另一方面，欧亚大陆北部西伯利亚和北美的亚寒带针叶林气候地区，气温年差较大，生长着落叶松、云杉等不同类型的针叶林，是地球上分布最北的树林；中国长江流域、美国东南部、澳大利亚东南部等亚热带地区，四季分明、雨热同期，也广泛分布着壳斗科、樟科、山茶科、木兰科等常绿阔叶林。上述区域受森林分布制约，不适宜进行大规模风能资源的集中式开发利用。

全球各洲不适宜集中式风电开发的地面覆盖物类型的面积占比如图2-1所示。对比来看，欧洲将近80%的地表面积均被森林、耕地、冰雪等覆盖，大型风电基地的建设条件较差；中南美洲、北美洲以及亚洲均有约50%的地表面积不适宜集中开发风电资源；非洲和大洋洲从土地性质方面来看制约相对较少，开发条件更好。

图 2-1 | 各洲森林、耕地、城市、冰雪和水体面积占比示意图



2.1.4 保护区分布

保护区是影响风电资源开发的重要限制性因素。一般情况下，大型风电基地的选址开发应规避所有类型的保护区。

全球来看，保护区总数量超过22万个，总面积约1900万km2，其中海上保护区个数约3500个，以自然生态系统类和自然资源类为主，主要分布在太平洋、印度洋、临近欧洲大陆的大西洋等海域。中南美洲、欧洲和大洋洲保护区面积位居世界前列，总占比超过全球的60%。中南美洲超过20%的陆地面积纳入保护区范围，居全球首位，集中式风电开发受保护区的制约相对较大；亚洲的保护区面积占比不足10%，保护区对于大型风电基地选址的制约较小。

2.1.5 地形分布

地形条件对太阳能光伏资源开发有较大影响，主要包括海拔高度和地形坡度2个方面。

海拔高度方面，高海拔地区大气散射作用减弱，有利于光伏发电，但是4500m以上高原多有冰川、常年冻土等分布，影响工程建设，光伏开发技术难度大、经济性差；同时高原生态脆弱，大型工程建设后的地表植被恢复困难。

从各洲分布来看，**亚洲**青藏高原地区海拔高，大型光伏工程的建设存在一定困难。**欧洲**主要为海拔500m以内的平原，**非洲**和**北美洲**高原地区海拔主要在2000m以内，影响集中式光伏开发的高海拔区域面积很小。**中南美洲**西部沿太平洋地带的高原存在海拔超过2000m的区域，在一定程度上将影响地区的工程建设。**大洋洲**主要为海拔500m以内的平原，不存在海拔高度影响的问题。

地形方面，地面的坡向和坡度将影响光伏发电装置布置的角度和间距，从而影响单位面积可获得的发电量。报告采用全球数字高程模型，对全球格点计算坡向（0-360°）和坡度（0-90°），结合格点经纬度坐标，形成光伏发电装置倾角和间距计算的输入参数。

总体上，欧洲、非洲与大洋洲地形坡度较小，太阳能光伏集中开发的地形条件好，而亚洲、北美洲和中南美洲的部分区域地形坡度大，集中开发存在一定的地形条件制约。

2.1.6 交通设施

交通设施发达程度越高、公路干网等分布越广泛，越有利于大型风电基地的建设，利于工程设备与材料的进场运输，提高基地开发经济性。开展风电资源开发经济性研究，需结合交通设施的分布情况进行综合分析和测算。

公路方面，全球高等级公路的总里超过170万km，公路总里程约1200万km，基本遍布各洲全境。**亚洲**公路总里程超过350万km，居世界首位，约占全球总里程的近30%，洲内高等级公路占比约10%。**北美洲**高等级公路总里程超过56万，居世界首位，占洲内公路总里程约35%。**欧洲**高等级公路与洲内公路总里程占比也超过20%，居世界前列。

铁路方面，全球铁路里程总计约130万km，主要分布在欧洲与北美洲的大部分地区，以及亚洲的东部与南部地区。其中，欧洲铁路里程约占全球总里程的40%，居各洲首位，亚洲里程占比近30%，居于次位。

总体来看，欧洲的公路和铁路交通发达，北美洲与亚洲的交通基础设施覆盖广泛，开展大型清洁能源发电基地工程建设的交通运输条件较好。

2.1.7 电网设施

电网基础设施条件越好，大型风电基地的并网成本越小，越有利于开展集中式风电开发。全球风能资源开发经济性的评估考虑了并网条件的影响，在平准化度电成本中增加了并网成本。

全球交流电网的高压线路总长度超过300万km，主要分布在亚洲与欧洲，其中380kV以上线路总长度约140万km，约50%集中在亚洲，20%在欧洲；全球直流工程总长度超过10万km，亚洲占比超过60%，居于世界首位，其中±800kV以上线路总长度超过3万km，主要分布在亚洲与中南美洲，±1100kV以上线路全部在中国。

2.2 风能资源评估结果

报告基于覆盖全球的数据、信息，采用统一标准和参数完成了全球风能资源的评估研究。

2.2.1 理论蕴藏量

根据100米高度的风速数据测算，全球风能资源理论蕴藏量总计2005PWh/a[15]，一带一路国家资源量共计1103PWh/a，占比55%。

图 2-2 | 全球及一带一路国家风能资源理论蕴藏量对比图

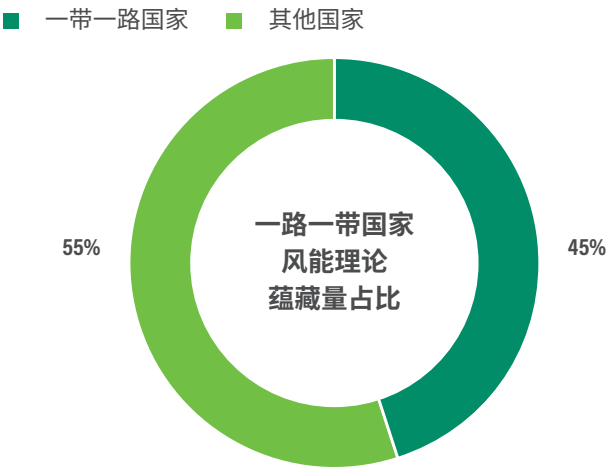
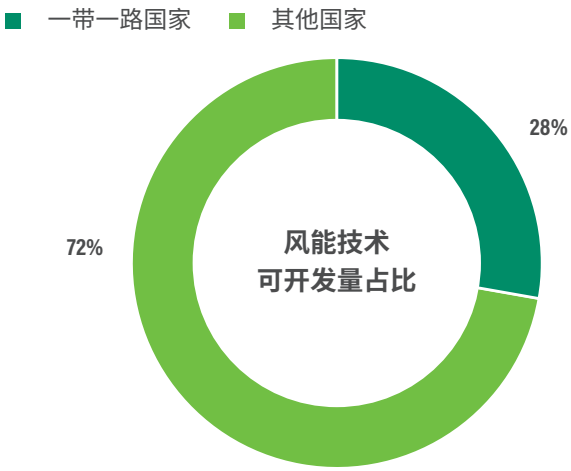


图 2-3 | 全球及一带一路国家适宜集中开发的风电规模对比图



2.2.2 技术可开发量

综合考虑资源和各类技术限制条件后，经评估测算，全球适宜集中开发的风电规模约131.2 TW，年发电量约 346.6 PWh。一带一路国家资源量共计95 TW，占比72%。总计年发电量约247 PWh。

2.2.3 开发成本

按照陆上风电装备2035年造价水平测算，综合考虑交通和电网基础设施条件，报告研究了139个一带一路国家和地区的集中式风电的平均开发成本，平均开发成本[16]为3.94美分。

以8美分为标准测算，139个一带一路国家集中式风电的经济可开发规模92TW，占全球的70%；以5美分为标准测算，经济可开发规模78TW，占全球的80%；以4美分为标准测算，经济可开发规模49TW，占全球的81%；以35美分为标准测算，经济可开发规模15TW，占全球的82%。图2-4给出了一带一路国家经济可开发规模占全球的比重。139个一带一路国家风能资源评估结果见下表所列。

