

清洁电力生产的生态效益评价方法研究

李佳蕾^{1,2}, 陈小彤³, 陈星³, 金铭鑫^{1,2}, 马志远³, 赵子健³, 杨方³, 孙然好^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京市 海淀区 100085;

2. 中国科学院大学, 北京市 石景山区 100049;

3. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Method for Assessing Ecosystem Service Values of Clean Electricity Generation

LI Jialei^{1,2}, CHEN Xiaotong³, CHEN Xing³, JIN Mingxin^{1,2}, MA Zhiyuan³, ZHAO Zijian³,
YANG Fang³, SUN Ranhao^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100085, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Shijingshan District, Beijing 100049, China;

3. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: Developing clean electricity to replace fossil fuels is an important way to tackle global climate change. Different electricity generation methods have different impacts on the ecological footprint, influencing regional and global ecosystem services. Despite much attention, there is still a lack of quantitative methods to evaluate the ecological benefits of electricity generation. In this study, the impact of power bases on ecosystem services was comprehensively evaluated from the ecological footprint, through which we established an ecological benefit assessment model for clean electricity generation. Based on the distribution of different types of power bases globally in 2050 of GEIDCO, the following results are observed. (1) The affected land area of typical clean power bases (hydro, wind, and solar power) is quantified, which are 5.29×10^5 , 3.39×10^3 , and 1.94×10^4 km², respectively. (2) The development of hydropower bases has the largest impact on the regulation services in the Middle East and North Africa (MEA). The development of wind and solar power bases has the largest impact on supply services in North America and South Asia; however, it has little impact on ecosystem services in MEA. In 2050, the ecological benefits of clean electricity generation will have the highest value in Centrally planned Asia and China and the lowest in the Pacific OECD. It can be suggested to strengthen the construction of clean electricity for MEA and reduce expansion in Latin America and the Caribbean. (3) Compared with traditional power, 1 GWh of clean power generated annually has an ecological

benefit of approximately 440 000 US dollars. In this study, we built a clean electricity ecosystem services value evaluation model, which has characteristics of cross-region and cross-type comparison, and provided a new way to evaluate ecological benefits in the future development of energy evaluation.

Keywords: energy development; connectivity; ecological value; ecological footprint; ecological benefits

摘 要: 清洁电力替代化石能源是应对全球气候变化的重要途径, 不同电力生产方式的生态足迹差异会影响区域和全球生态系统服务。清洁电力生产的生态效益评价尽管很受重视, 但是尚缺少一种定量方法。从电力生产基地直接和虚拟占地方面评价生态足迹, 结合4种生态系统服务功能综合评价电力生产基地的生态影响, 构建针对清洁电力生产的生态效益评价方法。基于全球能源互联网发展合作组织2050年全球清洁电力基地规划情况的研究发现: ①水能、风能和光伏基地对土地利用的影响面积分别为52.9万、0.339万和1.94万 km²; ②发展水电、风电和光伏发电对拉丁美洲和加勒比地区的调节服务、北美和南亚的供给服务影响最大, 中东和北非发展风电和光伏发电对整体生态系统服务功能影响不大, 全球清洁电力生产生态效益最大的区域为中国及周边, 最小的为澳大利亚、新西兰和日本; ③相较传统火电, 每1 GWh清洁电力带来约44万美元的生态效益。所构建的清洁电力生态系统服务价值评估模型将生态足迹的直接和间接影响进行统一, 具有跨区域、跨类型对比的特性, 为未来的能源发展生态效益评价提供了一种新思路。

关键词: 能源发展; 互联互通; 生态价值; 生态足迹; 生态效益

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0503001); 全球能源互联网集团有限公司科技项目资助 (52450018000W)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFC0503001); GEIGC Science and Technology Project (52450018000W)。

0 引言

21世纪以来,世界能源需求迅猛增长,导致能源供需矛盾日益严峻,石油、煤炭、天然气等化石能源的使用量居高不下。根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)的数据,2018年全球电力生产中,化石燃料发电所占比例仍占64%以上,能源清洁发展逐渐得到重视,但仍面临严峻挑战^[1-2]。目前,大多数环境问题都是由化石燃料为基础的能源利用系统造成的^[3-4],如空气污染、酸雨、全球变暖、生物多样性丧失和土地沙漠化等。尽管化石燃料尚能满足当前的使用需求,但长期而言,其储量终究有限^[5],可持续发展转型迫在眉睫。

为了推进可持续发展,2015年9月召开的联合国可持续发展峰会审议通过了《变革我们的世界:2030年可持续发展议程》,并提出了该议程的核心内容——可持续发展目标(Sustainable Development Goal, SDG)。其中,第七项目标是确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源,其主要衡量指标包括通电率、清洁的烹饪燃料和技术的获取、燃料燃烧发电的CO₂排放和可再生能源在终端能源消费总量中的比例^[6]。获得清洁、可担负和可靠的能源一直是世界可持续发展的基础,而发展可再生能源和清洁电力是实现这一基础的最有效途径之一^[7-8]。为了防止气候变化带来的严重后果,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)建议,到2050年,全球至少80%的能源供应必须基于可再生能源,这一目标给许多国家带来严峻挑战^[9]。为应对挑战,能源生产方式亟需改变,尤其是电力生产方式。已经有一些研究根据本国的清洁电力发展潜力拟定了未来能源发展情景^[10-16],这些能源发展情景通常针对某种特定能源和某一国家或地区^[13-16],或者直接利用国家尺度数据推广至全球^[10],鲜有对全球能源发展情景系统、详实的规划。

2015年9月26日,中国在联合国发展峰会上倡议探讨构建全球能源互联网,推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求。全球能源互联网(Global Energy Interconnection, GEI)实质是“智能电网+特高压电网+清洁能源”,通过能源与信息高度融合,实现能源高效清洁利用,特高压与智能电网的结合可以在支撑清洁电力大规模发展的同时降低输电损耗、提高输电效率,是能源转型的重要支持体系^[17]。对以清洁能源为基础的能源系统进行生态效益评价,将有助于理解

