

引用格式:毛爱涵,李发祥,杨思源,等.青海省清洁能源发电潜力及价值分析[J].资源科学,2021,43(1):104-121.[Mao A H, Li F X, Yang S Y, et al. Clean energy power generation potential and value in Qinghai Province[J], 2021, 43(1): 104-121.] DOI: 10.18402/resci.2021.01.09

青海省清洁能源发电潜力及价值分析

毛爱涵¹,李发祥²,杨思源²,黄婷¹,郝蕊芳³,李思涵¹,于德永¹

(1. 北京师范大学地理科学学部,地表过程与资源生态国家重点实验室人与环境可持续性研究中心,北京 100875;2. 三江源国家公园管理局,西宁 810001;
3. 北京林业大学水土保持学院,北京 100083)

摘要:随着科技进步,清洁能源的开发利用成为缓解资源短缺、改善生态环境的重要途径,对清洁能源潜力进行量化评估,有助于有关部门制定合理的开发利用决策。本文基于模型模拟和空间分析等方法,对青海省水电势能、太阳能、风能、生物质能、地热能5种主要清洁能源的发电潜力及价值进行评估,得到了青海省主要清洁能源发电潜力的时空分布格局和数量统计特征。结果表明:①从时间上看,2000—2018年清洁能源发电潜力呈逐年增加趋势,空间分布格局变化不大,发电潜力较稳定。从空间上看,青海省西部清洁能源发电潜力相对较高,东部较低;州(市)尺度上,玉树州、海西州处于清洁能源发电潜力高值区,西宁市处于低值区;生态功能区尺度上,三江源地区处于清洁能源发电潜力高值区,祁连山地区处于低值区。②从清洁能源结构来看,青海省水电资源潜力最为丰富,2000—2018年水电势能平均发电潜力达到2338.41亿kW·h,其次是生物质能、地热能、太阳能和风能,且在实际应用中清洁能源在能源消费中的比重逐渐增大。③2000—2018年青海省清洁能源潜力平均价值为1887.75亿元,未来可获得的清洁能源的经济价值将随着中国碳市场的发展和清洁能源开发利用强度的增大而逐渐增长。本文为青海省相关部门了解省内清洁能源的现状和未来开发利用前景,制定清洁能源开发利用政策提供了重要依据。

关键词:清洁能源;太阳能;风能;水电势能;生物质能;地热能;生态文明;青海省

DOI:10.18402/resci.2021.01.09

1 引言

根据2019年《BP世界能源统计年鉴》^[1],受经济发展、科技进步和人口增长影响,世界一次能源消费量不断增加,全球一次能源需求在2017年达到135.11亿t油当量,且在2018年增长了2.9%,其中2/3的增长来自中国、美国和印度3国,是2010年以来的最快增速。根据美国能源信息署预测结果,在当前能源发展情景下,如果不更改能源消费策略,2040年以前全球能源需求年平均增速为1.3%^[2]。在这种情况下,以煤、石油、天然气等传统能源为主的一次能源将面临短缺和枯竭的风险。另外传统能

源利用会释放CO₂等温室气体到大气中,根据2014年4月正式发布的IPCC第五次评估报告(AR5)第三工作组(WGIII)报告,在2000—2010年间,人为温室气体排放量增加了100亿t CO₂当量,其中47%来自能源供应部门^[3]。温室气体排放的增加,加剧了全球气候变化,尤其是全球变暖的进程。为了缓解能源紧张和遏制全球气候变暖问题,人类正寻求新的能源解决方案。水电势能、太阳能、风能、地热能、生物质能、潮汐能等新型能源由于利用潜力巨大、环境污染少、可再生性强等特点,日益受到世界的广泛关注^[4]。根据国家能源局发布的《中华人民

收稿日期:2020-07-17,修订日期:2020-12-18

基金项目:国家第二次青藏高原科考项目(2019QZKK1001);青海省重大科技专项项目(2019-SFA12)。

作者简介:毛爱涵,女,内蒙古赤峰人,硕士生,研究方向为资源生态与自然资源保护。E-mail: 798248599@qq.com

通讯作者:于德永,男,辽宁省朝阳人,教授,主要从事景观生态学、土地系统设计、城市生态学与城市规划研究。E-mail: ydy@bnu.edu.cn

2021年1月

共和国能源法(征求意见稿)》,清洁能源定义为开发利用、使用过程中环境污染物和CO₂等温室气体零排放或者低排放的能源^[5]。因此,评估清洁能源潜力,逐渐提高清洁能源在能源消费中的比重是节能减排、缓解全球环境压力的重要途径之一^[6]。

国外学者大多通过模型模拟和空间分析等方法对清洁能源潜力进行研究。对于水电资源,许多学者利用不同的水文模型,如ARIMA^[7]、SWAT^[8]或水文模型与GIS分析工具相结合^[9,10]对水资源蕴藏量、地表径流量等参数进行估计,从而评估水电资源潜力。对于太阳能资源,学者们计算了一些国家^[11,12]的太阳能发电潜力及太阳能碳减排潜力^[13],他们主要依据遥感数据^[14],利用地理信息系统(GIS)相关工具^[15]对太阳能的能量量和空间分布进行评估。对于风能资源,研究者通常依据风速数据的统计特征^[16-18],在此基础上根据资源、地形、环境和经济可利用性,利用GIS工具进行风能潜力研究^[19]。对于生物质资源,针对不同国家的生物质蕴藏情况^[20,21],研究者主要从已经充分利用的生物质资源和剩余的生物质潜力两方面进行评估,除此之外还对生物质碳减排能力进行了研究^[22]。对于地热能资源,由于所处地理位置不同,并非所有国家都具有地热能,因此相关研究主要针对不同地区的地理条件和地热田分布情况^[23,24],对地热能潜力进行了评估。上述研究工作对于不同清洁能源的潜力研究均有所涉及,但国外学者的研究成果大多针对单一种类的清洁能源进行研究,或者针对不同国家的清洁能源发展情况进行研究,研究尺度大多数为国家,少有针对区域尺度的研究,内容上仍存在针对性不强或考虑因素不够全面等问题。

国内学者对于清洁能源的潜力也展开了众多研究。对于水电势能发电潜力,研究者主要针对不同地区,如沃尔特河流域^[25]、卡扬河^[26]等,评估了水资源理论蕴藏量和水电资源开发潜力,通过与其他国家水资源开发程度的比较证明中国水电资源潜力巨大^[27]。对于太阳能发电潜力,研究者在很多空间尺度上进行了研究,如全国范围^[28]、黄河流域^[29]、黔西南州^[30]、华南地区^[31]等,这些研究利用GIS等工具,主要从太阳辐射量的计算^[32]、时空分布特征^[33,34]、开发利用潜力^[35,36]等方面评估太阳能应用潜力。对

于风能发电潜力,研究人员大多选取风功率密度、风能可用时数等参数,从风能资源的丰富度、稳定度、开发适宜度等方面^[37]对不同地区的风能潜力进行评估,如西藏地区^[38]、京津冀及周边地区^[39]。对于生物质能发电潜力,有研究者针对生物质某种资源禀赋开展了研究,如桉树^[40]、人工湿地植物^[41]等,还有研究者从不同尺度的生物质空间分布和蕴藏量等方面开展了生物质能应用潜力研究,如全国^[42]、黑龙江^[43]、黔西南州^[44]等。对于地热能资源,中国学者主要针对不同类型地热资源,即浅层地热能、水热型地热资源和干热岩地热资源进行了潜力评估^[45],此外还评估了地热资源的分布、开发利用现状和前景^[46-48]。国内学者在清洁能源潜力方面的研究主要侧重于清洁能源的蕴藏量和开发程度,且能源种类通常比较单一,对于区域清洁能源的多种类综合分析相对较少,且少有研究定量评估清洁能源潜力价值。

国内外对于清洁能源价值的研究通常将能源本身与许多因素结合在一起进行分析,如清洁能源与碳价格的调控^[49],清洁能源经济制度与碳排放交易^[50],清洁能源消费与股票市场和经济增长的关系^[51]。清洁能源碳减排价值受到越来越多的关注,主要原因在于清洁能源利用能够有效缓解CO₂和污染物的排放^[52]。尽管很多研究都涉及清洁能源的价值及碳减排价值,但很少有学者将二者结合从定量角度衡量清洁能源潜力的经济价值。

青海省是青藏高原的重要组成部分,是中国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地,生态环境在全国及全球都具有十分重要的战略地位。2018年青海省委十三届四次全会作出了坚持生态保护优先,推动高质量发展,创造高品质生活,即“一优两高”的战略部署。青海省作为中国西部地区资源丰富的省份之一,在发展清洁能源方面具有得天独厚的条件。由于其独特的地理位置和气候条件,青海省具有丰富的水资源、太阳能资源、风能资源、地热资源、动植物资源等,有巨大的开发利用潜力。在保护青海省生态环境的基础上,充分开发利用生态潜力是青海省实施区域可持续发展战略的重要支柱。

本文在研究对象上将青海省的5种清洁能源进

行综合研究,对青海省2000—2018年太阳能、风能、水电势能、地热能、生物质能进行定量分析,并将其太阳能、风能、水电势能资源的时空分布可视化,对清洁能源发电潜力价值和碳减排价值进行评估,以期直观全面地了解青海省清洁能源潜力概况,为国家和青海省清洁能源开发利用设施布局及相关利用政策制定提供科学支撑,也为同类研究提供方法上的参考。

2 研究区概况、研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

青海省地理坐标范围为 $89^{\circ}35'E-103^{\circ}04'E$, $31^{\circ}36'N-39^{\circ}19'N$ 之间。中国七大地理分区将全国划分为华北、东北、华东、华中、华南、西南、西北,青海省位于七大地理分区的西北地区,深居内陆,远离海洋,地处青藏高原,属于高原大陆性气候。