图 2-4 | 一带一路国家陆上风电经济可开发规模占比对比（8美分）

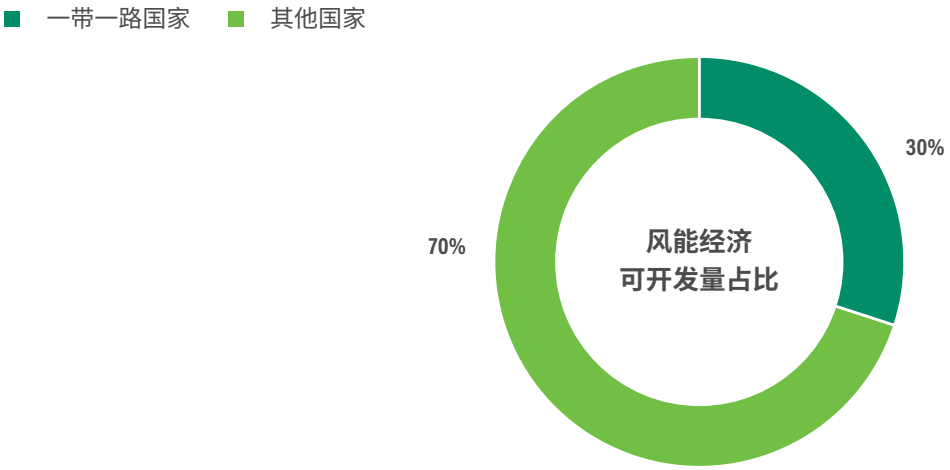


表 2-1 | 139个一带一路国家风能资源评估结果

序号	国家	国家	理论蕴藏量(TWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
1	Barbados	巴巴多斯	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
2	Bolivia	玻利维亚	10277	86	225	2599	4.47	86	4.37	58	32	3
3	Cook Island	库克群岛	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
4	Cote d'Ivoire	科特迪瓦	1423	0	0	nan	3.88	0	nan	0	0	0
5	Dominica	多米尼加	381	7	16	2199	4.37	7	4.06	6	3	0
6	Dominica	多米尼克	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
7	Federated States of Micronesia	密克罗尼西亚联邦	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
8	Grenada	格林纳达	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
9	Kiribati	基里巴斯	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
10	Malta	马耳他	11	0	0	2949	6.86	0	2.89	0	0	0
11	Niue	纽埃	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
12	Republic of Congo	刚果布	nan	nan	nan	nan	nan	0	nan	0	0	0
13	Samoa	萨摩亚	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
14	Tonga	汤加	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
15	Uruguay	乌拉圭	3440	362	956	2641	6.22	362	3.42	362	343	17
16	Afghanistan	阿富汗	8439	581	1613	2774	4.87	581	3.16	563	401	228
17	Albania	阿尔巴尼亚	316	0	1	1979	4.53	0	4.40	0	0	0
18	Algeria	阿尔及利亚	47354	8795	23863	2713	6.23	8790	4.01	7386	4155	1185

表 2-1 | 139个一带一路国家风能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量（TWh/a）	集中式开发规模（GW）	年发电量（TWh/a）	可利用小时数（h）	平均风速 m/s	低于8美分的经济可开发量（GW）	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量（GW）	低于4美分的经济可开发量（GW）	低于3美分的经济可开发量（GW）
19	Angola	安哥拉	5774	0	0	2240	3.78	0	5.57	0	0	0
20	Antigua and Barbuda	安提瓜和巴布达	15	0	0	3238	7.33	0	5.79	0	0	0
21	Armenia	亚美尼亚	171	0	0	1948	3.66	0	4.06	0	0	0
22	Austria	奥地利	1110	0	0	2201	4.83	0	4.06	0	0	0
23	Azerbaijan	阿塞拜疆	614	11	30	2593	3.63	11	3.33	11	9	3
24	Bahrain	巴林	14	2	4	2834	6.30	2	2.78	2	2	1
25	Bangladesh	孟加拉国	1006	1	1	1897	4.23	1	4.20	1	0	0
26	Belarus	白俄罗斯	4395	49	134	2743	6.25	49	3.15	49	49	10
27	Benin	贝宁	679	1	1	1625	4.22	1	5.00	0	0	0
28	Bosnia and Herzegovina	波黑	572	6	14	2348	4.50	4	4.35	3	2	0
29	Brunei	文莱	11	0	0	#DIV/0!	2.75	0	nan	0	0	0
30	Bulgaria	保加利亚	1165	2	3	2027	4.52	2	4.39	1	0	0
31	Burundi	布隆迪	42	0	0	#DIV/0!	2.65	0	nan	0	0	0
32	Cambodia	柬埔寨	1197	0	1	2227	4.04	0	3.59	0	0	0
33	Cameroon	喀麦隆	1395	12	24	1958	3.15	12	4.51	10	2	0
34	Cape Verde	佛得角	94	5	16	3092	6.80	4	5.65	1	0	0
35	Chad	乍得	23146	2902	8666	2987	5.95	2900	4.23	2316	948	155
36	Chile	智利	697	0	0	#DIV/0!	2.85	213	2.87	196	155	104
37	China	中国	140453	5627	14274	2537	5.37	5627	3.42	5399	4498	1411
38	Comoros	科摩罗	12	0	0	#DIV/0!	4.11	0	nan	0	0	0
39	Costa Rica	哥斯达黎加	397	3	9	2809	3.52	3	3.15	3	2	1
40	Croatia	克罗地亚	912	5	13	2403	4.97	4	4.85	2	2	0
41	Cuba	古巴	1674	30	73	2414	5.70	30	3.74	30	22	0
42	Cyprus	塞浦路斯	96	1	1	2041	4.60	1	4.13	1	0	0
43	Czech Republic	捷克	1416	2	4	2380	5.72	2	3.64	2	1	0
44	Djibouti	吉布提	381	40	108	2702	6.00	40	3.24	39	28	15
45	East Timor	东帝汶	64	0	0	1924	3.37	0	6.98	0	0	0
46	Ecuador	厄瓜多尔	20691	214	782	3662	6.29	0	5.08	0	0	0
47	Egypt	埃及	17262	3251	8453	2600	6.07	3250	3.62	2843	2331	751
48	Equatorial Guinea	赤道几内亚	52	0	0	#DIV/0!	2.87	0	nan	0	0	0
49	Estonia	爱沙尼亚	1438	11	34	3009	7.01	11	2.86	11	11	8
50	Ethiopia	埃塞俄比亚	9639	890	2451	2754	4.26	890	4.39	766	168	20

表 2-1 | 139个一带一路国家风能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(TWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
51	Fiji	斐济	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
52	Gabon	加蓬	518	0	0	#DIV/0!	2.86	0	nan	0	0	0
53	Gambia	冈比亚	97	2	3	1835	4.88	2	5.09	1	0	0
54	Georgia	格鲁吉亚	524	1	2	1988	3.76	1	4.52	1	0	0
55	Ghana	加纳	1169	4	6	1740	3.99	4	4.68	2	0	0
56	Greece	希腊	1902	13	34	2683	4.76	13	3.61	12	7	3
57	Guinea	几内亚	1042	0	0	#DIV/0!	3.63	0	nan	0	0	0
58	Guyana	圭亚那	799	1	1	1726	3.57	1	6.39	0	0	0
59	Hungary	匈牙利	1400	5	10	2179	5.24	5	3.93	5	2	0
60	Indonesia	印度尼西亚	4481	10	22	2239	2.66	10	5.59	2	1	0
61	Iran	伊朗	20521	1356	3232	2383	4.86	1356	3.56	1344	926	196
62	Iraq	伊拉克	7645	1357	3492	2574	5.82	1357	3.30	1357	1170	406
63	Italy	意大利	3903	11	26	2330	4.46	11	3.76	11	7	0
64	Jamaica	牙买加	112	1	2	2053	5.00	1	4.29	1	0	0
65	Kazakhstan	哈萨克斯坦	56449	7287	20175	2769	6.08	7287	3.13	7269	6945	2858
66	Kenya	肯尼亚	7662	1005	2695	2681	5.34	1003	4.31	730	306	57
67	Korea	韩国	1686	3	8	2322	5.37	3	3.45	3	2	1
68	Kuwait	科威特	458	61	186	3044	7.00	61	2.65	61	61	57
69	Kyrgyzstan	吉尔吉斯斯坦	1452	11	23	2041	4.05	11	4.41	10	1	0
70	Laos	老挝	1572	2	5	2245	3.86	2	3.58	2	2	0
71	Latvia	拉脱维亚	1766	14	42	2932	6.76	14	2.96	14	14	7
72	Lebanon	黎巴嫩	107	0	0	1874	4.45	0	4.34	0	0	0
73	Lesotho	莱索托	279	2	4	1944	4.65	2	4.81	1	0	0
74	Liberia	利比里亚	271	0	0	#DIV/0!	3.22	0	nan	0	0	0
75	Libya	利比亚	31144	7260	19300	2658	6.28	7260	4.02	5817	3526	1222
76	Lithuania	立陶宛	1572	4	12	2826	6.56	4	3.05	4	4	2
77	Luxembourg	卢森堡	58	0	0	2655	6.26	0	3.20	0	0	0
78	Madagascar	马达加斯加	5714	249	587	2353	4.55	249	5.36	77	11	1
79	Malaysia	马来西亚	582	0	0	1788	2.51	0	5.03	0	0	0
80	Maldives	马尔代夫	0	0	0	#DIV/0!	4.52	0	nan	0	0	0

