

光伏电站建设对沙区生态环境的影响

王祯仪¹, 汪季^{1,3}, 高永^{1,2}, 党晓宏^{1,3}, 蒙仲举^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 中央与地方共建风沙物理重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

摘要: [目的] 研究沙漠地区光伏电站建设选址、设计规划、科学管理及生态环境建设等问题旨在为建立光伏与生态相结合的产业可持续发展提供借鉴。[方法] 通过对大量文献归纳整理及相关课题研究, 分析光伏电站建设期和运营期对土壤、植被、气候、动物及微生物等生态因子的影响, 指出现有光伏电站在生态环境建设方面存在的不足, 并对光伏电站未来的应用前景和发展方向进行展望。[结果] 电站施工期会对站内植物和环境造成一些短期的不利影响。但在运营期间, 由于光伏阵列的阻风固沙与遮阴增湿作用和人工管护, 有利于站内植被恢复、土壤改良, 沙区局地小气候的改善。[结论] 今后应深入研究光伏电站对生态环境的影响机制, 并制定相应的防治措施, 保证生态平衡, 实现光伏发电与生态环境的友好协调发展。

关键词: 光伏电站; 生态环境; 沙区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)01-0191-06

中图分类号: TK514, X171.1

文献参数: 王祯仪, 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. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 01. 031; Wang Zhenyi, Wang Ji, Gao Yong, 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.

Impacts of Photovoltaic Power Station Construction on Ecology Environment in Sandy Area

Wang Zhenyi¹, Wang Ji^{1,3}, Gao Yong^{1,2}, Dang Xiaohong^{1,3}, Meng Zhongju^{1,2}

(1. College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Wind Erosion Key Laboratory of Central and Government, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Erdos, Inner Mongolia 017400, China)

Abstract: [Objective] This paper aims study the location selection, design planning, scientific management and ecological environment construction of photovoltaic power stations in desert areas in order to provide basis for the sustainable development of photovoltaic industry and ecology. [Methods] By analyzing a large number of references and related topics, the influences of the photovoltaic power station construction and operation period on soil, vegetation, climate, animals, microorganisms and other ecological factors were analyzed, to reveal the disadvantages of the existing photovoltaic power stations in ecological environment, and to predict the future application prospect and development direction. [Results] The construction period of the power station could cause some short-term adverse effects on plants and environment. However, during the operation period, due to wind resistance, sand fixation, shading and humidification of photovoltaic array and artificial management, it was beneficial to vegetation restoration, soil improvement and local microclimate improvement in the sand area. [Conclusion] In the future, the influence of photovoltaic power stations on the ecological environment should be further studied and the corresponding prevention measures should be implemented, to ensure the ecological balance and realize the friendly and coordinated development of photovoltaic power generation and the ecological environment.

Keywords: photovoltaic power station; ecology environment; sand area

收稿日期: 2018-05-10

修回日期: 2018-08-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“沙区光伏发电场与其环境的互馈机制”(41461001)

第一作者: 王祯仪(1993—), 男(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 博士研究生, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: 18248113866@163.com.

通讯作者: 汪季(1957—), 男(汉族), 山东省济南市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究工作。E-mail: wangji1957@163.com.

自 18 世纪 50 年代以来,随着工业革命的开始和人口数量的激增,全球对能源的消耗量与日俱增。全球已面临严重的能源危机和环境污染问题,特别是以石油、煤炭等传统化石能源被无节制开采和过量使用所导致的温室气体排放量增加,导致环境污染与生态失衡等问题^[1]。中国工业二氧化碳量位居世界首位,控制发电污染排放已成为中国亟待解决的难题^[2]。为了满足全球对能源的扩大需求以及协调生态环境和经济的可持续发展,开发新能源势在必行^[3-4]。太阳能是地球上巨大的无污染能源,地球上每秒钟获得的太阳能相当于燃烧 5.00×10^6 t 优质煤的热量。太阳能成为世界各国追求的新能源焦点^[5]。中国拥有的太阳能资源相当于 1.90×10^{14} t 标准煤,发电量可达 9.60×10^8 kW。

