光伏电站的长期运营对西北干旱典型生态脆弱区土壤理化性质的影响

曹毅博[1]，蔡兆山[2]，马世军[3]，肖建华[4]，东双娟[1]，马 瑞[1]

（1.甘肃农业大学 林学院，甘肃 兰州 730070；
2.华电甘肃能源有限公司，甘肃 兰州 730030；3.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司，北京 100024；4.中国科学院 西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：［目的］探究光伏电站长期运营对沙漠、戈壁、荒地3种典型生态脆弱区土壤理化性质的影响，为该区生态综合治理与土地可持续利用工作提供科学指导。［方法］选取甘肃省河西走廊地区运营超过10 a的古浪县黄花滩新诚光伏电站、民乐县三墩滩光伏电站、民勤县红砂岗华电光伏电站（所处地貌类型分别为沙地、戈壁和荒地）为研究对象，通过野外采样与室内分析，系统研究3种下垫面的光伏电站在光伏板板檐（FP）、板下（UP）、板间（IP）及电站外围（CK）0—60 cm土层中的土壤容重（BD）、土壤含水率（SWC）、pH值、电导率（EC）、有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）和全钾（TK）等指标的变化及其提升率。［结果］光伏电站建设显著改变了土壤水分布与养分状况，其影响程度和方向各有不同。沙漠土壤的BD和EC分别降低了10.04%和25.19%，SWC，TN分别提升了97.48%和56.00%（$p<0.05$），SOC，TP，TK的增幅在11%～15%；戈壁土壤的SWC，EC，SOC和TP增幅显著（$p<0.05$），分别达375.19%，43.55%，24.79%和24.06%，TN增幅为14.13%，BD和土壤pH值分别降低了20.30%和6.04%；荒地土壤的各项指标均呈正向提升，SWC和TK增幅最大，分别为54.93%和83.55%，其余指标增幅在14%～19%。各指标变化幅度均随土层深度增加而减小，以0—20 cm土层最为显著（$p<0.05$）。［结论］光伏电站的长期运营对3类土壤均有改良效应，尤以对戈壁区表层土壤（0—20 cm）土壤的改良效果最为显著。

关键词：光伏电站；土壤理化性质；西北干旱区；生态脆弱区

文献标识码：A **文章编号：**1000-288X（2026）03-0053-11 **中图分类号：**S714

文献参数：曹毅博，蔡兆山，马世军，等.光伏电站的长期运营对西北干旱典型生态脆弱区土壤理化性质的影响[J].水土保持通报，2026，46（3）：53-63. Cao Yibo，Cai Zhaoshan，Ma Shijun，et al. Impacts of long-term photovoltaic power station operation on soil physicochemical properties in typical arid ecologically fragile areas of northwest China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（3）：53-63.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.007 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.007**

Impacts of long-term photovoltaic power station operation on soil physicochemical properties in typical arid ecologically fragile areas of northwest China

Cao Yibo[1], Cai Zhaoshan[2], Ma Shijun[3], Xiao Jianhua[4], Dong Shuangjuan[1], Ma Rui[1]

（1.*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2.*Huadian Gansu Energy Co., Ltd., Lanzhou, Gansu* 730030, *China*; 3.*PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing* 100024, *China*; 4.*Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*）

Abstract: [Objective] The impacts of long-term operation of photovoltaic power stations on the soil physicochemical properties in three typical ecologically fragile areas (desert, Gobi, and wasteland) were investigated in order to provide scientific guidance for comprehensive ecological management and sustainable land use in these regions. [Methods] Three photovoltaic power stations that had been operating for over 10 years in the Hexi Corridor of Gansu Province were selected as study sites: the Huanghuatan Xincheng Photovoltaic Power

收稿日期：2025-09-23 **修回日期：**2025-12-10 **采用日期：**2025-12-12
资助项目：中国华电有限公司重点科技项目“沙戈荒新能源大基地防沙治沙技术及生态效益研究”（CHDKJ23-04-01-61）
第一作者：曹毅博（2001—），男（汉族），甘肃省武威市人，硕士研究生，研究方向为荒漠生态。Email：838136874@qq.com。
通信作者：马瑞（1977—），女（回族），甘肃省平凉市人，博士，教授，主要从事荒漠化防治方面的研究。Email：mar@gsau.edu.cn。

Station in Gulang County (desert), the Sanduntan Photovoltaic Power Station in Minle County (Gobi), and the Hongshagang Huadian Photovoltaic Power Station in Minqin County (wasteland). Field sampling and laboratory analysis were conducted to systematically investigate the variations and increase rates of soil bulk density (BD), soil water content (SWC), pH value, electrical conductivity (EC), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) in the 0—60 cm soil layer across the three power stations with different underlying surfaces. Soil samples were collected from four locations at each station: the front edge of the photovoltaic panel (FP), underneath the photovoltaic panel (UP), the interval between photovoltaic panels (IP), and outside the power station (CK). [Results] The construction of photovoltaic power stations significantly altered soil water distribution and nutrient status, with the degree and direction of these impacts varying across sites. In desert soil, BD and EC decreased by 10.04% and 25.19%, respectively, whereas SWC and TN significantly increased by 97.48% and 56.00% ($p<0.05$). The increases in SOC, TP, and TK ranged from 11% to 15%. In Gobi soil, SWC, EC, SOC, and TP increased significantly ($p<0.05$) reaching 375.19%, 43.55%, 24.79%, and 24.06%, respectively. TN increased by 14.13%, whereas BD and soil pH value decreased by 20.30% and 6.04%, respectively. All indicators in wasteland soil showed increases, with SWC and TK showing the largest increases at 54.93% and 83.55%, respectively. The remaining indicators increased by 14% to 19%. The magnitude of change for all indicators decreased with increasing soil depth, with the most significant changes observed in the 0—20 cm soil layer ($p<0.05$). [Conclusion] The long-term operation of photovoltaic power stations has a soil improvement effect on all three soil types, with the most significant improvement observed in the topsoil layer (0—20 cm) in the Gobi region.

Keywords: photovoltaic power stations; soil physicochemical properties; arid area of Northwest China; ecologically fragile areas

随着全球对能源可持续发展的推进,可再生能源的开发利用已成为大趋势[1]。太阳能是一种可再生的清洁能源,因其环境污染小、安全性高等优点成为近年来替代传统化石能源的理想选择[2]。光伏电站通过光伏组件及其辅助设备接收太阳能并将其转化为电能[3],是目前中国大面积推广应用的新能源发电系统。然而,光伏电站建设会破坏项目区原有土壤结构,并改变地形及地被物构成[4],这种对原有自然环境的干扰力度和方向在建站后的不同阶段有所不同[5]。在光伏电站的修建期,场地平整、设备运输、电缆掩埋等施工作业不仅破坏了原有的土壤结构及功能,还会使植物的群落组成发生变化,甚至会加剧土壤侵蚀[6]。在光伏电站运行期,光伏板的前沿位置由于风速加快,土壤被掏蚀而形成风蚀坑,被掏蚀的土粒运移至光伏阵列间形成堆积体而重塑地形[7-8]。此外,光伏板正下方光照和降水补给有限,加之光伏板对清洗水的导流作用,使得光伏板下方的土壤水热状况与板间存在明显差异[9-10]。这种水、热、光的二次分配以及地表的蚀积转换改变了光伏阵列区的局部环境,进而增大了站区土壤理化性质的空间异质性[11]。目前,中国光伏电站遍布全国各地,建站对生态环境的影响成为光伏研究的热点之一,屈准等[12]的研究表明在高寒区建设光伏电站可以提升植物多样性并增加土壤养分;孙文倩等[13]的研究表明光伏电站可以改变高寒草甸的小气候和土壤环境;吴彤等[14]的研究表明光伏电站对荒草地的土壤养分有一定提升,但对植被恢复效果并不显著。这说明在高寒区、高寒草甸和荒草地这3种不同生态类型区,光伏电站对土壤理化性质及植被的影响存在显著差异。这种差异性表明,光伏电站的环境效应可能不仅受区域气候因子影响,站区原有的土壤类型和植被类型等生态条件也可能是一个重要的影响因素。

