

张靖涵, 刘宝勇, 杜朋真, 等. 农光互补模式对海州露天矿排土场土壤的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(4): 73-81.

ZHANG J H, LIU B Y, DU P Z, et al. Effect of the agricultural and photovoltaic complementary mode on the soil of the Haizhou open-pit mine discharge field[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(4): 73-81.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.04.09

农光互补模式对海州露天矿排土场土壤的影响

张靖涵¹, 刘宝勇¹, 杜朋真², 张桐普¹, 赵 硕¹

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘 要:为探究农光互补模式下光伏电站对土壤性质的影响,以阜新市海州露天矿排土场光伏电站内玉米区、荞麦区、自然恢复区以及周边对照区4个区域为研究对象,对2023年秋季与2024年春季2个时期土壤的理化性质指标进行测定,并对土壤中各种理化性质指标进行相关性分析。结果表明,相对于2023年秋季,2024年春季4个区域中土壤的湿密度、含水率和容重含量均有不同程度增加,土壤的田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度含量均有不同程度下降;土壤的pH值、电导率和有机质含量均有不同程度增加,土壤中的碱解氮、有效磷以及速效钾含量均有不同程度降低;除pH值外,2个时期内种植玉米与荞麦的土壤养分含量均高于自然恢复区和周边对照区,4个区域土壤的物理性质没有明显差异。相关性分析结果表明,促进植物生长的碱解氮与速效钾含量对土壤理化性质指标影响程度较大,可作为提升作物产量与改善土壤质量的重要指标。综上,在农光互补模式下种植玉米、荞麦农作物可以改善露天矿排土场内土壤质量,可以在当地推广。

关键词:农光互补模式;土壤理化性质;光伏电站;海州露天矿排土场

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2025)04-0073-09

Effect of the Agricultural and Photovoltaic Complementary Mode on the Soil of the Haizhou Open-Pit Mine Discharge Field

ZHANG Jinghan¹, LIU Baoyong¹, DU Pengzhen², ZHANG Tongpu¹, ZHAO Shuo¹

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125000, China)

Abstract: In order to investigate the impact of photovoltaic power plants under the operation of the agricultural and photovoltaic complementary mode on soil properties, in this study, taking four areas, namely, the corn area, the buckwheat area, the natural recovery area, and the surrounding control area in the photovoltaic power plant in the Haizhou open-pit mine discharge field in Fuxin city in two different periods of the autumn of 2023 and the spring of 2024, the physicochemical property indexes of the soil were measured and the correlation analysis of the properties was conducted. The results showed that compared to the autumn of 2023, the wet density, moisture content, and bulk density of the soil in the four areas in the spring of 2024 increased to different degrees, and the water holding capacity, total porosity, capillary porosity as well as non-capillary porosity of the soil decreased to different degrees. The soil pH, electrical conductivity, and organic matter content of the soil increased to different degrees, and the alkali hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium content of the soil decreased to different degrees. Except for pH, the nutrient content of the soil planted with corn and buckwheat in the two periods were higher than those in the natural recovery area and the surrounding control area, and the physical properties of the soil in the four areas did not differ significantly. The results of the correlation showed that the content of alkali hydrolyzed nitrogen and available potassium which promoted plant growth had a greater influence on the physicochemical property indexes

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划(2022JH2/101300196)

作者简介: 张靖涵, 在读硕士, 研究方向: 工矿区水土保持以及环境污染与治理, E-mail: l3942193939@163.com

通信作者: 刘宝勇, 副教授, 博士, 主要从事工矿区水土保持以及环境污染与治理研究, E-mail: liubaoyong00@163.com

in the soil, and could be used as an important index to improve crop yield and soil quality. In conclusion, planting corn and buckwheat crops under the agricultural and photovoltaic complementary mode could improve the soil quality in the open-pit mine discharge field and was worth promoting and using locally.