表 2-1 | 139个一带一路国家风能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(TWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
81	Mali	马里	19225	4274	11372	2661	5.82	4274	4.74	3167	19	0
82	Mauritania	毛里塔尼亚	24268	4849	14278	2944	6.82	4849	4.22	4443	1181	287
83	Moldova	摩尔多瓦	563	5	11	2276	5.67	5	3.81	5	4	0
84	Mongolia	蒙古	25465	2756	6730	2442	5.53	2756	3.57	2657	2056	372
85	Montenegro	黑山	166	1	2	2149	4.67	1	4.10	1	0	0
86	Morocco	摩洛哥	6297	199	563	2828	5.17	199	3.02	198	167	113
87	Mozambique	莫桑比克	6679	294	585	1986	4.61	294	4.75	205	72	1
88	Myanmar	缅甸	2538	1	2	2218	3.25	1	3.59	1	1	0
89	Namibia	纳米比亚	9454	689	1399	2031	5.13	689	4.29	609	170	1
90	Nepal	尼泊尔	563	0	0	#DIV/0!	3.28	0	nan	0	0	0
91	new Zealand	新西兰	8788	127	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
92	Niger	尼日尔	19145	3758	9329	2483	5.91	3757	4.84	2208	432	20
93	Nigeria	尼日利亚	6077	263	501	1907	4.30	263	4.67	211	16	0
94	North Macedonia (formerly Macedonia)	北马其顿（原马其顿）	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
95	Oman	阿曼	4736	1005	2422	2410	5.50	996	4.81	562	181	14
96	Pakistan	巴基斯坦	9204	540	1306	2420	4.50	540	3.84	499	302	68
97	Panama	巴拿马	562	2	6	2213	3.83	2	4.22	2	1	0
98	Papua New Guinea	巴布亚新几内亚	1500	14	36	2490	2.80	14	5.87	3	0	0
99	Peru	秘鲁	2569	63	148	2346	2.65	63	3.76	56	39	4
100	Philippines	菲律宾	2817	8	20	2473	4.19	8	3.38	8	7	1
101	Poland	波兰	7534	6	17	2758	6.46	6	3.13	6	6	2
102	Portugal	葡萄牙	1221	12	26	2216	5.27	12	3.91	11	5	1
103	Qatar	卡塔尔	229	42	112	2681	6.10	42	3.00	42	42	22
104	Romania	罗马尼亚	2564	3	5	2058	4.62	2	4.69	2	0	0
105	Russia	俄罗斯	281629	8643	22168	2565	5.64	5859	4.27	4303	3304	708
106	Rwanda	卢旺达	39	0	0	#DIV/0!	2.65	0	nan	0	0	0
107	Salvador	萨尔瓦多	156	1	1	2248	3.66	1	4.12	1	0	0
108	Saudi Arabia	沙特阿拉伯	27141	6264	14162	2261	5.59	6145	4.06	5146	3462	625
109	Senegal	塞内加尔	2254	258	565	2187	5.29	258	4.05	211	116	33
110	Serbia	塞尔维亚	989	2	5	1986	4.71	2	4.60	2	0	0

表 2-1 | 139个一带一路国家风能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(TWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
111	Seychelles	塞舌尔	8	0	0	#DIV/0!	6.20	0	nan	0	0	0
112	Sierra Leone	塞拉利昂	235	0	0	#DIV/0!	3.18	0	nan	0	0	0
113	Singapore	新加坡	3	0	0	#DIV/0!	3.80	0	nan	0	0	0
114	Slovakia	斯洛伐克	664	1	2	2190	5.11	1	3.98	1	0	0
115	Slovenia	斯洛文尼亚	232	0	0	2200	4.55	0	3.89	0	0	0
116	Solomon Islands	所罗门群岛	236	0	1	2594	4.44	0	6.46	0	0	0
117	Somalia	索马里	18234	2193	6668	3040	6.99	2193	4.12	1838	842	75
118	South Africa	南非	16591	1597	3751	2348	5.34	1597	3.62	1574	1081	219
119	South Sudan	南苏丹	3750	76	152	2003	4.03	76	4.66	59	14	0
120	Sri Lanka	斯里兰卡	1187	6	17	2995	5.64	6	2.72	6	6	4
121	Sudan	苏丹	32760	6355	17456	2747	6.22	6354	3.55	5528	4276	2059
122	Suriname	苏里南	587	1	1	1754	3.78	0	7.11	0	0	0
123	Tajikistan	塔吉克斯坦	1455	5	11	2170	4.49	5	3.78	5	3	0
124	Tanzania	坦桑尼亚	5520	84	189	2258	4.07	84	3.90	74	41	10
125	Thailand	泰国	3563	2	5	2050	4.07	2	3.89	2	1	0
126	Togo	多哥	260	0	0	1609	3.85	0	5.04	0	0	0
127	Trinidad and Tobago	特立尼达和多巴哥	60	0	0	1720	5.72	0	6.04	0	0	0
128	Tunisia	突尼斯	3619	362	997	2757	6.22	362	3.04	362	350	169
129	Turkey	土耳其	7576	62	140	2241	4.60	62	3.71	62	31	9
130	UAE	阿联酋	27141	6264	14162	2261	5.59	6145	4.06	5146	3462	625
131	Uganda	乌干达	757	0	0	#DIV/0!	3.17	0	nan	0	0	0
132	Ukraine	乌克兰	11332	140	357	2550	5.94	139	3.40	138	137	4
133	Uzbekistan	乌兹别克斯坦	8054	1299	3679	2833	5.71	1299	3.24	1289	1168	454
134	Vanuatu	瓦努阿图	257	3	7	2739	6.23	1	6.67	0	0	0
135	Venezuela	委内瑞拉	4165	88	223	2541	3.35	88	3.52	74	41	20
136	Vietnam	越南	3281	7	16	2371	4.41	7	3.40	7	5	2
137	Yemen	也门	5182	642	1507	2348	5.00	624	5.04	319	74	25
138	Zambia	赞比亚	5468	115	226	1963	4.53	113	4.58	89	25	0
139	Zimbabwe	津巴布韦	3167	134	261	1955	4.59	134	4.30	129	28	0
总计			1102823	95070	247238	1929		91872	3.94	78044	49321	14672

注：1.一带一路国家风电利用小时数为年总发电量与总技术可开发量的比值。
2.一带一路国家风电平均开发成本为各国家平均开发成本及其年发电量的加权平均值。

2.3 光伏资源评估结果

报告基于覆盖全球的数据、信息，采用统一标准和参数完成了全球太阳能光伏资源的评估研究。

2.3.1 理论蕴藏量

根据太阳能水平面总辐射量数据测算，全球太阳能光伏资源理论蕴藏量总计208325 PWh/a，基本由地理纬度和陆地面积决定。一带一路国家资源量共计136988 PWh/a，占比66%。