沙漠以流动或半固定沙丘为主,地表物质疏松,土壤质地粗糙、养分极度贫乏,但可塑性较强。戈壁地表覆盖着砾石,形成独特的"砾幕",其土壤紧实,细物质少,保水能力差,但表面相对稳定[8]。荒地通常保留有部分土壤结构和微量的植被,其土壤本底条件相对略好,但退化趋势明显[15],由于降水稀少,沙戈荒地区普遍植被稀疏,土壤贫瘠,生态系统脆弱。光伏治沙是中国近年大面积推广的风沙危害治理新模式,沙漠、戈壁、荒地是目前光伏治沙的主阵地[16],而建设光伏电站必然对地表及覆被物产生扰动和破坏,但随着时间推移,光伏电站对土壤及环境的改良作用逐渐显现[17]。然而,目前对于光伏电站生态效益的研究多聚焦于单一生态系统,缺乏针对沙漠、戈壁、荒地这3种典型且存在差异的生态系统进行系统性对比研究。明确在土壤

类型存在差异的沙漠、戈壁和荒地上建设光伏电站,其对土壤理化性质的改良效应以及改良的路径与强度,对于精准评估光伏治沙的生态效益、因地制宜地优化光伏电站的布局与管理至关重要。因此,本研究通过对比分析沙、戈、荒3种典型生态脆弱区光伏电站的土壤理化性质,揭示光伏电站土壤改良效应的生态系统依赖性,明确光伏电站长期运营对沙、戈、荒土壤理化性质的影响及其改良效益的差异性。

1　研究方法

1.1　光伏电站地理位置及自然概况

选取甘肃省河西走廊地区3个运营时间均超过10 a的大型光伏电站作为研究对象。其中,古浪县黄花滩新诚光伏电站和民乐县三墩滩光伏电站均于2013年投产,民勤县红砂岗华电光伏电站于2014年投产。至2025年5月,调查、采样时已分别持续运营了12 a和11 a,具体情况详见表1。

表1　光伏电站自然概况

Table 1　General natural conditions of photovoltaic power stations

自然概况	古浪县黄花滩新诚光伏电站	民乐县三墩滩光伏电站	民勤县红砂岗华电光伏电站
地理位置	103°7′18.332″ E,37°46′50.530″ N,位于甘肃省武威市古浪县黄花滩镇	100°50′3.778″ E,38°45′22.884″ N,位于甘肃省张掖市民乐县三墩滩镇	102°28′8.900″ E,38°57′24.982″ N,位于甘肃省武威市民勤县红砂岗镇
气候特征	年均降水量180 mm,年均蒸发量2 430 mm,年均温度6 ℃,平均海拔2 500 m[18]	年均降水量117.1 mm,年均蒸发量2 337.6 mm,年均温度7.6 ℃海拔2 050～2 100 m[19]	年均降水量113.2 mm,年均蒸发量2 413.5 mm,年均温度1～14 ℃,海拔1 298～1 936 m[20]
地貌与土壤类型	腾格里沙漠东南缘,流动沙丘为主,风沙土,砂粒含量约99%,有机质<0.1%,pH=8.72～9.35	祁连山北麓,戈壁,地表覆砾石(厚4～5 cm,砾石>68%),棕漠土,砂粒含量约86%,有机质<0.2%,pH值8.92～9.25	巴丹吉林沙漠东南缘,荒地土壤砂砾含量约98%,有机质<0.3%,pH值9.06～9.42,电导率>438.67 μS/cm,部分有盐结皮
电站阵列区植被	盖度约38% 主要种:砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*) 伴生种:梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙生针茅(*Stipa caucasica* subsp. *glareosa*)	盖度约53% 主要种:红砂(*Reaumuria songarica*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*) 伴生种:白刺(*Nitraria tangutorum*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙生针茅(*Stipa caucasica* subsp. *glareosa*)	盖度约15% 主要物种:骆驼蓬(*Peganum harmala*)、蝎虎驼蹄瓣(*Zygophyllum mucronatum*)
外围未扰动区植被	盖度约9% 主要种:梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、黄花补血草(*Limonium aureum*)	盖度约7% 主要种:红砂(*Reaumuria songarica*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)	盖度<3% 主要物种:梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)

1.2　土壤样品采集

各电站光伏阵列中心区域选择无明显扰动痕迹的光伏板3块,在各光伏板的前檐(front edge of photovoltaic panel, FP)、板下(underneath photovoltaic panel, UP)、板间(interval between photovoltaic panels, IP)设置采样点,以距光伏电站1 km外未受干扰的原地貌区域为对照(CK),采样点如图1所示。在各采样点挖取深60 cm的土壤剖面各3个(注:因日照角度不同,取土统一在背阳侧进行),用环刀采集各剖面10,30和50 cm处的环刀样用于容重及含水率测定。再按0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm分层采集土壤样品,将同一光伏板、同一部位、同一土层的3个剖面土样等量混合后装入自封袋,带回实验室用于其他理化性质测定。

1.3　土壤理化性质测定

土壤容重(bulk density, BD)和土壤含水率(soil water content, SWC)采用烘干称重法(105 ℃,12 h)测定。其余样品于室内风干后过1 mm筛,剔除石砾、植物根系后备用。

用电位法(水土比为5∶1)测定pH值和电导率(electrical conductivity, EC);重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC);凯氏定氮法测定土壤全氮(total nitrogen, TN);碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤全磷(total phosphorus, TP);氢氧化钠熔融-火焰光度法测定土壤全钾(total potassium, TK),以上具体测定步骤均参照文献[21]。理化指标测定均设置3个重复。

1.4　数据分析

使用Microsoft Excel 2019对数据进行汇总、整理,利用IBM SPSS Statistics 26进行数据处理及分析。运用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析同一电站的空间位置、土层深度分别对土壤理化性质的影响,运用多重比较法(LSD)检验数据间的差异显著性($p<0.05$)。使用Origin 2021绘图。