Keywords: the agricultural and photovoltaic complementary mode; soil physicochemical properties; photovoltaic power plant; Haizhou open-pit mine discharge field

农光互补模式是一种利用农业和光伏发电相互补充的能源发展模式,该模式利用光伏发电设施可以搭建在农田上方,利用太阳能进行发电。这不仅能够有效利用农田上方的空间资源,还能够提供一定的遮阴效果,有利于农作物的生长^[1]。同时,光伏发电还可以为农田提供电力,满足灌溉、照明等各项用电需求,提高农业生产率,降低对常规能源的依赖程度,促进环境保护和可持续发展^[2]。

土壤养分是由土壤提供的植物生长所必需的营养元素,它不仅能提高土壤的质量、改善生态环境,还是植物生长所需养分的直接来源^[3]。针对光伏电站建设对土壤理化性质的影响,国内学者开展了各种光伏发电项目环境影响评价工作,提出了不同的生态环境恢复措施,主要包括植物对土壤的改良措施、风蚀防治措施,电站建设对土壤的影响、植被恢复的影响等研究^[4-10]。但这些研究主要集中在西北草原区、戈壁区及沙漠区等,关于华北地区的光伏电站建设后对生态恢复的研究则报道较少,且鲜有关于农光互补项目的实施对复垦后矿区排土场土壤的影响效应研究。

笔者以阜新嘉寓光伏电站为例,通过对项目区内作物种植土壤与原地貌土壤在不同时间内理化性质的分析,探讨光伏项目运营期间农光互补对土壤理化性质的影响,以期为海州露天矿排土场的生态修复提供帮助。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

1.1.1 自然背景 研究区位于辽宁省阜新市海州露天矿排土场北侧的光伏电站内(E121°35′~121°45′,N41°52′~42°2′,图1),平均海拔200 m。矿区周边生态环境经过长达50 a的开采造成了较大的破坏,大面积的土地占压使得土壤遭到污染破坏,动植物大量减少,地表粉尘飞扬,易形成沙尘暴,导致周边土地的荒漠化,对矿区周边的生态环境破坏严重^[11]。

光伏电站内土地性质为农用复垦地,由于原地表土壤的条件不适宜植物生长,为实施农光互补项目,在电站项目建成后部分光伏板之间原有裸露地表上方区域覆盖厚度为40 cm左右的红壤土。根据农用经济作物对于生长环境的不同需求,整个场区内选择种植玉米与荞麦2种作物。

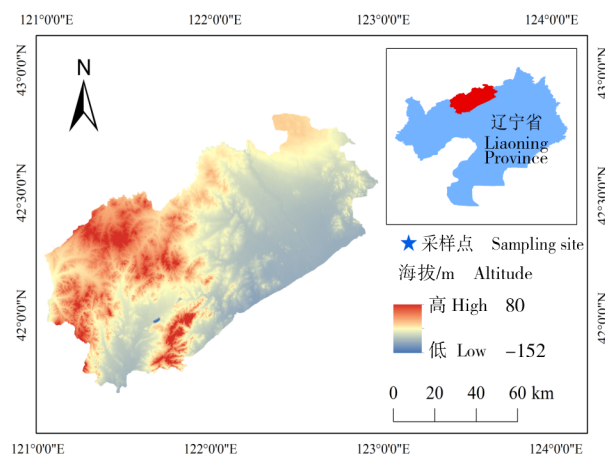


图1 研究区具体位置

Fig.1 Specific location of the study area

1.1.2 气候特征 研究区位于辽宁省西北部,所属温带半干旱大陆性季风气候,全年气温变化较大,多风、少雨、干燥。夏季温度较高,多以西南风为主,最高气温可达40.6℃;冬季温度较低,最低气温-28.4℃,多以西北风为主。年平均气温7.8℃。多年平均蒸发量为1 738.0 mm,其中5—6月蒸发最强;年平均降水量为519.3 mm,最低310.7 mm,最高824.7 mm,日降雨量最大为147 mm^[12]。该区年平均风速2.3 m/s,最大风速为16.0 m/s。场区内太阳能水平辐射平均为5 142 MJ/m²,经计算,该地区太阳能资源属于丰富区。

1.1.3 植被与土壤特征 研究区周边的植被属于华北植物区,植被丰富,有森林、灌木、草地、草甸等^[13]。场区内土地类型包括覆土后农用复垦地、旱地、其他草地或未利用地。

1.1.4 工程概况 本工程为嘉寓阜新200 MW光伏电站项目,位于辽宁省阜新市海州露天矿坑及

矿坑周边地区5号地、7号地块,所在场区总面积为369.25 hm²,场区内海拔250 m。电站光伏板采用多主栅双面双硅太阳能组件,倾斜角度为10~55°,光伏板底端距地面约2 m,间距为12 m,项目直流侧装机容量为200.08 MW。