图 2-5 | 各洲太阳能光伏资源理论蕴藏量对比图

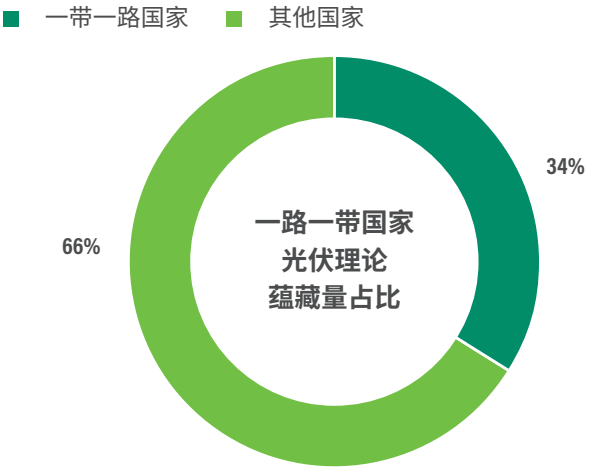
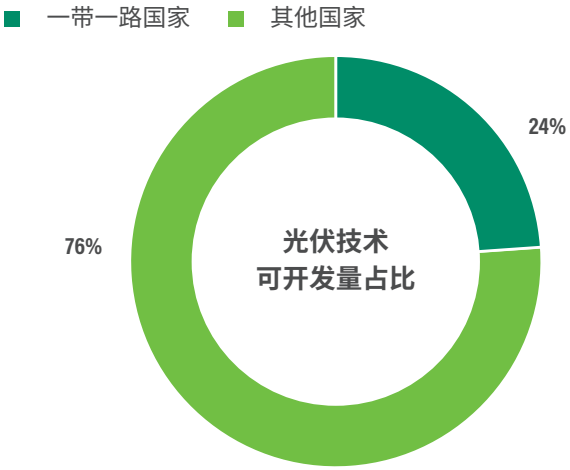


图 2-6 | 各洲适宜集中式开发的光伏发电规模对比图



2.3.2 技术可开发量

综合考虑资源和各类技术限制条件后，经评估测算，全球适宜集中开发的光伏发电规模约2647 TW，年发电量约5002 PWh。一带一路国家资源量共计2007 TW[17]，占比76%。

与风电技术指标相似，采用单位国土面积的年发电量与装机容量的比值，即装机利用小时数（容量因子，Capacity Factor）能够反映区域光伏资源技术开发条件的优劣。

2.3.3 开发成本

按照2035年光伏装备的经济性水平测算，综合考虑交通和电网基础设施条件，报告研究了全球139个一带一路国家和地区的集中式光伏发电的平均开发成本[17]，为2.71美分。

以8美分为标准测算，139个一带一路国家集中式光伏资源的经济可开发规模2005TW，占全球的76%；以5美分为标准测算，经济可开发规模2000TW，占全球的76%；以4美分为标准测算，经济可开发规模1963TW，占全球的78%；以3美分为标准测算，经济可开发规模1246TW，占全球的77%。图2-7给出了一带一路国家经济可开发规模占全球的比重。139个一带一路国家太阳能资源评估结果见下表所列。

图 2-7 | 一带一路国家光伏经济可开发规模占比对比（8美分）

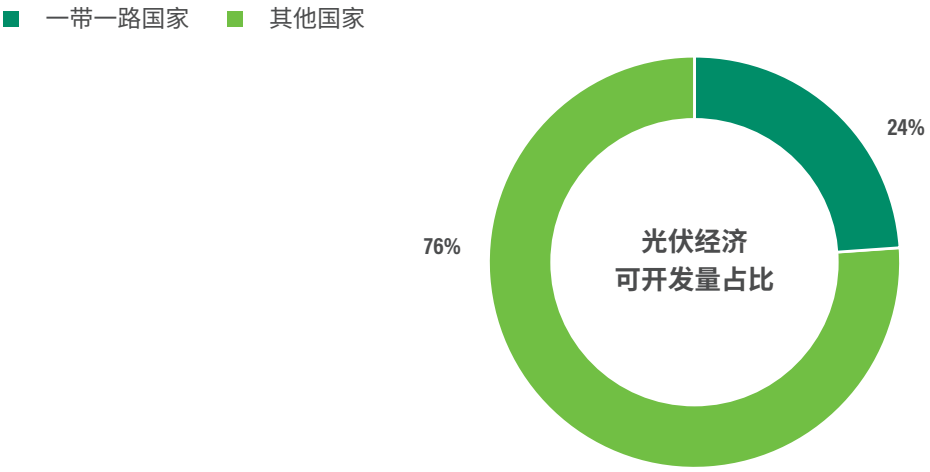


表 2-2 | 139个一带一路国家太阳能资源评估结果

序号	国家	国家	理论蕴藏量(PWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
1	Barbados	巴巴多斯	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
2	Bolivia	玻利维亚	2162	19532	39600	2027	1980	19532	2.40	19532	15406	15141
3	Cook Island	库克群岛	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
4	Cote d'Ivoire	科特迪瓦	594	10730	18451	1720	1838	10730	2.36	10730	10730	10729
5	Dominica	多米尼加	96	338	604	1784	1981	338	2.20	338	338	338
6	Dominica	多米尼克	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
7	Federated States of Micronesia	密克罗尼西亚联邦	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
8	Grenada	格林纳达	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
9	Kiribati	基里巴斯	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
10	Malta	马耳他	1	0	0	1705	1830	0	2.27	0	0	0
11	Niue	纽埃	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
12	Republic of Congo	刚果布	612	4044	6446	1594	1766	4044	2.68	4044	3947	3469
13	Samoa	萨摩亚	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
14	Tonga	汤加	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
15	Uruguay	乌拉圭	312	4989	8241	1652	1748	4989	2.45	4989	4989	4986
16	Afghanistan	阿富汗	1280	23646	45996	1945	1985	23644	2.16	23636	23622	23523
17	Albania	阿尔巴尼亚	44	107	157	1468	1523	107	2.73	107	107	99
18	Algeria	阿尔及利亚	5015	144122	283647	1968	2154	144121	2.96	144120	143169	66132

表 2-2 | 139个一带一路国家太阳能资源评估结果

序号	国家	国家	理论蕴藏量(PWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
19	Angola	安哥拉	2625	54993	104448	1899	2093	54993	2.71	54992	54387	37289
20	Antigua and Barbuda	安提瓜和巴布达	1	3	6	1867	2120	3	4.93	3	0	0
21	Armenia	亚美尼亚	45	286	448	1563	1530	286	2.58	286	286	275
22	Austria	奥地利	97	117	139	1187	1162	117	3.33	117	116	0
23	Azerbaijan	阿塞拜疆	126	906	1314	1450	1475	906	2.86	905	904	655
24	Bahrain	巴林	1	24	44	1877	2095	24	1.97	24	24	24
25	Bangladesh	孟加拉国	232	215	353	1644	1677	215	2.35	215	215	214
26	Belarus	白俄罗斯	222	37	40	1084	1071	37	4.00	36	21	0
27	Benin	贝宁	227	1914	3471	1814	1940	1914	2.35	1914	1914	1851
28	Bosnia and Herzegovina	波黑	68	104	142	1359	1328	69	3.28	62	62	44
29	Brunei	文莱	10	4	6	1569	1763	4	2.39	4	4	4
30	Bulgaria	保加利亚	156	77	107	1381	1407	76	2.89	76	76	64
31	Burundi	布隆迪	52	464	803	1731	1887	464	2.24	464	464	464
32	Cambodia	柬埔寨	341	331	549	1657	1864	331	2.26	331	331	331
33	Cameroon	喀麦隆	901	12428	22923	1844	1927	12428	2.88	12428	12346	7172
34	Cape Verde	佛得角	9	115	156	1351	2155	82	5.42	28	0	0
35	Chad	乍得	2918	86255	172462	1999	2284	86255	3.37	86255	86213	7938
36	Chile	智利	1354	17766	39832	2242	1729	17698	1.83	17483	17387	16969
37	China	中国	14259	117201	193460	1651	1501	117178	2.63	116836	113653	94372
38	Comoros	科摩罗	3	2	4	1693	1885	2	3.98	2	1	0
39	Costa Rica	哥斯达黎加	92	271	466	1722	1782	271	2.28	271	271	270
40	Croatia	克罗地亚	76	71	98	1376	1355	48	3.31	44	44	23
41	Cuba	古巴	217	636	1133	1783	1976	636	2.25	636	635	633
42	Cyprus	塞浦路斯	17	51	90	1777	1901	51	2.16	51	51	51
43	Czech Republic	捷克	88	5	6	1115	1116	5	3.82	5	4	0
44	Djibouti	吉布提	48	1432	2728	1906	2206	1432	2.19	1432	1432	1431
45	East Timor	东帝汶	29	214	370	1732	1939	214	3.33	214	133	96
46	Ecuador	厄瓜多尔	388	755	1101	1458	1557	755	2.70	755	755	641
47	Egypt	埃及	2289	55219	112702	2041	2282	55219	2.29	55219	55216	46509
48	Equatorial Guinea	赤道几内亚	45	11	17	1507	1670	11	2.52	11	11	11

