

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙仡, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

光伏电站建设对陆地生态环境的影响：研究进展与展望

田政卿¹, 张勇¹, 刘向¹, 陈生云^{1,2}, 柳本立³, 吴纪华^{1*}

(1. 兰州大学生态学院, 草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 随着全球能源消耗的快速增长, 环境将进一步恶化, 各国减排的竞争将更加激烈, 而利用太阳能作为清洁能源的光伏发电对于实现地球碳中和具有重要战略意义。陆地生态系统中的集中式光伏电站大范围覆盖地球表面, 导致土地利用发生变化, 对地表能量平衡和降水的再分配产生显著影响, 进而改变土壤养分循环和植物生产力, 并最终带来明显的生态环境效应。通过回顾近20年来国内外光伏电站生态环境影响研究的相关文献, 综述了光伏电站建设对微气候、土壤和动植物等的影响强度和方向, 以及对陆地生态系统功能的潜在影响。光伏电站可以通过调节微气候因子中的太阳辐射强度、空气温湿度、风速和风向等, 进一步影响植物生产力、土壤抗蚀性和土壤碳固存等多项生态系统功能。尽管已有文献报道中有关光伏电站建设对陆地生态系统的影响并不一致, 但总体而言, 可以提高植被盖度和植物生产力; 特别在荒漠等生态系统中可在一定程度上改善生态环境。目前, 尽管有大量研究报道了光伏电站对生态系统可能具有的效应, 但实验性论据尚不充分, 对生态系统功能影响机制的研究更为少见。在后续的工作中, 可进一步关注光伏电站对生态环境影响的区域差异性, 以及对生态系统功能潜在的影响途径, 结合生态效应为光伏电站建设区域的生态保护与修复提供依据, 并针对潜在的生态风险制定相应预案措施。

关键词: 光伏电站; 生态效应; 微气候因子; 植物多样性; 土壤生态系统

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0239-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301152

Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect

TIAN Zheng-qing¹, ZHANG Yong¹, LIU Xiang¹, CHEN Sheng-yun^{1,2}, LIU Ben-li³, WU Ji-hua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the rapid growth of global energy consumption, the environment will further deteriorate, and the competition among countries to reduce emissions will become more intense. Photovoltaic power generation using solar energy as a clean energy source is of strategic importance for achieving a carbon-neutral planet. Therein, centralized photovoltaic power stations in terrestrial ecosystems cover the earth's surface, which leads to changes in land use and has a significant effect on the surface energy balance and precipitation regimes, altering soil nutrient cycling and plant productivity, and ultimately significantly affects ecosystem functions and services. By synthesizing relevant studies on this topic over the past 20 years, we summarized the effects of photovoltaic power station construction on microclimate, soil, flora and fauna, and potential changes in terrestrial ecosystem functions. Overall, the photovoltaic power stations improved the quality of the soil condition, especially in harsh environments, and increased the vegetation coverage. In addition, photovoltaic power stations could affect ecosystem functions including plant productivity, soil erosion resistance, and soil carbon sequestration by regulating microclimatic factors such as solar radiation intensity, air temperature and humidity, wind speed, and wind direction. Although numerous studies have anticipated the potential effect of photovoltaic power stations on ecosystem structure and functions, empirical evidence remains scarce. Therefore, more studies focusing on the regional variability of the ecological impacts of photovoltaic power stations and the potential pathways of photovoltaic power stations affecting ecosystem functions are needed in the future. Improving the understanding of the ecological effects of photovoltaic power stations may help to provide a basis for ecological protection and restoration.

Key words: photovoltaic power station; ecological effect; microclimate factor; plant diversity; soil ecosystem

太阳能作为一种清洁可再生能源, 是替代石油、天然气和煤炭等传统能源最为理想的能源类型之一^[1]。光伏发电原理是根据“光生伏特效应”将太阳辐射能转化为电能, 是一种新型太阳能利用模式^[2]。目前, 全球光伏发电总装机容量已超过1 000 GW, 约占全球发电总装机容量份额的1%^[3]。仅2021年全球光伏发电装机容量已达175 GW, 预计到2100年光伏发电在全球电力供应的占比将达到20%~29%, 因此光

伏发电对于加快形成清洁能源利用新格局和双碳目标的实现具有重要战略意义^[4,5]。传统能源的过度消

收稿日期: 2023-01-30; 修订日期: 2023-03-20

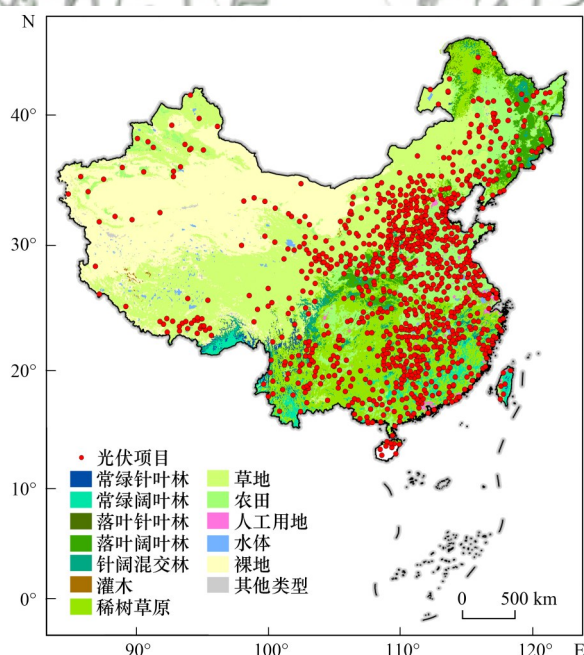
基金项目: 甘肃省自然科学基金重点项目(22JR5RA396); 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2021-sp51); 国家重点研发计划项目(2022YFB4202102)

作者简介: 田政卿(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏电站建设对生态系统多功能性的影响, E-mail: 220220932401@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wjh@lzu.edu.cn

耗导致严重的能源危机和温室效应,而使用可再生能源代替化石燃料能够有效减排降碳,进而缓解气候危机^[6].为应对气候变暖、臭氧层空洞和生物多样性锐减等全球性挑战,各国正致力于光伏发电等清洁能源技术的开发与利用^[7].根据国际能源署(IEA)的报告,以上清洁能源利用将可减少70%的全球碳排放量^[8].