光伏发电是根据光伏伏特效应原理,利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能的一种技术,具有清洁、永续及取用方便等优势。自 1969 年世界上第一座太阳能发电站在法国建成后,太阳能光伏发电技术和产业在全球迅速发展,并成为发展前景最广的一种环保型能源生产技术^[6-7]。其中,大型并网式光伏发电技术已经成为当今世界该行业发展的主流方向^[8-9]。大型并网式光伏电站建设前期需要进行土地平整、土石方开挖、电缆布设等一系列工程,对土层具有扰动作用,且光伏板的遮阴作用会对区域生态环境产生不容忽视的影响。因此,施工单位和环保部门高度重视光伏电站建设前期所产生的系列“生态效应”,并强烈要求施工后须进行相应的土壤和植被等相关恢复措施,以保护该区的生态环境^[9-10]。

中国沙漠、戈壁面积广大,太阳能资源丰富充沛,且大面积沙漠、戈壁土地被闲置。因此近些年,在沙漠、戈壁上建立了大量光伏发电场,例如甘肃敦煌 10 MW 光伏电场(2009 年)、古浪县 1.00×10^6 kW 沙漠生态光伏电场(2013 年)、保利协鑫宁夏庆阳 100 MW 荒漠光伏电站(2013 年)、青海格尔木型 200 MW 荒漠光伏电站(2013 年)、宁夏中卫市 1.50×10^6 kW 沙漠光伏产业园(2015 年)等。截至 2015 年底,仅甘肃河西走廊的武威、金昌、张掖、酒泉、嘉峪关 5 市在沙漠、戈壁建成了 12 个光伏产业园区,光伏电量可达 5.80×10^6 kW,位居全国第一(新世纪能源网,2016)。此外,在工业和信息化部、国家发展和改革委员会的指导下,2010 年 5 月 17 日,中国光伏产业联盟(简称光伏联盟或 CPIA,总部设在北京)成立。2013 年,国务院发布的《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》(〔2013〕24 号)指出“光伏产业是全球能源科技和产业的重要发展方向,是具有巨大发

展潜力的朝阳产业,也是中国具有国际竞争优势的战略性新兴产业。”可见,中国光伏产业将被大力推广,未来发展前景十分广阔。

通过查阅大量相关文献资料,我们发现目前有关光伏产业的研究只考虑其经济产出,鲜有涉及光伏产业的生态作用与效应研究。光伏产业向沙漠、戈壁地区加快推进,但若对其产生的生态效应了解不足,将会对中国光伏产业进一步发展产生不利影响。如果能厘清光伏产业对沙漠、戈壁地区的生态学意义,即沙漠、戈壁光伏产业的建设是否具有明显的生态效应?有何生态意义?它对植被、土壤、气候、动物及微生物有哪些正向生态作用和负向生态作用?基于此,本文拟通过对大量文献提炼总结及相关课题研究工作,分析光伏电站建设期和运营期对土壤、植被、气候、动物及微生物等生态因子的影响,指出现有光伏电站在生态环境建设方面存在的不足,并对光伏电站未来的应用前景和发展方向进行展望,旨在为沙区开发建设光伏电站做到最大程度地减少对当地生态系统的破坏并及时采取必要的生态恢复和污染治理措施提供参考依据,实现光伏发电产业“发展为要,生态优先”。

1 光伏电站对土壤的影响

光伏电板及其支架的布设与遮阴作用对建站前后的土壤具有较为明显的生态作用。光伏电站对土壤的影响研究主要集中在土壤抗蚀性、理化性质及土壤温度等方面。其中,电站对土壤抗蚀性和理化性质的影响主要集中在建站前对场地的平整与开挖、人员踩踏及机械碾压等工作环节,对土壤温度的影响主要反映在建站后光伏电板在光照下的升温作用,进而影响周边土壤温度。

1.1 对土壤抗蚀性的影响

中国光伏电站集中分布在西北戈壁、荒漠等典型生态脆弱区^[11]。该区植被稀疏、土壤水肥不足、植物生产力偏低、原有生态环境十分脆弱。而在区域光伏电站建设中,人为活动的扰动必然会加大对土层原生结构和植被的破坏作用,并加速地表风蚀,对当地生态系统的稳定性产生负面影响。