表 2-2 | 139个一带一路国家太阳能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(PWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
49	Estonia	爱沙尼亚	45	0	0	#DIV/0!	992	0	nan	0	0	0
50	Ethiopia	埃塞俄比亚	2415	38636	73378	1899	2130	38636	2.81	38636	38178	22745
51	Fiji	斐济	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
52	Gabon	加蓬	433	725	1100	1517	1649	725	2.93	725	693	489
53	Gambia	冈比亚	23	420	790	1881	2094	420	3.08	420	420	184
54	Georgia	格鲁吉亚	94	340	467	1372	1346	340	2.99	340	339	166
55	Ghana	加纳	447	8320	14482	1741	1856	8320	2.36	8320	8282	8172
56	Greece	希腊	211	549	865	1576	1616	549	2.74	548	522	479
57	Guinea	几内亚	501	10292	18980	1844	2030	10292	3.05	10292	10284	4878
58	Guyana	圭亚那	404	970	1676	1727	1906	970	2.62	970	868	865
59	Hungary	匈牙利	119	24	30	1266	1277	24	3.26	24	24	1
60	Indonesia	印度尼西亚	3196	4138	6478	1565	1690	4138	3.32	3805	2749	2376
61	Iran	伊朗	3266	61383	117913	1921	2002	61382	2.07	61378	61372	61309
62	Iraq	伊拉克	873	18184	33737	1855	1992	18184	2.22	18184	18184	18182
63	Italy	意大利	444	505	731	1447	1474	482	2.89	461	457	348
64	Jamaica	牙买加	21	64	110	1714	1911	64	2.25	64	64	64
65	Kazakhstan	哈萨克斯坦	3771	43162	61884	1434	1385	43130	3.33	41398	36005	16495
66	Kenya	肯尼亚	1231	24555	44914	1829	2101	24555	3.16	24555	23815	9970
67	Korea	韩国	140	126	189	1494	1440	126	2.50	126	126	126
68	Kuwait	科威特	35	823	1526	1855	2069	823	2.07	823	823	823
69	Kyrgyzstan	吉尔吉斯斯坦	294	3089	4767	1543	1480	3088	2.66	3083	3068	2786
70	Laos	老挝	380	908	1397	1538	1642	908	2.43	908	908	906
71	Latvia	拉脱维亚	65	0	0	#DIV/0!	1011	0	nan	0	0	0
72	Lebanon	黎巴嫩	20	221	411	1862	1946	221	2.00	221	221	221
73	Lesotho	莱索托	62	693	1347	1943	2013	693	2.15	693	693	692
74	Liberia	利比里亚	171	237	387	1629	1775	237	3.37	237	169	115
75	Libya	利比亚	3635	113869	230342	2023	2235	113869	2.81	113869	113866	55297
76	Lithuania	立陶宛	67	0	0	#DIV/0!	1030	0	nan	0	0	0
77	Luxembourg	卢森堡	3	0	0	1076	1095	0	3.73	0	0	0
78	Madagascar	马达加斯加	1220	21393	40681	1902	2047	21393	3.60	21389	19799	0

表 2-2 | 139个一带一路国家太阳能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(PWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
79	Malaysia	马来西亚	567	352	540	1533	1715	352	2.53	352	351	341
80	Maldives	马尔代夫	0	0	0	#DIV/0!	2069	0	nan	0	0	0
81	Mali	马里	2766	93541	180542	1930	2197	93541	3.33	93541	93289	19813
82	Mauritania	毛里塔尼亚	2303	85705	166666	1945	2203	85705	3.46	85705	84190	9367
83	Moldova	摩尔多瓦	43	39	49	1262	1290	39	3.21	39	38	2
84	Mongolia	蒙古	2452	27235	46674	1714	1565	27212	2.65	27062	26288	23008
85	Montenegro	黑山	19	41	56	1363	1401	41	2.92	41	41	30
86	Morocco	摩洛哥	824	6281	11988	1909	2021	6280	2.11	6280	6279	6274
87	Mozambique	莫桑比克	1549	16624	29882	1798	1958	16624	2.62	16623	16466	13464
88	Myanmar	缅甸	1151	2267	3798	1675	1716	2267	2.34	2266	2264	2235
89	Namibia	纳米比亚	1932	28216	59384	2105	2331	28215	2.08	28215	28212	26487
90	Nepal	尼泊尔	243	341	571	1672	1638	341	2.52	340	339	318
91	new Zealand	新西兰	346	1987	2661	1339	1283	1984	2.96	1982	1965	1239
92	Niger	尼日尔	2719	79038	157475	1992	2288	79038	3.19	79038	79036	18043
93	Nigeria	尼日利亚	1810	25281	46261	1830	1981	25281	2.22	25281	25280	24953
94	North Macedonia (formerly Macedonia)	北马其顿（原马其顿）	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan
95	Oman	阿曼	711	24267	48817	2012	2291	24267	2.83	24265	24254	11474
96	Pakistan	巴基斯坦	1706	24812	47596	1918	1932	24812	2.30	24810	24803	23167
97	Panama	巴拿马	129	614	1006	1637	1733	614	2.48	614	614	574
98	Papua New Guinea	巴布亚新几内亚	758	2205	3323	1507	1631	2204	4.59	1980	21	0
99	Peru	秘鲁	2436	14952	29595	1979	1878	14952	2.04	14929	14782	14558
100	Philippines	菲律宾	507	962	1494	1553	1724	962	2.46	962	954	948
101	Poland	波兰	337	6	7	1088	1082	6	4.08	6	3	0
102	Portugal	葡萄牙	148	232	367	1581	1670	232	2.54	232	232	229
103	Qatar	卡塔尔	25	637	1203	1891	2156	637	2.01	636	636	634
104	Romania	罗马尼亚	308	94	116	1244	1297	84	3.39	83	80	4
105	Russia	俄罗斯	18297	13537	17297	1278	1065	11807	3.71	10447	8721	2092
106	Rwanda	卢旺达	47	119	203	1704	1843	119	2.32	119	119	119

表 2-2 | 139个一带一路国家太阳能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(PWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
107	Salvador	萨尔瓦多	45	475	911	1917	2153	475	2.04	475	475	475
108	Saudi Arabia	沙特阿拉伯	4399	129748	260074	2004	2267	129748	2.30	129747	125733	112274
109	Senegal	塞内加尔	417	7803	14712	1885	2113	7803	2.50	7803	7803	6384
110	Serbia	塞尔维亚	119	70	93	1322	1342	65	3.13	64	64	21
111	Seychelles	塞舌尔	1	0	0	#DIV/0!	2048	0	nan	0	0	0
112	Sierra Leone	塞拉利昂	136	1934	3384	1749	1866	1934	2.65	1934	1804	1647
113	Singapore	新加坡	1	0	1	1456	1642	0	2.51	0	0	0
114	Slovakia	斯洛伐克	58	7	8	1179	1179	7	3.64	7	6	0
115	Slovenia	斯洛文尼亚	26	2	2	1232	1252	2	3.23	2	2	0
116	Solomon Islands	所罗门群岛	44	37	54	1468	1614	34	6.59	1	0	0
117	Somalia	索马里	1405	42271	80974	1916	2195	42271	3.54	42263	40582	1165
118	South Africa	南非	2505	36251	71324	1967	2044	36251	2.06	36251	36250	36242
119	South Sudan	南苏丹	1315	33806	61353	1815	2067	33806	3.14	33806	32857	15510
120	Sri Lanka	斯里兰卡	128	165	288	1746	1925	165	2.19	164	164	164
121	Sudan	苏丹	4299	139323	280054	2010	2304	139323	2.35	139323	139321	112780
122	Suriname	苏里南	287	46	79	1725	1967	46	4.02	46	20	0
123	Tajikistan	塔吉克斯坦	229	2087	3501	1677	1613	2087	2.42	2086	2084	2057
124	Tanzania	坦桑尼亚	1949	13267	24522	1848	2057	13267	2.55	13267	13215	10487
125	Thailand	泰国	931	920	1521	1654	1806	920	2.27	920	920	920
126	Togo	多哥	109	1328	2345	1766	1901	1328	2.32	1328	1328	1328
127	Trinidad and Tobago	特立尼达和多巴哥	10	1	2	1702	1977	1	2.91	1	1	1
128	Tunisia	突尼斯	301	5014	9308	1856	1928	5014	2.16	5014	5014	5014
129	Turkey	土耳其	1305	9655	16062	1664	1673	9654	2.32	9652	9647	9565
130	UAE	阿联酋	4399	129748	260074	2004	2267	129748	2.30	129747	125733	112274
131	Uganda	乌干达	500	4475	8194	1831	2050	4475	2.22	4475	4475	4460
132	Ukraine	乌克兰	731	691	837	1211	1223	668	3.49	660	595	44
133	Uzbekistan	乌兹别克斯坦	748	11554	18467	1598	1640	11551	2.91	11001	10838	8150
134	Vanuatu	瓦努阿图	20	75	107	1432	1590	54	7.09	0	0	0