青海省地势总体呈西高东低,南北高中部低的态势,西部海拔高峻,向东倾斜,呈梯型下降,东部地区为青藏高原向黄土高原过渡地带,地形复杂,地貌多样。青海省是长江、黄河、澜沧江等重要水系的发源地,降水较多,水系发育,河网密集,河流比降大,境内多海拔5000米以上的高大山体,山上终年积雪,广布冰川,形成许多天然巨型固体水库。青海省地势高、空气稀薄、干燥少云,太阳辐射透过大气层的距离较海拔低的地区短,被大气层所反射和吸收的部分也较少,因而到达地面的辐射量相对增多,是中国太阳辐射量最多的地区之一。青藏高原地势开阔,海拔较高,对风的阻挡小,冬季东南部盛行偏南风,东北部多为东北风,风能资源丰富。青海省位于欧亚板块的交接地区,地壳运动较频繁,频繁的造山运动使得活跃地壳的热运动频繁,地热资源丰富。青海省蕴藏丰富的水能、太阳能、风能等可再生能源,是中国的能源资源储备大省,且具备大规模开发条件,是国家重要的清洁能源基地。

2.2 清洁能源潜力评估方法

2.2.1 水电资源潜力评估方法

CLM(Community Land Model)陆面过程模式是国家大气研究中心(National Center of Atmospheric Research, NCAR)发展推广的陆面过程模式。CLM在综合了LSM(Land Surface Model)、IAP94

(Institute of Atmospheric Physics Land Surface model)以及BATS(Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme)等陆面模式优点的基础上,改进了一些物理过程参数化方案,并且加入了水文、生物地球化学以及动态植被等过程,是目前世界上发展最为完善而且也是最具发展潜力的陆面过程模式之一。因此,本文采用最新发布的CLM5.0^[53],使用其尺度自适应河流运输模型(MOSART),通过运动波方法对河道汇流、随时间变化的河道径流速度、水深以及河道地表水储量进行模拟,进而得到青海省地表径流量,由地表径流的势能产生的最大水电势能作为水电开发利用潜力评估的依据。本文根据水资源量和水位差(高程)计算水电势能理论蕴藏量,计算方法如公式(1)所示:

$$N=QLg \quad (1)$$

式中: N 为水电势能理论蕴藏量(kW); Q 为地表水资源量(m^3); L 为上下断面水位差(m); g 表示重力加速度,取值为9.81。水电势能计算步骤如下:

首先,利用ArcGIS水文分析工具,基于青海省90 m数字高程模型(DEM)数据,以当年的地表径流为权重计算青海省汇流累积分布,并生成集水区分布图。水资源只有达到一定汇集量才具有发电能力。参考已有研究^[54],确定该汇集量为 $1.28 \times 10^6 m^3$,即达到或超过此阈值点具备建设水库使水势能转化为电能的条件。此外,由于当代可开发水电技术条件限制以及水能不能完全转变为电能,存在一定损失,因此真正能够被利用的水能资源为可开发水电势资源。全国技术可开发水能资源量占全国水能理论蕴藏量的40.67%^[50],以此比例计算青海省水电势能发电量及其经济价值。

本文驱动CLM模型所用数据集如表1所示,水电势能潜力评估的空间分辨率为1 km,时间为2000—2018年。

目前没有统一的划分标准来确定水电势能潜力的高低,参考中华人民共和国水利部批准的《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2017)^[65]、《水力发电工程地质勘察规范》(GB50287-2016)^[66],本文拟将水电势能潜力划分为4个等级,如表2。

2.2.2 太阳能发电潜力评估方法

本文以太阳辐射数据为基础评估太阳能发电

表1 本文CLM模型所需的基础数据及来源

Table 1 Basic data required for the community land model (CLM) of this study and sources

类型	名称	时空分辨率	时间范围	来源
气象数据	CLDAS 东亚区域大气驱动场再分析数据集	0.0625°/hour	2008—2018年	国家气象信息中心 ^[55]
	中国大气强迫数据集	5 km/3hour	2000—2010年	Li等 ^[56] , Huang等 ^[57]
下垫面数据	土地利用/土地覆盖数据	30 m	2000、2005、2010、2015年	中国西部环境与生态科学数据中心 ^[58]
	中国植被功能型数据	1 km	—	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 ^[59]
	全球湖泊数据(GLDBv.2)	1 km	—	Kourzeneva等 ^[60] , Choulga等 ^[61]
	DEM	90 m	—	地理空间数据云 ^[62]
	CLASS 叶面积指数	1 km/8day	2000—2018年	国家地球系统科学数据中心 ^[63]
河道数据	全球河道模块数据集	0.125°	—	Li等 ^[64]

表2 水电势能资源潜力分级

Table 2 Classification of hydropower resource potential

指标等级	发电装机容量(MW)	水电势能发电量(亿kW·h/km ²)	潜力分级
1	≤50.0	≤0.0010	贫乏
2	50.1~300.0	0.0011~0.0030	一般
3	300.1~1200.0	0.0031~0.0050	丰富
4	>1200.0	>0.0050	极丰富

潜力,根据太阳辐射年等效利用小时数、理论装机容量及其理论发电量量化青海省太阳能发电潜力。在计算青海省太阳能水平面总辐射、散射辐射的基础上,根据公式(2)计算倾斜面上月平均太阳辐照量^[67]:

$$\bar{R} = D + \frac{\bar{H}_d}{2\bar{H}}(1 + \cos \beta) + \frac{\mu}{2}(1 - \cos \beta) \quad (2)$$

式中: \bar{R} 为倾斜面上月平均太阳辐照量与水平面上月平均太阳辐照量的比值; D 为倾斜面上时角取值, \bar{H}_d 为水平面上月平均散射辐照量; \bar{H} 为水平面上月平均总辐照量; β 为方阵倾角; μ 为地面反射率, 根据已有研究其取值为0.2^[68]。根据国家标准(GB 50797)《光伏电站设计规范》中推荐的光伏阵列最佳倾角参考值, 选取青海省固定最佳斜面倾角为35°。在此基础上计算得到最佳斜面总辐射年总量。

(1)年等效太阳能利用小时数

年等效太阳能利用小时数表示光伏电站发电量按照额定功率满发所计算的小时数, 是电站选址的重要因素^[57]。本文按照固定式斜面太阳能进行评估, 根据固定斜面总辐射年总量, 计算年等效利用小时数, 计算方法如公式(3)所示:

$$H = t \times G \quad (3)$$

式中: H 为年等效利用小时数; G 为年最佳斜面总辐射总量; t 为光伏电站综合效率系数, t 取值与光伏组件类型修正系数、逆变器效率、光照利用率等因素有关, 一般介于0.7~0.9, 在本文中取0.8。

(2)太阳能理论装机量

在考虑地形地貌对太阳能发电装机的约束后, 计算一定区域太阳能电站的可装机量, 计算方法如公式(4)所示:

$$Y_s = Y_0 X_s \quad (4)$$

式中: Y_s 为太阳能理论装机量(MW/km²); Y_0 为不考虑任何约束条件, 理想状况单位面积的太阳能装机量; X_s 为土地利用或装机折减系数, 代表单位面积可用于太阳能开发的土地比例, 由地形和土地利用类型决定, 根据已有研究^[69], Y_0 取值一般在40~50 MW/km², 本文取45 MW/km², X_s 主要系数选取如表3、表4所示。

(3)青海省太阳能发电潜力计算方法

太阳能发电潜力, 即理论发电量, 表示在单位面积下, 考虑地形地貌和土地利用等约束条件, 基于年等效利用小时数和理论装机量计算得到的年总发电量, 计算方法如公式(5)所示:

$$Z_s = H Y_s \quad (5)$$

式中: Z_s 为太阳能发电潜力。

本文2000—2007年短波辐射数据来自中国大陆地表强迫场的数据集, 2008—2018年来自CLDAS东亚区域大气驱动场再分析数据集(表1)。

本文以国家气象科学研究院对总辐射的分级标准^[70]对太阳年总辐射潜力进行划分, 由高到低分为4级; 对年日照时数和年有效日照天数的划分, 参

表3 不同坡向、坡度下的土地利用率

Table 3 Land use efficiency under different slope aspects and slopes

坡向类型	坡度	土地利用率
315°~45°	[0,10)	1.0
315°~45°	[10,90)	0.0
45°~135°,135°~225°,225°~315°	[0,10)	1.0
45°~135°,135°~225°,225°~315°	[10,20)	0.8
45°~135°,135°~225°,225°~315°	[20,30)	0.6
45°~135°,135°~225°,225°~315°	[30,90)	0.0

表4 不同土地利用类型的利用率

Table 4 Land use rate of different land use types

土地利用类型	土地利用率
湿地、森林、水体等	0.00
耕地、人造地表	0.05
灌木	0.10
草地	0.20
裸地	1.00

照针对太阳能光电利用区划制定的分级标准,由高到低分为4级^[71];在此基础上,为进一步区分中国太阳能资源极端丰富区的分布范围,以各评价指标最高等级区内最大的一个四分位数作为分割阈值,将最高等级区再分为两级,即每项指标总共分5级^[72](表5)。分级赋值之后,将各评价因子分值相加,其平均值即为各地太阳能资源开发潜力总分值,计算方法如公式(6):

$$K_{\text{sum}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \quad (6)$$

式中: K_{sum} 为太阳能开发潜力总分值; K_i 为第 i 种评价因子的分值。

2.2.3 风能发电资源潜力评估方法

风能资源分析的关键参数之一为风功率密度。风功率密度指的是气流在单位时间里垂直通过单位截面积的风功率^[73],是评价一个地区风能资源潜力的重要参数^[74]。本文根据国家标准(GB/

T18170-2002)《风电场风能资源评估方法》计算风功率密度,如公式(7)所示:

$$D_w = \frac{1}{2m} \sum_{c=1}^m \rho v_c^3 \quad (7)$$

式中: D_w 为平均风功率密度(W/m^2); m 为在设定时段内的记录数; ρ 为空气密度(kg/m^3); v_c 为第 c 条记录的风速值的立方。在此基础上计算年均风功率密度,将青海省2000—2018年每日逐时的风速数据按间距分成各等级风速, v_1 (1 m/s), v_2 (2 m/s), ..., v_c (c m/s),各等级风速在该年出现的累积小时数分别为 n_1, n_2, \dots, n_c ; 分别乘以相应各风速下的风功率密度,再将各等级风功率密度相加之后除以年总时数 N , 计算方法如公式(8)所示:

$$E_{\text{平均}} = \left(\sum_{c=1}^m \frac{1}{2} n_c \rho v_c^3 \right) \frac{1}{N} \quad (8)$$