目前,我国可再生能源事业发展迅速,包括光伏发电在内的新能源将成为我国实现能源结构优化与“双碳”目标的主力军,并且在各类陆地生态系统中均有分布(图1)^[9].我国北方地区普遍具有日照时间长、太阳辐射强和地势相对平坦等建设集中式光伏电站的优势区位条件^[10].北方沙漠和戈壁等可能是今后一段时期我国集中式光伏电站建设的重点区域.但这些地区往往原生植被生长情况较差,属于生态脆弱区,而且目前正面临着人类活动加剧和气候变化的双重压力^[11].集中式光伏电站大范围覆盖地球表面,改变地表形态,导致土地利用发生变化,影响局地辐射条件和地表能量平衡;而光伏电站也可能在建设中和建设后对局地微气候和植物、动物与微生物的生长、活动以及生命周期产生不同程度影响,并最终导致固碳潜力等生态系统功能发生改变^[12,13].研究光伏电站的综合生态环境效应对于全球和我国快速推进光伏电站建设过程中的选址确定、环境影响评估及生态修复技术开发等均具有重要意义.



地图基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)

4619标准地图制作,底图无修改

图1 2020年中国集中式光伏电站分布示意

Fig. 1 Distribution of China's centralized photovoltaic power stations in 2020

光伏电站中的光伏组件可以改变扩散辐射与直接辐射的比例,而植物光合速率会受到光合有效辐射的影响^[14];因此,光合有效辐射的减少可能会导致光伏组件下植物的光合速率降低^[15,16].然而,这取决于所在地的光合有效辐射通量.在一些光合有效辐射较高并存在光抑制和光损伤的地区^[17],由光伏组件导致的光合有效辐射降低反而有利于植物光合作用,从而提高植物生产力.光伏电站内较高的植物生产力可以使更多的凋落物进入到土壤中去参与生态系统物质循环,并直接影响土壤微生物动态和间接影响动物群落分布^[18].

此外,光伏组件还可能降低土壤温度^[19],提高土壤含水率^[6],导致土壤理化环境发生改变^[20].土壤温湿度一方面影响植物生产力和生物多样性,同时又受到植被变化的反馈作用影响^[21].此外,光伏组件导致的土壤理化环境因子变化,还会影响土壤有机质组成、团聚体结构和矿物保护机制等,共同影响生态系统碳固存功能(图2).

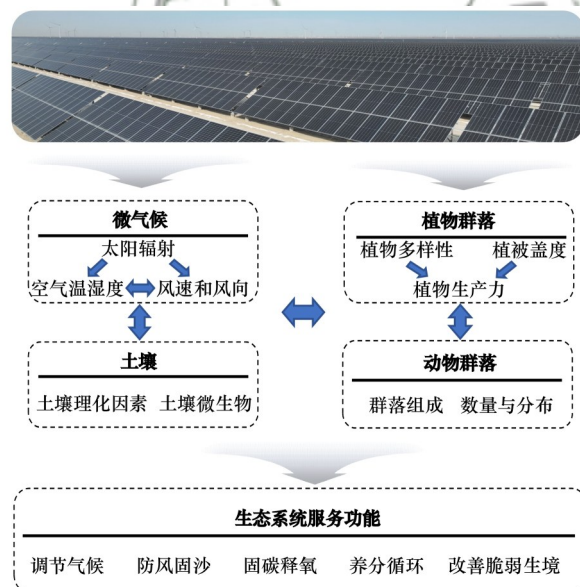


图2 光伏电站生态效应示意

Fig. 2 Schematic diagram of the ecological impacts of photovoltaic power stations

生态系统固碳能力是陆地生态系统最重要的功能之一,并且土壤有机碳是陆地生态系统碳库最重要的组分^[22,23].在区域尺度上,光伏组件以其独特构造能够显著改变光照、温度和湿度等微气候条件,进而引起地上植物群落、地下生物类群和土壤生物化学过程等一系列变化.上述过程既影响土壤有机碳的输入和输出,也影响土壤有机碳的生物地球化学循环稳定机制.以上因素整合在一起,共同影响生态系统服务功能,包括调节气候、防风固沙、固碳释氧、养分循环和生境改善等(图2).因此,预测光伏电

站对生态环境及生态系统功能产生影响的直接或间接途径成为当前研究的重点方向。

近年来,有关光伏电站对生态环境影响的讨论备受关注。光伏电站对环境因子影响的研究主要集中在地表太阳辐射、空气温湿度、风速和风向等方面^[24],关于光伏电站如何影响地表植物多样性、动物分布、微生物活性和土壤碳排放等方面并未取得一致的研究结论。通过回顾近20年来国内外光伏电站生态效应研究的相关文献,综述光伏电站建设对微气候、土壤、植物和动物等因子的影响强度和方向,以及对陆地生态系统功能的潜在影响,旨在为评估光伏电站对生态系统多功能性的影响,并为光伏电站建设的未来发展提出可能关注的研究方向。

1 光伏电站对局地微气候的影响

集中式光伏电站能够有效影响地表反照率、地表辐射强迫^[25]和下垫面陆面参数特征^[26],进而对空气能量传递过程产生影响,导致地表太阳辐射、空气温湿度、风速和风向等微气候因子发生变化。目前,关于光伏电站对微气候影响的研究主要来自于野外实地观测、卫星遥感和模型分析。

1.1 地表太阳辐射

光伏发电不同于传统能源发电,通常不会产生温室气体或其他有毒有害气体;但是光伏阵列在进行能量转化的同时会对局地地表辐射分配过程产生干扰,进而影响站内和周边区域的温度、湿度等气候条件^[27]。太阳短波辐射到达地表后,一部分会被地表吸收,一部分会被反射回大气中,剩余部分以感热和潜热的形式重新辐射^[24]。因此,大面积的光伏电站会在表面形成暗区,减少地表反照率^[28],降低来自光伏组件下方土壤的直接短波和长波辐射通量^[29]。青海共和荒漠光伏电站的研究显示,站内与站外辐射各分量日变化特征明显,夏季站内的向上短波辐射低于站外,而冬季则相反;总体上站内年均向上短波辐射低于站外^[30]。在美国红石光伏电站的观测数据表明,站内吸收的净短波辐射增加,加之光伏组件自身的属性和特殊结构,引起站内感热通量较周边区域明显增加^[29]。