表 2-2 | 139个一带一路国家太阳能资源评估结果（续）

序号	国家	国家	理论蕴藏量(PWh/a)	集中式开发规模(GW)	年发电量(TWh/a)	可利用小时数(h)	平均风速m/s	低于8美分的经济可开发量(GW)	平均开发成本（美分/kWh）	低于5美分的经济可开发量(GW)	低于4美分的经济可开发量(GW)	低于3美分的经济可开发量(GW)
135	Venezuela	委内瑞拉	1790	14016	24614	1756	1954	14016	2.42	13980	13593	13563
136	Vietnam	越南	507	998	1387	1389	1548	998	2.71	998	998	761
137	Yemen	也门	1057	34050	70601	2073	2358	34050	2.59	34049	34044	19704
138	Zambia	赞比亚	1622	15526	30152	1942	2144	15526	2.34	15526	15526	13434
139	Zimbabwe	津巴布韦	825	9055	17465	1929	2104	9055	2.08	9055	9055	9054
总计			136988	2006824	3841176	1929		2004757	2.71	1999558	1962596	1246287

注：1.一带一路国家光伏利用小时数为年总发电量与总技术可开发量的比值。
2.一带一路国家光伏平均开发成本为各国家平均开发成本及其年发电量的加权平均值。

第 3 章 重点国家的可再生能源发展潜力

3.1 印度尼西亚

3.1.1 资源条件

印度尼西亚是东南亚国家，疆域横跨亚洲和大洋洲，国土总面积为191万平方公里，海拔高度为-61~4728.5米，最大地形坡度80.7度。

风能方面，印度尼西亚风能资源较差，距地面100米高度全年风速范围为1.2米/秒~6.7米/秒，平均风速为2.7米/秒，区域主导风向为SE。全国大部分地区风速低于3米/秒，爪哇岛、新几内亚岛（伊里安岛）、苏拉威西岛等地南部沿海风速相对较高。

太阳能方面，印度尼西亚太阳能资源较好，全国太阳能年总水平辐射量（GHI）范围为1104~2299千瓦时/平方米，区域平均年总水平辐射约1690千瓦时/平方米。印度尼西亚太阳能资源较好的区域主要分布在南部的爪哇岛、巴厘岛等地区，苏门答腊岛、加里曼丹岛和新几内亚岛中部山地地区太阳能资源相对较差。

3.1.2 开发条件

印度尼西亚国土总面积191万平方公里，其中河流、湖泊等水体面积2.6万平方公里，陆地面积185万平方公里。陆地表面覆盖地物类型的差异将影响风能、太阳能资源的规模化开发。

印度尼西亚森林面积147.4万平方公里，占总面积的77.0%；耕地农田25.8万平方公里，占总面积的13.5%；草本植被覆盖面积7.1万平方公里，占3.7%；沼泽湿地面积3.1万平方公里，占1.6%；城市等人工建筑面积1.6万平方公里。

印度尼西亚境内设有不同类型的保护区，总面积23.0万平方公里，保护区内部一般不能进行能源资源开发。具体而言，自然生态系统类保护区11.8万平方公里，野生生物类保护区6.0万平方公里，自然资源类保护区4.3万平方公里。

表 3-1 | 国土覆盖物类型分析结果

国土总面积 (km^2)	河流面积 (km^2)	陆地面积 (km^2)								
		总计	森林	灌丛	草本植被	耕地农田	湿地沼泽	裸露地表	城市	冰雪
1913579	26379.25	1849980	1474241	0	71067.76	257765.8	30562.81	306.1426	16036.23	0

表 3-2 | 保护区面积测算结果

保护区总面积 (km^2)	自然生态系统 (km^2)	野生生物 (km^2)	自然遗迹 (km^2)	自然资源 (km^2)	其他 (km^2)
229631.9	118114.6	60240.78	4985.387	43247.47	3043.57

印度尼西亚人口稠密，总人口2.62亿，爪哇岛、苏门答腊岛、苏拉威西岛南部沿海等地人口密度超过35000人/平方公里，加里曼丹岛和新几内亚岛人口密度相对较低。

印度尼西亚地震发生频率较高，历史地震发生频率高的地区主要集中于苏门答腊岛、爪哇岛、苏拉威西岛等地。印度尼西亚岩层分布以中间火山岩、混合沉积岩、硅碎屑沉积岩和松散沉积岩为主。

3.1.3 开发潜力

风能方面，可用于风电集中式开发的陆地面积2307平方公里，占国土总面积的0.12%。经评估测算，印度尼西亚全国技术可开发总装机容量1003.6万千瓦，年发电量224.7亿千瓦时，平均利用小时数2239。印度尼西亚风能的技术可开发装机容量主要分布在印尼东部的帝汶岛和新几内亚岛。截止2019年，统计数据表明印度尼西亚风电总装机为7.6万千瓦。

太阳能方面，可用于光伏开发的陆地面积4.95万平方公里，占国土总面积的2.6%。经评估测算，印度尼西亚全国技术可开发光伏总装机容量41.4亿千瓦，年发电量64778亿千瓦时，发电利用小时数1565。印度尼西亚光伏技术可开发装机容量主要分布在苏门答腊岛东南部、爪哇岛中部、加里曼丹岛南部，以及东部的松巴岛和新几内亚岛西南部等区域。截止2019年，统计数据表明印度尼西亚太阳能总装机为19.8万千瓦。

3.2 埃塞俄比亚

3.2.1 资源条件

埃塞俄比亚地处非洲东北部，国土总面积约110万平方公里，海拔高度为-128~4472米，最大地形坡度59.7度。

风能资源方面，埃塞俄比亚风能资源较好，距地面100米高度全年风速范围为1.4米/秒~8.6米/秒，全国平均风速4.3米/秒，主导风向为E。全年风速大于6米/秒的区域主要分布在东部及东南部地区，西部及西南部大部分地区年平均风速均低于3米/秒，资源相对较差。

太阳能方面，埃塞俄比亚太阳能资源较好，全国太阳能年总水平辐射量（GHI）范围为1510~2470千瓦时/平方米，区域平均年总水平辐射约2130千瓦时/平方米。埃塞俄比亚太阳能资源较好的区域主要分布在北部及东部地区，西南部地区资源相对较差，总体呈现从东到西、从北到南逐渐减少的趋势。

3.2.2 开发条件

埃塞俄比亚国土总面积110万平方公里，其中河流、湖泊等水体面积0.8万平方公里，陆地面积109万平方公里。陆地表面覆盖地物类型的差异将影响风能、太阳能资源的规模化开发。

埃塞俄比亚地表草本植被覆盖面积57万平方公里，占总陆地面积52%；耕地农田21万平方公里，占19%；森林面积14万平方公里，占12%；灌丛面积14万平方公里，占12%；湿地沼泽0.3万平方公里，裸露地表3万平方公里，城市等人工建筑区面积1513平方公里。