清洁电力的在生产过程中带来的生态影响,从而更有针对性地进行规划调整。

目前针对能源电力未来生产情景的生态环境影响的系统评价中,最常见的是针对过去或拟定的电力需求,预估带来的经济成本和环境因子变化^[18]。然而,这些研究针对的环境指标通常较为繁杂,比如碳排放、土地占用、水资源消耗、资金成本、劳动力成本等^[10, 15-16, 18]。对于综合指标,则通常是将这些指标进行排名或打分,从而达到对比的目的^[19-21]。而且这些研究通常止步于单纯的电力生产带来的环境物质变化,对后续产生的生态系统及其服务功能影响则很少进行评估。目前电力生产对生态系统服务影响的研究,主要集中于单一发电方式或某一主要生态系统服务功能的研究^[22-23],并未针对电力生产带来的生态系统服务影响进行全面的价值评估。

生态系统服务(ecosystem services)是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[24],包括供给服务(如提供食物和水)、调节服务(如控制洪水和疾病)、文化服务(如精神、娱乐和文化收益)以及支持服务(如维持地球生命生存环境的养分循环)等^[25]。人类生存与发展所需要的资源归根结底都来源于自然生态系统,它不仅为人类提供食物、医药和其他生产生活原料,还创造与维持了地球的生命支持系统,形成人类生存所必需的环境条件。同时,自然生态系统还为人类生活提供了休闲、娱乐与美学享受。生态系统服务功能研究经过二十多年的发展,其研究重心逐步由内涵定义分类与定量评价方法转向维持复合生态系统相对平衡的权衡与集成方法,以及制度和治理创新的演变,研究对象也相应由单一生态系统扩展到资源、环境、生态和经济子系统等耦合而成的区域复合系统^[24-26]。然而,生态系统服务价值的量化研究内容和采用的方法多样且差别较大,已有研究往往仅针对单一要素、单一系统或单一尺度开展,如某一区域的农田生态系统、城市生态系统等^[27-28]。将电力生产与生态系统服务价值评估相结合,可以对不同种类能源发电带来的环境影响进行多角度的定量评估,从而为未来能源的发展与规划提供参考。

本研究通过调研全球各大区域能源发展目标与规划方案,识别能源发展影响生态的关键要素,采用生态系统服务价值评估等理论方法,梳理分析传统火电、风电、太阳能发电、水电的生产过程对生态系统服务的正面及负面影响,建立综合考虑环境保护、生

态友好、能源保障的能源环境生态系统服务功能评估模型，以全球能源互联网规划情景为案例，通过与传统火电情景损耗的生态系统服务价值进行对比，计算清洁电力替代产生的生态效益。本研究将生态足迹与生态系统服务价值核算结合，创建了清洁电力的生态系统服务评估模型，并总结了清洁电力生产对不同区域、分项生态服务价值的影响规律。本研究所开发的模型具有可重复性和计算方便性，可为后续的能源与生态研究提供研究范式。研究结论将为区域能源与环境可持续发展相关政策制定实施提供技术与数据支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区域与数据来源

本研究能源电力情景数据来源于全球能源互联网发展合作组织等基于MESSAGE模型模拟的全球能源互联网能源规划。该规划基于能源系统分部门、分环节的多种能源技术应用与发展，从全球宏观经济社会发展出发，综合考虑现有能源利用技术和创新技术应用，设计提出具有较高电气化水平的能源需求规划方案，通过与MESSAGE模型相互耦合，优化计算能源与经济发展相互匹配的、经济效益最佳的能源规划方案，实现运用全球能源互联网理念对全球能源系统的优化设计^[29]。本研究使用的是2050年清洁电力生产装机容量规划数据（包含水力发电、风力发电和太阳能发电），包括空间分配格局和装机容量^[30]，所涉及区域的2050年装机容量如图1所示。

MESSAGE模型将全球划分为11个区域，同一区域内的国家在气候条件、地势地貌类型、经济社会情况等方面有相似性（AFR：撒哈拉以南的非洲；CPA：中国及周边；EEU：中欧和东欧；FSU：俄罗斯和中亚；LAC：拉丁美洲和加勒比地区；MEA：中东和北非；NAM：北美；PAO：澳大利亚、新西兰和日本；PAS：其他亚太地区；SAS：南亚；WEU：西欧。各区域具体国家见<https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE-model-regions.en.html>）。本研究也依据此分类方法将国家分组，分析全球各区域的清洁电力-生态系统服务评估结果，以降低区内国家差异。目前的规划缺乏中欧和东欧区域（EEU）的具体大型电站规划，所以研究范围不计入该区。土地覆被类型的数据利用ESA CCI（European Space Agency Climate Change Initiative）的2018年全球土地利用与覆被（land use and land cover, LULC）类型数据。

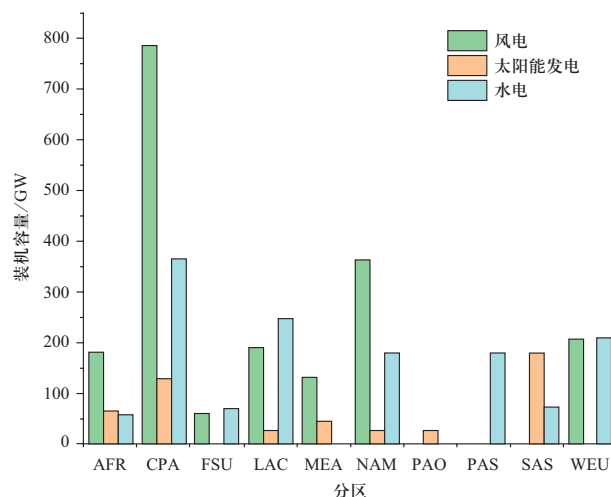


图1 2050年清洁电力生产规划的装机容量

Fig. 1 Clean power installed capacity in 2050

1.2 生态效益评价方法

已经有文献证实，清洁电力生产在全生命周期中的CO₂排放低于传统火电^[21, 31-32]。与自身的碳排放相比，清洁电力由于土地占用所带来的影响更大^[33]，但这些影响相比于化石能源发电带来的生态影响有较大差距^[33]。清洁电力生产基地的建立会占用新的土地，从而使原生LULC改变，不同种类的发电基地位置不同，占用的LULC类型和面积不同，而不同的LULC有着不同的生态系统服务功能和对应的生态系统服务价值。通过对这些清洁电力生产需要新占用的土地面积和类型进行衡量，就可以计算出生产这些电力所损耗的生态系统服务类型与价值，从而得到清洁电力生产的生态环境影响。与同等发电量的传统火电的碳排放影响对比，得出清洁电力生产的生态效益。整体研究思路与技术路线如图2。