1.2 空气温湿度

不同地点的光伏电站所处环境条件和下垫面特征有所区别,因此不同地点温度和相对湿度对光伏电站产生的响应各不相同^[31]。此外,地表不同类型植被所引起的感热、潜热情况各有差别,多种因素综合导致陆表能量变化过程产生差异^[28]。在荒漠地区,光伏电站总体上能够起到增加空气温度和降低空气湿度的效应。这是由于空气具有比热容低的特性,在光

伏组件接收太阳辐射的过程中,一部分能量被空气分子吸收,因此具有增温降湿的效应。有研究表明,光伏组件的架设会在地表产生“热岛效应”,使局地气候变暖^[29,32]。目前,关于大规模光伏装置产生“热岛效应”的观点包括:①光伏组件具有遮阴作用,因此能够减少地表土壤吸热并影响光伏组件下方植物的蒸腾作用^[33];②光伏组件虽然厚度较薄且单位面积热容量较小,但其能够同时向上和向下散发热辐射,因此站内温度通常高于站外,且此效应在白天更为明显;③光伏组件吸收或反射地表的长波辐射,阻碍地表在夜间的冷却过程^[34]。与此同时,有研究发现光伏组件可能因光伏阵列安装倾角或者微地貌特征不同而形成“冷岛效应”^[35,36]。在干旱戈壁地区,以甘肃酒泉东洞滩光伏电站为例,研究表明光伏组件具有遮阴作用和对降水再分配的作用,且集群化光伏组件的架设能缓解地表水分蒸散,有效降低地表温度,导致空气相对湿度增加,局地降水增多,最终使微气候更为湿润^[37]。

光伏电站还会影响空气温湿度的日夜变化^[38]。Armstrong等^[19]发现光伏电站会导致空气温度和湿度的日变化幅度均有不同程度的降低。有研究表明白天站内等效气温低于站外,对于局地空气具有降温效应,但在夜晚则具有保温效应^[24]。这是因为光伏电板自身会与环境发生热传递,在傍晚时空气温度会产生时滞效应,进而导致电站内空气温度仍然稍高于电站周边环境^[39]。观测数据表明,相较于电站外,美国图森光伏电站内距地面2.5 m处的年平均气温增高2.4℃,其中夜间升温幅度为3~4℃^[34]。此外,夜间光伏电站内气温值也可能低于站外,这可能是受到白天站内外地表能量收支差异的影响^[27]。光伏电站对空气温湿度的季节性变化动态也会产生影响^[38]。来自草原生态系统的案例表明:夏季光伏电板遮阴区比未遮阴区和周边区域的温度低约5℃,同时空气相对湿度降低;而冬季未遮阴区比遮阴区和周边区域的温度低约1.7℃^[19]。

1.3 风速和风向

光伏组件安装后会显著改变当地原有风速廓线特点,进而对近地面风速产生影响。有研究表明,当大气层处于中性层结条件下,近地面风速与高度关系基本上满足对数变化规律;同时近地面粗糙度是对数风速廓线的重要参量,反映出风速与下垫面形态结构的关系^[40]。因此,在不同地区安装光伏组件的倾斜角度和偏转角度要求有所不同,通常而言纬度越高则光伏组件倾斜角越大,而偏转角度则通常是向南略偏西^[35]。此外,地表热力不均衡所形成的气压梯度,以及戈壁地区大面积沙面裸露和长期干旱少

雨都会导致沙尘暴天气的形成^[24]。在戈壁地区修建大规模光伏基地能够显著影响当地热力环流过程,有助于转化和消耗沙尘暴与风流沙的势能,改变气流方向与强度,降低风速。同时,光伏组件还通过覆盖土地和改变气流与风速的方式影响和调控风蚀程度。据统计,光伏阵列最多能直接损耗掉近 50% 的风速,因而具有类似屏障的阻沙固沙效果以及重定向效应^[41]。有研究表明,在青海共和荒漠光伏电站建造后,原本的东北风转为东风,导致当地风向更为单一,同时能够有效降低风速,减少大风天气出现的频率^[42]。通过光伏组件对风沙的阻挡作用,光伏电站建设能够显著增加地表粗糙程度从而起到阻碍风速和降低输沙率的作用,并最终降低沙尘暴的发生频率和强度^[37]。因此,科学合理利用光伏阵列对风速和风向的影响,对于西北戈壁地区防风固沙具有积极意义。

2 动植物对光伏电站的响应

光伏电站会改变植物群落的基本特征,对包括植被盖度、植物株高及密度、均匀度、丰富度和生物量等方面产生影响。有研究指出,在毛乌素沙漠光伏电站,相较于站外,站内植被盖度提高约 7 倍,物种丰富度增加约 2 倍,生物量增加约 23 倍^[12]。光伏电站还能够影响当地植被生长状况,进而对野生动物种群的分布产生影响^[43]。此外,光伏电站可以通过增加降水截留和减少土壤水分蒸发等途径促进植被恢复^[44];而较高的植物多样性能够进一步增强植物生产力和固碳能力,从而“盘活”整个生态系统^[13]。

2.1 植被盖度

光伏电站总体上有利于耐阴植物的生存,光伏阵列的阻风固沙与遮阴增湿作用促进站内植被盖度的提高,特别是改善沙漠地区原本脆弱的生态环境。一方面,光伏组件能够增加空间异质性;另一方面,不同植物物种之间存在竞争作用;上述两方面共同有助于提高某些特定植物的盖度。有研究表明,在草原上建造光伏阵列导致组件下方植物多样性下降,羊草获得了更宽的生态位,这导致光伏组件下方的羊草盖度显著提高^[45]。此外,在干旱地区光伏电站建成后 2 年内,植被盖度从自然条件下的 13.4% 增加到 90.5%^[12],在光伏组件下方有利于形成蒸发量低、土壤含水量高和温度适宜的生境,有利于扩大植被盖度,并有效抵抗外界环境变化。青海共和荒漠电站的研究显示,在电站建成后 3 年内,站内植被盖度呈现逐年增加趋势,且相较于周边区域,站内植被盖度提高了 83.9%^[46]。基于遥感的数据表明,从 2011 ~ 2018 年,中国 12 大沙漠中光伏项目占地面积达到 102.56