埃塞俄比亚境内设有不同类型的保护区，保护区总面积为23万平方公里，保护区内部一般不能进行能源资源开

表 3-3 | 国土覆盖物类型分析结果

国土总面积 (km^2)	河流面积 (km^2)	陆地面积 (km^2)								
		总计	森林	灌丛	草本植被	耕地农田	湿地沼泽	裸露地表	城市	冰雪
1103600	7800	1095799	136002	137673	574635	212856	2628	30494	1513	0

表 3-4 | 保护区面积测算结果

保护区总面积 (km^2)	自然生态系统 (km^2)	野生生物 (km^2)	自然遗迹 (km^2)	自然资源 (km^2)	其他 (km^2)
226681.7	57001.6	166373.8	116.0	3190.3	0

发。具体而言，野生生物类保护区17万平方公里，自然生态系统类保护区6万平方公里，自然资源类保护区3200平方公里。

埃塞俄比亚人口9940万人，人口密度超过35000人/平方公里的人口密集地区主要集中在中部及北部城市地区，东部及南部人口密度较低，规模化开发风电、光伏一般应远离人口密集地区。

埃塞俄比亚地震发生频繁，历史地震发生频率高的地区主要集中于中部山区，东部平原地区的地震频率较低，风电开发应规避主要地层断裂带、地震带及地震高发区域。埃塞俄比亚岩层分布以基性深成岩和碳酸盐沉积岩为主。

3.2.3 开发潜力

风能方面，可用于风电开发的陆地面积21.2万平方公里，占国土总面积的19.2%。经评估测算，埃塞俄比亚全国技术可开发总装机容量8.9亿千瓦，年发电量2.5万亿千瓦时，平均利用小时数2754。截止2019年，统计数据表明埃塞俄比亚风电总装机为32万千瓦。

太阳能方面，可用于光伏开发的陆地面积43万平方公里，占国土总面积的39.0%。经评估测算，埃塞俄比亚全国技术可开发光伏总装机容量386.4亿千瓦，年发电量73.4万亿千瓦时，发电利用小时数1899。截止2019年，统计数据表明埃塞俄比亚太阳能总装机为1万千瓦。

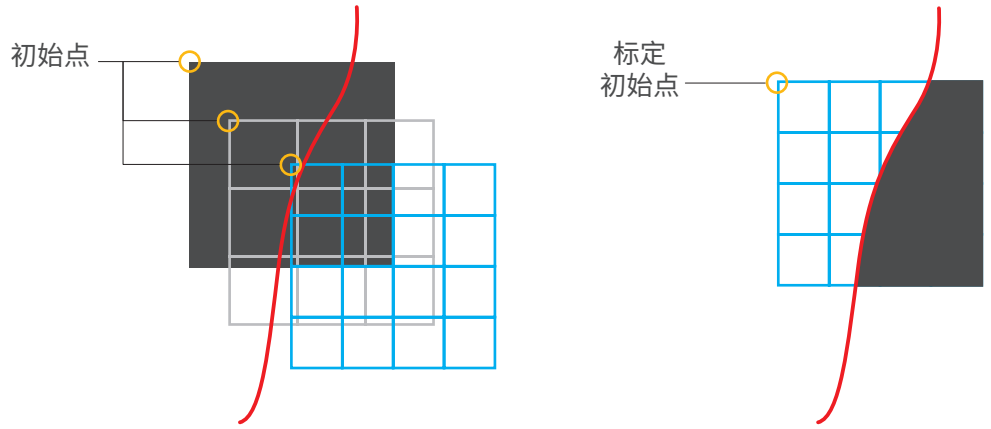
附录 地理信息运算关键算法

在各类基础数据间开展的与地表面积、坡度等有关的地理信息运算是全球清洁能源资源评估系统的基础性算法。由于基础数据的空间分辨率不同、格式不同，必须解决数据多分辨率融合以及不同类型数据混合计算两大关键问题。

(1) 多分辨率融合计算

栅格数据间分辨率的差异将对所选区域的界定产生偏差，进而影响计算准确性。研究采用归一法进行多分辨率融合，其示意图如附图1-1所示，归一化后蓝色、灰色与黑色栅格的分辨率保持一致且初始点重合。

附图 1-1 | 分辨率调整示意图



多分辨率原始数据 **归一化多分辨率融合后实际选择区域**

主要计算步骤：一是**选定最佳分辨率，标定初始点**。综合考虑评估需求和基础数据信息，研究采用500m作为地理信息计算的最佳分辨率，统一全球坐标系统。计算时将不同分辨率数据重采样预处理为500m分辨率并统一采用WGS84坐标系统，对齐初始点坐标。二是**分辨率归一化**。根据原始数据分辨率的高低采取适宜多分辨率归一化的不同算法。以500m分辨率为基准，分辨率低于500m分辨率的原始数据，研究采用双线性插值法将低分辨率数据向高分辨率转化；分辨率高于500m分辨率的原始数据，采用加权平均法将高分辨率数据转化为低分辨率数据。资源类数据、全球历史地震频度分布、全球人口分布等应实现高分辨率转化，全球地面覆盖物分类信息、全球地理高程数据等分辨率较高，应采用加权平均法进行低分辨率转化。详细算法如下。

1）双线性插值法

总体思路为：用已知的四个端点将未知函数坐标包含在内部，对已知函数的值在x轴、y轴分别线性插值，获得未知函数在该坐标上的值，其数学表达为：

假设四端点Q_{11}、Q_{12}、Q_{21}和Q_{22}的坐标分别为(x_1, y_1)、(x_1, y_2)、(x_2, y_1)、(x_2, y_2)，已知未知函数f在四点的值，求未知函数f在点P的值，P点坐标为(x，y)。首先在x轴方向进行线性插值，得到R_1和R_2，然后在y轴方向进行线性插值，得到P点的值即结果f(x，y)。计算公式如附式1所示：

$$f(P) \approx \frac{y-y_1}{y_2-y_1} f(R_1) + \frac{y-y_1}{y_2-y_1} f(R_2)$$ 附式1

该算法的优点是准确度较高，可用于低分辨率向高分辨率进行降尺度计算，能够体现不同小栅格栅格之间数据差异，反映资源状况。

2）加权平均法

总体思路为：根据高分辨率下每个小栅格与周边栅格所在位置的距离和资源状况对该栅格进行加权平均，转化为500米分辨率低分辨率大栅格的数值，其数学表达为：

分辨率转换需对x_1、x_2……x_n等高分辨率已知栅格格点赋予f_1、f_2……f_n等权重值，权重通过栅格周围资源分布数据所确定，随后采用加权平均法计算位置函数f值，公式如附式2所示。该方法优点是能够在一定程度内反映该栅格周边所有栅格对该栅格影响程度求得该栅格的近似值，反映不同栅格之间的差距。

$$f = \frac{x_1f_1 + x_2f_2 + \cdots\cdots + x_nf_n}{n}$$ 附式2

分辨率调整示意图如下图所示，左图为原始数据集叠加，右图为归一化后选择范围。可见，归一化后蓝色和灰色栅格与黑色栅格的分辨率一致且初始点重合。

(2) 矢量和栅格数据的混合运算

混合运算可按照矢量数据的性质分为两类。

第一类是矢量数据为固定矢量元，如全球保护区分布、全球水库分布、全球岩层分布等基础数据，可通过矢量数据栅格化进行混合运算，主要包含：确定栅格矩阵、点栅格化、线栅格化和面栅格化等4个步骤。具体的，选定500米作为栅格单元分辨率；采用线性插值法实现点栅格化，即将点坐标（x，y）换算为栅格的行列号，如附式3所示；

$$J = 1 + int\left(\frac{x-x_0}{dx}\right) \qquad I = 1 + int\left(\frac{y_0-y}{dx}\right)$$ 附式3

式中，$x0$与$y0$代表栅格的原点坐标，dx与dy分别代表栅格的长度和宽度，I为行数，J为列数，Int为取整函数。

对于线栅格化，可采用Bresenham法（八方向栅格法），其数学表达为：已知一条线段有两个端点：$P1(x1，y1)$、$P2(x2，y2)$，先分别确定其行列号$(I1，J1)$及$(I2，J2)$，然后求出这两个端点位置的行数差和列数差。