1.2.1 生态足迹计算方法

根据未来电力规划，不同清洁能源装机容量增长明显，直接占地规模不断扩大，而量化全球尺度电力基地影响的土地类型和面积比较困难。通常清洁能源发电的装机容量或发电量和电站的占地类型和面积相关^[20]。目前已有少数研究对各种发电技术的单位装机容量或发电量与占用或影响的土地面积的定量关系进行统计^[10, 14, 18, 33-36]，但这些统计数据处于较大区间、主观选择性较强。通过对这些文献的筛选，本研究选择Klein等依据大量文献统计的各类发电厂的直接占地足迹的中位值^[36]，得到代表电站每增加单位装机容量所占用的土地面积的生态足迹因子 F_j （表1）。

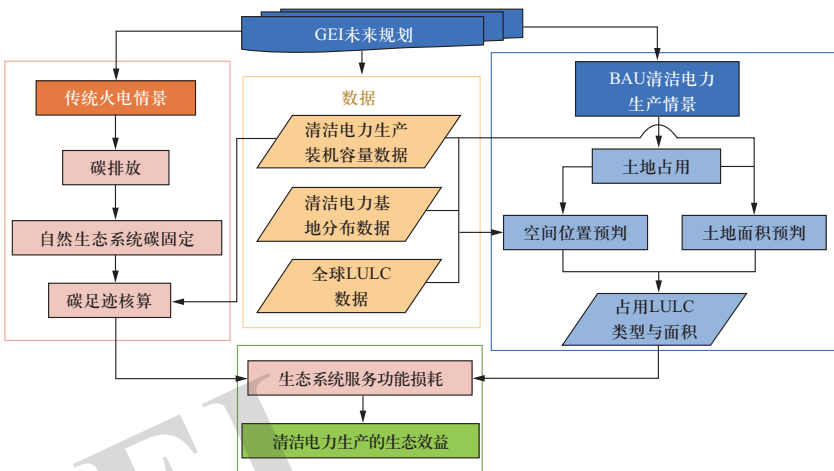


图2 清洁电力生产的生态价值评估方法

Fig. 2 Ecological value assessment method of clean electricity generation

注: GEI, 全球能源互联网 (global energy interconnection); BAU, 政策延续情景 (business as usual); LULC: 土地利用与土地覆被 (land use and land cover)

表1 清洁电力生产的生态足迹因子
Table 1 Land factor of clean electricity generation

清洁电力技术	生态足迹因子(F_j)/(hm ² ·GW ⁻¹)
陆地风力发电	205.97
海上风力发电	0.52
太阳能光伏发电	4 139.1
水力发电	38 631.6

根据清洁电力基地的分布与装机容量规划和全球2018年土地覆被类型分布,全球清洁电力生产影响的土地利用类型和面积分布如图3所示。首先,针对风电、水电、太阳能发电大型基地,根据全球能源互联网大型基地布局,判断大型基地所处地理位置;其次,提取并统计基地周边地区的土地覆被类型;最后,根据区内各电站装机容量比例量化土地覆被的占用情况。此外,如果未来电力生产所需为单一土地覆被类型时,则假定为100%的占用比例,如海上风电基地土地覆被类型为100%的海洋,荒漠光伏发电基地,土地覆被类型为100%的裸地。清洁电力生产需要占用多种土地利用类型时,采用以下方法估计:①对于水电站,利用关键河流的沿岸或流域的土地覆盖和利用类型的统计数据(本研究利用主干河流两侧10 km的缓冲带统计);②对于风电场和太阳能电站,利用所在区域的整体土地类型结构进行估算,统计区域一般为省或州。

火力发电会排放大量的温室气体(主要为CO₂),该影响已经超过了火电厂占地对生态带来的影响^[35],吸收这些温室气体需要占用不同类型的自然生态系

统,多数研究基于生态足迹来衡量吸收CO₂所需要的自然生态面积。生态足迹(有些研究称为碳足迹)指的是吸收相应温室气体所需要的虚拟土地^[37],全球1 kWh火电的生态足迹为3.583 7×10⁻⁵ hm²林地、2.863 6×10⁻⁵ hm²草地、3.723 9×10⁻⁵ hm²海洋、5.287 7×10⁻⁶ hm²湿地、8.193 0×10⁻⁶ hm²淡水水域、8.159 6×10⁻⁶ hm²耕地和7.877 3×10⁻⁶ hm²低生产力地(稀疏植被)^[38]。由于此处生态足迹因子的单位为hm²/kWh,后续计算将上述清洁电力的装机容量(GW)换算为一年的发电量(GWh)再进行对比。此处认为清洁电力在生产过程中CO₂排放极少,可以忽略不计^[10]。

本研究所指的生态足迹定义为清洁电力基地占用的土地和火电的碳固定所需的虚拟土地,最终的生态足迹的计算公式为

$$A_i = \sum_{j=1}^M (L_{ij}^C \times L_j^U) \quad (1)$$

$$L_{ij}^C = \sum_{m=1}^J \left[\left(\frac{P_{jm}}{\sum_{m=1}^J P_{jm}} \right) \times Q_{ijm} \right] \quad (2)$$

$$L_j^U = T_j \times F_j \quad (3)$$

式中: A_i 为分区内所有清洁电力发电基地的第*i*种土地利用类型的面积,即清洁电力生产的生态足迹, hm²; M 为分区内所有清洁电力发电类型的数目; L_{ij}^C 为分区内*j*类清洁发电基地的第*i*种土地类型的占比, %; P_{jm} 为分区内第*m*座*j*类清洁发电基地的装机容量, GW; Q_{ijm} 为分区内第*m*座*j*类清洁发电基地的第*i*类土地覆被类型的占比, %; J 为分区内清洁发电基地的总数;