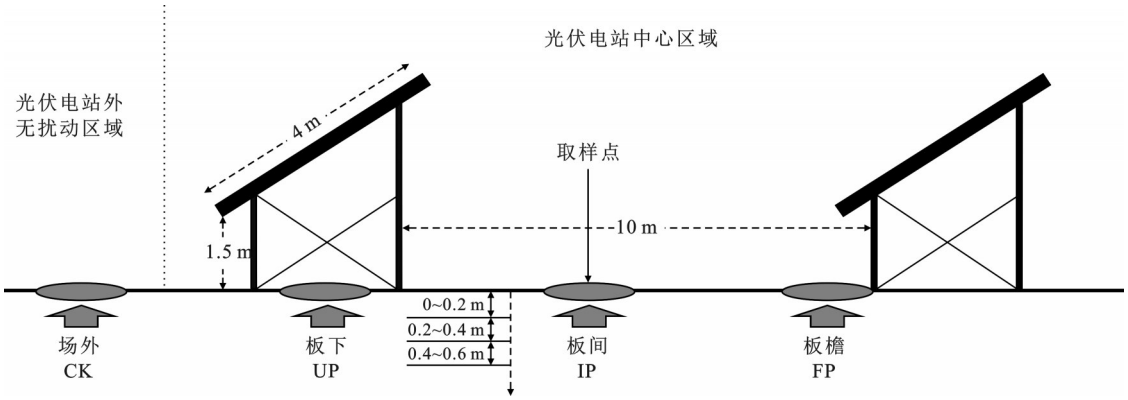


图1 土壤样品采样点布设示意图

Fig.1 Diagram for layout of soil sampling points

2 结果与分析

2.1 光伏电站建设后土壤理化性质的变化

2.1.1 光伏电站建设后沙漠土壤理化性质的变化

黄花滩新诚光伏电站内与电站外围无干扰区的0—60 cm土壤理化性质详见表2。

由表2可知，与CK相比，光伏电站阵列区的SWC，SOC，TN，TK均有显著升高($p<0.05$)，其中UP点TN的增幅最为突出，达82.6%；UP点和IP点SOC显著高于CK($p<0.05$)，分别升高20.0%和31.7%；IP点SWC的增幅最大，达187.3%，同时IP点TK相比CK升高25.9%。而光伏电站阵列区的BD，pH值，EC相比CK均显著降低($p<0.05$)，其中FP点BD降幅最大，为17.2%；UP点和IP点的pH值，EC均显著低于CK($p<0.05$)，EC分别降低了19.9%和49.9%。

表2 黄花滩新诚光伏电站光伏板阵列区不同位置0—60 cm土层的土壤理化特征

Table 2 Soil physicochemical characteristics at different locations in 0—60 cm soil layer within photovoltaic panel array area of Huanghuatan Xincheng Photovoltaic Power Station

土壤理化指标	采样点			
	FP	UP	IP	CK
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.25±0.03^{d}	1.46±0.01^{b}	1.35±0.05^{c}	1.51±0.01^{a}
土壤含水率/%	1.56±0.12^{b}	1.59±0.13^{b}	2.93±0.15^{a}	1.02±0.15^{c}
pH值	9.28±0.01^{a}	8.69±0.11^{b}	8.79±0.11^{b}	9.03±0.17^{ab}
电导率/(μS·cm^{-1})	140.69±4.93^{ab}	119.64±8.15^{b}	74.83±2.61^{c}	149.33±12.68^{a}
土壤有机碳/(g·kg^{-1})	0.55±0.17^{c}	0.72±0.07^{b}	0.79±0.02^{a}	0.60±0.03^{c}
土壤全氮/(g·kg^{-1})	0.31±0.01^{c}	0.42±0.01^{a}	0.34±0.02^{b}	0.23±0.01^{d}
土壤全磷/(g·kg^{-1})	0.09±0.000 3^{a}	0.09±0.000 4^{a}	0.09±0.000 5^{b}	0.08±0.000 9^{c}
土壤全钾/(g·kg^{-1})	0.92±0.02^{b}	0.84±0.01^{c}	1.07±0.01^{a}	0.85±0.03^{c}

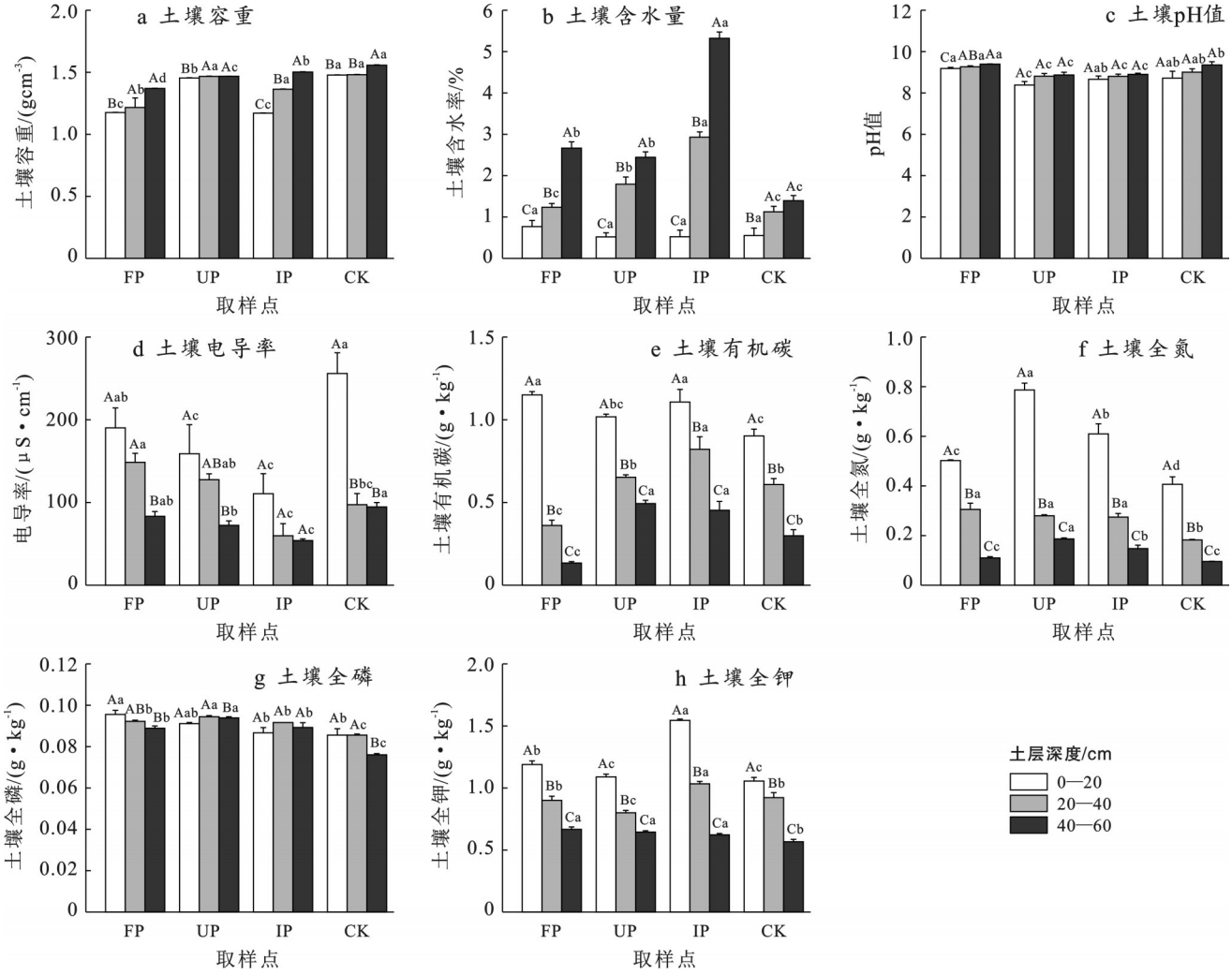
注：①数据为平均值±标准误；②不同小写字母表示不同采样点间差异显著($p<0.05$)。下同。