1.2 试验设计

基于农光互补模式光伏工程的实际特点,本试验于2023年秋季秋收时节与2024年春季播种时节选择电站内玉米种植区(YM)、荞麦种植区(QM)、自然恢复区(ZR)的光伏板和电站周边(ZB)4个其他自然条件较好、地形平坦且无工程干扰的区块为研究区域。其中玉米和荞麦种植区始于2023年春季种植,秋季收获。

1.3 测定项目及方法

每个区域中选取一块样地(2 m×2 m),每块样地中选取3个具有代表性的样点,按0~20、20~40 cm的深度通过四分法分层采集土样,带回实验室自然风干过筛,备用。土壤样品的处理及分析方法采用土壤常规分析方法^[14]。湿密度、容重、含水率、土壤孔隙度均采用环刀法测定;田间持水量采用室内威尔克斯测定法;pH与电导率采用水土比为1:5的方法测定;速效钾含量采用中性醋酸铵提取-火焰光度法测定;有效磷含量采用

NaHCO₃法测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定。

1.4 数据分析

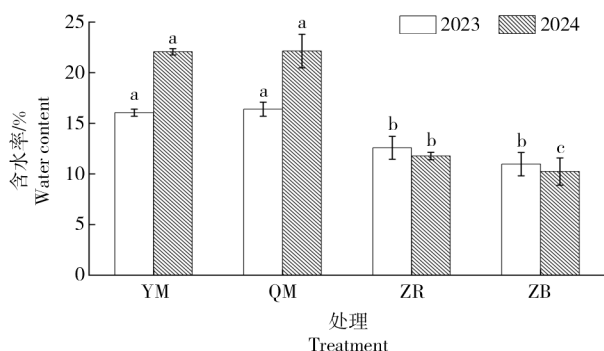
利用Excel 2010对数据进行统计与分析,数据的相关性与显著性检验采用IBM SPSS 27.0.1软件,并通过Pearson相关系数对各指标进行相关性分析,运用Origin 2022和Matlab进行绘图。

2 结果与分析

2.1 农光互补模式光伏电站建设对露天矿排土场土壤物理性质的影响

2.1.1 不同处理对土壤湿密度、含水率的影响 由图2可知,4种区域的土壤湿密度在2023年秋季整体表现为QM>ZB>ZR>YM,2024年春季整体表现为ZR>QM>ZB>YM,2024年春季4种区域的平均湿密度均高于2023年秋季,但2次不同取样时间内各处理间差异均不显著。

2023、2024年4种区域的土壤平均含水率均表现为QM>YM>ZR>ZB,YM与QM间差异不显著,但与ZR和ZB间差异都达到了显著水平($P<0.05$)。2024年YM、QM的平均含水率均高于2023年。



不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著

Different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments at the $P<0.05$ level

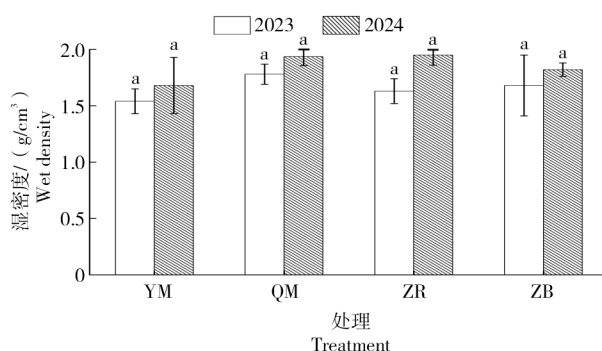


图2 不同处理对土壤湿密度、含水率的影响

Fig.2 Comparison of soil wet density and moisture content in different treatments

2.1.2 不同处理对土壤容重、田间持水量的影响 由图3可知,2023年4种区域的容重平均值为QM>ZB>ZR>YM,4种区域间差异不显著。而2024年4种区域的容重为ZR>QM>ZB>YM,仅ZR与YM间差异显著($P<0.05$)。2 a内自然恢复区相较于其他3个区域的容重有明显增加。