式中: $E_{\text{平均}}$ 为年平均风功率密度(W/m^2),即风能发电潜力,式中空气密度 ρ 采用国家GB/T18170-2002《风电场风能资源评估方法》计算,如公式(9)所示:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (9)$$

式中: P 为年平均大气压力(Pa); R 为气体常数($287 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$); T 为年平均空气开氏温标绝对温度。

2000—2007年风速、气压、气温数据来自中国陆地地表强迫场的数据集,2008—2018年来自第三次青藏高原科学考察气象数据中的东亚区域大气驱动场再分析数据集(表1)。

国家标准《风电场风能资源评估方法》(GB/T18710-2002)对风能资源的风功率密度等级进行了划分。只要风能资源达到3级及以上就能满足风电并网及大规模开发的基本要求,而2级风能资源的区域目前只适于发展中小型或离网型风电。在进行风能资源开发潜力分析时,既要考虑当前中国大规模开发风电的需要,也要考虑随着技术水平的提

表5 太阳能资源潜力分级

Table 5 Classification of solar energy resource potential

指标等级	分值	年总辐射(MJ/m^2)	年日照时数	年有效日照天数	潜力分级
1	20	≤ 4200.0	≤ 1600.0	≤ 210.0	贫乏
2	40	4200.1~5200.0	1600.1~2000.0	210.1~270.0	一般
3	60	5200.1~6200.0	2000.1~2400.0	270.1~330.0	较丰富
4	80	6200.1~7000.0	2400.1~3200.0	330.1~350.0	丰富
5	100	> 7000.0	> 3200.0	> 350.0	极丰富

2021年1月

高及在风能资源等级较低的内陆地区发展小型离网风电的需要。

本文的风能资源评估参考了美国可再生能源实验室(NREL)的方法,从技术、经济及国家和地方政策角度综合考虑,中国陆地风能资源不可开发区域主要包括,海拔高度 ≥ 3500 m的地区,GIS坡度 $> 4\%$ 的地区,以及水体、湿地、沼泽地等。因此根据年平均风速、并网条件与地形条件,将风能资源潜力划分为4个等级(表6)。

2.2.4 生物质能发电潜力评估方法

依据青海省统计数据,计算生物质能蕴藏量,并折算能源量。青海省生物质分为5类,分别是秸秆资源、畜禽粪便、薪柴林木、城市垃圾与废水。

(1) 生物质蕴藏量

①农作物秸秆:主要包括粮食作物、油料作物、棉花、麻类和糖料作物5大类^[75]。其用途广泛,除可以作为工业原料和畜牧饲料外,剩余部分都可以作为燃料使用。由于秸秆产量未列入国家有关部门的统计范围,其产量通常依据农作物的产量计算而得。计算方法如公式(10)所示:

$$S = \sum_{d=1}^w r_d A_d \quad (10)$$

式中: S 为秸秆资源实物量(t); A_d 为第 d 种农作物产量; r_d 为第 d 种农作物谷草比系数,是可以通过田间试验和观测得到的经验常数。不同学者在估算中国秸秆资源时,采用了不同农作物谷草比系数^[76,77]。综合已有研究,并考虑青海省农作物的种植情况和地理分布,本文选取的谷草比系数如表7所示。

②畜禽粪便:是一种重要的生物质资源。畜禽粪便经干燥可直接燃烧供应热能,若经厌氧处理还可产生甲烷和肥料。根据各类畜禽每日粪便产生量和畜禽的饲养周期可以估算畜禽粪便排放量,计算方法如公式(11)所示:

$$T = \sum_{f=1}^u D_f m_f \quad (11)$$

式中: T 为畜禽粪便实物总量(kg); D_f 为第 f 种畜禽的数目; m_f 为不同类型单位畜禽饲养期内的粪便排泄量(kg)。青海省统计年鉴中的畜禽养殖头数包括出栏量和存栏量两部分。根据已有研究^[78,79],本文选取不同类型单位畜禽饲养期内的粪便排泄

量如表8所示。

③林木生物质:可以通过薪炭林,林业生产和更新剩余物以及灌木林、竹林等其他林木生物质资源来计算^[80]。本文根据青海省统计年鉴数据计算了林业生产采伐剩余物、林木抚育间伐量、四旁树种植量3种林木生物质资源。计算方法如式(12)所示:

$$F = \sum_{j=1}^v b_j C_j \quad (12)$$

式中: F 表示林木生物质资源实物量(t); C_j 为第 j 种林木资源量; b_j 为相应的折算系数(表9)。

④城市垃圾:通过青海省统计年鉴中每年的城市垃圾清运量得到。

⑤城市污水:可以用于生产沼气,分为工业废水和生活废水两部分,计算方法如公式(13)所示:

$$M = B \times b \times W \quad (13)$$

表6 风能资源潜力分级

Table 6 Classification of wind energy resource potential

指标等级	年平均风速 参考值/(m/s)	应用于并网风力 发电条件	潜力 分级
1	5.1	不好	贫乏
2	5.6	较好	一般
3	6.0	好	丰富
4	6.4	很好	极丰富

表7 不同农作物谷草比系数

Table 7 Residue to product ratio of various crops

秸秆资源种类	草谷比系数
小麦	1.1
杂粮	1.6
薯类	1.0
油菜籽	3.0
胡麻	2.0

表8 单位畜禽饲养期内的粪便排泄量

Table 8 Total amounts of livestock and poultry feces produced during feeding period

畜禽种类	饲养期内的粪便排泄量/kg
肉猪	1050.0
存栏猪	1460.0
牛	8200.0
羊	632.0
马	5237.0
肉禽	4.5
蛋禽	55.0

表9 林木生物质能计算参数^[81]

Table 9 Related parameters of forest biomass energy calculation

种类	b_j	折重
采伐剩余物	40%	1.17 t/m ³
抚育间量	8 m/hm ²	0.90 t/m ³
四旁树	100%	2.00 kg/株

式中: M 为废水产生的沼气的量(m³); W 为废水总量(kg); B 为废水中化学需氧量(COD)平均含量, 按《中国环境统计年报》发布数据计算; b 为单位 COD 产生 CH₄ 的量, 取值为 0.907 m³/kg^[82]。

(2) 生物质折标能源量

根据以上各类生物质能资源的实物量, 乘相应的折标系数, 就可以得到不同种类生物质能折合成标准能源的总量。例如, 在秸秆资源总量的基础上引入折标系数 λ_e , 即可计算不同类型农作物秸秆的折标能源总量, 如公式(14):

$$ES = \sum_{e=1}^y r_e \lambda_e A_e \quad (14)$$

式中: ES 为农作物秸秆的折标能源总量; A_e 为第 e 种农作物产量; r_e 为第 e 种农作物谷草比系数; λ_e 为第 e 种类型秸秆的折标系数。

畜禽粪便资源能源潜力 ET , 林木资源能源潜力 EF , 城市垃圾资源能源潜力 EG 和城市废水资源能源潜力 EM 的计算方法与此类似。本文选取的各类生物质能源的折标系数如表 10 所示。

表10 不同种类生物质能源的折标系数^[82-84]

Table 10 Standard conversion coefficient of different types of biomass

生物质类型	折标能源系数
麦秆、麻类秆	0.500
杂粮秆	0.050
薯类秆	0.486
油料秆	0.529
薪柴	0.571
牛粪	0.429
猪粪	0.471
马、羊、驴、骡粪	0.529
鸡粪	0.643
生活垃圾	0.143
工业沼	0.857
农业沼	0.714

注: 沼气折标能源系数的单位为 kgce/m³, 其他为 kgce/kg。

本文所使用的农作物秸秆产量、畜禽养殖数据、林木数据、城市垃圾清运量、城市污水数据、废水中 COD 平均含量, 来自 2000—2018 年《青海省统计年鉴》、2000—2018 年《中国统计年鉴》、2000—2018 年《中国环境统计年报》。

2.2.5 地热能发电潜力评估方法

中国地质科学院水文地质环境地质研究所在青海省开展的“青海省地热资源调查评价”“贵德盆地深部水文地质调查”项目完成了青海省地热资源现状评价与区划工作^[85]。由于数据获取的局限性, 本文 2000—2018 年地热能发电潜力依据该研究探明的 2012—2014 年地热资源量平均值代替。

2.3 清洁能源价值研究方法

2.3.1 清洁能源发电价值

为了便于比较, 清洁能源价值计算参考 2018 年的价值指数。根据国家能源局发布《2018 年度全国电力价格情况监管通报》^[86], 水电机组平均上网电价为 267.19 元/千 kW·h, 光伏发电平均上网电价为 859.79 元/千 kW·h, 风电机组平均上网电价为 529.01 元/千 kW·h, 生物质发电平均上网电价为 677.99 元/千 kW·h, 由于地热能目前没有统一的价格标准, 故将地热能折算的标准煤完全燃烧释放的能量作为理论发电量, 以 2018 年燃煤机组平均上网电价为 370.52 元/千 kW·h 对地热能潜力价值进行评估, 计算方法如公式(15)所示:

$$P_r = E_r N_r \quad (15)$$

式中: P_r 为第 r 种清洁能源的理论发电价值(元); E_r 为第 r 种清洁能源的理论发电量(千 kW·h); N_r 为第 r 种清洁能源的全国上网电价(元/千 kW·h)。

2.3.2 清洁能源碳减排价值

根据 2006 年 IPCC 制定的《国家温室气体清单指南》中提供的参考方法, CO₂ 排放量可以根据各种能源消费导致的 CO₂ 排放估算量加和得到^[87]。根据中华人民共和国生态环境部发表的《2006—2017 年度减排项目中中国区域电网基准线排放因子》可知, 青海省属于西北区域电网, 根据文件中的排放因子计算方法和原理, 取 2006—2017 年平均值作为青海省 CO₂ 排放系数, 即 1.0012 (tCO₂/MW·h)。依据美国能源部发布的清洁能源碳排量数据, 即生命周期内, 不同清洁能源发电方式 1 kW·h 的发电量平