km²,而其中 30.80 km²土地上的植被盖度由于光伏电站的建设而得到显著提升^[47]。

2.2 植物多样性

光伏电站总体上对植物多样性的影响为,植物多样性在光伏组件未遮阴区最高,遮阴区次之,周边区域最低。在草原生态系统,有研究发现光伏组件下方植物多样性指数、均匀度指数表现出在电板前檐和后檐大于电板正下方长期遮阴处,这说明光伏组件自身截留降水的作用对植物群落产生了重要影响^[45,48]。电板前后檐不完全遮阴情景下植物多样性显著低于电板正下方长期遮阴区域的植物多样性,这说明遮阴能够通过减少水分增发量,增加土壤含水率以维持植物多样性^[45]。总之,光伏组件的前檐、后檐和正下方往往会由于电板本身对降水的截留与聚集,或电板对阳光的遮蔽作用等,使土壤和空气的温湿度在空间上形成差异化分布并最终影响植物多样性、生产力乃至生态系统功能^[49]。但是,目前尚不清楚光伏组件上述效应的方向和强度在不同生态系统、不同降水格局、不同规模风光电站和不同大小的光伏组件下的差异程度。此外,某些条件下光伏电站可能会对当地植物多样性起到负面影响。例如,在光伏电站运营期间更换的废旧蓄电池、零部件以及废油等均会对当地环境产生一定程度的负面影响,同时电站本身存在发生事故的风险,特别是泄漏的废油可能会降低植物多样性^[50]。

2.3 植物生产力

光伏电站总体上能够提升当地植物生产力,这是因为光伏电站建设能够增加站内土壤含水率和土壤养分含量,进而有效提高植物群落的生产力^[51]。有研究表明,在靖边光伏电站的未遮阴区植被生物量最大,遮阴区次之,周边区域最小,其中未遮阴区和遮阴区的生物量干重较周边区域分别提高了 144% 和 127%^[52]。在青海共和光伏电站建成后,站内植被地上生物量和地下生物量均呈现逐年增加的趋势,且站内植被地上生物量显著高于站外^[46]。此外,也有研究表明在沙漠和戈壁地区,光伏组件正下方的植被地上生物量较电板前后檐和周边区域相对较低,这可能与光伏组件下方的空气温度变化有关;周边区域植被地上生物量在沙漠地区与电站距离呈反比,在戈壁地区则随着电站距离的增加,生物量先降低后提高;这可能与光伏电站对局地微气候以及下垫面特征的影响有关^[53]。

2.4 野生动物

光伏电站在施工阶段的爆破、大型设备运行以及施工噪声会导致电站周边的野生动物受到惊吓,尤其对迁移鸟类影响较大^[24]。鸟类在季节性迁徙过

程中有撞击到电站内发电装置而死亡的可能,而光伏组件本身的反光也会对鸟类带来危机^[54]。此外,光伏电站可能导致生境破碎化,破坏原有生态系统的稳定性,影响动物种群的竞争、迁徙、捕猎和繁衍过程,并最终导致动物数量和多样性下降。例如,荒漠地区光伏电站建设可能改变当地敏狐(*Vulpes macrotis*)种群的栖息地,从而改变狐群原本的生存对策^[55]。目前,关于光伏电站对动物群落影响的报道尚不多见。

3 光伏电站对土壤生态系统的影响

光伏组件的遮阴作用对于土壤环境,包括土壤理化特性、土壤生物群落、土壤抗蚀性以及土壤碳排放等具有重要生态作用^[24]。光伏组件的安装会对土壤理化环境产生直接影响,光伏组件能够有效截留降水,这种水资源利用变化则可以影响植物-土壤过程^[19]。在不同微气候条件下,定量解释光伏组件在不同季节对不同深度土壤环境的影响可能成为本领域的重点关注方向。

3.1 土壤理化性质

光伏组件通过改变地表土壤的入射直接短波和出射长波辐射通量进而对土壤温度产生影响^[56]。同时,光伏组件下被改善的植被能够进一步存水固土,维持较为温暖湿润的土壤微环境。有研究分别对格尔木^[26]和共和盆地^[42]荒漠地区光伏电站内外的土壤温度进行了对比分析,发现光伏电站内外土壤温度日变化差异明显:土壤温度日较差站内明显低于站外,说明光伏组件在相对恶劣的环境下具有绝热保温作用。此外,格尔木光伏电站观测数据表明,电站内外土壤温度在深度达5 cm处差异最大;但在深层土壤则差异不显著。这是由于热量在从空气到浅层土壤再到深层土壤的流动中,主要是通过热传导和热对流进行传输;热量在传输过程中会产生损耗,因此,随着土壤深度增加,温度受到的影响越不明显。光伏组件对土壤环境的影响还具有明显季节动态。在青海柴达木荒漠地区,秋季光伏电板对土壤温度影响不显著,但在春夏两季光伏电板对土壤温度有降低效果;这种变化可能是由于光伏电板在不同季节阻碍到达地面的短波辐射量存在显著差异^[57]。

目前,关于光伏电站建设对土壤含水率、土壤有机质和营养元素含量影响的研究结论尚不统一,这可能与研究地点、建站和采样时间等因素有关。王涛等^[52]发现光伏电站内土壤含水率、有机质、速效磷和速效钾含量较周边区域显著增加;但电导率和pH有所降低。在戈壁和沙漠地区,光伏电站内土壤含水率、有机质含量和全氮含量较周边区域分别提

高88.6%、83.0%和81.8%,这可能与站内植被恢复有关^[46]。此外,Tanner等^[58]发现莫哈韦沙漠的光伏电板下土壤含水率显著降低,该研究结果与我国北方干旱和半干旱区的研究结论明显不同,可能原因是莫哈韦沙漠属极端干旱区域,该地区潜在蒸发量大,因此光伏电板的遮阴作用“入不敷出”。河西走廊光伏电站的研究显示,较周边区域,光伏电站内速效磷和速效钾含量有所提高,但土壤全氮、全磷和全钾含量并没有明显变化^[59]。也有研究指出,遮阴区较未遮阴区相比土壤容重增加,土壤含水率、电导率、pH和0~40 cm层速效磷和速效钾含量均降低,这可能与光伏组件和植物的遮阴作用减少地表水分蒸发和提高土壤蓄水保墒能力有关^[60]。一方面,光伏组件的遮阴作用可以有效降低土壤电导率和土壤pH;另一方面光伏组件的截留降水作用导致遮阴区长期无法得到雨水补给,两方面共同导致土壤容重增加^[52]。