光伏电站对土壤抗蚀性的影响主要集中在施工期对光伏场地的平整、光伏阵列基地的开挖、道路系统的修建及升压站区的场地平整等工作环节。同时,光伏电站的建设需要大量砍伐影响运输设备、遮挡太阳能光伏阵列等环节的植被,导致地表裸露,产生大量松散土方石,极易引发土壤侵蚀。光伏电站建设会破坏该区域多年形成的地表结皮,造成水土流失和地表扬尘,甚至引发沙尘暴^[12]。在生产运行期,各项具

有水土保持功能的工程和植物措施均得到落实,土壤侵蚀进入相对稳定时期。同时,太阳能电池板具有一定的阻挡作用,大面积的光伏阵列会减弱地表风速,降低地表输沙率,并增加地表粗糙度,此时土壤侵蚀会大幅减少^[13]。赵鹏宇等^[14]对乌兰布和沙漠东北缘光伏电站土壤表层颗粒空间异质特征分析中指出,电站内,站区中心区域与南北两缘土壤粒度组成最细,从中心区域向电站南北两缘土壤粒径表现为先增粗后变细的趋势。光伏电站作为一种机械挡沙措施对沙漠地区的风沙流具有“再分配”作用,光伏电板及其支架的布设在防风固沙方面具有高立式沙障的作用。

1.2 对土壤理化性质的影响

光伏电站于施工过程中,由于机械碾压、人员踩踏、土体翻整并被堆放于地表等人为因素的干扰会使土壤板结,肥力降低,造成施工区域内动植物的栖息环境被破坏,生物多样性减少,导致该区域内植被群落种类组成、数量及分布规律发生改变,进而影响其土壤性质。有研究表明,光伏电站施工期间会增大土壤容重和非毛管孔隙度,同时也降低了土壤总孔隙度和毛管孔隙度^[15]。此外,施工使土壤中的有机质、全氮、速效氮、速效磷含量降低,但对全磷、全钾和速效钾的影响并不显著^[16]。在光伏电站运营期,与光伏电站周边相比,未遮阴和遮阴区域的土壤有机质、含水量、速效磷和速效钾含量明显增加,电导率和 pH 值降低,其中遮阴区域的土壤容重增加,而未遮阴区域的土壤容重降低;在电站内部,与遮阴区域相比,未遮阴区域的土壤含水量、电导率、pH 值、0—40 cm 层速效磷和速效钾含量均增加,可能是因由于太阳能电池板以及植物的遮阴作用能有效的减少地表水分蒸发,提高了土壤的蓄水保墒能力^[17],进而为植被生长提供了保障。总体而言,光伏电站建成运营后在一定程度上有利于土壤理化性质的改良和物种多样性的增加。

1.3 对土壤温度的影响

高晓清等^[18]对格尔木荒漠地区光伏电站土壤温度进行了一整年的观测得出,站内与站外土壤温度日、年变化趋势均一致,在 10 cm 的土壤浅层,站内土壤温度日较差明显低于站外,说明光伏装置具有绝热保温作用;在冬季,光伏电站是冷源,站外 5—180 cm 各层土壤温度均明显高于站内,而站内各层土壤温度年较差均大于站外。

2 光伏电站对植物的影响

光伏电站对植物的影响共分为两个阶段:施工期和运营期。光伏电站在建设期间,需要对站内土地进行平整以及光伏组件支架基础和配电房部分工程进

行施工,使原有植被遭到一定程度的破坏。施工期间施工量相对较少,对植被影响将会随着工程的结束而消失,施工结束后次年即可自然恢复。在光伏电站建设期间,短时间内虽会造成某些物种数量减少,但不会使这些物种在区域内绝对消失^[19-21]。在光伏电站运营期间,人为扰动减少,且大型的太阳能基础设施可以保护植被免受太阳和强风的影响,而时常清洗太阳能光伏板的水可以为植物提高生长所需的水分,为耐荫性植物的生长创造条件^[22]。研究表明,光伏电站内的植物种类多样性大体表现为:未遮阴>遮阴>电站周边,说明光伏电站能够显著提高该区域的植被覆盖率,有利于改善脆弱的生态环境^[12]。同时,植物也可以减少风尘对光伏板发电装置的磨损和干扰。