黄花滩新诚光伏电站各采样点土壤理化性质随土层深度的变化如图2所示。由图2可知，沙漠土壤的BD随深度增加而升高，表明表层的土壤疏松，深层土壤更紧实。UP点和CK点的BD在各个深度均较高，均大于1.46 g/cm^3，而FP点和IP点的BD较低，在0—20 cm土层中BD为1.17 g/cm^3。在FP，UP，IP3个采样点，SWC随深度显著增加($p<0.05$)；而在CK点，40—60 cm土层中SWC低于20—40 cm土层。IP点的40—60 cm土层中SWC极高(5.32%)，相较CK点增幅高达281%，具有显著提升($p<0.05$)，FP点的40—60 cm土层SWC(2.67%)也较高。CK点的SWC在各层中均是最低的(0.55%～1.40%)。沙漠的土壤呈碱性。pH值随深度有升高的趋势。FP点的pH值在各个深度都是最高的(9.18～9.39)，碱性最强。UP点和IP点的pH值相对较低。EC随深度增加而急剧降低，表明可溶性盐分主要聚集在土壤表层。在0—20 cm土层中FP，UP，IP点相较CK点分别降低了25.69%，37.90%，56.77%。IP点的EC在各个深度都是最低的，在40—60 cm土层中仅54 μS/cm。SOC随土层深度增加而显著降低($p<0.05$)，表明SOC主要富集于土壤表层。在0—20 cm土层中，FP点的SOC含量最高

(1.15 g/kg),相较CK点增幅为27.48%,具有显著提升($p<0.05$);在40—60 cm土层中,UP点相较FP点的SOC增幅最大,达267.81%。

与SOC类似,TN含量也随深度增加而显著降低($p<0.05$)。在0—20 cm土层中,UP点的TN含量(0.79 g/kg)相较FP,CK点增幅分别达56.65%,93.43%,具有显著提升($p<0.05$),但在20—40 cm土层中,UP点的TN含量(0.28 g/kg)与IP点(0.27 g/kg)和FP点(0.31 g/kg)差异较小。

不同采样点和深度的TP含量变化相对较小,波动范围在0.076 ~0.096 g/kg,没有表现出明显的变化规律。TK含量随深度增加呈现下降趋势,在0—20 cm土层中,IP点的TK含量相较UP,CK点增幅分别达41.83%,46.31%,具有显著提升($p<0.05$);在40—60 cm土层中,所有采样点的TK含量差异并不显著($p>0.05$)。



注:①不同大写字母表示相同采样点不同深度土层间差异显著($p<0.05$);②不同小写字母表示同一土层不同采样点间差异显著($p<0.05$)。下同。

图2　黄花滩新诚光伏电站光伏板阵列区不同位置各土层的土壤理化性质

Fig.2　Soil physicochemical properties at different locations and soil layers in photovoltaic panel array area of Huanghuatan Xincheng Photovoltaic Power Station

2.1.2　光伏电站建设后戈壁土壤理化性质的变化

三墩滩光伏电站内与电站外围无干扰区的0—60 cm土壤理化性质如表3所示。由表3可知,与CK相比,光伏电站阵列区的SWC,EC,SOC,TN,TP,TK均有显著升高($p<0.05$)。其中FP点的SWC,EC,SOC显著高于CK($p<0.05$),增幅分别高达642.03%,86.11%和35.05%;UP点的TN,TP相比CK增幅突出,分别升高150.00%和37.50%;IP点TK的增幅最大,达106.37%。而光伏电站阵列区的BD,pH相比CK均显著降低($p<0.05$),其中IP点BD降幅最大,为31.97%;FP点和UP点的pH值降幅明显。

三墩滩光伏电站土壤理化性质随土层深度的变化如图3所示。由图3可知,戈壁土壤的BD均随深度增加而显著升高($p<0.05$),表明表层土壤疏松,深层土壤趋于紧实。在0—20 cm土层中IP点的BD相较FP,CK点降幅分别达22.29%和23.27%,表现为

显著降低($p<0.05$)。而CK点在40—60 cm土层的BD最高(1.85 g/cm^3)。SWC的变化规律在不同采样点间差异显著($p<0.05$)。在FP点,SWC随深度显著增加($p<0.05$),其40—60 cm土层SWC极高(6.07%),相较UP,CK点增幅分别达112.60%和424.59%,呈显著提升($p<0.05$)。UP点和IP点的SWC随深度变化趋势不一致。CK点的SWC在各深度土层中均为最低(0.38%～1.16%)。戈壁的土壤呈碱性。CK点的pH值在各土层深度都是最高的(8.92～9.25),碱性较强。FP点的pH值相对较低(8.10～8.53)。EC值随深度增加而降低,表明可溶性盐分主要富集在0—20 cm土层。FP点的EC在0—20 cm土层中相较IP,CK点增幅分别达58.96%和48.15%,具有显著升高($p<0.05$),具有严重的盐渍化风险。CK点40—60 cm土层中EC(431 μS/cm)最低。SOC表现出随土层深度增加而显著降低的趋势($p<0.05$),表明SOC主要富集于土壤表层。在0—20 cm土层中,UP点的SOC含量最高(1.76 g/kg),相较IP,CK点增幅分别达26.08%,25.86%,具有显著升高($p<0.05$),IP点与CK点的含量相对较低且接近。与SOC类似,TN含量也随深度增加而显著降低($p<0.05$)。在0—20 cm土层中UP点的TN含量(0.33 g/kg)显著最高($p<0.05$),是CK点(0.13 g/kg)的2.5倍以上,FP点与IP点的TN含量较为接近。不同采样点和深度的TP含量变化相对较小。在0—20 cm土层中,UP点的TP含量(0.129 g/kg)最高,而CK点的各层TP含量普遍最低。TK含量在不同采样点间差异显著($p<0.05$)。在0—20 cm土层中,UP点和IP点的TK含量差异并不显著,但UP点显著高于FP点和CK点($p<0.05$),增幅分别为12.97%,69.50%。CK点的TK含量随深度急剧下降,其40—60 cm土层TK含量仅为0.69 g/kg。

表3 三墩滩光伏电站光伏板阵列区不同位置0—60 cm土层的土壤理化特征

Table 3 Soil physicochemical characteristics at different locations in 0—60 cm soil layer within photovoltaic panel array area of Sanduntan Photovoltaic Power Station

土壤理化指标	采样点			
	FP	UP	IP	CK
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.27±0.0003^b	1.23±0.0004^c	1.00±0.0002^d	1.47±0.0001^a
土壤含水率/%	5.12±0.15^a	2.12±0.21^b	2.64±0.25^b	0.69±0.13^c
pH值	8.38±0.09^c	8.40±0.01^c	8.73±0.08^b	9.05±0.12^a
电导率/(μS·cm^{-1})	1 638.56±25.02^a	1 226.56±38.48^b	926.33±17.83^c	880.41±46.61^c
土壤有机碳/(g·kg^{-1})	1.31±0.02^a	1.23±0.01^b	1.08±0.01^c	0.97±0.02^d
土壤全氮/(g·kg^{-1})	0.12±0.002^c	0.20±0.003^a	0.14±0.001^b	0.08±0.001^d
土壤全磷/(g·kg^{-1})	0.10±0.002^b	0.11±0.002^a	0.10±0.001^c	0.08±0.001^d
土壤全钾/(g·kg^{-1})	3.16±0.03^c	3.88±0.03^b	4.21±0.01^a	2.04±0.01^d