3.2 土壤生物群落

微生物是土壤生态系统的重要组成部分,在生物分解、养分矿化、物质循环、土壤结构和生态平衡中起到关键作用^[61]。土壤微生物对气候变化具有较高的敏感性^[62],局地温湿度和降水量通过影响土壤温湿度来改变微生物群落的功能多样性和生物多样性^[63]。光伏电站总体上能显著改变当地土壤微生物的群落结构。在青海荒漠地区的研究显示,相比于光伏电站外,电站区中土壤原核微生物的系统发育多样性指数、香农-维纳指数和物种丰富度指数均在建设6 a后显著降低^[63]。冗余分析(RDA)发现,土壤含水量是决定原核微生物多样性的主导因子,且与3种多样性指数均呈负相关关系,说明土壤水分增加导致微生物多样性下降。此外,光伏电站导致原有网络中多模块化的原核微生物交互关系逐渐趋于单一化。例如,微生物网络中正相关交互关系增加,负相关交互效应减少,表明微生物群落中种间正反馈增加,生态系统稳定性下降^[64]。

对于土壤动物,目前仅有一篇报道研究了光伏电站对土壤节肢动物群落空间分布的影响。智利阿塔卡玛沙漠光伏电站的研究发现,光伏组件可以为节肢动物提供良好的栖息地,在光伏组件遮阴处双翅目数量较多,而隐翅目数量较少^[65]。

3.3 土壤抗蚀性

风蚀是土壤沙漠化的主要原因,全球近三分之一的陆地面积受到风蚀的影响^[66]。风蚀会导致地表细粒物质减少,粗粒物质增加,改变土壤质地,消耗土壤有机质,并加快水分蒸发速度^[67]。这些变化会降低土壤抗蚀性,破坏当地土壤生态系统的稳定性。光伏电站对土壤抗蚀性的影响集中在场地平整、山石

爆破、地基挖掘、电缆布设、设备安装和机械破坏等施工环节。建设过程会对当地长期形成的地表结皮产生影响,严重破坏原有地表植被,导致水土流失和地表扬尘,最终容易导致土壤侵蚀^[68]。在运营阶段,光伏电站能够通过影响太阳辐射和降水再分配过程调节局地温湿度、气压和风速等^[69],从而具有促进植被恢复,增加水土保持功能和缓解土壤侵蚀的作用。因为光伏组件对风速具有一定缓冲作用,能够大幅度降低地表风速,减少地表输沙率,并最终能够有效提高土壤的抗蚀性^[70]。

3.4 土壤碳排放

光伏能源的发展是构建清洁能源体系、实现经济绿色低碳发展的关键环节。明确光伏系统中的碳循环途径,分析其主导因子对于促进能源转型并最终实现碳中和目标具有重要意义^[71]。有研究表明,光伏电站建成后导致的局地温度升高,可能会对土壤碳循环过程产生重要影响^[72,73]。光伏组件影响土壤有机质的分解,尽管关于光伏组件影响空气和土壤温湿度的程度目前未有统一结论,但改变后的温湿度对分解过程一定会产生影响^[74]。光伏电站可能导致空气和土壤温度升高而增强土壤碳循环和温室气体排放,进而抵消掉光伏电站的部分固碳潜能。植被-土壤界面的碳通量规模可能在很大程度上取决于光伏电站所在地的气候条件、土壤质地和植被类型。在干旱、炎热的地中海气候条件下,光伏电站内微气候变化幅度可能更大,从而对季节性土壤呼吸动态产生强烈扰动^[75]。有研究表明,在典型地中海气候的法国南部地区,光伏组件下方的土壤碳排放量在3月和6月均低于组件外区域,这可能与春季低温影响微生物活性以及光照减少影响植物呼吸有关^[48]。此外,光伏电站拦截掉大部分直接辐射和扩散辐射,对地表接收到的光合有效辐射量产生实质性影响,这可能进一步改变植被-土壤界面的碳通量。

4 研究展望

4.1 光伏电站选址规划

目前,光伏电站选址主要考虑自然条件(太阳能资源、气候条件)和经济效益(交通覆盖度、并网条件)两个方面。在电站选址时尽量选择植被较少的流动与半固定沙丘地或戈壁滩,同时也考虑风蚀沙埋和堆积对电站正常运营和维护的影响^[24]。此外,通常建议选址在地面自然坡度不超过 3° 的地势平坦地带^[59]。实际上,以碳收益为核心的生态效益也是决定光伏电站选址的重要因素。例如,光伏电站建设对植被和土壤固碳能力的影响在不同地区具有明显差异。光伏电站规划时,可以选择在能预期大幅度提升

碳汇的区域,这能够在一定程度上提升电站整体生态效益。除此之外,基于地理遥感数据,开发筛选区域内适合光伏电站建设潜在地点的应用程序,能够进一步辅助政府和企业进行科学决策。

4.2 光伏电站区域碳核算

人类活动导致的碳排放增加是全球变暖的主要原因,尤其是土地利用变化能够显著改变碳源汇格局^[76]。光伏电站建设也是一种重要的土地利用方式,将光伏电站建成后可能产生的碳收益纳入区域碳核算体系之中,在区域尺度上核算光伏电站建设对当地碳汇的潜在贡献,可以更精确、合理地量化其生态效益。在世界范围内,法国、意大利和印度等多国先后对不同新能源电站系统进行建模,开发了Ectotectt、r. green. solar和AVirrg等多个新能源电站生态效应评估模拟平台,从资源利用效率、生态环境变化、发电效益与生态经营权衡等角度模拟新能源电站系统的生态效应和碳收益^[77-79]。有研究显示,新能源电站结合农牧渔业能够显著提高生态系统的资源利用率,调节气候与改善土壤环境,进一步提高农业系统的生产力,最终增强碳效益。我国光伏电站建设集中于沙漠、戈壁等土地利用率的地区,这就要求在进行碳效益评估时,需要更加注重生态风险与气候的扰动效应,同时兼顾经济效应的最大化。此外,未来研究中应对新能源电站的生态环境影响和碳效益进行综合、全面、准确地评估,构建适用于我国北方地区光伏电站生态效应评估模拟平台。通过借鉴国际主流的碳交易体系,政府可以对全国新能源领域碳排放总量展开核查工作,从地区、行业、经济、技术和生产状态等角度制定市场化的碳定价机制,并完善本国碳交易系统的顶层设计^[80]。