L_j^U 为分区内 j 类清洁发电基地的总占地面积, hm^2 ;
 $T_j = \sum_{m=1}^j P_{jm}$, 为分区内 j 类清洁发电基地的总装机容量,

GW; F_j 为分区内 j 类清洁发电基地的生态足迹因子, hm^2/GW 。

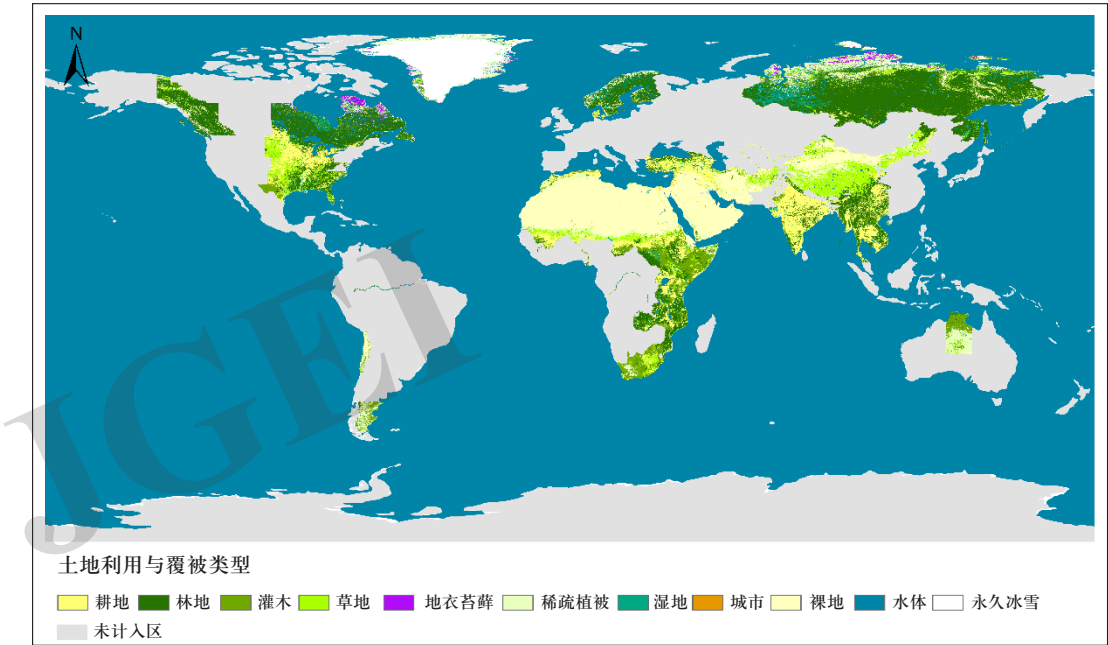


图 3 全球清洁电力生产影响的土地利用与覆被类型分布

Fig. 3 Distribution of land use and land cover types affected by global clean electricity generation

1.2.2 生态系统服务价值计算方法

Costanza等和de Groot等总结的单位土地面积的生态系统服务价值是常用的国际标准^[39-40]。以de Groot的研究作为主体, Costanza的耕地服务价值作为补充, 根据草地生态系统服务价值和耕地生态系统服务价值之比的等比例换算, 得到各种土地利用与覆被类型每年的单位面积生态系统服务价值 (表2), 美元为2007年物价水平。发展清洁电力和火电损耗的生态系统服务价值的计算公式为

$$E^V = \sum_{i=1}^I (A_i \times V_i) \tag{4}$$

$$E^C = \sum_{i=1}^n (E_i^F \times V_i) \tag{5}$$

式中: E^V 为分区发展清洁电力损耗的生态系统服务价值, 美元; E^C 为分区内发展火电损耗的生态系统服务价值, 美元; I 为清洁电力占用的土地利用类型总数; V_i 表示分区第 i 种土地利用类型的单位面积生态系统服务价值, 美元/ hm^2 ; A_i 为分区内所有清洁发电基地的第 i 种土地利用类型的面积, hm^2 。对于火电, 其 A_i 由生态足迹 E_i^F 代替, n 为火电占用的生态足迹的类型数目。

表 2 生态系统服务价值

Table 2 Value of ecosystem services

土地利用与覆被类型	美元/ hm^2				
	供给服务	调节服务	栖息地服务	文化服务	总经济价值
耕地	3275	0	2292	0	5567
热带森林	1828	2529	39	867	5263
温带森林	671	491	862	990	3014
灌木	253	51	1277	7	1588
草地	1305	159	1214	193	2871
内陆湿地	1659	17 364	2455	4203	25 681
海洋	102	65	5	319	491
淡水河湖	1914	187	0	2166	4267

1.2.3 清洁电力生产的生态效益核算

通过量化清洁发电的生态服务价值损耗, 可以与传统火电对比, 两者影响的生态系统服务价值的差值定义为清洁电力生产的生态效益 (ecological benefit), 其计算公式为

$$E_k = E_k^C - E_k^V \tag{6}$$

式中: E_k 为第 k 分区内清洁电力的生态效益, 美元;

E_k^C 为第 k 分区内发展火电损耗的生态系统服务价值,美元; E_k^V 为第 k 分区发展清洁电力损耗的生态系统服务价值,美元;美元均为2007年物价水平。本研究选择2050年的规划装机容量和发电量来探究清洁电力生产带来的生态效益,清洁电力基地的总装机容量为3752 GW,总发电量为11 970 TWh。

2 结果与讨论

2.1 清洁电力生产的生态足迹

全球能源互联网规划情景中,2050年全球水电、风电、太阳能发电基地的占地面积分别为529 203 km²、3394 km²和19 405 km²,清洁电力生产总生态足迹约为55万km²。为方便后续计算与分析,根据不同大型发电基地的地理位置、发电类型和发电量,结合其所处区域的LULC,统计出不同分区的清洁电力生态足迹当量(表3),即每个分区每发展1 GW的电力所产生的不同土地覆被类型的生态足迹。根据发电类型来看,风电与太阳能发电都是占用生态资源比较少的发电方式,LULC类型较少且多集中为某一种类型。风电基地占用的生态系统类型主要为海洋和裸地(荒