2.1.3 光伏电站建设后荒地土壤理化性质的变化

红砂岗华电光伏电站内与电站外围无干扰区的0—60 cm土壤理化性质如表4所示。由表4可知,与CK相比,光伏电站阵列区的BD,EC,SOC,TN,TP,TK均有显著升高($p<0.05$)。其中FP点TK相比CK的增幅最大,达65.28%;UP点的EC,SOC显著高于CK($p<0.05$),增幅分别达44.63%,23.33%;IP点的BD,TN,TP相比CK增幅突出,分别升高30.25%,44.11%和25.00%。而光伏电站阵列区的SWC相比CK并无显著差异($p>0.05$)。

红砂岗华电光伏电站土壤理化性质随深度的变化如图4所示。由图4可知,荒地的BD随土层深度增加而显著升高($p<0.05$)。在0—20 cm土层中,IP点的BD(1.37 g/cm^3)显著高于FP点($p<0.05$),增幅为27.15%。在40—60 cm土层中,IP点的BD达到最大值(1.65 g/cm^3),显著高于CK点($p<0.05$),增幅达20.15%。SWC在不同采样点的变化幅度存在差异。IP点的SWC随深度增加显著上升($p<0.05$),其40—60 cm土层SWC最高(4.43%),显著高于UP,CK点($p<0.05$),增幅分别为73.25%,77.17%。FP点与IP点变化趋势类似,其40—60 cm土层SWC也较高(4.20%)。CK点的SWC在各土层中均为最低(0.76%～2.50%)。荒地的pH呈碱性。FP点的pH值在各土层中均为最高,碱性最强。EC值总体随深度增加而降低。UP点的EC值在各个土层中均为最高值,存在明显的盐分积累现象。CK点40—60 cm土层的EC(439 μS/cm)最低。SOC与TN含量均表现出随土层深度增加而显著降低的趋势($p<0.05$),二者主要富集于土壤表层。在0—20 cm土层中,FP点的SOC(2.50 g/kg)含量相较CK点显著最高($p<0.05$),增幅达16.13%。IP点在各深度土层中的TN(0.26～0.78 g/kg)含量均为最高。CK点的

SOC 和 TN 含量均相对较低。TP 含量随深度增加有下降的趋势。在 0—20 cm 土层中,IP 点的 TP 含量(0.20 g/kg)相较 CK 点显著最高($p<0.05$),增幅达 49.77%,而 CK 点的各层 TP 含量均为最低。TK 随深度的增加显著下降($p<0.05$)。在 0—20 cm 土层中,FP 点的 TK 含量(3.66 g/kg)相较 CK 点增幅达 77.84%,具有显著上升($p<0.05$)。CK 点在 40—60 cm 土层含量仅为 0.81 g/kg, FP, UP, IP 点均显著高于 CK 点($p<0.05$),增幅分别为 57.54%, 49.32%,72.61%。

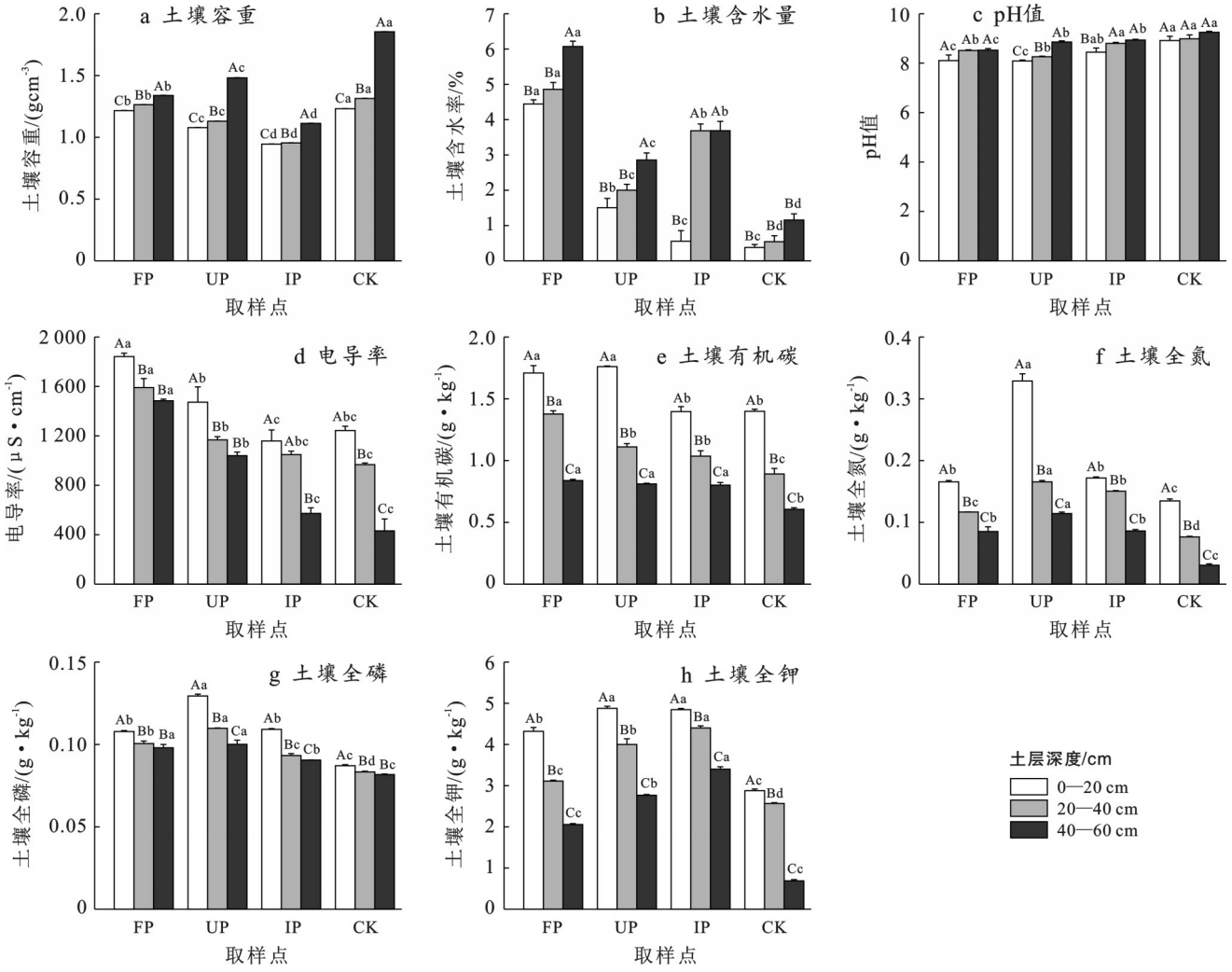


图 3　三墩滩光伏电站光伏板阵列区不同位置不同土层的土壤理化性质

Fig.3　Soil physicochemical properties at different locations and soil layers in photovoltaic panel array area of Sanduntan Photovoltaic Power Station

表 4　红砂岗华电光伏电站光伏板阵列区不同位置 0—60 cm 土层的土壤理化特征

Table 4　Soil physicochemical characteristics at different locations in 0—60 cm soil layer within photovoltaic panel array area of Hongshagang Huadian Photovoltaic Power Station