光伏电站对植物的影响主要体现在:太阳能电池板对风和太阳光的阻挡作用^[23]。荒漠化地区大面积光伏组件的布置,有助于增加地表粗糙度^[24],降低风速并且减少植被的水分蒸发,从而使地上植物更好地生长,起到防风固沙和绿化的作用^[25]。例如翟波等^[26]研究了光伏电站对羊草群落特征及多样性的影响,在每块电板下根据光照强度及水分情况的差异,研究调查发现电板正下方的多样性指数整体偏低,Pielou 均匀度指数同样表现出电板正下方的数值低于电板前檐以及后檐,其中电板前檐的最高,达到 0.86。光伏电板的架设改变了草本植物种类分布,降低了草地自然植被的多样性。此外,风会使草本植物叶片倾角改变,导致成熟期叶面积指数降低。在风的长期作用下,某些植物的叶表皮薄层会被剥蚀,羧化酶的含量受到影响,进而影响光合作用^[27]。强风也会影响植物周围的相对温度和相对湿度^[28]。光伏阵列降低了电站内的风速,提高了空气湿度,也为植物提供了良好的生境,同时也形成了生长兼顾治沙的良性循环^[29-30]。但是,由于太阳能电池板对太阳的阻挡作用,使板下温度降低,阻碍了植物进行光合作用,使植物生长缓慢^[31]。

3 光伏电站对局地小气候的影响

光伏电站对土壤的影响研究主要集中在地表太阳辐射、大气热力平衡及大气温湿度等方面。由于缺少光伏电站内部观测资料,至今对光伏电站局地气候效应的研究还较少。以往的研究大多依靠模式模拟,且主要集中于温度场,而对辐射特征的观测分析相对较少。光伏电站的运行对局地辐射平衡有重要影响,所以研究光伏电站内外辐射特征的差异性,对研究光伏电站的局地气候效应有重要意义。

3.1 对地表太阳辐射的影响

光伏阵列把部分太阳能转换为电能,改变了局地地表能量分配,可能会对大型光伏电站局地 and 周边的太阳辐射乃至气候产生影响。常兆丰等^[32]运用河西走廊的气象资料和民勤沙区的光照观测资料以及植被观测资料,对此作了探索性分析。结果表明,1 m²的光伏电池板转换的太阳能相当于民勤沙区 260.75 m² 沙漠植被利用的太阳能。光伏电站建成后,大面积的太阳能电池板覆盖于地面,改变了原有地表形态,并把太阳能转换成电能,大大减少了地表的太阳直接辐射,并对地表辐射平衡产生直接影响,在光伏电站内形成小气候,对周边局地气候产生影响。Taha^[33]对洛杉矶地区进行气象建模以此来评估光伏电站的大气效应。Turney 等^[34]调查了光伏电站在整个存在阶段的 32 种影响。Barron-Gafford 等^[35]对大规模屋顶光伏装置产生的城市热岛效应进行大量研究。Fthenakis 等^[36]对北美的大型光伏电站的温度场进行了模拟,并与实测温度场数据作对比。此外,杨丽薇等^[37]研究发现,站内日平均反照率为 0.19,站外为 0.26,站内年平均净辐射明显高于站外。光伏电站在夜间具有保温效应,而在白天有降温效应,光伏电站是一个能量汇。而因光伏阵列将部分辐射能转换为电能输出,导致站内地表温度低于站外。

3.2 对大气热力平衡的影响

地面热力不平衡是形成气压梯度进而产生大风的动力源。沙区多风且大面积沙面裸露;气压梯度越大,则风速越大,这也是导致中国西北地区每年春季沙尘暴频发的一个重要原因。每年春季气温回升时,沙面将大量的太阳辐射反射到近地面空气中,空气受热膨胀,向上运行,气压降低,与每年春季向四周扩散的西伯利亚高压冷空气形成明显的气压梯度。当大风掠过干燥裸露的沙面时会吹起沙尘,形成沙尘暴或风沙流。风是沙尘暴的动力源,而近地层空气的热力不平衡则是风的动力源。光伏发电有利于转化和消耗沙漠地区沙尘暴和风沙流的动力源,进而减少沙尘暴的发生。光伏电板支架还可改变气流方向,降低风速,具有类似沙障的挡风阻沙作用^[32]。