漠),各区平均占用比例为27.40%和22.19%;太阳能发电基地主要占用荒漠和灌木生态系统,各区平均占用比例为43.45%和15.32%。相较而言,水电站的生态足迹比风电和太阳能发电的生态足迹类型多、面积大,占用的植被较多,其占用的生态系统主要为林地和耕地,各区平均占用比例为41.45%和26.45%。

针对各个分区而言,在生产同样多的清洁电力的情况下,占用耕地最多的是南亚地区(SAS)的水电基地,占用林地、灌木和地衣苔藓最多的是北美地区(NAM)的水电基地,占用草地最多的是中国及周边地区(CPA)的水电基地,占用裸地(荒漠)最多的是撒哈拉以南的非洲(AFR)的水电基地,占用湿地最多的是拉丁美洲和加勒比地区(LAC)的水电基地,占用水体(海洋)最多的是俄罗斯和中亚(FSU)的风电基地。然而,如果将这些清洁电力转换为传统火电,吸收2050年因火电生产排放的CO₂,需要占用的总生态足迹约1575万km²,其中包括429万km²林地、343万km²草地、446万km²海洋、63万km²湿地、98万km²淡水水域、98万km²耕地和98万km²低生产力地(稀疏植被),火电的生态足迹显著大于清洁电力的生态足迹。

表3 清洁电力生产的生态足迹当量
Table 3 Ecological footprint based on per unit clean electricity generation

		hm ² /GW									
分区	发电技术	耕地	林地	灌木	草地	稀疏植被	地衣苔藓	裸地	湿地	永久冰雪	水体
AFR	风电	33.91	34.51	73.02	24.17	9.66	0.00	26.29	2.08	0.00	0.00
	太阳能发电	598.45	361.82	2 101.00	742.71	313.18	0.00	21.93	0.00	0.00	0.00
	水电	10 051.77	10 626.22	2 288.72	1 721.11	471.48	0.00	6 118.20	7 354.10	0.00	0.00
CPA	风电	25.42	11.80	0.76	75.09	11.82	0.00	81.07	0.00	0.00	0.00
	太阳能发电	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4 139.10	0.00	0.00	0.00
	水电	8 244.29	9 787.02	193.19	17 237.81	363.86	0.00	2 708.13	97.29	0.00	0.00
FSU	风电	0.11	3.43	0.05	0.02	0.00	0.00	3.31	0.00	0.00	0.50
	太阳能发电	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4 139.10	0.00	0.00	0.00
	水电	4 699.55	17 679.58	2 532.29	3 542.38	4 465.43	0.00	4 016.15	1 696.22	0.00	0.00
LAC	风电	2.58	8.24	80.53	5.15	2.64	0.00	3.06	0.00	0.00	0.00
	太阳能发电	9.24	14.60	942.59	56.96	1 308.70	0.00	1 807.00	0.00	0.00	0.00
	水电	1 861.10	21 593.90	793.73	19.02	22.57	0.00	18.04	14 323.23	0.00	0.00
MEA	风电	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	205.97	0.00	0.00	0.00
	太阳能发电	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4 139.10	0.00	0.00	0.00
NAM	风电	107.26	38.36	0.81	59.21	0.04	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00
	太阳能发电	998.46	1 601.44	448.69	1 079.66	1.28	0.00	9.57	0.00	0.00	0.00
	水电	791.71	26 296.58	2 900.86	1 169.60	3 487.97	2 337.18	983.94	663.76	0.00	0.00

续表

分区	发电技术	耕地	林地	灌木	草地	稀疏植被	地衣苔藓	裸地	湿地	永久冰雪	水体
PAO	太阳能发电	3.46	234.46	1 418.56	278.63	2 127.58	0.00	76.41	0.00	0.00	0.00
PAS	水电	16 553.01	17 921.26	2 161.67	740.52	7.14	0.00	16.72	298.24	0.00	0.00
SAS	太阳能发电	2 976.84	756.31	160.77	150.21	8.55	0.00	55.03	31.39	0.00	0.00
	水电	28 466.81	3 774.74	337.61	4 049.74	174.96	0.00	1 065.48	762.25	0.00	0.00
WEU	风电	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.49
	水电	11 066.94	20 424.53	229.01	1 610.33	2 503.24	5.37	786.51	2 005.69	0.00	0.00

注：AFR：撒哈拉以南的非洲；CPA：中国及周边；FSU：俄罗斯和中亚；LAC：拉丁美洲和加勒比地区；MEA：中东和北非；NAM：北美；PAO：澳大利亚、新西兰和日本；PAS：其他亚太地区；SAS：南亚；WEU：西欧。

2.2 清洁电力生产对生态系统服务价值的影响

为了后续研究的计算便利性，计算了清洁电力基地每增加1 GW装机容量所损耗的生态系统服务价值 E^V （表4）。可以看出发展水电所损耗的生态系统服务价值在3种清洁电力中是最多的，其次是太阳能发电。而太阳能发电和风力发电对生态系统的供给服务和栖息地服务破坏较多，水电对供给服务和调节服务破坏较多，主要体现在太阳能发电基地对农田和荒漠生态系统的占用、风电基地对海洋和农田生态系统的占用，以及水电基地对农田和森林生态系统的占用。对于未来的太阳能发电和风力发电基地的配置，如果要减少对供给服务、尤其是粮食供给造成的损失，应尽量避免占用农田区。虽然占用荒漠和海洋的生态足迹造成的生态系统服务价值损耗较少，但其对于栖息地的破坏值得注意^[22-23]。发展屋顶太阳能可以代替部分大型太阳能基地，因为其不占用额外的土地，仅仅占用城市建筑的屋顶^[33, 41]，从而可以减少损耗的生态系统服务价值。