2023年4种区域的田间持水量依次为YM>

QM>ZR>ZB,除QM与YM间差异不显著外,其他区域均都达到了显著差异($P<0.05$)。而2024年4种区域的田间持水量含量依次为QM>YM>ZB>ZR,仅ZB与其他3个区域间差异显著($P<0.05$)。除ZR含量降低外,2024年相较于2023年3种区域的田间持水量有明显增加。

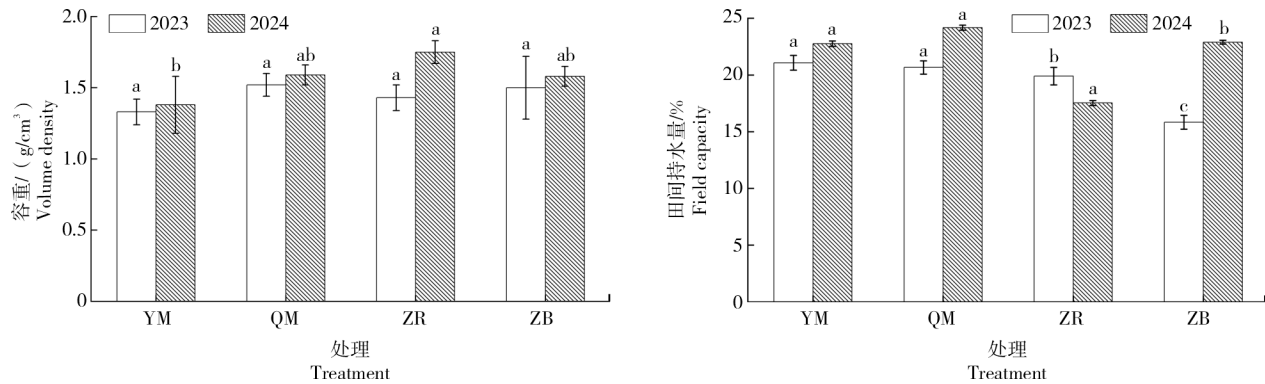


图3 不同处理对土壤容重、田间持水量的影响

Fig.3 Comparison of soil bulk density, water holding capacity in different treatments

2.1.3 不同处理下土壤孔隙性质的影响 从图4可以看出,2023年4种区域的土壤总孔隙度大小依次为YM>ZR>QM>ZB,4种区域间差异不显著,而2024年4种区域的土壤总孔隙度大小依次为YM>QM>ZB>ZR,仅YM与ZR间差异显著($P<0.05$)。从整体来看,2024年4种区域的土壤总孔隙度比2023年都有少许的降低。

对于毛管孔隙度来说,2023年4种区域的毛管孔隙度大小依次为QM>YM>ZR>ZB, QM与YM间显著不差异,与ZR和ZB间差异显著($P<0.05$)。2024年4种区域的毛管孔隙度大小依次为QM>YM>ZB>ZR, QM、YM与ZR和ZB间均差异显著($P<0.05$)。2024年QM、ZR、ZB土壤毛管孔隙度比2023年都有少许的降低。