土壤理化指标	采样点			
	FP	UP	IP	CK
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.26±0.06^{c}	1.44±0.07^{b}	1.55±0.03^{a}	1.19±0.05^{c}
土壤含水率/%	2.23±0.33^{a}	2.31±0.21^{a}	2.00±0.42^{a}	1.41±0.62^{a}
pH值	9.46±0.01^{a}	9.15±0.03^{c}	9.27±0.04^{b}	9.22±0.02^{bc}
电导率/(μS·cm^{-1})	574.00±57.01^{b}	843.22±41.77^{a}	582.00±99.33^{b}	583.00±20.23^{b}
土壤有机碳/(g·kg^{-1})	2.17±0.05^{a}	2.22±0.04^{a}	2.03±0.01^{b}	1.80±0.05^{c}
土壤全氮/(g·kg^{-1})	0.33±0.01^{b}	0.35±0.01^{b}	0.49±0.03^{a}	0.34±0.01^{b}
土壤全磷/(g·kg^{-1})	0.13±0.003^{c}	0.14±0.002^{b}	0.15±0.002^{a}	0.12±0.001^{d}
土壤全钾/(g·kg^{-1})	2.38±0.03^{a}	2.19±0.06^{b}	2.26±0.03^{ab}	1.44±0.03^{c}

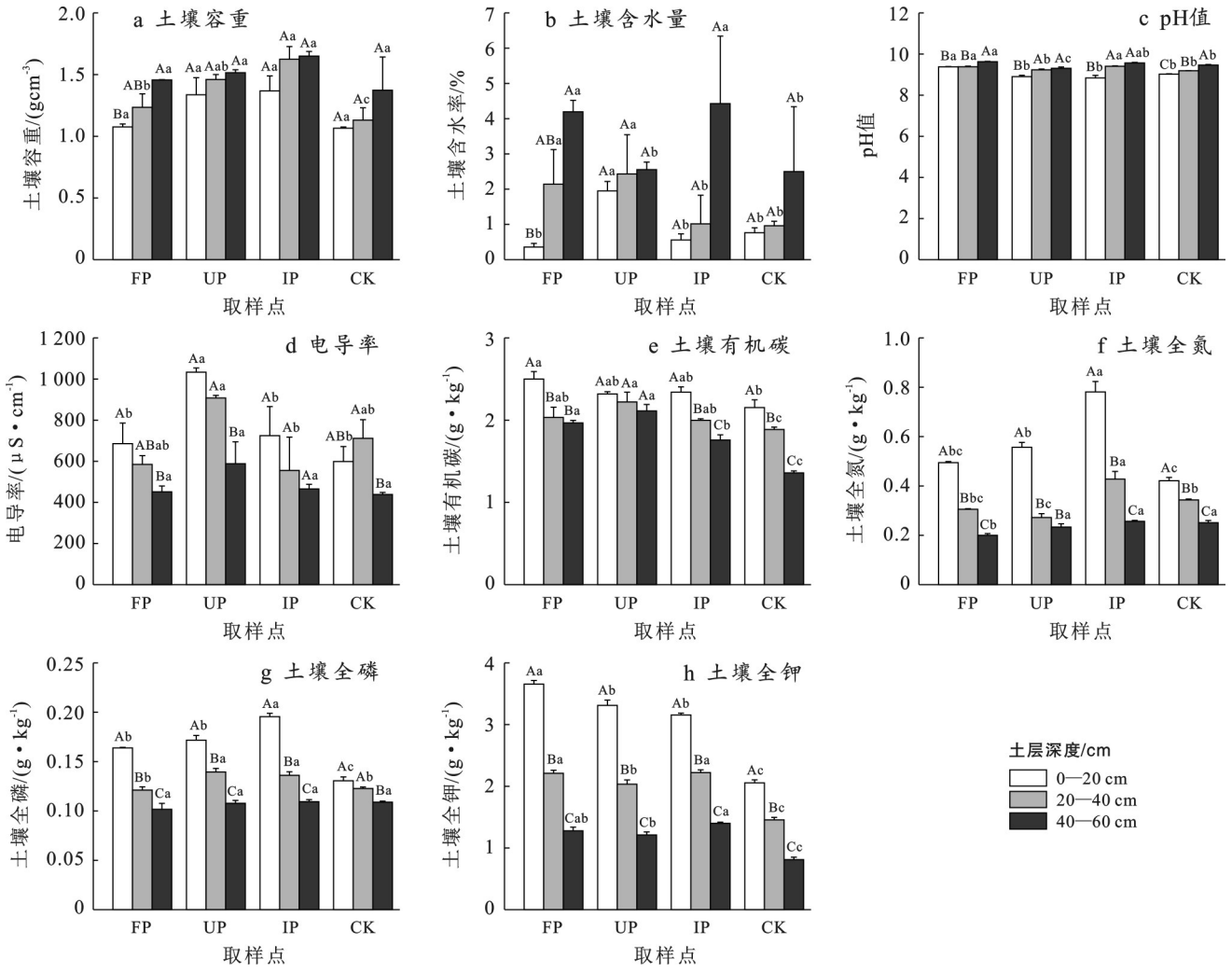


图4 红砂岗华电光伏电站光伏板阵列区不同位置不同土层的土壤理化性质特征

Fig.4 Soil physicochemical properties at different locations and soil layers in photovoltaic panel array area of Hongshagang Huadian Photovoltaic Power Station

2.2 光伏电站对不同土壤类型理化性质的影响程度

各光伏电站土壤理化性质相较于未干扰对照区的提升率如图5所示。由图5可知,古浪县黄花滩新诚光伏电站中SWC, SOC, TN, TP, TK相较沙漠区CK均有提升,其中TN增幅最大,为56%,但BD, pH值, EC分别降低了10.04%,1.19%,25.19%;民乐县三墩滩光伏电站中SWC, EC, SOC, TN, TP, TK相较戈壁区CK均有提升,其中SWC, EC, SOC, TP增幅较大分别为375.19%, 43.55%, 24.79%和24.06%,但BD, pH值分别降低了20.3%, 6.04%;民勤县红砂岗华电光伏电站中各项指标相较荒地区CK均呈现正向提升,其中BD, TK增幅较大分别为18.80%和83.55%,各指标提升率相对均衡。

3 讨 论

3.1 光伏电站的长期运营对土壤理化性质的影响

本研究结果表明,光伏电站改变了站区周边的土壤微环境,使光伏板不同空间位置(FP, UP, IP)的土壤理化性质呈现显著的空间异质性($p<0.05$)。但其具体表现与电站所在地的原始环境条件密切相关。

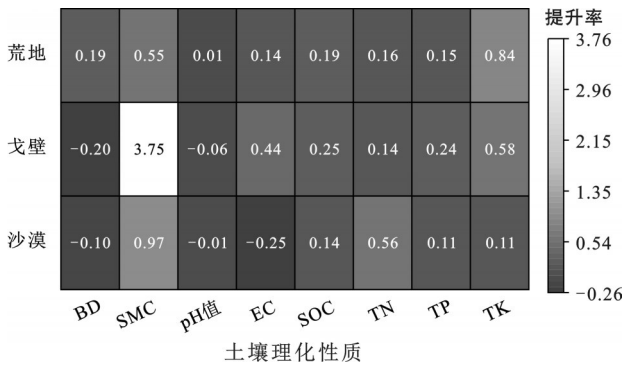


图5 长期运营的光伏电站土壤理化性质相较于未干扰对照区(CK)的提升率

Fig.5 Increase rates of soil physicochemical properties in long-term operating photovoltaic power stations compared with undisturbed control sites (CK)