均产生的CO₂量^[88],将其从与清洁能源量等值的传统能源利用的碳排放中扣除即可以得到清洁能源碳减排量。

为了便于比较,清洁能源碳减排价值计算均按2018年的价值指数进行计算。根据《2018年中国碳价调查》中的试点碳价范围^[89]和中央财经大学绿色金融国际研究院发布的2018年试点碳市场价格得到2018年中国试点碳市场年度成交均价为23.445元/tCO₂。依据此对清洁能源的碳减排价值进行计算,如公式(16):

$$Q_x = O_x \times V \quad (16)$$

式中: Q_x 为第 x 种清洁能源的碳减排价值; O_x 为第 x 种清洁能源的碳减排量; V 为2018年中国试点碳市场年度成交均价。

3 结果与分析

3.1 清洁能源发电潜力

3.1.1 水电资源潜力

2000—2018年青海省水电势能潜力呈增加趋势($n=19$, $R^2=0.49$),且2016年之后,水电势能潜力增长较快,年平均增量为52.157亿kW·h,但空间分布格局未发生明显变化,高值区主要分布在青海省南部和北部部分区域。

2000—2018年青海省平均水电势能潜力的空间分布如图1所示。从全省整体空间分布情况来看,水电势能资源潜力在空间上呈不均匀分布,水

电势能高值区分布在青海省南部及东部,低值区分布在西北部,由东南向西北逐渐递减。从州(市)尺度来看,玉树州和海西州是水电势能潜力的高值区,多年平均水电势能潜力最高值分别达到896亿kW·h/年、645亿kW·h/年,共占全省水电势能潜力总量的66%;果洛州、海南州、海北州为水电势能潜力的中值区,共占全省水电势能潜力总量的27%;黄南州、海东市、西宁市为水电势能潜力的低值区。从生态功能区尺度来看,三江源地区是水电势能潜力的高值区,多年平均水电势能潜力最高值达2502.96亿kW·h/年,占全省水电势能潜力总量的74%;东部干旱山区为水电势能潜力的中值区,占全省水电势能潜力总量的13%;柴达木地区、青海湖流域和祁连山地区为水电势能潜力的低值区。

水电势能潜力在时间上呈增加趋势,首先是年际降水量呈增加趋势,使得地表水资源量增加,进而影响水电势能变化;其次是在全球气候变暖的大背景下,虽然蒸发量在增大,但同时会使冰川冻土融水量增加,从而使液态水资源总量在一定时期内增加^[90]。水电势能潜力在空间分布上呈现东南高西北低的格局。首先是降水的空间分布差异,由于所处地理位置,青海省东南部靠近横断山区,南北走向的横断山可以阻隔东南季风,但西南季风会沿河谷抬升,在青海南部形成降水,降水分布格局决定了径流的大体变化趋势,形成东南地区水电势能资

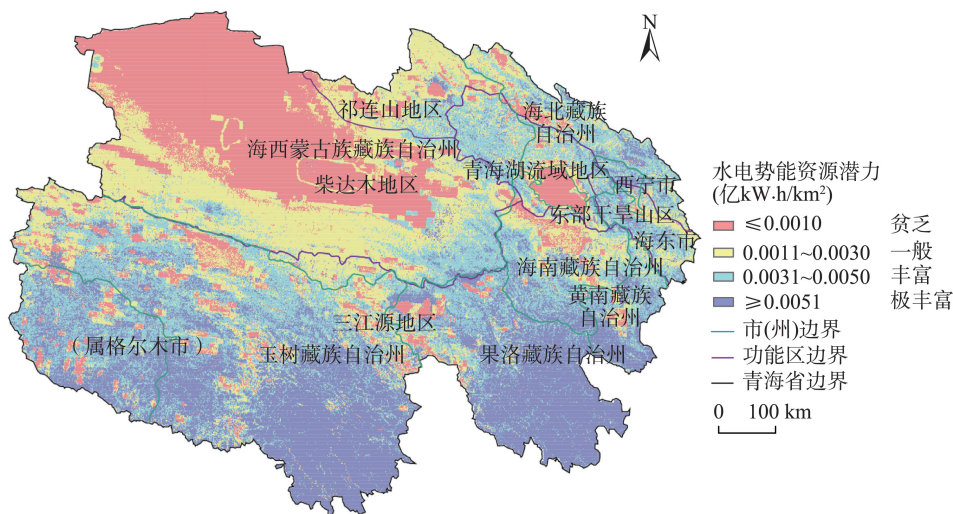


图1 2000—2018年青海省多年平均水电势能潜力的空间分布

Figure 1 Spatial distribution of the average hydropower potential energy in Qinghai Province, 2000-2018

源潜力较大的空间格局;此外,地表径流上下断面水位差也是重要影响因素,青海省东部地区为青藏高原向黄土高原过渡地带,地形复杂,河流比降大,从而形成东南高西北低的水电势能潜力分布。

3.1.2 太阳能发电潜力

2000—2018年的太阳能发电潜力进行拟合($n=19$, $R^2=0.89$),结果表明,2000—2005年太阳能发电潜力呈现减少趋势,2005—2015年呈现增加趋势,2015—2018年呈减少趋势,但2000—2018年整体呈增加趋势,空间分布格局变化不大,且太阳能发电潜力较稳定。

2000—2018年青海省平均太阳能发电潜力的空间分布如图2所示。从全省整体空间分布来看,太阳能资源在空间上呈现不均匀分布,从西北到东南呈递减趋势。从州(市)尺度来看,海西州是太阳能发电潜力的高值区,多年平均最高发电潜力达150.66亿kW·h/年,占全省太阳能发电潜力总量的65%;玉树州是太阳能发电潜力的中值区,占全省太阳能发电潜力总量的22%;果洛州、海南州、海北州、黄南州、海东市、西宁市是太阳能发电潜力的低值区。从生态功能区尺度来看柴达木地区是太阳能发电潜力的高值区,多年平均最高发电潜力达123.52亿kW·h/年,占全省太阳能发电潜力总量的53%;三江源地区是太阳能发电潜力的中值区,占全省太阳能发电潜力总量的39%;祁连山地区、青海

湖流域、东部干旱山区是太阳能发电潜力的低值区。

太阳能发电潜力在时间上呈现增加的趋势主要受年际天气状况影响,年等效利用小时数增加,进而带来太阳能发电潜力呈增加趋势。太阳能发电潜力在空间分布上呈现西北高东南低分布的格局主要受纬度位置影响,青海省地处中高纬地带,太阳辐射强度大,光照时间长;其次是受海拔高度影响,青海省海拔高,空气稀薄,大气对太阳辐射的阻挡作用弱,到达地面的太阳辐射强。此外受地形和土地利用类型影响,青海省兼具青藏高原、内陆干旱盆地、黄土高原三种地形地貌,地形和土地利用类型影响太阳能装机情况,进而形成太阳能发电潜力呈西北高东南低的空间格局。

3.1.3 风能发电潜力

2000—2018年青海省风能发电潜力呈下降趋势($n=19$, $R^2=0.449$),平均每年下降约0.384亿kW·h,但空间分布格局变化较小。

2000—2018年青海省平均风能发电潜力的空间分布如图3所示。从全省空间分布来看,风能发电潜力在空间上呈不均匀分布,整体上为西部高,东部低。从州(市)尺度来看,海西州是风能发电潜力的高值区,最高每年达 1.82×10^6 W/m²,占全省风能发电潜力总量的48%;玉树州是风能发电潜力的中值区,占全省风能发电潜力总量的30%;果洛州、

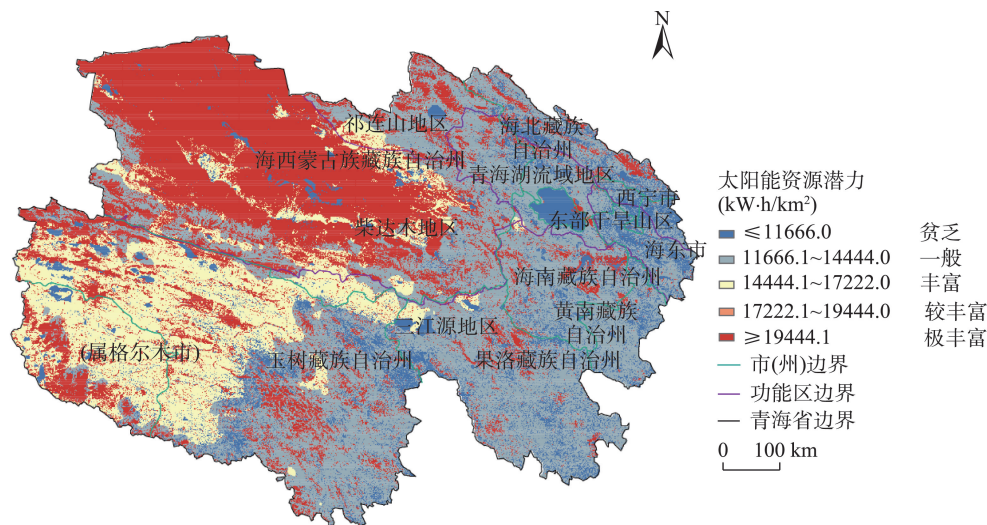


图2 2000—2018年青海省多年平均太阳能发电潜力的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of the average solar power generation potential in Qinghai Province, 2000-2018