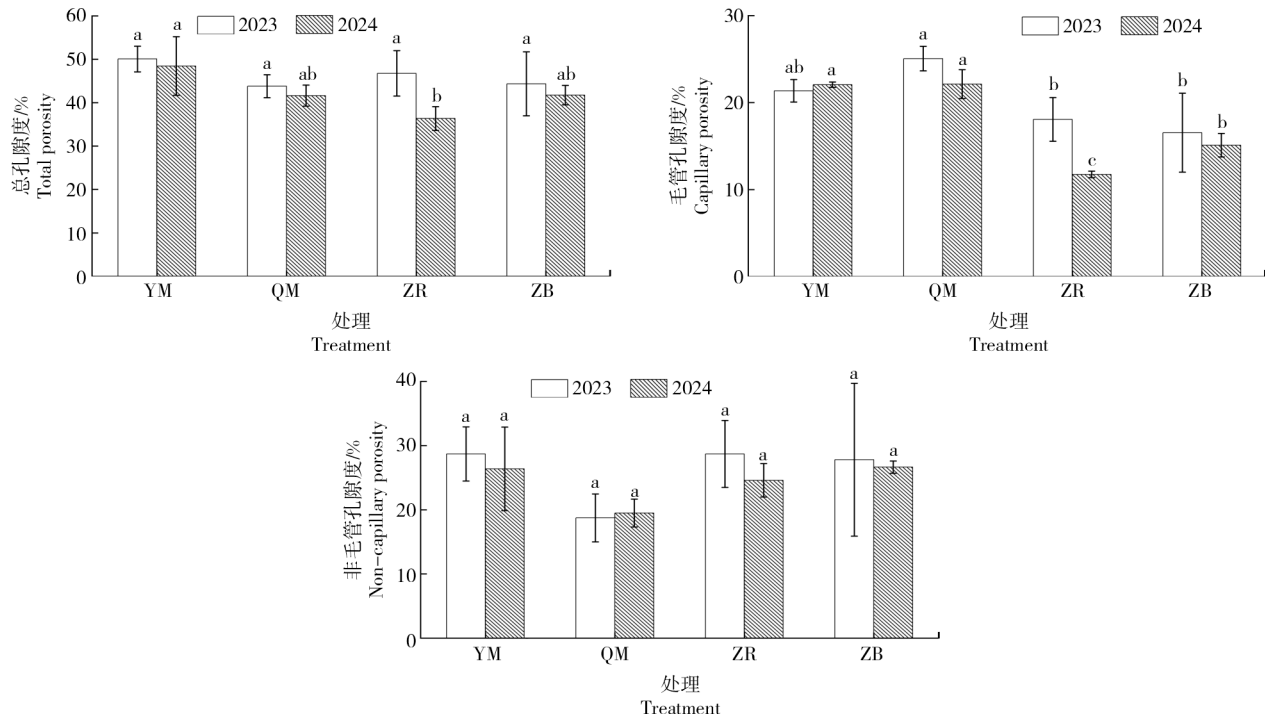


图4 不同处理对土壤孔隙度的影响

Fig.4 Effect of different treatments on soil porosity

对于非毛管孔隙度来说,数值上等于土壤总孔隙度与毛管孔隙度之差,2个时期内4个区域的非毛管孔隙度间差异均不显著,2023年的非毛管孔隙度大小依次为ZR>YM>ZB>QM,2024年的非

毛管孔隙度大小依次为ZB>YM>ZR>QM。除QM区域2a间非毛管孔隙度数值无明显变化外,2024年4种区域的非毛管孔隙度比2023年均有少许的降低。

2.2 农光互补模式光伏电站建设对露天矿排土场土壤化学性质的影响

2.2.1 不同处理对露天矿排土场土壤pH、电导率的影响 从图5可以看出,2023、2024年4种区域的pH值大小均依次为ZB>ZR>QM>YM。2023年,YM与ZR、ZB间、QM与ZB间差异显著($P<0.05$);2024年,YM、QM与ZR、ZB间差异均达到显著水

平($P<0.05$)。2 a内除ZR相较于其他3种区域的pH值有所增加外,其他3种区域间pH值无明显变化。

2023、2024年4种区域的电导率大小依次为ZR>QM>YM>ZB,且4种区域间均存在显著差异($P<0.05$)。2 a内4种区域的电导率均没有明显的变化。

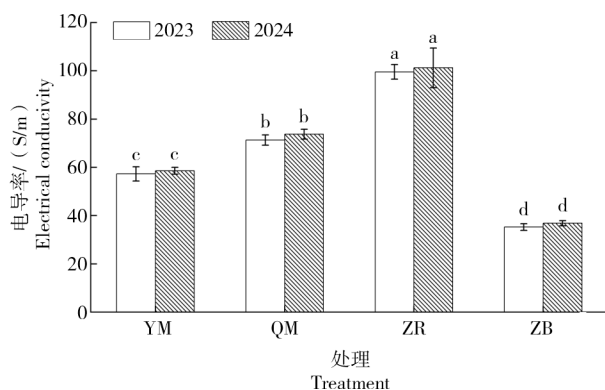
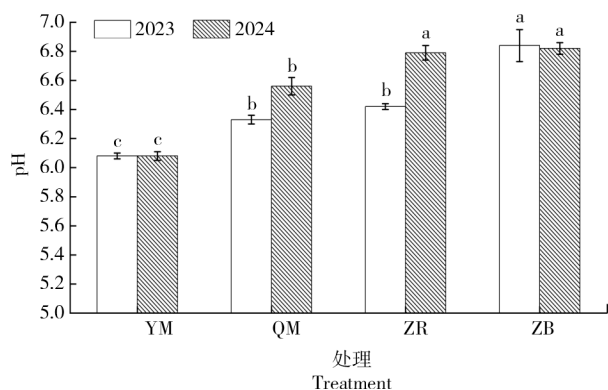