土壤水分(SWC)的空间分异是驱动其他性质变化的关键[22]。本研究发现,3个电站内各位置的SWC均高于CK,这与何鑫东等[9]和车光欣等[22]关于光伏阵列能有效提高土壤湿度的结论总体趋势一致。何鑫东等[9]的研究主要基于黄土高原地区的砂壤土,其SWC平均增幅为19.61%。本研究中,戈壁区CK持水能力极差(SWC仅0.69%),而民乐县三墩滩光伏电站站区SWC平均增幅高达375.19%。在极度干旱的戈壁地区,光伏板通过遮挡阳光的直射、减少地表水分蒸发(UP处)极大地抑制了土壤水分的蒸发[3],而板檐滴水和光伏板的淋洗为土壤提供了额外水源[23],其效果在原本持水能力极差的戈壁基质上表现得尤为突出。相较之下,沙漠和荒地原始土壤自身具有一定的持水能力,因此长期运营的光伏电站带来的水分绝对增量虽然显著,但相对增幅较小。

BD的变化反映了电站建设对土壤结构的物理扰动和风沙活动的影响。结果表明,古浪县黄花滩新诚光伏电站站区FP与IP点的BD均显著低于CK,民乐县三墩滩光伏电站站区BD相较CK大幅降低了20.3%,这与贾瑞庭等[24]关于人工固沙可以降低光伏电站土壤容重的研究相符。本研究中,沙漠区电站FP处因风速加快导致的风蚀作用移走了部分表层物质,而被掏蚀的土粒在IP处再堆积,形成相对疏松的堆积体[25],这种风蚀-堆积过程打破了土壤原有的紧实状态,导致了BD降低。而戈壁区CK土壤结构极为紧实(40—60 cm土层BD达1.854 g/cm^3),但光伏电站的建设活动(如平整土地)破坏了地表自然形成的坚硬砾幕[8,26],这种对原生结构的物理性破坏,导致戈壁土壤容重显著降低。但在荒地,民勤县红砂岗华电光伏电站站区内UP点(1.44 g/cm^3)、IP点(1.55 g/cm^3)的BD显著高于CK(1.19 g/cm^3),这与于耀鑫等[20]对光伏电站的建设导致温带荒漠土壤容重增加的观测结果基本一致。本研究中民勤县红砂岗华电光伏电站运营已超过10 a,光伏板减少了UP处的地表扰动,而IP处作为设备运输与维护的主要通道,长期运营后导致UP, IP处深层土壤被进一步压实。

本研究结果表明,光伏电站的建设对不同土壤类型的土壤养分(SOC, TN, TP, TK)均有普遍提升。这与鲍平安等[27]关于植被恢复后1 a和2 a的光伏电站内SOC, TN, TP, TK相较电站外均显著提升的研究结果基本一致。然而,本研究基于建站后超过10 a(古浪县黄花滩新诚光伏电站、民乐县三墩滩光伏电站建于2013年,民勤县红砂岗华电光伏电站建于2014年)的长期观测数据,进一步揭示了光伏电站在不同土壤类型中养分提升的持续性与差异性。相较于短期研究,本研究中戈壁区(民乐县三墩滩光伏电站)的SOC, TP提升幅度(分别为24.79%,24.06%)高于鲍平安等[27]报道的短期恢复效果,表明长期运行下光伏电站对土壤养分的改良效应更为显著。

3.2　光伏电站建设的生态效益与土壤类型适宜性评估

本研究结果表明,在3个生态脆弱区建设光伏电站总体上具有积极的土壤改良作用,但其具体效益各有不同。①对于沙漠,光伏电站的建设在提升土壤养分(TN提升了56%)和水分的同时,也需关注其潜在的风蚀风险。BD的降低与SOC的升高共同表明,光伏电站改善了表层土壤的物理结构,增加了孔隙度和有机质含量,有利于水分入渗和植物生长,EC的下降也表明土壤盐分减少,减轻了植物生长的盐分胁迫。然而,在风力强劲的沙漠环境中,若缺乏植被覆盖或地表结皮保护,这种疏松的表层土壤在初期可能更易受风蚀影响[28]。因此,在沙漠建设光伏电站需格外注重风沙防治措施,如在板间空地人工促进植被恢复或布设沙障,以稳定新堆积的疏松物质,巩固生态恢复成果[29]。②对于戈壁,光伏电站的建设不仅提升了土壤的养分(SOC, TN, TP, TK),还极大地改善了土壤水分状况和物理结构(SWC提升了375.19%,BD降低了20.3%)。这表明在类似民乐三墩滩的戈壁地区,光伏电站的“遮阴增湿”效应能极大地改善植物生长的限制性因子——水分条件[30-31],同时,电站建设期对地表坚硬砾幕的破除作业,有效打破了坚硬的表层土壤结构,改善了通透性[32]。为生态恢复创造了极为有利的基础条件,生态正效益最为突出。③对于荒地,光伏电站的建设促使各项土壤理化指标均呈现较为均衡的正向提升(相较CK各指标增幅在14%~83%)。这表明在该区域,光伏电站对微环境的改造全方位地促进了土壤质量的提升,为植被的定居与生长创造了更为协调的立地条件[33],是实现经济效益与生态效益双赢的理想选择。

4　结　论

在沙漠、戈壁、荒地地区,光伏电站均能不同程度地提升土壤关键养分指标。尽管3种类型土壤的养分均有提升,但其提升幅度存在显著差异,戈壁因

其贫瘠的本底和严苛的水分条件使得光伏电站的介入能产生显著的改善效果(SWC, EC, SOC, TN, TP, TK的增幅分别达375.19%,43.55%,24.79%,14.13%,24.06%和57.93%,BD和pH值分别降低了20.30%和6.04%)。长期运营的光伏电站在改善戈壁土壤结构、提升养分含量方面具有全面且显著的生态恢复潜力,为西北"沙戈荒"生态脆弱区域的综合治理与土地可持续利用提供了有效路径。

参考文献(References)

[1] 严陆光,夏训诚,周风起,等.我国大规模可再生能源基地与技术的发展研究[J].电工电能新技术,2007,26(1):13-24.
Yan Luguang, Xia Xuncheng, Zhou Fengqi, et al. A development study for Chinese large scale renewable energy source base and technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(1):13-24.

[2] 余红.可再生能源发电对PM_{10}和$PM_{2.5}$减排的贡献核算[J].环境工程技术学报,2014,4(4):321-325.
Yu Hong. Emission reduction accounting for PM_{10} and $PM_{2.5}$ by renewable energy power generation [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(4): 321-325.

[3] 常兆丰,刘世增,詹科杰,等.沙漠光伏电场的光伏转换及能量传递效应:以甘肃古浪振发光伏电场为例[J].生态经济,2020,36(11):188-194.
Chang Zhaofeng, Liu Shizeng, Zhan Kejie, et al. Photovoltaic conversion and energy transfer effect of desert photovoltaic field: A case study of Gulang Zhenfa photovoltaic field of Gansu [J]. Ecological Economy, 2020, 36(11):188-194.