3.3 对大气温湿度的影响

空气温湿度是表征一个地区气候环境的重要参数。在夏季晴朗的天气条件下,光伏电站具有增温降温的作用,形成“热岛效应”^[38]。高晓清等^[18]利用格尔木大型光伏电站内外空气温湿度观测资料,比较电站内外气温与空气相对湿度的日变化与年变化特征,分析了造成光伏电站内外空气温湿度差异的原因。研究发现,由于太阳能电池板的发热作用,使其热空气

效应大于光伏板遮阳冷却效应,使春、夏、秋季日间站内 2 m 高度处的气温明显高于站外,夏季差异达到最大值;而在四季夜晚,站内 2 m 高度处的气温均高于站外,这可能与光伏板对近地面土壤层的保温作用有关,有待于进一步深入研究。同时,四季白天站内 10 m 高度处的气温均低于站外,其中秋、冬季相差较大,这可能与冬、夏气温对太阳能电池板光电转换效率的影响有关。夜晚光伏阵列具有绝热保温作用,使站内昼夜温差减小,对抑制风沙的产生具有十分重要的意义。此外,光伏电站对局部的小气候还具有降温增湿的作用。

4 光伏电站对动物和微生物的影响

光伏电站施工期对光伏场地的平整、光伏阵列基地的开挖、道路系统的修建及升压站区的场地平整等工作环节,导致地表裸露,产生大量松散土方石,极易引发土壤侵蚀。而土壤侵蚀过程能够直接影响土壤养分在坡面上的空间分布及土壤结构,通过影响土壤性质,改变土壤微生物群落的生长环境和营养物质的含量,从而影响土壤微生物的生长^[38]。此外,项目实施期间受爆破等施工活动的影响,区域内的野生动物会受到惊吓等影响,但随着施工结束这种影响将随之消除。光伏电站对动物的影响研究主要体现在鸟类迁徙等活动,对其他动物和土壤微生物的影响较小。

5 结论

(1) 光伏电站施工期大面积破坏多年形成的地表结皮,导致大量松散土石方堆积、地表裸露,极易造成水土流失和风蚀扬尘,是产生土壤侵蚀的主要阶段。在营运期间,由于植被自然恢复、人工绿化及管护对站内土壤具有一定的改良作用。

(2) 沙区光伏电站施工期间,短时间内会对站内植物群落产生不利影响,但长期来说有利于耐阴植物的生长、增加物种多样性,改善沙区脆弱的生态环境。光伏阵列的阻风固沙与遮阴增湿作用有利于提高站内植被覆盖率,改善生态脆弱区。此外,在电站选址时尽量选择植被较少的流动与半固定沙丘地,同时也要考虑风蚀沙埋和堆积对电站正常运营和维护的影响。

(3) 大面积覆盖的光伏电板会吸收太阳辐射并将其转换成电能,减少地表大量的太阳直接辐射,有利于转化和消耗沙区沙尘暴和风沙流的动力源。同时,光伏阵列具有类似高立式机械沙障的挡风阻沙作用,能够抑制和减少沙尘暴的发生频率和强度。此外,光伏电站对局部小气候具有降温增湿的作用。以往的研究大多依靠模式模拟,且主要集中于温度场,而对辐射特征的观测分析相对较少。光伏电站的运

行对局地辐射平衡有重要影响,所以未来的研究应重点关注光伏电站内外辐射特征的差异性。

(4) 项目实施期间受爆破等施工活动的影响,区域内的野生动物(主要为鸟类)会受到惊吓等影响,但随着施工的结束这种影响将随之消除。总体而言,光伏电站对动物和土壤微生物的影响较小。