若行数差大于列数差，则逐行求出yi行中心线Y与过这两个端点的直线的交点（X，Y），得到交点的行列号，如附式4和附式5所示。若行数差小于或等于列数差，则逐列求出xi列中心线X与过这两个端点的直线的交点（X，Y），得到交点行列号，如附式6和附式7所示：

$$X = (y_i - y_1)k + x_1$$ 附式4

$$k = (x_2 - x_1) / (y_2 - y_1) \quad \text{附式5}$$

$$Y = (x_j - x_1)k + y_1 \quad \text{附式6}$$

$$k' = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) \quad \text{附式7}$$

面的栅格化又称为多边形填充，报告采用边界代数法进行矢量面栅格化。边界代数法为基于积分思想的矢量数据向栅格数据格式转换算法，适合于记录拓扑关系的多边形矢量数据转换为栅格数据，计算方法如下。

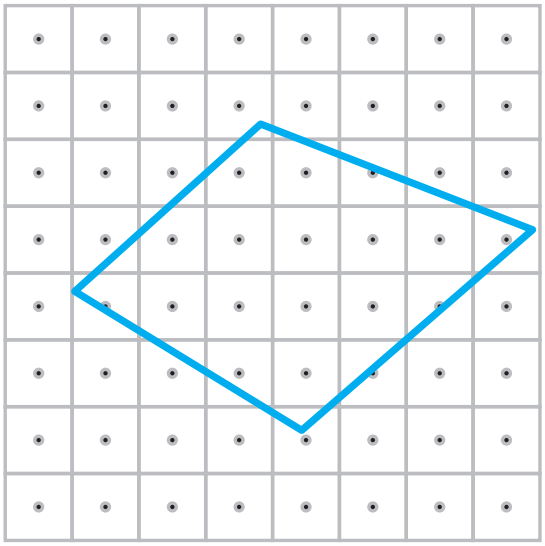
对于单多边形，栅格阵列各栅格值初始化为0，以栅格的行列为参考坐标，由多边形的某点开始顺时针搜索边界线，边界上行时，边界左侧的行坐标的栅格被减去a，边界下行时，边界左侧的行坐标的栅格加上a。

对于多多边形，当多边形弧段上行时，该弧段与左图框之间栅格增加一个值，即左多边形编号减去右多边形编号；当边界弧段下行时，该弧段与左图框之间栅格减少一个值；重复上述步骤，直至所有多边形处理完。该方法串行算法的复杂程度不高，结构清晰，运算效率高，调用关系明确，算法并行技术上可行，可大幅度减少计算时间，适用于处理较大数据量的矢量数据栅格化。

第二类是矢量数据将不断改变，在进行目标区域划定或选择的过程中，区域范围的矢量数据会发生变化，矢量数据与栅格像元切割将产生不规则邻域，选择范围示意图如附图1-2所示。

一般可以采用0-1排除法、全面积法、中心点排除法进行计算。0-1排除法的计算原则为：被矢量数据切割部分的栅格数据全部排除（1排除法），或者全部包含（0排除法）；全面积法则是将通过矢量坐标以及栅格位置计算出范围包含部分的实际面积；中心点排除法即确定栅格数据中心点坐标，判断选择范围矢量是否包含栅格中心点坐标，若包含中心点，则该点被选中，反之则该点未被选中，选择范围面积为所有选中面积之和。

附图 1-2 | 选择范围示意图



对比来看，0-1排除法涉及栅格矩形与矢量图形的几何图形计算，计算时间长，选择范围面积越小误差越大；全面积法耗时长，空间存储量大；中心点排除法即判断选择范围矢量是否包含栅格中心点坐标，若包含则该点被选中，反之则该点未被选中，该方法计算量小且误差小。本报告采用中心点排除法。

注释

1. 数据来源：WRF 模型的相关介绍 http://wrf-model.org/。
2. 数据来源：Vortex ERA5 Downscaling:Validation Results, 2017 November。
3. 数据来源：Climate Forecast System (CFSR) 再分析数据的介绍为：https://www.ncdc.noaa.gov/ data-access/model-data/modeldatasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2 。Modern Era Retrospective Reanalysis version 2 (MERRA-2) 再分析数据的介绍为：https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/。European Reanalysis (ERA-Interim & ERA5) 再分析数据的介绍为：http:// www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim。
4. 数据来源：Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)是基于NASA和NGA牵头的国际空间项目，通过特殊雷达系统于2000年在奋进号航天飞机上执行为期11天的飞行任务，获得了近全球范围内的高程数据，从而生成地球最完整的高分辨率数字地形数据库。http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm。
5. 数据来源：GlobCover Land Cover1数据采用2592块瓦片数据覆盖整个地球，其水平瓦片为72块、垂直瓦块为36块。http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php。
6. 数据来源：Vortex ERA5 downscaling:validation results, 2017 November。
7. 数据来源：Vortex System Technical Description, 2017 January。
8. 卫星数据信息：欧洲、非洲和中东为Meteosat PRIME satellite (© EUMETSAT, Germany) 1994 - 2010, 15分钟或30分钟分辨率；亚洲为Meteosat IODC satellite (© EUMETSAT, Germany) 1999 - 2011, 30分钟分辨率；环太平洋地区为MTSAT satellite (© JMA, Japan) 2007 - 2012, 30分钟分辨率；美洲为GOES satellite (© NOAA, USA) 1999 - 2012, 30分钟或3小时分辨率。
9. 气象模式再分析数据信息：CFSR和GFS数据库的2m高度处气温数据(© NOAA NCEP)；CFSR和GFS数据库的水汽数据(© NOAA NCEP)；MACC数据库的大气光学厚度数据(© ECMWF)；GFS和CFSR的积雪厚度数据(© NOAA)。
10. 海拔数据信息：SRTM-3数字地形数据库，分辨率为90米×90米。
11. 资料来源：Vortex ERA5 downscaling:validation results, 2017 November.
    Vortex System Technical Description, 2017 January.
12. 资料来源：Solargis Solar Resource Database Description and Accuracy, 2016 October.
13. 数据来源：中华人民共和国环境保护部GB/T 14529-1993 自然保护区类型与级别划分原则[S].北京：中国标准出版社，1993。
14. 结合美国国家可再生能源实验室（NREL）和中国风电工程经验，以年平均风功率密度300瓦/平方米为标准开发条件进行测算。
15. 全球风能资源评估结果不包含南极地区。
16. 全球集中式风电的平均开发成本为全球各国家与地区的平均开发成本及其年发电量的加权平均值。
17. 风能技术可开发量评估是基于GREAN平台开展的距地面100米高度、适宜集中式开发的风能资源评估。

致谢

特别感谢世界资源研究所（美国）北京代表处支持本报告的编写与出版，感谢苗红、王珮珊、宋婧、袁敏、都志杰为本报告描写所给予的不懈支持以及宝贵意见和建议。

世界资源研究所介绍

世界资源研究所成立于1982年，总部位于美国华盛顿，是一家独立的全球性智库和行库。近40年来，研究所一直通过开拓性的研究方式和工具、庞大多元的数据平台和敏锐客观的分析观点为科学决策提供参考和支持，并产生实际影响。

世界资源研究所在12个国家和地区拥有办公室，汇聚1400多名专家和工作人员，工作范围辐射50多个国家。2008年，世界资源研究所在中国北京开设了首个国际办公室。

可持续投资项目介绍

世界资源研究所可持续投资项目立足中国，放眼国际，与可再生能源和绿色金融领域的中外权威智库及研究机构合作，提供绿色金融解决方案，支持对外投资领域从传统能源（尤其是化石能源）向可再生能源转变，助力中国实现能源转型与高质量发展，推动全球可持续发展与低碳目标。

世界资源研究所（美国）北京代表处

地址：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
传真：86 10 6416 7567

WRI.ORG.CN



Photo by Claudia Fernández Ortiz on Unsplash

Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

全球能源互联网发展合作组织联络方式

邮箱：geidco-info@geidco.org
电话：010-66598554（周一至周五 8:30-17:30）

全球能源互联网发展合作组织驻外机构

非洲办公室
邮箱：Africa@geidco.org

欧洲办公室
邮箱：Europe@geidco.org

东北亚-南非办公室
邮箱：SEASA@geidco.org

中南美办公室
邮箱：CSA@geidco.org

西亚-北非办公室
邮箱：MENA@geidco.org

东欧-中亚办公室
邮箱：EECA@geidco.org

北美办公室
邮箱：NorthAmerica@geidco.org

全球能源互联网发展合作组织官方新媒体

官方微信　官方微博　官方抖音