[4] 袁嘉茂,高永.沙区追踪式光伏阵列区域土壤养分空间分异特征[J].中国农业科技导报,2025,27(11):216-225.
Yuan Jiamao, Gao Yong. Spatial differentiation characteristics of soil nutrients in sand area tracking photovoltaic array area [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025,27(11):216-225.

[5] 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.
Xu Shenlai, Chen Liding, Chen Chen, et al. The impact of construction on agricultural soil nutrients in the Ji-Ning section of gas pipeline project from west to east [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 627-635.

[6] Ormeño M S, Hervás S, Amorós J Á, et al. Soil protection in solar photovoltaic farms by revegetation with mycorrhizal native species [J]. Soil Research, 2016, 54(2):237-241.

[7] 李永得,马瑞,王强强,等.腾格里沙漠西南缘光伏阵列风沙运动特征的观测研究[J].水利规划与设计,2025(10):160-165.
Li Yongde, Ma Rui, Wang Qiangqiang, et al. Observation and research on wind-sand movement characteristics of photovoltaic array in the southwestern edge of Tengger Desert [J]. Water Resources Planning and Design, 2025(10):160-165.

[8] 李振洋,张宏伟,尚思汝,等.戈壁光热电站内风沙环境特征及运动规律[J].中国沙漠,2025,45(2):17-28.
Li Zhenyang, Zhang Hongwei, Shang Siru, et al. Environmental characteristics and movement rules of wind-blown sand in Gobi concentrated solar power plant [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(2):17-28.

[9] 何鑫东,李涛,王文玉,等.光伏板布设方式对土壤水热运移特征的影响[J/OL].西安理工大学学报,1-13.https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250416.1613.006.
He Xindong, Li Tao, Wang Wenyu, et al. Effect of photovoltaic panel layout on soil water and heat transport characteristics [J/OL]. Journal of Xi'an University of Technology,1-13.https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250416.1613.006.

[10] 左强,杨昊天,杨奕颖,等.沙漠光伏建设模式通过土壤水分影响固沙草本植物生长特征[J].中国沙漠,2025,45(3):291-301.
Zuo Qiang, Yang Haotian, Yang Yiying, et al. The construction mode of desert photovoltaic facilities influences the growth characteristics of sand-fixing herbaceous plants through soil moisture [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(3):291-301.

[11] 杨若婷,庞秀岚,马鸿元,等.松嫩平原固定式光伏方阵土壤水热盐时空分异特征[J].中国水土保持科学,2026,24(1):149-158.
Yang Ruotin, Pang Xiulan, Ma Hongyuan, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil water-heat-salt characteristics in the plough layer under fixed-mounted photovoltaic arrays in the Songnen Plain [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026,24(1):149-158.

[12] 屈准,杨肃昌,赵鹏,等.青藏高原东北缘大规模光伏电站对高寒沙地植被-土壤的影响研究:以青海共和盆地为例[J].干旱区资源与环境,2024,38(12):92-106.
Qu Zhun, ang Suchang, Zhao Peng, et al. Effects of large-scale photovoltaic power stations on vegetation and soil in Alpine sandy land in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Gonghe basin in Qinghai Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(12):92-106.

[13] 孙文倩,楚彬,叶国辉,等.光伏发电站对高寒草甸土壤细菌群落组成及多样性的影响研究[J].草地学报,2025,33(2):440-450.
Sun Wenqian, Chu Bin, Ye Guohui, et al. Effects of photovoltaic power station on soil bacterial community composition and diversity in alpine meadow [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(2):440-450.

[14] 吴彤,段媛媛,李捷,等.不同光伏阵列建设对荒漠草地植物群落自然恢复和土壤理化性质的影响[J].草业科学,2025,42(9):2178-2189.
Wu Tong, Duan Yuanyuan, Li Jie, et al. Effects of different photovoltaic array designs on the natural restoration of plant communities and soil physicochemical properties in desert grasslands [J]. Pratacultural Science, 2025,42(9):2178-2189.

[15] 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.
Zhang Zhiping, Shang Wen, Wang Qi, 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.

[16] 刘坤,王波,张发国,等.光伏电站建设的生态效应:光伏治沙研究进展与展望[J].中国沙漠,2025,45(1):277-291.
Liu Kun, Wang Bo, Zhang Faguo, et al. Ecological effects of photovoltaic power station construction: Retrospect and prospect on photovoltaic desertification control [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(1): 277-291.

[17] 刘雅婧,王丹阳,常旭,等.光伏电站建设对西北荒漠区生态环境的影响研究进展[J].中国水土保持科学,2025,23(2):9-17.
Liu Yajing, Wang Danyang, Chang Xu, et al. Research progress in the impact of photovoltaic power station construction on the ecological environment of the desert region of northwest China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(2):9-17.

[18] 马婧,郭方君,邹枝慧,等.腾格里沙漠南缘不同恢复阶段沙质草地植被的季节变化特征[J].草业学报,2023,32(5):203-210.
Ma Jing, Guo Fangjun, Zou Zhihui, et al. Seasonal variation in vegetation during restoration of sandy grassland at the southern edge of the Tengger Desert [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(5):203-210.

[19] 赵丽娜,李昱达,缑倩倩,等.荒漠绿洲扩张区土壤微生物群落和多功能性的时效累积效应:以张掖绿洲为例[J].干旱区研究,2025,42(9):1612-1627.
Zhao Lina, Li Yuda, Gou Qianqian, et al. Cumulative effects of time on soil microbial community and multifunctionality in a desert oasis expansion area: A case study of the Zhangye oasis [J]. Arid Zone Research, 2025,42(9):1612-1627.

[20] 于耀鑫,纪童,何国兴,等.光伏电站建设对温带荒漠植被和土壤的影响[J].草地学报,2025,33(12):4129-4138.
Yu Yaoxin, Ji Tong, He Guoxing, et al. Impact of photovoltaic power station construction on temperate desert vegetation and soil [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(12):4129-4138.

[21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[22] 车光欣,李艳梅,胡元泽,等.滇中石漠化地区光伏阵列对微气候-土壤的影响机制及效应[J].水土保持学报,2025(3):191-201.
Che Guangxin, Li Yanmei, Hu Yuanze, et al. Mechanisms and effects of photovoltaic arrays on microclimate-soil in the rocky desertification area of central Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025(3):191-201.

[23] 孟广双.荒漠光伏太阳能电池板表面灰尘作用机理及其清洁方法研究[D].青海 西宁:青海大学,2015.
Meng Guangshuang. Research on mechanism of dust particle adhesion and removal from solar panel surface in desert area [D]. Xining, Qinghai: Qinghai University, 2015.

[24] 贾瑞庭,袁立敏,蒙仲举.植物措施对沙漠光伏电站土壤的改良效应[J].中国农业科技导报,2023,25(10):182-188.
Jia Ruiting, Yuan Limin, Meng Zhongju. Effects of plant measures on soil improvement of desert photovoltaic power station [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023,25(10):182-188.

[25] 郭彩赟,韩致文,李爱敏,等.库布齐沙漠110MW光伏基地次生风沙危害的动力学机制[J].中国沙漠,2018,38(2):225-232.
Guo Caiyun, Han Zhiwen, Li Aimin, et al. Dynamic mechanism research on the secondary blown sand disaster in the 110 MW photovoltaic arrays of the Hobq Desert [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(2):225-232.

[26] 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.
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.

(下转第 106 页)