6 展望

(1) 中国在西北沙区进行光伏电站建设时,要做到开发建设与环境保护同时设计、同时施工、同时投运“三同时”原则。开发建设与生态保护并重,优化设计,科学施工,加强环境监理。尽量保持当地生态的结构与功能的完整性,减少人类活动对当地生态系统的影响。在光伏发电项目的规划与选址设计阶段要充分考虑到工程可能对环境产生的各种不利影响,并采取必要的生态恢复和污染治理措施。

(2) “以光发电、以电提水、以水改土、以土促产、以产扶贫”是一项精准扶贫的有效措施。光伏发电将成为防治沙的一条新途径,将发电、节水农业、沙漠治理结合在一起,利用沙漠充足的土地和光热资源发展光伏产业,利用光伏板的遮阴作用发展沙草产业,在发电的同时改善生态环境与发展沙区旅游经济,有利于沙漠增绿、企业增效、资源增值,并充分实现生态、经济及社会效益的“三赢”。

(3) 生态环境中植被、土壤、气候、动物、微生物等环境因子相互作用。因此,必须要深入研究光伏电站对生态环境的影响机制,并制定相应的防治措施,保证生态平衡,有助于实现光伏发电与生态环境的友好、良性及协调发展。光伏电站对生态环境的影响研究仍处于初级阶段,光伏电站对动物迁徙和分布、植物群落结构以及对昆虫、土壤微生物的影响等问题亟需进一步深究。

[参 考 文 献]

[1] 杨金焕. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2013.

[2] 邓志茹. 中国能源供求预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

[3] 贾雪艳,曹金良. 太阳能光伏发电技术的发展与应用[J]. 内蒙古石油化工,2010,36(4):84-85.

[4] Wang Li, Lin Yinghao. Random fluctuations on dynamic stability of a grid-connected photovoltaic array[C]// Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, 2001,3:985-989.

[5] 李晓刚. 中国光伏产业发展战略研究[D]. 长春:吉林大学,2007.

[6] 陆维德. 太阳能利用技术发展趋势评述[J]. 世界科技研

究与发展,2007,29(1):95-99.

[7] 杨忠. 太阳能光伏发电现状与发展趋势[J]. 金陵科技学院学报,2008,24(1):9-13.

[8] 张轶. 电源布局调整对电网节能和安全可靠性的影响研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.

[9] 赵争鸣. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.

[10] 阳晓原,邓岚,王小军,等. 湛江特呈岛光伏电站项目水土保持植物措施评价[J]. 广东水利水电,2010(7):29-31.

[11] 夏军,郑冬燕,刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题研讨[J]. 水文,2002,22(5):12-17.

[12] 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.

[13] 姚娜,吴薇,程艳辉,等. 光伏电场水土保持措施配置初探:以鄯西县光伏发电工程为例[J]. 亚热带水土保持,2014,26(1):52-55.

[14] 赵鹏宇,高永,党晓宏,等. 乌兰布和沙漠东北缘光伏电站表层土壤颗粒空间异质特征[J]. 内蒙古林业科技,2016,42(2):11-14.

[15] 云巴图. 风电项目环境影响评价指标研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.

[16] 许申来,陈利顶,陈忱,等. 管道工程建设对沿线地区农业土壤养分的影响:以西气东输冀宁联络线为例[J]. 农业环境科学学报,2008,27(2):627-635.

[17] 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.

[18] 高晓清,杨丽薇,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究[J]. 太阳能学报,2016,37(6):1439-1445.

[19] 吴菲. 光伏电站环境影响评价技术规范研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.

[20] 王慧玲. 内蒙古某 10MW 光伏电站可行性方案论证[D]. 北京:华北电力大学,2013.

[21] 梅浩,鲁黎,蒲云海,等. G316 工程建设对汉江国家湿地公园植物多样性影响的评价[J]. 湖北林业科技,2013,42(5):26-29.

[22] Ravi S. Partner crop plants with solar facilities[J]. Nature, 2015,524(7564):161.

[23] 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.

[24] 赵名彦,李芳然,崔利强,等. 生态脆弱地区光伏电站建设的环境效应分析[J]. 科技创新与应用,2015(26):22-23.

[25] 卢霞. 荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析[D]. 兰州:兰州大学,2013.

[26] 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.