2021年1月

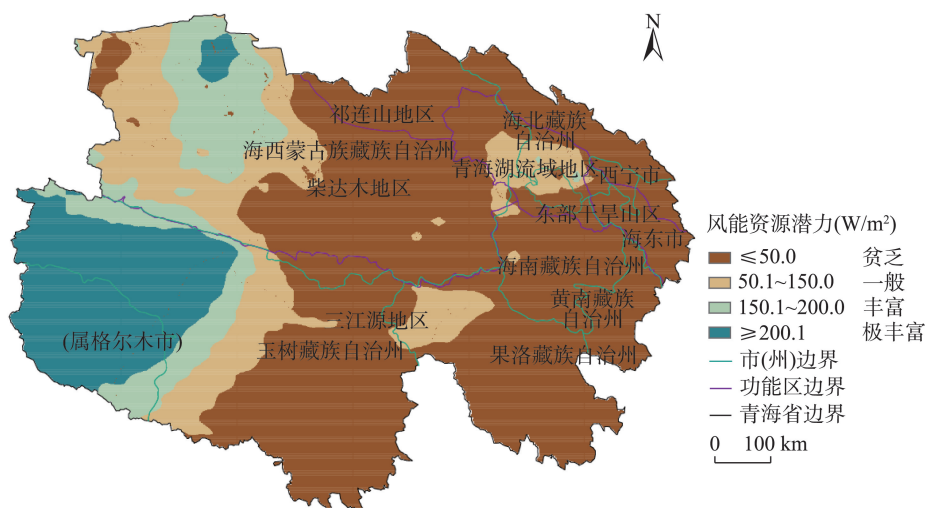


图3 2000—2018年青海省多年平均风能发电潜力的空间分布

Figure 3 Spatial distribution of the average wind power generation potential in Qinghai Province, 2000-2018

海南州、海北州、黄南州、海东市、西宁市是风能发电潜力的低值区。从生态功能区尺度来看,三江源地区始终处于风能发电潜力的高值区,多年平均最高发电潜力达 $1.77 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,占全省风能发电潜力总量的56%;柴达木地区是风能发电潜力的中值区,占全省风能发电潜力总量的32%;祁连山地区、青海湖流域、东部干旱山区是风能发电潜力的低值区。

风能发电潜力在空间上呈现西高东低的格局,主要受地形等因素的影响,青海省西部海拔较高,由于地形的抬升更易形成大风,因此海西州西部、玉树州西部、柴达木地区风能资源丰富。青海湖东北面、西南面均有山体,气流通过这种特殊地形条件时会产生狭管效应而导致风速增加,同时由于东南端地势较高,气流会在此产生堆积作用而加速,另外由于气流流经光滑的湖面时也会加速,因此青海湖周边地区风能潜力较大。

3.1.4 生物质能发电潜力

2000—2018年青海省生物质资源折合标准煤能源总量如表11所示。

2000—2018年的青海省生物质资源呈上升趋势($n=19$, $R^2=0.807$),林木资源和畜禽粪便资源总量占比较高,其次是秸秆资源、城市垃圾、废水。影响生物质资源的因素有很多,如光热组合、自然地理条件、种植情况等。生物质能源呈上升趋势与人口数量增多有密切关系,2000—2018年青海省常住人

口数量由503万增长到603.23万,随着人口数量增多,城市垃圾、生活污水和工业污水的排放量增加,作物种植、畜禽饲养的水平也有所提高,使生物质能源成为青海省具有较大发展潜力的清洁能源之一^[84]。

3.1.5 地热能资源潜力

青海省地热资源总储量为 $1.43 \times 10^{20} \text{ J}$,折合标准煤为 $8.10 \times 10^9 \text{ t}$;可开采地热资源总量为 $1.40 \times 10^{17} \text{ J/年}$,折合标准煤为 $7.98 \times 10^6 \text{ t/年}$ ^[85]。青海省地热资源类型主要分为隆起断裂型和沉降盆地型。隆起断裂型地热资源,大多分布在盆地周边山区地带,常以温泉形式沿断裂带排泄于地表,具有温度高、分布面积小的特点,主要分布在西宁盆地南缘药水滩地热区、贵德热水沟地热区、兴海县温泉地热区及唐古拉山口温泉地热区等。青海省沉降盆地型地热资源主要分布在青海东部西宁、贵德、共和等盆地内,该地区地热资源丰富,开发利用价值较高,同时勘查研究程度较高。青海省地热资源的热源特征与底部岩浆活动历史和特征密切相关,由于我国青藏高原地区具有强烈的构造运动,新生代以来,受欧亚板块和印度洋板块的挤压,青藏高原逐渐隆升,局部有岩浆入侵的存在,故产生沉积盆地型干热岩资源和隆起断裂型地热资源^[91]。根据青海省地热资源广泛分布的现状,未来在政策措施引导下,能更好地推动地热资源开发利用,为中国地热发电战略部署做出贡献。

表11 2000—2018年青海省生物质资源折合标准煤总量

Table 11 Biomass resource equivalent to total standard coal energy in Qinghai Province, 2000-2018

年份	秸秆/万t	畜禽粪便/万t	林木/万t	城市垃圾/万t	废水/万t	总和/万t
2000	89.74	2157.24	2876.32	13.69	2.51	5139.50
2001	77.77	2535.06	3380.08	10.84	2.54	6006.30
2002	71.86	2578.78	3438.37	11.30	2.51	6102.82
2003	74.23	2500.90	3334.53	7.99	2.48	5920.13
2004	80.91	2717.14	3622.85	8.25	3.03	6432.18
2005	90.47	2755.69	3674.26	7.78	5.60	6533.80
2006	70.45	2787.66	3716.88	8.55	5.75	6589.30
2007	86.55	2897.62	3863.49	9.25	5.91	6862.81
2008	92.84	2478.19	3304.26	9.09	5.80	5890.19
2009	98.31	2969.49	3959.31	12.50	5.92	7045.53
2010	96.41	3006.90	4009.20	11.88	8.01	7132.39
2011	92.62	3067.77	4090.36	11.88	8.01	7270.65
2012	90.49	2964.33	3952.44	9.48	8.07	7024.82
2013	89.60	2924.25	3899.00	10.60	8.04	6931.48
2014	87.27	3025.99	4034.65	11.10	8.16	7167.17
2015	84.69	3172.70	4230.27	11.75	8.11	7507.52
2016	84.20	3279.38	4372.50	11.73	5.46	7753.27
2017	82.44	3357.87	4477.17	11.11	4.47	7933.06
2018	87.95	3138.24	4184.32	16.23	4.47	7431.21

3.2 清洁能源价值

2000—2018年青海省5种清洁能源价值汇总如表12所示。

清洁能源潜力总价值由本身价值和其具有的碳减排价值两部分组成,本文对5种清洁能源的本身价值及碳减排价值进行整理分析,得出以下结果:

(1)从总价值的变化趋势来看,2000—2018年,清洁能源价值呈增加趋势($n=19, R^2=0.69$),平均增量为29.61亿元/年。其中,水电势能、太阳能、生物质能价值呈增加趋势,平均增量分别为19.47亿元/年、0.44亿元/年、9.91亿元/年,风能呈减少趋势,平均减量为0.21亿元/年。清洁能源的价值与国际碳交易市场的碳交易定价关系密切,国际碳市场发展迅速且价格波动较大。中国处在碳交易产业链的最低端,只是作为市场的参加者和规则的执行者进行碳市场定价^[92]。因此未来清洁能源潜力的价值变化取决于未来中国的碳交易市场发展情况,完善碳交易市场体系,加强对清洁能源发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)项目开发的研究、

制定统一交易标准等,对中国碳交易市场的完善具有重要意义。

(2)从能源结构来看,2000—2018年水电势能平均价值占清洁能源总价值的比重最大(46.20%),其次是生物质能(30.82%)、地热能(11.97%)、太阳能(10.09%)和风能(0.92%);从能源价值构成来看,清洁能源发电价值占总价值的95%,碳减排价值占总价值的5%。根据《青海清洁能源发展白皮书2019》^[93],截至2018年底,青海省清洁能源装机规模已达2420万kW,占全省电源总装机的86.5%,其中,水力发电占青海省电源结构的42.6%,太阳能发电占34.4%,风力发电占9.5%。由本文对清洁能源的时空分布评估结果可以看出青海省的清洁能源具有巨大开发潜力,增加清洁能源在能源消费中的比重,能够获得更高的发电价值及碳减排价值。

(3)根据青海省发布的《青海能源发展报告(2018)》^[94],2018年清洁能源的实际利用量分别为:水力发电量为517亿kW·h,同比增长56.6%;风力发电量为37.6亿kW·h,同比增长108.9%,弃风率1.6%;太阳能发电量为131.1亿kW·h,同比增长

表 12 2000—2018年青海省清洁能源价值/亿元

Table 12 Clean energy resource value of Qinghai Province, 2000-2018 (unit: 100 million yuan)

年份	水电势能		太阳能		风能		生物质能		地热能		总价值
	发电	碳减排	发电	碳减排	发电	碳减排	发电	碳减排	发电	碳减排	
2000	685.26	45.59	184.00	4.48	16.33	0.71	411.97	29.63	221.37	4.67	1604.00
2001	657.25	43.71	182.46	4.44	17.00	0.74	481.45	34.63	221.37	4.67	1647.72
2002	706.91	47.02	180.55	4.39	16.80	1.07	489.18	35.18	221.37	4.67	1707.14
2003	739.99	49.22	180.74	4.40	20.92	0.91	474.54	34.13	221.37	4.67	1730.89
2004	722.07	48.03	183.67	4.47	20.30	0.89	515.58	37.08	221.37	4.67	1758.11
2005	838.46	55.78	179.41	4.36	17.43	0.76	523.73	37.67	221.37	4.67	1883.63
2006	626.18	41.65	176.31	4.29	17.94	0.78	528.18	37.99	221.37	4.67	1659.36
2007	831.34	55.30	181.30	4.41	17.12	0.75	550.10	39.56	221.37	4.67	1905.91
2008	813.57	54.11	188.13	4.58	15.41	0.67	472.14	33.96	221.37	4.67	1808.61
2009	887.52	59.03	185.39	4.51	15.95	0.70	564.75	40.62	221.37	4.67	1984.50
2010	813.71	54.12	190.46	4.63	16.46	0.72	571.71	41.12	221.37	4.67	1918.97
2011	844.55	56.17	193.72	4.71	16.56	0.72	582.79	41.91	221.37	4.67	1967.17
2012	853.20	56.75	192.46	4.68	16.67	0.73	563.09	40.50	221.37	4.67	1954.12
2013	749.83	49.88	198.47	4.83	15.26	0.67	555.61	39.96	221.37	4.67	1840.54
2014	860.02	57.21	198.06	4.82	15.22	0.66	574.50	41.32	221.37	4.67	1977.85
2015	653.91	43.49	190.47	4.63	15.90	0.69	601.78	43.28	221.37	4.67	1780.20
2016	956.05	63.59	195.06	4.74	14.55	0.63	621.48	44.70	221.37	4.67	2126.85
2017	1107.23	73.65	179.82	4.37	14.77	0.64	635.89	45.73	221.37	4.67	2288.15
2018	1189.14	79.10	171.18	4.16	14.77	0.64	595.66	42.84	221.37	4.67	2323.53