图5 不同处理对土壤pH、电导率的影响

Fig.5 Effect of different treatments on soil pH and electrical conductivity

2.2.2 不同处理对露天矿排土场土壤养分的影响 从图6可以看出,2023年4种区域的有效磷含量大小依次为ZR>QM>YM>ZB,ZB与其他3种区域间存在显著差异($P<0.05$)。2024年4种区域

的有效磷含量大小依次为QM>YM>ZR>ZB, QM、YM与ZR、ZB间差异显著($P<0.05$)。从整体来看,2024年4种区域的有效磷含量相比2023年均有明显下降。

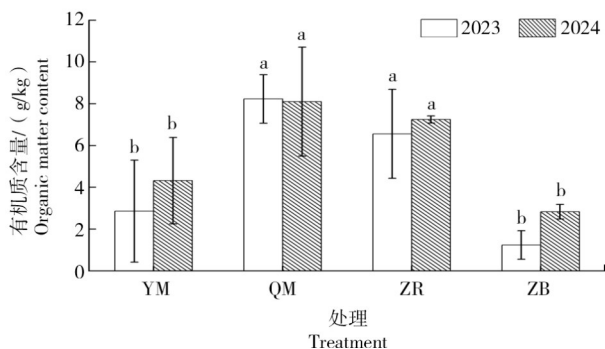
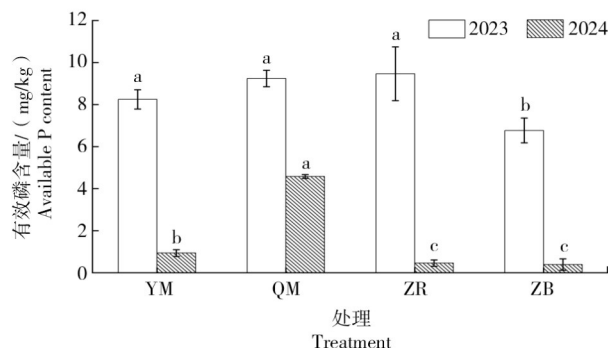
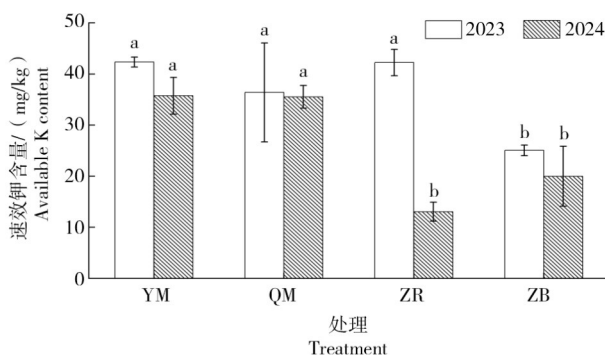
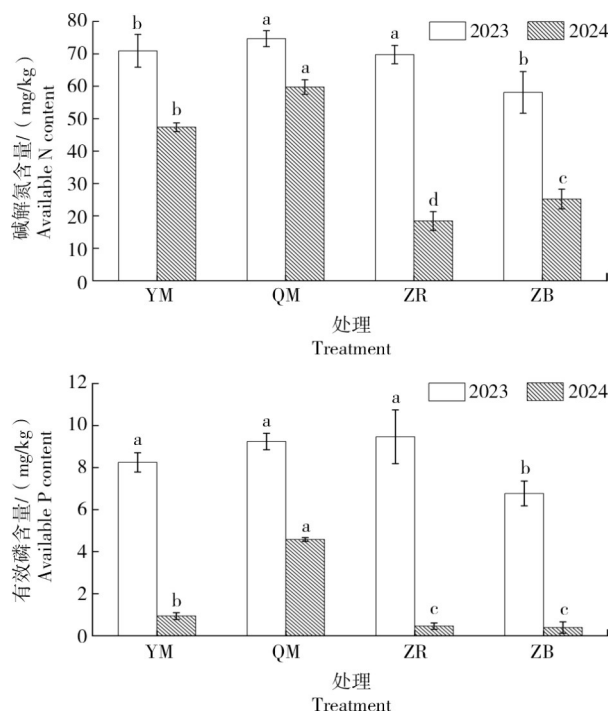