各个分区内，每发展1 GW的清洁电力，生态系统服务价值总损耗最多的区域为拉丁美洲和加勒比地区（LAC），其次为撒哈拉以南的非洲（AFR），可以看出清洁能源发展的主力军是发展中国家。其中，LAC的水电损耗生态系统服务价值最多，影响最大的为调节服务，这主要由于水电基地的建立对LAC中的热带雨林和湿地产生破坏，影响对该地区乃至全球的生态调节，如气体调节、气候调节、水文调节等。由于损耗生态系统服务价值的地域主要在发展中国家乃至贫困地区，要针对其发展前景给予一定的资金与环境改善支持^[42]，以可持续地进行基地建设。生态系统服务价值总损耗最少的区域为中东和北非地区（MEA），其损耗的生态系统服务价值几乎为0，因

为其主要的清洁发电类型为风力发电和太阳能发电，根据规划，其占用的主要为裸地，所以破坏的生态系统服务几乎为0。而生态系统服务功能受风电基地和太阳能发电基地影响最大的区域分别为北美地区（NAM）和南亚地区（SAS），两地区的生态系统服务功能类型受影响最大的均为供给服务，其次为栖息地服务，经过对其生态足迹的分析发现，其占用的耕地均较多，这会对耕地的粮食供给和农田相关的物种栖息地提供等产生影响。

表 4 清洁电力生产损耗的生态服务价值当量
Table 4 Ecological service value based on per unit clean electricity generation

		美元/GW				
发电技术	分区	供给服务	调节服务	栖息地服务	文化服务	总经济价值
风电	AFR	1.88×10^5	6.06×10^4	2.35×10^5	4.81×10^4	5.31×10^5
	CPA	1.89×10^5	1.78×10^4	1.61×10^5	2.62×10^4	3.94×10^5
	FSU	2.75×10^3	1.72×10^3	3.30×10^3	3.56×10^3	1.13×10^4
	LAC	5.06×10^4	2.58×10^4	1.15×10^5	8.70×10^3	2.00×10^5
	MEA	0	0	0	0	0
	NAM	4.54×10^5	2.83×10^4	3.52×10^5	4.94×10^4	8.84×10^5
	WEU	50.41	32.12	2.47	157.63	242.63
	AFR	3.70×10^6	4.03×10^5	5.27×10^6	5.16×10^5	9.89×10^6
	CPA	0	0	0	0	0
	FSU	0	0	0	0	0
太阳能发电	LAC	3.70×10^5	9.40×10^4	1.29×10^6	3.02×10^4	1.79×10^6
	MEA	0	0	0	0	0
	NAM	5.87×10^6	9.81×10^5	5.55×10^6	1.80×10^6	1.42×10^7
	PAO	8.91×10^5	2.32×10^5	2.36×10^6	2.96×10^5	3.78×10^6
	SAS	1.14×10^7	2.49×10^6	7.32×10^6	8.18×10^5	2.20×10^7

续表

发电技术	分区	供给服务	调节服务	栖息地服务	文化服务	总经济价值
水电	AFR	5.51×10^7	1.33×10^8	5.53×10^7	4.18×10^7	2.85×10^8
	CPA	5.63×10^7	9.25×10^6	4.87×10^7	1.34×10^7	1.28×10^8
	FSU	3.53×10^7	3.88×10^7	3.77×10^7	2.53×10^7	1.37×10^8
	LAC	6.96×10^7	3.03×10^8	4.13×10^7	8.16×10^7	4.45×10^8
	NAM	2.36×10^7	2.48×10^7	3.12×10^7	2.58×10^7	1.09×10^8
	PAS	8.90×10^7	5.07×10^7	4.30×10^7	1.69×10^7	2.00×10^8
	SAS	1.07×10^8	2.34×10^7	7.26×10^7	7.72×10^6	2.10×10^8
	WEU	5.54×10^7	4.51×10^7	5.01×10^7	2.65×10^7	1.80×10^8

注：AFR：撒哈拉以南的非洲；CPA：中国及周边；FSU：俄罗斯和中亚；LAC：拉丁美洲和加勒比地区；MEA：中东和北非；NAM：北美；PAO：澳大利亚、新西兰和日本；PAS：其他亚太地区；SAS：南亚；WEU：西欧。

2.3 清洁电力生产的生态效益

通过表4，可以将清洁电力的生态系统服务价值的计算公式简化为

$$E^V = \sum_{j=1}^r (T_j \times V_j)$$

(7)

式中： E^V 为分区内发展清洁电力损耗的生态系统服务价值，美元； T_j 为分区内第 j 类清洁发电的总装机容量，GW； V_j 为表4中的第 j 类清洁发电对应的生态服务价值当量，美元/GW； r 为清洁电力发电类型总数。式（7）与表4相结合可以为后续更深入的能源规划与生态评估研究提供模型支持。

在得到了清洁电力生产的生态系统服务价值损耗后，为了与传统火电的生态系统服务价值损耗对比，选择等同于清洁电力在2050年的发电量（约11 970 TWh）来计算火电的生态系统服务价值损耗。计算结果如表5所示，清洁电力生态效益明显高于传统火电，其节省的生态系统服务经济总价值高达5.27万亿美元，其中供给服务、调节服务、栖息地服务和文化服务价值分别约为1.56万亿、1.74万亿、0.93万亿和1.04万亿美元。这意味着在2050年，全球平均每生产1 GWh清洁电力，可以带来约44万美元的生态效益，其中包括的供给服务、调节服务、栖息地服务和文化服务效益分别为13万、14万、8万和9万美元。由上述结果可以看出，利用清洁电力替代传统火电是更为可持续的生产方式，可以带来生态系统服务价值。其中生态效益最多的为供给服务和调节服务，这反映了发展清洁能源对提高原材料供给、改善全球变暖、控制全球气候变化带来直接的支持。但相较其他的生态系统服务功能

类型，带来的栖息地服务生态效益是最少的，这是清洁替代过程中需要注意的地方，在清洁电力基地建设中应注意避开保护区、生物迁徙路径等生态敏感区。带来生态效益较少的还有文化服务，在野外建立电站可能会原生态系统的景观与视觉效果造成影响^[36]，所以对清洁电力基地的选址应尽量避免观赏区，不对原生景观造成破坏。