15.6%,弃光率4.75%。根据本文的研究结果,青海省水电、太阳能发电、风力发电的实际应用约占其总能源潜力的26%,且生物质能与地热能有待继续开发,因此,青海省未来的清洁能源开发应用潜力巨大。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于模型模拟和空间分析等方法,对青海省水电势能、太阳能、风能、生物质能、地热能5种主要清洁能源的发电潜力及价值进行评估,得到了青海省主要清洁能源发电潜力的时空分布格局和数量统计特征。主要结论有:

(1)青海省清洁能源蕴藏量丰富,开发利用潜力巨大,具有时间和空间变化特征。2000—2018年青海省清洁能源潜力整体呈逐年增加的趋势,其中水电势能、太阳能、生物质能呈增加趋势,风能呈减少趋势;在空间上,青海省西部清洁能源潜力相对较高,东部较低,西部具有丰富的太阳能和风能,东部具有丰富的水电势能。能源总量和单位面积能

源产出效率排序并不完全一致,因此在能源开发时应综合考虑不同地区的生态环境现状、能源产出效率、能源蕴藏总量等因素,可以把长期处于清洁能源潜力的高值区作为优先开发区,如在西部地区开发太阳能与风能,在东部地区开发水电势能等。

(2)从清洁能源结构来看,青海省水电资源潜力最为丰富,其次是生物质能、地热能、太阳能和风能。随着科学技术的进步,青海省水电站、光伏电站、风电站的装机量都在逐年增加,生物质能源的使用量也在不断提高,但是地热能利用仍然处于初级阶段,开发利用量较少。针对清洁能源利用现状,应充分考虑清洁能源的蕴藏量和开发条件,在合理保护生态环境的前提下,在适宜地区进一步建设水力发电站、太阳能发电站、风力发电站,提高生物质资源的利用效率,对可用于发电的地热资源进行勘探和开发。

(3)从清洁能源价值来看,2000—2018年清洁能源价值呈增加趋势,水电势能平均价值占清洁能源总价值的比重最大,其次是生物质能、地热能、太

阳能和风能。根据相关统计数据与本文研究结果比较后发现,全省清洁能源实际应用程度与清洁电力应用潜力尚有较大差距,未来青海省清洁能源利用水平存在较大提升空间。在未来清洁能源开发利用过程中应结合能源潜力总量、不同地区的能源产出效率与能源需求,建立与清洁能源生产相适应的产业体系、消费体系,加大推广清洁能源开发利用的力度。

4.2 讨论

本文评估的对象为青海省清洁能源发电潜力及潜在价值,因此对评估结果和开发利用清洁能源的意义展开讨论:

(1)本文考虑了青海省气候、植被、水文、地形地貌、土壤等自然地理要素时空分异特征,通过对2000—2018年青海省清洁能源的量化评估,进一步证实青海省的最大价值在生态这一科学判断。此外,水电势能、太阳能、风能发电潜力影响因素众多,由于气候、植被等因素的变化使其时空分布具有动态变化特征和一定的不确定性,这需要进一步的长期跟踪研究。

(2)本文根据模型模拟和数据统计结果核算了2000—2018年青海省清洁能源发电潜力及碳减排潜力。清洁能源潜力价值依据平均上网电价进行核算,碳减排潜力价值依据中国试点碳市场年度成交均价进行核算,结果具有可靠性,为同类研究提供了方法上的参考。由本文核算过程可知,清洁能源的价值与中国的上网电价和国际碳交易市场的碳交易定价关系密切,因此在未来发展中,确定合理的国内上网电价、制定统一的中国碳交易标准等措施对开发清洁能源、提升宏观经济、改善民生福祉具有积极影响。

(3)根据本文核算结果,青海省水力发电、太阳能发电、风力发电的实际应用约占其总能源潜力的26%,且生物质能与地热能有待继续开发,印证了青海省清洁能源具有巨大的开发潜力。因此,充分利用水能、风能、太阳能、生物质能、地热等清洁能源,可以逐步改善并优化青海省乃至全国的能源消费结构;制定具有吸引力的清洁能源开发利用政策,吸收各种资本,增加清洁能源开发与利用方面的投入,对于确保中国的能源安全,治理环境污染问题,

建设“美丽中国”和落实生态文明建设都具有十分重要的战略意义。

参考文献(References):

- [1] BP Group. BP Statistical Review of World Energy[R/OL]. (2019-07-30) [2020-07-17]. https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2019/2019srbook.pdf.
- [2] IEA. World Energy Outlook 2019[R/OL]. (2019-11) [2020-07-17]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- [3] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Ucar A, Balo F. An investigation of wind turbine characteristics and the wind potential assessment of Ankara, Turkey[J]. Energy Sources, 2011, 33: 1291-1303.
- [5] 国家能源局. 国家能源局关于《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》公开征求意见的公告[EB/OL]. (2020-04-10) [2020-04-30]. http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm. [National Energy Administration. Announcement of the National Energy Administration on the Public Consultation on the “Energy Law of the People’s Republic of China(Draft for Comment)” [EB/OL]. (2020-04-10) [2020-04-30]. http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm.]
- [6] 钟章奇, 姜磊, 何凌云, 等. 基于消费责任制的碳排放核算及全球环境压力[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 422-459. [Zhong Z Q, Jiang L, He L Y, et al. Global carbon emissions and its environmental impact analysis based on a consumption accounting principle [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 422-459.]
- [7] Cassiano K M, Junior L A T, Souza R M D, et al. Hydroelectric energy forecast[J]. International Journal of Energy & Statistics, 2013, 1(3): 205-214.
- [8] Goyal M K, Singh D V, Meena A H. Geospatial and hydrological modeling to assess hydropower potential zones and site location over rainfall dependent Inland catchment[J]. Water Resources Management, 2015, 29(8): 2875-2894.
- [9] Rospriandana N, Fujii M. Assessment of small hydropower potential in the Ciwidey subwatershed, Indonesia: A GIS and hydrological modeling approach[J]. Hydrological Research Letters, 2017, 11(1): 6-11.
- [10] Ozturk H K. Present status and future prospects of hydroelectric energy in Turkey[J]. Energy Sources, 2004, 26(9): 829-840.
- [11] Anwarzai M A, Nagasaka K. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 150-160.
- [12] Effat H A, El-Zeiny A. Modeling potential zones for solar energy

2021年1月

- in Fayoum, Egypt, using satellite and spatial data[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2017, DOI: 10.1007/s40808-017-0372-2.
- [13] Lysen E H. The potential of solar electricity to reduce CO₂ emissions[J]. *Climate and Energy: The Feasibility of Controlling CO₂ Emissions*, 1989, 78-84.
- [14] Wang S F, Koch B. Determining profits for solar energy with remote sensing data[J]. *Energy*, 2010, 35(7): 2934-2938.
- [15] Gad A A, El-Zeiny A. Spatial analysis for sustainable development of El Fayoum and Wadi El Natrun desert depressions, Egypt with the aid of remote sensing and GIS[J]. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2016, 8(3): 1-18.
- [16] Bilgili M, Hassanzadeh R, Sahin B, et al. Investigation of wind power density at different heights in the Gelibolu peninsula of Turkey[J]. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization & Environmental Effects*, 2016, 38(4): 512-518.
- [17] Sahin B, Bilgili M. Wind characteristics and energy potential in Belen-Hatay, Turkey[J]. *International Journal of Green Energy*, 2009, 6(2): 157-172.
- [18] Al-Yahyai S, Charabi Y, Gastli A, et al. Assessment of wind energy potential locations in Oman using data from existing weather stations[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(5): 1428-1436.
- [19] Baban S M J, Parry T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK[J]. *Renewable Energy*, 2001, 24(1): 59-71.
- [20] Toklu E. Biomass energy potential and utilization in Turkey[J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 235-244.
- [21] Yokoyama S Y, Ogi T, Nalampoon A. Biomass energy potential in Thailand[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 18(5): 405-410.
- [22] Hansen A, Meyer-Aurich A, Prochnow A. Greenhouse gas mitigation potential of a second generation energy production system from short rotation poplar in Eastern Germany and its accompanied uncertainties[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 56: 104-115.
- [23] Nasruddin, Alharnid I, Daud Y, et al. Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 733-740.
- [24] Korkmaz E D, Serpen U, Satman A. Geothermal boom in Turkey: Growth in identified capacities and potentials[J]. *Renewable Energy*, 2014, 68: 314-325.
- [25] 张清, 张庆玉, 赵乔, 等. 沃尔特河流域水力资源理论蕴藏量计算及其空间分布研究[J]. *内蒙古水利*, 2019, (8): 20-23. [Zhang Q, Zhang Q Y, Zhao Q, et al. Calculation of theoretical reserves of hydraulic resources and its spatial distribution in the Walter River Basin[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2019, (8): 20-23.]
- [26] 董闯, 李晓丹, 李运龙, 等. 利用DEM计算河流水力资源理论蕴藏量的实例分析[J]. *西北水电*, 2020, (4): 22-25. [Dong C, Li X D, Li Y L, et al. Case study on calculation of theoretical reserves of river hydraulic resources by DEM[J]. *Northwest Hydropower*, 2020, (4): 22-25.]
- [27] 徐志, 马静, 贾金生, 等. 水能资源开发利用程度国际比较[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(1): 63-67. [Xu Z, Ma J, Jia J S, et al. International comparison of hydropower resources development[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(1): 63-67.]
- [28] 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1049-1054. [Li K, He F N. Analysis on mainland China's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1049-1054.]
- [29] 徐宗学, 赵芳芳. 黄河流域日照时数变化趋势分析[J]. *资源科学*, 2005, 27(5): 153-159. [Xu Z X, Zhao F F. Variation of sunlight radiation duration in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 153-159.]
- [30] 韦仕丽, 郑元春雷. 黔西南州太阳能资源开发利用条件分析[J]. *科技风*, 2018, (4): 180-180. [Wei S L, Zheng Y C L. Analysis on the development and utilization conditions of solar energy resources in Qianxinan Prefecture[J]. *Science and Technology Wind*, 2018, (4): 180-180.]
- [31] 梁玉莲, 申彦波, 白龙, 等. 华南地区太阳能资源评估与开发潜力[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(4): 481-492. [Liang Y L, Shen Y B, Bai L, et al. Assessment of solar energy resource and its exploitation potential in south China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(4): 481-492.]
- [32] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. *太阳能学报*, 1980, 1(1): 5-13. [Wang B Z, Zhang F G, Li L X. Solar energy resources and calculation in China[J]. *Acta Energetica Sinica*, 1980, 1(1): 5-13.]
- [33] 赵东, 罗勇, 高歌, 等. 我国近50年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(7): 96-102. [Zhao D, Luo Y, Gao G, et al. Essential characteristics of solar direct radiation over recent 50 years in China[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2009, 30(7): 96-102.]
- [34] 杨胜朋, 王可丽, 吕世华. 近40年来中国大陆总辐射的演变特征[J]. *太阳能学报*, 2007, (3): 5-10. [Yang S P, Wang K L, Lv S H. Regional characteristics of global solar radiation evolution in China over recent 40 years[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2007, (3): 5-10.]
- [35] 王炳忠. 中国太阳能资源利用区划[J]. *太阳能学报*, 1983, 4(3): 221-228. [Wang B Z. Solar energy resource division in China[J]. *Acta Energetica Sinica*, 1983, 4(3): 221-228.]
- [36] 姚伟. 太阳能利用与可持续发展[J]. *中国能源*, 2005, 27(2): 46-47. [Yao W. Solar energy utilization and sustainable development[J]. *Energy of China*, 2005, 27(2): 46-47.]