4.3 光伏电站区生态保护与修复

光伏电站建设过程会对当地生态系统中的微气候、土壤、植物和动物等因子产生影响。因此,需要系统分析光伏电站对生态系统稳定性的干扰机制,并制定科学的预案措施,以维护生态系统稳定并实现光伏产业的健康绿色可持续发展。有研究表明,光伏电站在建设阶段会造成当地水土流失。因此,需要分别在设计、施工和后期维护这3个阶段施行合理易行的治理措施将新增水土流失降低到最低水平,尽量维持和修复当地生态系统结构与功能的完整性^[81]。此外,在充分考虑电站建设可能对生态环境带来的潜在负面影响,要做到经济建设与环境保护及修复协调发展,力争实现经济效益和生态效益的“双赢”局面。目前,光伏电站对生态系统稳定性影响的研究尚处于探索阶段,特别是光伏电站对动物种群动态、土壤微生物生态功能和植物多样性等影响研

究不足,因此,未来光伏电站建设与生态系统多功能性关系也是亟需研究的重要方向,并在此基础上研发相应的生态环境保护与修复技术。

参考文献:

- [1] Wilberforce T, Baroutaji A, El Hassan Z, *et al.* Prospects and challenges of concentrated solar photovoltaics and enhanced geothermal energy technologies [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 851-861.
- [2] 蒋俊霞, 高晓清. 光伏系统气候效应及影响机理研究进展[J]. *高原气象*, 2022, **41**(4): 953-962.
- Jiang J X, Gao X Q. Research progress on climate effect and influence mechanism of photovoltaic systems [J]. *Plateau Meteorology*, 2022, **41**(4): 953-962.
- [3] Dunnett S, Sorichetta A, Taylor G, *et al.* Harmonised global datasets of wind and solar farm locations and power[J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(1), doi: 10.1038/s41597-020-0469-8.
- [4] 刘建涛, 曹雷, 马杰, 等. 基于储能系统的用户光伏并网发电系统经济性分析[J]. *太阳能学报*, 2012, **33**(11): 1887-1892.
- Liu J T, Cao L, Ma J, *et al.* Economic analysis of user's grid-connected PV system based on energy storage system [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2012, **33**(11): 1887-1892.
- [5] Breyer C, Bogdanov D, Gulagi A, *et al.* On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2017, **25** (8): 727-745.
- [6] 赵春江, 杨金焕, 陈中华, 等. 太阳能光伏发电应用的现状及发展[J]. *节能技术*, 2007, **25**(5): 461-465.
- Zhao C J, Yang J H, Chen Z H, *et al.* State & development of photovoltaic application [J]. *Energy Conservation Technology*, 2007, **25**(5): 461-465.
- [7] Yue S J, Guo M J, Zou P H, *et al.* Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(14): 17506-17518.
- [8] IEA. World energy outlook 2016[R/OL]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>, 2016-11.
- [9] 李全生. 碳中和目标下我国能源转型路径探讨[J]. *中国煤炭*, 2021, **47**(8): 1-7.
- Li Q S. Discussion on the path of China's energy transformation under the goal of carbon neutrality[J]. *China Coal*, 2021, **47**(8): 1-7.
- [10] Hong J, Kim J. Simulation of surface radiation balance on the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(8), doi: 10.1029/2008GL033613.
- [11] 于贵瑞, 徐兴良, 王秋风. 全球变化对生态脆弱区资源环境承载力影响的研究进展[J]. *中国基础科学*, 2020, **22**(5): 16-20.
- Yu G R, Xu X L, Wang Q F. Progress of the effects of global changes on the resource and environmental carrying capacity of the ecologically fragile areas[J]. *China Basic Science*, 2020, **22**(5): 16-20.
- [12] Liu Y, Zhang R Q, Huang Z, *et al.* Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, **30**(18): 2177-2186.
- [13] 刘向, 张鹏, 刘建全. 无机肥料是青海塔拉滩光伏电站植被恢复过程中的限制性因子[J]. *生物多样性*, 2022, **30**(5): 26-33.
- Liu X, Zhang P, Liu J Q. Inorganic fertilizers are limiting factors of vegetation restoration of Qinghai Tala Shool photovoltaic power station[J]. *Biodiversity Science*, 2022, **30**(5): 26-33.
- [14] Mercado L M, Bellouin N, Sitch S, *et al.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink[J]. *Nature*, 2009, **458**(7241): 1014-1017.
- [15] Wu C Y, Niu Z, Gao S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D12), doi: 10.1029/2009JD013023.
- [16] Araki K, Nagai H, Lee K H, *et al.* Analysis of impact to optical environment of the land by flat-plate and array of tracking PV panels [J]. *Solar Energy*, 2017, **144**: 278-285.
- [17] Murata N, Takahashi S, Nishiyama Y, *et al.* Photoinhibition of photosystem II under environmental stress [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) -Bioenergetics*, 2007, **1767** (6): 414-421.
- [18] Jia C, Liu Y, He H H, *et al.* Formation of litter crusts and its multifunctional ecological effects in a desert ecosystem [J]. *Ecosphere*, 2018, **9**(4), doi: 10.1002/ecs2.2196.
- [19] Armstrong A, Ostle N J, Whitaker J. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, **11** (7), doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- [20] Zhou L M, Tian Y H, Roy S B, *et al.* Impacts of wind farms on land surface temperature [J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2** (7): 539-543.
- [21] Dupraz C, Marrou H, Talbot G, *et al.* Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes[J]. *Renewable Energy*, 2011, **36**(10): 2725-2732.
- [22] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, **298**(5870): 156-159.
- [23] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57** (1): 192-194.
- [24] 王慎仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, **39**(1): 191-196.
- Wang Z Y, Wang J, Gao Y, *et al.* Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(1): 191-196.
- [25] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (2nd ed.) [M]. New York: Springer, 1998.
- [26] Hernandez R R, Easter S B, Murphy-Mariscal M L, *et al.* Environmental impacts of utility-scale solar energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **29**: 766-779.
- [27] 杨丽薇, 高晓清, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2015, **36**(9): 2160-2166.
- Yang L W, Gao X Q, Lv F, *et al.* Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of Golmud [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2015, **36**(9): 2160-2166.
- [28] 崔杨, 陈正洪. 光伏电站对局地气候的影响研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2018, **14**(6): 593-601.
- Cui Y, Chen Z H. Research progresses of the impacts of photovoltaic power plants on local climate [J]. *Climate Change Research*, 2018, **14**(6): 593-601.
- [29] Broadbent A M, Kräyenhoff E S, Georgescu M, *et al.* The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, **58**(5): 989-1006.