表5 不同能源发电类型的生态效益

Table 5 Ecological benefits of different electricity generation types

亿美元

	供给服务	调节服务	栖息地服务	文化服务	总经济价值
水电	-823.34	-1 129.53	-624.34	-427.71	-2 888.87
风电	-3.57	-0.40	-3.18	-0.49	-7.64
太阳能发电	-23.19	-4.80	-17.51	-1.92	-47.42
火电	-16 413.94	-18 486.57	-9 909.17	-10 851.30	-55 661.61
清洁电力生态效益	15 563.84	17 351.83	9 264.14	10 421.18	52 717.68

对2050年全球清洁电力生产的生态效益进行分析，可以发现总生态效益最多的区域为中国及周边地区（CPA），约为17 666亿美元，其中水电总生态效益约为6164亿美元，是清洁电力中生态效益最多的。总生态效益最少的区域为澳大利亚、新西兰和日本（PAO），约为126亿美元。总生态效益最少的发电类型为俄罗斯及中亚地区（FSU）的光伏发电，约为12亿美元。由2.2节可知，中东和北非地区（MEA）发展清洁电力（包括风电和太阳能光伏发电）是损耗生态系统服务较少的区域，其在2050年预计将获得2504亿美元的生态效益，说明该区域清洁电力目前发展欠缺，但未来发展潜力巨大。

上述结果表明，清洁电力的生态足迹和损耗的生态系统服务价值与传统火电相比均是数量级的减少。根据Costanza等的研究^[39]，2011年全球生态系统服务总价值估计为125万亿~145万亿美元（以2007年美元计算），本文核算的清洁电力生态效益约为5.27万亿美元，可为全球节约3.63%~4.22%的生态系统服务价值。尤其是风电损耗的生态系统服务价值是3种清洁电力中最少的，是最值得考虑发展的清洁能源。水力发电虽然占用的生态系统服务功能是3种清洁电力中最多的，但其有大量已建立的基地，所以对未来的生态系

统破坏程度有限。

未来清洁电力发展损耗生态系统服务的区域集中在发展中、乃至贫困国家内(如撒哈拉以南的非洲区域),但这些区域距离实现清洁电力大量生产的目标还有较大差距。由于其目前的经济水平有限,有必要对这些国家提供一定的资金与技术支持,并且注意这些区域的栖息地与耕地的占用问题,尽量减少发展清洁电力对其原有生境造成的影响。这不仅可以推动全球能源与电力可持续发展,也可以为缓解能源紧张、控制全球气候变化提供支持。

3 结论与展望

本研究根据全球土地覆被、能源生产和规划数据,建立了全球清洁电力生产的生态服务价值评估方法。本方法具有客观性、可操作性,可以进行全球不同区域的对比分析。与传统的能源环境承载力评估相比,本方法融合了生态足迹与生态系统服务功能,使得能源生产影响的生态效益量化成为可能。

清洁电力生产能够促进土地利用的优化,提升生态系统服务价值。2050年每生产1 GWh清洁电力,可以带来约44万美元的生态效益,其中包括的供给服务、调节服务、栖息地服务和文化服务效益分别为13万、14万、8万和9万美元。由于在中东和北非地区(MEA)发展风电和太阳能发电对生态系统服务功能影响不大,可以加强该地区的清洁电力建设;2050年全球清洁电力生产带来生态效益最大的区域为中国及周边地区(CPA),最小的区域为澳大利亚、新西兰和日本(PAO);发展水电基地对拉丁美洲和加勒比地区(LAC)的生态系统服务功能有较大影响,尤其是调节服务,水电建设时应减少在该区域的扩张;风电基地和太阳能发电基地对供给服务和栖息地服务影响较大,建设时要考虑对耕地和物种栖息地的保护。

清洁电力可以有效促进经济社会可持续发展,通过本研究的量化方法,可以对不同类型、不同区域的清洁电力生产影响进行客观对比。一方面可以在选择清洁发电类型时作为参考,在太阳能发电、风电和水电等之间进行权衡;另一方面也可以评价不同区域清洁电力基地建设的适宜性,为选址提供参考。

清洁电力生产的生态效益评价受限于当前现状的输入数据,未来情景的变化衡量还需要进行更多工作,如考虑生态系统服务价值当量、清洁能源发电的效率提升和未来其他能源利用情景的变化。此外,清

洁电力生产的生态影响可以概括为电能生产、电能传输和电能消费环节,本研究侧重于电能生产环节。考虑到跨区域的社会经济和人口背景,这种影响的边际效应会更加复杂。清洁电力全生命周期的生态足迹和生态效益需要进一步量化和评估,从而将全生命周期的生态效益作为能源管理的基础,为能源互联互通提供科学依据。

本研究主要目的是提出量化清洁电力生产对生态系统服务功能带来的影响的新思路,但其对于数据输入较为敏感,不同的能源情景和清洁电力基地选址会影响输出结果,包括生态系统服务价值当量参数也需要根据不同区域进一步校准。后续研究可针对不同的研究目的对输入数据进行优化与调整,进一步提高模拟精度。

参考文献

- [1] GAURAV N, SIVASANKARI S, KIRAN G, et al. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73: 205-214.
- [2] ALIZADEH R, SOLTANISEHAT L, LUND P D, et al. Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method[J]. *Energy Policy*, 2020, 137: 111174.
- [3] 张士宁, 马志远, 杨方, 等. 全球可再生能源发电减排技术及投资减排成效评估分析[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(4): 328-338.
ZHANG Shining, MA Zhiyuan, YANG Fang, et al. Assessment of carbon emission reduction and costs of global renewable energy investment[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(4): 328-338(in Chinese).
- [4] MA Zhiyuan, ZHANG Shining, HOU Fangxin, et al. Exploring the driving factors and their mitigation potential in global energy-related CO₂ emission[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 413-422.
- [5] ALIZADEH R, LUND P D, SOLTANISEHAT L. Outlook on biofuels in future studies: a systematic literature review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110326.
- [6] SACHS J, SCHMIDT-TRAUB G, KROLL C, et al. Sustainable development report 2019[R]. New York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network(SDSN), 2019.
- [7] CHU S, MAJUMDAR A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. *Nature*, 2012, 488(7411): 294-303.
- [8] 王永真, 朱轶林, 康利改, 等. 计及能值的中国电力能源系统可持续性综合评价[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(1):