- [37] 李柯, 何凡能, 席建超. 中国陆地风能资源开发潜力区域分析[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1672-1678. [Li K, He F N, Xi J C. An analysis of utilization potential distribution of wind power in mainland China[J]. Resources Science, 2010, 32(9): 1672-1678.]
- [38] 张双益, 黄四维, 燕志婷, 等. 西藏措美高原风电场风能资源特性研究[J]. 风能, 2019, (5): 78-82. [Zhang S Y, Huang S W, Yan Z T, et al. Study on wind energy resource characteristics of wind power farm in Cuomei Plateau, Xizang[J]. Wind Energy, 2019, (5): 78-82.]
- [39] 张戈, 付俊峰, 王海军. 东南沿海五省海上风能资源开发潜质研究[J]. 海岸工程, 2018, 37(2): 80-86. [Zhang G, Fu J F, Wang H J. Study on the development potential of offshore wind energy resource in five southeast coastal provinces of China[J]. Coastal Engineering, 2018, 37(2): 80-86.]
- [40] 陈少雄, 刘杰锋, 孙正军, 等. 桉树生物质能源的优势、现状和潜力[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(B12): 119-128. [Chen S X, Liu J F, Sun Z J, et al. Superiority, situation and potential of eucalyptus for bioenergy[J]. Biomass Chemical Engineering, 2006, 40 (B12): 119-128.]
- [41] 何明雄, 胡启春, 罗安靖, 等. 人工湿地植物生物质资源能源化利用潜力评估[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 527-531. [He M X, Hu Q C, Luo A J, et al. Assessment of the constructed wetland plant biomass for energy utilization[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(4): 527-531.]
- [42] 赵思语, 耿利敏. 我国生物质能源的空间分布及利用潜力分析[J]. 中国林业经济, 2019, (5): 75-79. [Zhao S Y, Geng L M. Analysis of spatial distribution and utilization potential of biomass energy in China[J]. China Forestry Economy, 2019, (5): 75-79.]
- [43] 冯雪, 吴国春, 曹玉昆, 等. 生物质能源可利用潜力评价: 以黑龙江省重点国有林区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 55-62. [Feng X, Wu G C, Cao Y K, et al. Evaluation on the utilization potential of biomass energy: A case from key state-owned forest areas in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(6): 55-62.]
- [44] 陈永松. 黔西南州主要农作物秸秆理论资源潜力及县域分布特征[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(7): 91-94. [Chen Y S. Theoretical resource potential and county-level distribution characteristics of main crop straw in Qianxinan Prefecture[J]. Guizhou Agricultural Science, 2018, 46(7): 91-94.]
- [45] 胡俊文, 闫家泓, 王社教. 我国地热能的开发利用现状、问题与建议[J]. 环境保护, 2018, 46(8): 45-48. [Hu J W, Yan J H, Wang S J. The development and utilization of geothermal energy in China[J]. Environmental Protection, 2018, 46(8): 45-48.]
- [46] 朱卉. 漯河市浅层地热能资源量及开发利用潜力评价[J]. 能源环境保护, 2020, 34(4): 92-98. [Zhu H. Shallow geothermal energy resources in Luohe City and evaluation of development and utilization potential[J]. Energy and Environmental Protection, 2020, 34(4): 92-98.]
- [47] 周阳, 洪增林, 张卉, 等. 关中盆地浅层地热能赋存规律及资源量估算[J]. 中国地质调查, 2020, 7(2): 1-29. [Zhou Y, Hong Z L, Zhang H, et al. Occurrence rules and resource estimation of shallow geothermal energy in Guanzhong Basin[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(2): 21-29.]
- [48] Zhao X G, Wan G. Current situation and prospect of China's geothermal resources[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 651-661.
- [49] Li Z P, Yang L, Li S R, et al. The long-term trend analysis and scenario simulation of the carbon price based on the energy-economic regulation[J]. International Journal of Climate Change Strategies and Management, 2020, DOI: 10.1108/IJCCSM-02-2020-0020.
- [50] Suo C, Li Y P, Jin S W, et al. Identifying optimal clean-production pattern for energy systems under uncertainty through introducing carbon emission trading and green certificate schemes[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 299-316.
- [51] Razmi S F, Ramezani B, Behname M, et al. The relationship of renewable energy consumption to stock market development and economic growth in Iran[J]. Renewable Energy, 2020, DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.166.
- [52] Pang M Y, Zhang L X, Liang S, et al. Trade-off between carbon reduction benefits and ecological costs of biomass-based power plants with carbon capture and storage(CCS) in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 279-286.
- [53] Lawrence D, Fisher R A, Koven C D, et al. The community land model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, DOI: 10.1029/2018MS001583.
- [54] 唐小平, 黄桂林, 徐明. 青海省生态系统服务价值评估研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016. [Tang X P, Huang G L, Xu M. Research on the Evaluation of Ecosystem Services Value in Qinghai Province[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016.]
- [55] 中国气象数据网. 东亚区域大气驱动场再分析数据集[DB/OL]. (2018-01-01) [2020-11-16]. <http://tipex.data.cma.cn/tipex/expeditionData1/id/1.html>. [China Meteorological Data Network. East Asia Regional Atmospheric Driving Field Reanalysis Data Set[DB/OL]. (2018-01-01) [2020-11-16]. <http://tipex.data.cma.cn/tipex/expeditionData1/id/1.html>.]
- [56] Li T, Zheng X G, Dai Y J, et al. Mapping near-surface air temperature, pressure, relative humidity and wind speed over mainland China with high spatiotemporal resolution[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(5): 1127-1135.
- [57] Huang C C, Zheng X G, Tait A, et al. On using smoothing spline and residual correction to fuse rain gauge observations and remote sensing data[J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 410-417.