- [30] Chang R, Shen Y B, Luo Y, *et al.* Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China[J]. *Renewable Energy*, 2018, **118**: 131-137.
- [31] Adeh E H, Selker J S, Higgins C W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0203256.
- [32] 李培都, 高晓清. 光伏电站对生态环境气候的影响综述[J]. *高原气象*, 2021, **40**(3): 702-710.
- Li P D, Gao X Q. The impact of photovoltaic power plants on ecological environment and climate: a literature review[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, **40**(3): 702-710.
- [33] Smith S D, Patten D T, Monson R K. Effects of artificially imposed shade on a Sonoran Desert ecosystem: microclimate and vegetation[J]. *Journal of Arid Environments*, 1987, **13**(1): 65-82.
- [34] Barron-Gafford G A, Minor R L, Allen N A, *et al.* The photovoltaic heat island effect: larger solar power plants increase local temperatures[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep35070.
- [35] 回双双, 吴亚敏, 王晓, 等. 太阳能电池板的优化安装[J]. *实验室研究与探索*, 2012, **31**(5): 28-30.
- Hui S S, Wu Y M, Wang X, *et al.* Optimization of the installation of solar panels[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2012, **31**(5): 28-30.
- [36] Zhang C, Lu D S, Chen X, *et al.* The spatiotemporal patterns of vegetation coverage and biomass of the temperate deserts in Central Asia and their relationships with climate controls[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **175**: 271-281.
- [37] 卢霞. 荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析——以酒泉市东洞滩百万千瓦光伏示范基地为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- Lu X. The environment effect analysis of PV power plant construction in desert Gobbi-take Dongdongtan million kilowatt solar power demonstration base, Jiuquan city as an example[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [38] Yang L W, Gao X Q, Lyu F, *et al.* Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas[J]. *Solar Energy*, 2017, **144**: 244-253.
- [39] 赵鹏宇. 光伏板对地表土壤颗粒及小气候的影响——以磴口县光伏电站为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- Zhao P Y. Effect of photovoltaic panels on the surface of soil particles and microclimate-taking Dengkou photovoltaic power station as an example[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [40] 周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [41] Chang Z F, Liu S Z, Zhu S J, *et al.* Ecological functions of PV power plants in the desert and Gobi[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, **7**(2): 130-136.
- [42] 殷代英, 马鹿, 屈建军, 等. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(3): 15-21.
- Yin D Y, Ma L, Qu J J, *et al.* Effect of large photovoltaic power station on microclimate of desert region in Gonghe basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(3): 15-21.
- [43] 王涛. 光伏电站建设对靖边县土壤、植被的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- Wang T. The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation in Jingbian county[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [44] 崔永琴, 冯起, 孙家欢, 等. 西北地区光伏电站植被恢复模式研究综述[J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(3): 200-203.
- Cui Y Q, Feng Q, Sun J H, *et al.* A review of revegetation patterns of photovoltaic Plant in Northwest China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(3): 200-203.
- [45] 翟波, 高永, 党晓宏, 等. 光伏电板对羊草群落特征及多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(8): 2237-2243.
- Zhai B, Gao Y, Dang X H, *et al.* Effects of photovoltaic panels on the characteristics and diversity of *Leymus chinensis* community[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(8): 2237-2243.
- [46] 李少华, 高琪, 王学全, 等. 光伏电厂干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(6): 325-329.
- Li S H, Gao Q, Wang X Q, *et al.* Characteristics of vegetation and soil property changes by photovoltaic plant interference in alpine desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(6): 325-329.
- [47] Xia Z L, Li Y J, Zhang W, *et al.* Solar photovoltaic program helps turn deserts green in China: evidence from satellite monitoring[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **324**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116338.
- [48] Lambert Q, Bischoff A, Cuffe S, *et al.* Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO₂ effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**(18): 5190-5202.
- [49] 丁晓花, 杨国华, 卫宁波, 等. 宁夏地区光伏发电环境效益分析及建模[J]. *电力科技与环保*, 2015, **31**(4): 9-12.
- Ding X H, Yang G H, Wei N B, *et al.* Study of environmental benefits analysis and modeling of photovoltaic power generation in Ningxia region[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2015, **31**(4): 9-12.
- [50] 张雪萍, 张南辉, 吴秋宁, 等. 有关光伏电站对环境产生的影响探讨[J]. *资源节约与环保*, 2015, (7): 190-191.
- [51] 王长庭, 龙瑞军, 王根绪, 等. 高寒草甸群落地表植被特征与土壤理化性状、土壤微生物之间的相关性研究[J]. *草业学报*, 2010, **19**(6): 25-34.
- Wang C T, Long R J, Wang G X, *et al.* Relationship between plant communities, characters, soil physical and chemical properties, and soil microbiology in alpine meadows[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, **19**(6): 25-34.
- [52] 王涛, 王得祥, 郭廷栋, 等. 光伏电站建设对土壤和植被的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(3): 90-94.
- Wang T, Wang D X, Guo T D, *et al.* The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(3): 90-94.
- [53] 张芝萍, 尚雯, 王祺, 等. 河西走廊荒漠区光伏电站植物群落物种多样性研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, **35**(2): 190-196, 212.
- Zhang Z P, Shang W, Wang Q, *et al.* Biodiversity of herbaceous species under large photovoltaic (PV) power stations in desert region of Hexi Corridor[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, **35**(2): 190-196, 212.
- [54] Rose T, Wollert A. The dark side of photovoltaic-3D simulation of glare assessing risk and discomfort[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2015, **52**: 24-30.
- [55] Cypher B L, Boroski B B, Burton R K, *et al.* Photovoltaic solar farms in California: can we have renewable electricity and our species, too?[J]. *California Fish and Wildlife Journal*, 2021, **107**(3): 231-248.
- [56] 朱少康, 王珊, 张军涛, 等. 光伏阵列的微气候特征及其对站区植物生长特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(10):