- 19-27.
- WANG Yongzhen, ZHU Yilin, KANG Ligai, et al. comprehensive sustainability evaluation of China's power system based on emergy analysis[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 19-27(in Chinese).
- [9] ACHEAMPONG M, YU Q Y, ERTEM F C, et al. Is Ghana ready to attain sustainable development goal (SDG) number 7?—A comprehensive assessment of its renewable energy potential and pitfalls[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 408.
- [10] JACOBSON M Z, DELUCCHI M A. A path to sustainable energy by 2030[J]. *Scientific American*, 2009, 301(5): 58-65.
- [11] JACOBSON M Z, DELUCCHI M A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1154-1169.
- [12] HAND M M, BALDWIN S, DEMEO E, et al. Renewable electricity futures study. volume 1. Exploration of high-penetration renewable electricity futures[R]. United States: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [13] JACOBSON M Z, DELUCCHI M A, BAZOUIN G, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for the 50 United States[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(7): 2093-2117.
- [14] MOHAN A. Whose land is it anyway? Energy futures & land use in India[J]. *Energy Policy*, 2017, 110: 257-262.
- [15] DALE A, PEREIRA DE LUCENA A, MARRIOTT J, et al. Modeling future life-cycle greenhouse gas emissions and environmental impacts of electricity supplies in Brazil[J]. *Energies*, 2013, 6(7): 3182-3208.
- [16] BUKHARY S, AHMAD S, BATISTA J. Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3288-3305.
- [17] HUANG Qili. Insights for global energy interconnection from China renewable energy development[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 2-12.
- [18] MCDONALD R I, FARGIONE J, KIESECKER J, et al. Energy sprawl or energy efficiency: Climate policy impacts on natural habitat for the United States of America[J]. *PLoS One*, 2009, 4(8): e6802.
- [19] RISTIC B, MAHLOOJI M, GAUDARD L, et al. The relative aggregate footprint of electricity generation technologies in the European Union (EU): A system of systems approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 143: 282-290.
- [20] MAHLOOJI M, GAUDARD L, RISTIC B, et al. The importance of considering resource availability restrictions in energy planning: What is the footprint of electricity generation in the Middle East and North Africa (MENA)?[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 135035.
- [21] EVANS A, STREZOV V, EVANS T J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 1082-1088.
- [22] GRODSKY S M, HERNANDEZ R R. Reduced ecosystem services of desert plants from ground-mounted solar energy development[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(12): 1036-1043.
- [23] KLAIN S C, SATTERFIELD T, SINER J, et al. Bird killer, industrial intruder or clean energy? perceiving risks to ecosystem services due to an offshore wind farm[J]. *Ecological Economics*, 2018, 143: 111-129.
- [24] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, ZHAO Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640(in Chinese).
- [25] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- FU Bojie, YU Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J]. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9(in Chinese).
- [26] COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [27] POWER A G. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [28] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem services in urban areas[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [29] 全球能源互联网发展合作组织, 国际应用系统分析研究所, 世界气象组织. 全球能源互联网应对气候变化研究报告[R]. 北京: 2019.
- [30] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网研究与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [31] VARUN, BHAT I K, PRAKASH R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 1067-1073.
- [32] TURNEY D, FTHENAKIS V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 3261-3270.
- [33] FTHENAKIS V, KIM H C. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6/7): 1465-1474.
- [34] THOMAS A, RACHERLA P. Constructing statutory energy goal compliant wind and solar PV infrastructure pathways[J]. *Renewable Energy*, 2020, 161: 1-19.
- [35] IOANNIDIS R, KOUTSOYIANNIS D. A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact[J]. *Applied Energy*, 2020, 276: 115367.

- [36] KLEIN S J W, WHALLEY S. Comparing the sustainability of US electricity options through multi-criteria decision analysis[J]. *Energy Policy*, 2015, 79: 127-149.
- [37] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1729-1735.
XIE Hongyu, CHEN Xiansheng, LIN Kairong, et al. The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1729-1735(in Chinese).
- [38] 方恺, 董德明, 林卓, 等. 基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2900-2909.
FANG Kai, DONG Deming, LIN Zhuo, et al. Calculation method of energy ecological footprint based on global net primary productivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2900-2909(in Chinese).
- [39] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [40] DE GROOT R, BRANDER L, VAN DER PLOEG S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.
- [41] YUE C D, HUANG G R. An evaluation of domestic solar energy potential in Taiwan incorporating land use analysis[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(12): 7988-8002.
- [42] JEULAND M, OHLENDORF N, SAPARAPA R, et al. Climate implications of electrification projects in the developing world: A systematic review[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 103010.

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-02-19。



李佳蕾

作者简介:

李佳蕾 (1997), 女, 博士研究生, 研究方向为全球变化与生态系统服务, E-mail: lijialei97@163.com。

陈小彤 (1993), 女, 博士, 研究方向为大气环境、气候变化、经济-能源-气候-环境系统分析等, E-mail: xiaotong-chen@geidco.org。

陈星 (1988), 女, 博士, 研究方向为能源规划、气候变化、环境系统分析等, E-mail: xing-chen@geidco.org。

金铭鑫 (1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为景观格局变化的生态效应评价, E-mail: mxjin_st@rcees.ac.cn。

马志远 (1991), 女, 博士, 研究方向为低碳电力系统规划、气候变化、环境能源耦合影响等, E-mail: zhiyuan-ma@geidco.org。

赵子健 (1992), 女, 博士, 研究方向为大气环境、气候变化、能源规划等, E-mail: zijian-zhao@geidco.org。

杨方 (1981), 女, 博士, 研究方向为全球能源发展战略规划、气候变化、环境承载力评价等, E-mail: fang-yang1@geidco.org。

孙然好 (1981), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为景观生态学、生态系统服务、生态安全与环境健康等。通信作者, E-mail: rhsun@rcees.ac.cn。

(责任编辑 李锡)