2021年1月

- [58] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC) [DB/OL]. (2018-12) [2020-07-17]. <http://www.resdc.cn/doi/doi.aspx?doiid=54>. [Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, et al. A Multi-Period Land Use and Land Cover Remote Sensing Monitoring Data Set in China(CNLUCC) [DB/OL]. (2018-12) [2020-07-17]. <http://www.resdc.cn/doi/doi.aspx?doiid=54>.]
- [59] 冉有华. 中国植被功能型图(1公里)[DB/OL]. (2019-10-11) [2020-07-17]. <http://www.crensed.ac.cn/portal/metadata/aa4460d1-b99a-4531-bd44-0d6509326762>. [Ran Y H. Functional Type Map of Vegetation in China (1 km) [DB/OL]. (2019-10-11) [2020-07-17]. <http://www.crensed.ac.cn/portal/metadata/aa4460d1-b99a-4531-bd44-0d6509326762>.]
- [60] Kourzeneva E, Asensio H, Martin E, et al. Global gridded dataset of lake coverage and lake depth for use in numerical weather prediction and climate modeling[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2012, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15640.
- [61] Choulga M, Kourzeneva E, Zakharova E, et al. Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modeling[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014, DOI: 10.3402/tellusa.v66.21295.
- [62] 地理国情监测云平台. 青海省DEM数据产品[DB/OL]. (2020-01-01) [2020-07-17]. <http://www.dsac.cn/DataProduct/Detail/20082026>. [Geographical Condition Monitoring Cloud Platform. Qinghai Province DEM Data Products[DB/OL]. (2020-01-01) [2020-07-17]. <http://www.dsac.cn/DataProduct/Detail/20082026>.]
- [63] 国家地球系统科学数据中心. GLASS 产品-叶面积指数 LAI_modis (1km)(2000-2018年) [DB/OL]. (2020-01-01) [2020-07-17]. <http://www.geodata.cn/data/index.html?word=LAI>. [National Earth System Science Data Center. GLASS products-Leaf Area Index LAI_modis (1km) (2000-2018)[DB/OL]. (2020-01-01) [2020-07-17]. <http://www.geodata.cn/data/index.html?word=LAI>.]
- [64] Li H Y, Leung L R, Getirana A, et al. Evaluating global streamflow simulations by a physically-based routing model coupled with the community land model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16 (2): 948-971.
- [65] 中华人民共和国水利部. 水利部关于批准发布水利行业标准的公告(水利水电工程等级划分及洪水标准)[EB/OL]. (2017-01-09) [2020-07-17]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/zfxgkml/201701/t20170123_966185.html. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Announcement of the Ministry of Water Resources on Approving and Issuing Water Conservancy Industry Standards (Water Conservancy and Hydropower Project Classification and Flood Standards) [EB/OL]. (2017-01-09) [2020-07-17]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/zfxgkml/201701/t20170123_966185.html.]
- [66] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于发布国家标准《水力发电工程地质勘察规范》的公告[EB/OL]. (2016-08-18) [2020-07-17]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201702/t20170224_230737.html. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Announcement of the Ministry of Housing and Urban-Rural Construction on the Promulgation of the National Standard "Code for Geological Investigation of Hydropower Engineering" [EB/OL]. (2016-08-18) [2020-07-17]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201702/t20170224_230737.html.]
- [67] Klein S A, Theilacker J C. An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1981, 103(1): 29-33.
- [68] 孙韵琳, 杜晓荣, 王小杨, 等. 固定式并网光伏阵列的辐射量计算与倾角优化[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(12): 1597-1601. [Sun Y L, Du X R, Wang X Y, et al. Calculation of solar radiation and optimum tilted angle of fixed grid connected solar PV array[J]. *Journal of Solar Energy*, 2009, 30(12): 1597-1601.]
- [69] 郭鹏, 申彦波, 陈峰, 等. 光伏发电潜力分析: 以山西省为例[J]. *气象科技进展*, 2019, 9(2): 78-83. [Guo P, Shen Y B, Chen F, et al. The analysis of PV electricity generation potential: A case study in Shanxi[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 9(2): 78-83.]
- [70] 王炳忠. 中国太阳能资源利用区划[J]. *太阳能学报*, 1983, 4(3): 3-10. [Wang B Z. Solar energy resource division in China[J]. *Acta Energy Solaris Sinica*, 1983, 4(3): 3-10.]
- [71] 寿陞扬, 王明, 陈二永. 我国太阳能资源的生态区域[J]. *生态经济*, 1992, (6): 40-44. [Shou B Y, Wang M, Chen E Y. Solar energy resources ecological areas over China[J]. *Ecological Economy*, 1992, (6): 40-44.]
- [72] 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1049-1054. [Li K, He F N. Analysis on mainland China's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1049-1054.]
- [73] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 中国未来风功率密度变化预估[J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 640-649. [Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C. Forecast of future changes in wind power density in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(4): 640-649.]
- [74] 蒋洁, 刘永学, 李满春, 等. 南海岛礁风能资源及风力发电评价: 基于 QuikSCAT 风场数据与 Landsat ETM+影像[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 139-147. [Jiang J, Liu Y X, Li M C, et al. Wind energy resources and wind power generation on islands and reefs in the South China Sea based on QuikSCAT wind data and landsat ETM+ images[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 139-147.]
- [75] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2002, (3): 87-91. [Han L J, Yan Q J, Liu X

- Y, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, (3): 87-91.]
- [76] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 62-67. [Zhong H P, Yue Y Z, Fan J W. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. Resources Science, 2003, 25(4): 62-67.]
- [77] Yuan Z, Wu C Z, Huang H, et al. Research and development on biomass energy in China[J]. International Journal of Energy Technology & Policy, 2002, DOI: 10.1504/IJETP.2002.000806.
- [78] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 288-291. [Peng L, Wang D Y. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing Municipality[J]. Transactions of the CSAE Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 288-291.]
- [79] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 311-319. [Gao D, Chen T B, Liu B, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 311-319.]
- [80] 中国林木生物质能源研究专题组. 第二章 中国林木生物质能源资源培育与发展潜力调查[J]. 中国林业产业, 2006, (1): 12-21. [China Forestry Biomass Energy Research Group. Chapter 2 investigation of China's forestry biomass energy resources cultivation and development potential[J]. China Forestry Industry, 2006, (1): 12-21.]
- [81] Yuan Z H, Wu C Z, Huang H, et al. Research and development on biomass energy in China[J]. International Journal of Energy Technology and Policy, 2002, (1): 108-144.
- [82] Li J J, Bai J, Ralph O. Assessment of Biomass Resource Availability in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.
- [83] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [Department of Industry and Transport Statistics. China Energy Statistics Yearbook 2004[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [84] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9-19. [Liu G, Shen L. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(1): 9-19.]
- [85] 自然资源部中国地质调查局. 青海省地热资源潜力评价与区划全面完成[EB/OL]. (2016-10-13) [2020-04-30]. http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201610/t20161013_408515.html. [China Geological Survey, Ministry of Natural Resources. The Evaluation and Regionalization of Geothermal Resources Potential in Qinghai Province Are Fully Completed[EB/OL]. (2016-10-13) [2020-04-30]. http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201610/t20161013_408515.html.]
- [86] 国家能源局. 2018年度全国电力价格情况监管通报[EB/OL]. (2019-11-05) [2020-04-30]. http://www.nea.gov.cn/2019-11/05/c_138530255.htm. [National Energy Administration. The 2018 National Electricity Price Regulatory Bulletin[EB/OL]. (2019-11-05) [2020-04-30]. http://www.nea.gov.cn/2019-11/05/c_138530255.htm.]
- [87] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Uses(AFOLU) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [88] Pace University Center for Environmental and Legal Studies, Oak Ridge National Laboratories for the U.S. Department of Energy. 1 kilowatt-hour generation methods[EB/OL]. (1990-12) [2020-07-17]. <https://blueskymodel.org/kilowatt-hour>.
- [89] Slater H, DeBoer D, 王席, 等. 2018年中国碳价调查[C]. 北京: 中国碳论坛, 2018. [Slater H, DeBoer D, Wang X, et al. 2018 Carbon Price Survey in China[C]. Beijing: China carbon Forum, 2018.]
- [90] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232. [Wang N L, Yao T D, Xu B Q, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [91] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, (1): 1-9. [Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, (1): 1-9.]
- [92] 雷立钧, 荆哲峰. 国际碳交易市场发展对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, (4): 30-36. [Lei L J, Jing Z F. Development of international carbon market and its enlightenment for Chinese carbon market construction[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, (4): 30-36.]
- [93] 青海省人民政府. 青海清洁能源发展研究院挂牌成立 首次发布清洁能源发展白皮书[EB/OL]. (2019-03-24) [2020-12-27]. <http://www.qh.gov.cn/zwgk/system/2019/03/24/010326984.shtml>. [People's Government of Qinghai Province. Qinghai Clean Energy Development Research Institute Was Established to Issue Clean Energy Development White Paper for the First Time[EB/OL]. (2019-03-24) [2020-12-27]. <http://www.qh.gov.cn/zwgk/system/2019/03/24/010326984.shtml>.]
- [94] 青海省人民政府. 我省发布首个《青海能源发展报告(2018)》[EB/OL]. (2019-06-14) [2020-11-16]. <http://www.qh.gov.cn/zwgk/system/2019/06/14/010333190.shtml>. [People's Government of Qinghai Province. Our Province Issued the First "Qinghai Energy Development Report(2018)" [EB/OL]. (2019-06-14) [2020-11-16]. <http://www.qh.gov.cn/zwgk/system/2019/06/14/010333190.shtml>.]

Clean energy power generation potential and value in Qinghai Province

MAO Aihan¹, LI Faxiang², YANG Siyuan², HUANG Ting¹, HAO Ruifang³, LI Sihan¹, YU Deyong¹

(1. Human and Environmental Sustainability Research Center, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Sanjiangyuan National Park Administration, Xining 810001, China;

3. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the progress of science and technology, the development and use of clean energy resources have become an important way to alleviate the shortage of traditional energy resources and improve the ecological environment. Quantitative assessment of the potential of clean energy resources will help relevant government departments to make scientific decisions on their development and use. Based on model simulation and spatial analysis methods, this study evaluated the potential and value of five major clean energy resources including solar energy, wind energy, hydroelectric potential energy, biomass energy, and geothermal energy in Qinghai Province, and obtained the spatial and temporal distribution pattern and the amount of the main clean energy resources in the province. The results show that: (1) Temporally, the power generation potential of clean energy was increasing year by year from 2000 to 2018. The spatial distribution pattern changed only slightly, and the power generation potential was stable. From a spatial point of view, the clean energy power generation potential in the west of Qinghai Province is relatively high, while that in the east is relatively low; on the prefectural (city) scale, Yushu Prefecture and Haixi Prefecture are in the high value area of clean energy power generation potential, while Xining City is in the low value area; on the scale of ecological function area, the Sanjiangyuan area is in the high value area of clean energy power generation potential, while the Qilian Mountains area is in the low value area. (2) From the perspective of clean energy structure, from 2000 to 2018, Qinghai Province has abundant hydropower resources, with an average power generation potential of 233.841 billion kWh, followed by biomass energy, geothermal energy, solar energy, and wind energy, and the proportion of clean energy in energy consumption is gradually increasing in practical application. (3) The average value of clean energy potential in Qinghai Province from 2000 to 2018 was 188.775 billion yuan. The economic value of clean energy obtained in the future will gradually increase with the development of China's carbon market and the increase of clean energy development and use intensity. This study provided an important basis for Qinghai Province to understand the current status and future prospect of clean energy resource use in the province, as well as to formulate policies for the development and use of clean energy resources.

Key words: clean energy; solar energy; wind energy; hydroelectric potential energy; biomass energy; geothermal energy; ecological civilization; Qinghai Province