- 3078-3087.
- Zhu S K, Wang S, Zhang J T, *et al.* Microclimate characteristics of photovoltaic arrays and their effects on plant growth in a solar power station area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40** (10): 3078-3087.
- [57] Weinstock D, Appelbaum J. Optimization of solar photovoltaic fields [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2009, **131** (3), doi: 10.1115/1.3142705.
- [58] Tanner K E, Moore-O'Leary K A, Parker I M, *et al.* Simulated solar panels create altered microhabitats in desert landforms [J]. *Ecosphere*, 2020, **11**(4), doi: 10.1002/ecs2.3089.
- [59] 周茂荣, 王喜君. 光伏电站工程对土壤与植被的影响——以甘肃河西走廊荒漠戈壁区为例[J]. *中国水土保持科学*, 2019, **17**(2): 132-138.
- Zhou M R, Wang X J. Influence of photovoltaic power station engineering on soil and vegetation: Taking the Gobi desert area in the Hexi corridor of Gansu as an example [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(2): 132-138.
- [60] 汤懋苍, 孙淑华, 钟强, 等. 下垫面能量储放与天气变化[J]. *高原气象*, 1982, **1**(1): 24-34.
- Tang M C, Sun S H, Zhong Q, *et al.* The energy variation of the underlying surface and the changes of the weather and climate [J]. *Plateau Meteorology*, 1982, **1**(1): 24-34.
- [61] 张雅琪, 陈林, 庞丹波, 等. 土壤微生物群落对枯落物输入的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, **33** (11): 2943-2953.
- Zhang Y Q, Chen L, Pang D B, *et al.* Responses of soil microbial community structure to litter inputs [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33** (11): 2943-2953.
- [62] Jing X, Sanders N J, Shi Y, *et al.* The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate [J]. *Nature Communications*, 2015, **6**, doi: 10.1038/ncomms9159.
- [63] Shi Y, Zhang K P, Li Q, *et al.* Interannual climate variability and altered precipitation influence the soil microbial community structure in a Tibetan Plateau grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136794.
- [64] 丁成翔, 刘禹. 光伏园区建设对青藏高原高寒荒漠草地土壤原核微生物群落的影响[J]. *草地学报*, 2021, **29**(5): 1061-1069.
- Ding C X, Liu Y. Effects of solar photovoltaic park construction on soil microbial community in alpine desert of Qinghai Tibet Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, **29**(5): 1061-1069.
- [65] Suuronen A, Muñoz-Escobar C, Lensu A, *et al.* The influence of solar power plants on microclimatic conditions and the biotic community in Chilean desert environments [J]. *Environmental Management*, 2017, **60**(4): 630-642.
- [66] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, *et al.* Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 1038-1050.
- [67] Wang C, Hill R L, Bu C F, *et al.* Evaluation of wind erosion control practices at a photovoltaic power station within a sandy area of northwest, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**(4): 1854-1872.
- [68] 武广萍, 李兴德, 何巍, 等. 光伏电站对生态敏感地区的环境影响分析及防治[J]. *甘肃科技*, 2014, **30**(22): 78-80.
- [69] Dale V H, Efromson R A, Kline K L. The land use-climate change-energy nexus [J]. *Landscape Ecology*, 2011, **26** (6): 755-773.
- [70] 姚娜, 吴薇, 程艳辉, 等. 光伏电场水土保持措施配置初探——以郧西县光伏发电工程为例[J]. *亚热带水土保持*, 2014, **26**(1): 52-55.
- [71] 王鑫森, 马志勇, 周旺潇, 等. 光伏发电系统碳中和及其影响因素[J]. *资源科学*, 2022, **44**(8): 1735-1744.
- Wang X M, Ma Z Y, Zhou W X, *et al.* Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors [J]. *Resources Science*, 2022, **44**(8): 1735-1744.
- [72] Dorrepaal E, Toet S, Van Logtestijn R S P, *et al.* Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic [J]. *Nature*, 2009, **460**(7255): 616-619.
- [73] Scherba A, Sailor D J, Rosenstiel T N, *et al.* Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment [J]. *Building and Environment*, 2011, **46**(12): 2542-2551.
- [74] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, **440**(7081): 165-173.
- [75] González-Ubierna S, Lai R. Modelling the effects of climate factors on soil respiration across Mediterranean ecosystems [J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, **165**: 46-54.
- [76] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 267-276.
- Li Y Y, Wei W, Zhou J J, *et al.* Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1267-1276.
- [77] Castellano S. Influence of geometry on shading effect inside photovoltaic greenhouses [J]. *Acta Horticulturae*, 2017, **1170**: 813-820.
- [78] Sacchelli S, Garegnani G, Geri F, *et al.* Trade-off between photovoltaic systems installation and agricultural practices on arable lands: an environmental and socio-economic impact analysis for Italy [J]. *Land Use Policy*, 2016, **56**: 90-99.
- [79] Elamri Y, Cheviron B, Lopez J M, *et al.* Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: application to irrigated lettuces [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, **208**: 440-453.
- [80] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 1128-1138.
- Zhao Z Y, Yao S, Yang S P, *et al.* Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: status, problems, and suggestions of CCUS in China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 1128-1138.
- [81] 王喜君. 甘肃河西走廊光伏电站建设生态环境保护对策研究[J]. *水资源开发与管理*, 2019, **38**(3): 15-17, 31.
- Wang X J. Research on construction ecological environmental protection countermeasures in Gansu Hexizoulang photovoltaic power station [J]. *Water Resources Development and Management*, 2019, **38**(3): 15-17, 31.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)