[27] 张琳琳,赵晓英,原慧. 风对植物的作用及植物适应对策研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(12):1349-1353.

- [28] Saghravani S R, Mustapha S, Shaharin I, et al. Comparison of daily and monthly results of three evapotranspiration models in tropical zone: A case study[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2009, 5(6):698-705.
- [29] 李国艳. 林州光伏发电项目投资效益及风险分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [30] 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.
- [31] 刘建, 庞真真. “农地种电”型光伏电站可种植区域光温环境参数研究[J]. 农业工程技术, 2016, 36(25):28-32.
- [32] 常兆丰, 刘世增, 朱淑娟, 等. 沙漠戈壁光伏电站的生态功能[C]//2016 中国环境科学学会学术年会论文集. 海南 海口, 2016.
- [33] Taha H. The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas[J]. Solar Energy, 2013, 91(3):358-367.
- [34] Turney D, Fthenakis V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(6):3261-3270.
- [35] 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, 6:35070; DOI: 10.1038/srep35070.
- [36] Fthenakis V, Yu Yuanhao. Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms[C]// Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2014:3362-3366.
- [37] 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.
- [38] 赵鹏宇, 高永, 陈曦, 等. 沙漠光伏电站对空气温湿度影响研究[J]. 西部资源, 2016(3):125-128.
- [39] 席军强, 杨自辉, 郭树江, 等. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(5):44-52.

《水土保持通报》2016—2017 年刊载论文被引频次前 20 位文献参数 (数据来源:中国知网中国学术期刊网络出版总库;检索时间:20190225)

- [1] 戴明宏, 王腊春, 汤溟. 基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):151-156.
- [2] 陈珂珂, 何瑞珍, 梁涛, 等. 基于“海绵城市”理念的城市绿地优化途径[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):258-264.
- [3] 郑华伟, 夏梦蕾, 张锐, 等. 基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):284-289, 296.
- [4] 石小亮, 陈珂, 揭昌亮, 等. 吉林省森林生态系统服务价值评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):312-319, 325.
- [5] 周晓艳, 宋祯利, 宋亚男, 等. 基于地理加权回归模型的长江中游地区人均耕地面积变化影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):136-142, 150.
- [6] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):211-218.
- [7] 刘洁, 谢丽芳, 杨国英, 等. 丰水区城镇化进程与水资源利用的关系:以江苏省为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):193-199.
- [8] 程文仕, 乔蕻强, 刘志, 等. 基于 RAGA-PPC 模型的土地整治综合效益评价:以甘肃省庆阳市 15 个土地整治项目为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4):257-261, 268.
- [9] 刘超, 许月卿, 孙丕苓, 等. 基于改进三维生态足迹模型的张家口市生态可持续性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6):169-176.
- [10] 赵辉, 黎家作, 李晶晶. 中国水土流失动态监测与评价的现状与对策[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):115-119.
- [11] 张利超, 谢颂华. 江西省水土流失重点防治区的复核和划分[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):230-235.
- [12] 孙德亮, 张凤太. 基于 DPSIR-灰色关联模型的重庆市土地生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):191-197.
- [13] 杨亚辉, 赵文慧, 木热提江·阿不拉, 等. 不同植被对土壤理化性质影响:以王东沟小流域为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):249-252.
- [14] 石小亮, 陈珂, 何丹. 森林蓄水量价格倒算法公式推演与实证研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6):165-168.
- [15] 赵春芳, 董朝阳, 伍磊, 等. 浙江省水资源生态足迹时空格局[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):242-248.
- [16] 王雪梅, 柴仲平, 武红旗. 典型干旱荒漠绿洲区耕层土壤养分空间变异[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):51-56.
- [17] 樊鹏飞, 梁流涛, 陈常优, 等. 城市土地集约利用评价及障碍因子诊断:基于生态健康与低碳发展视角[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4):273-279.
- [18] 余德贵, 吴群. 基于 Logistic-Markov 方法的土地利用结构变化多因素驱动预测模型研究与应用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):149-154, 160.
- [19] 边锋, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):11-16.
- [20] 董捷, 员开奇. 湖北省土地利用碳排放总量及其效率[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2):337-342, 348.