图6 不同处理对土壤养分含量的影响

Fig.6 Effect of different treatments on soil nutrient content

2023 年 4 种区域的速效钾含量大小依次为 $YM > ZR > QM > ZB$, ZB 与其他 3 种区域间存在显著差异 ($P < 0.05$)。2024 年 4 种区域的土壤速效钾含量大小依次为 $YM > QM > ZB > ZR$, QM、YM 与 ZR、ZB 间差异显著 ($P < 0.05$)。4 种区域 2024 年土壤速效钾含量相较于 2023 年均有所下降, 其中 ZR 下降情况明显。

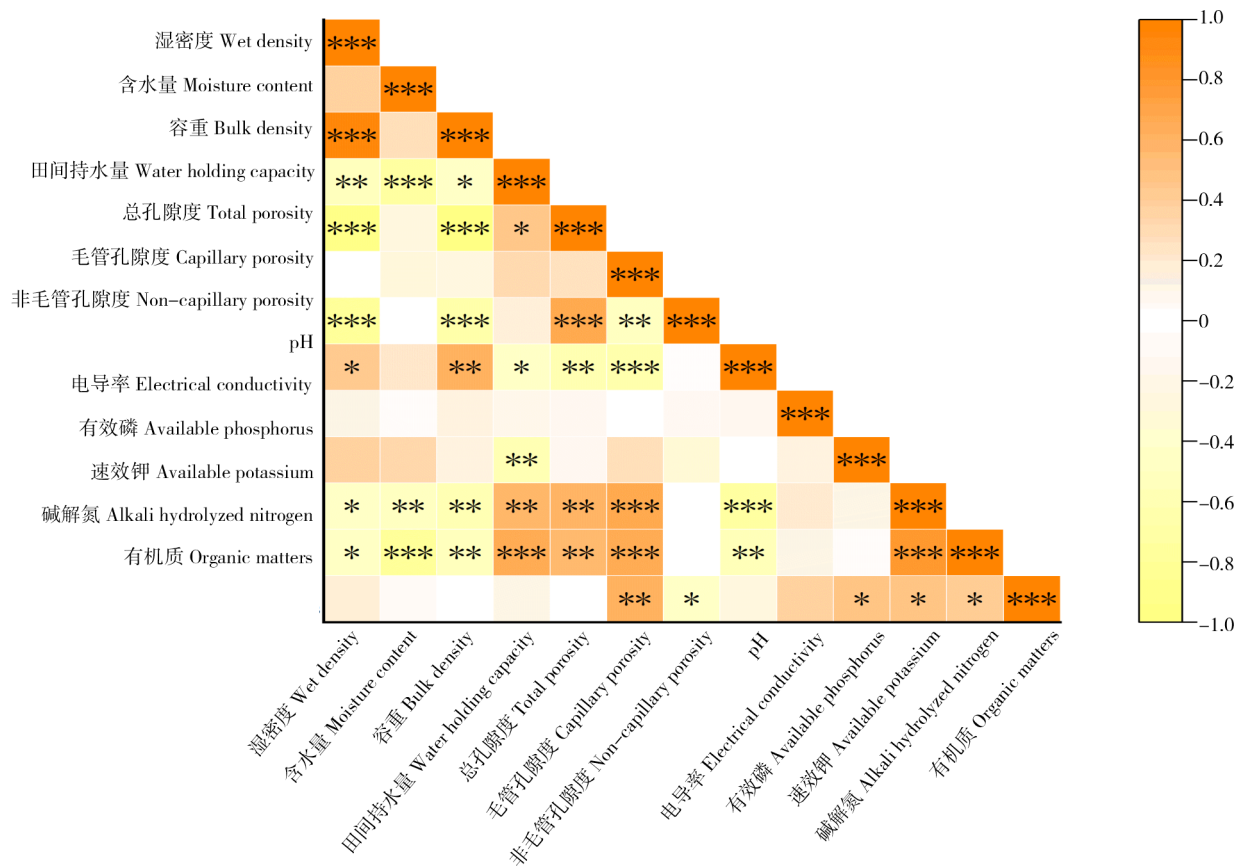
2023 年 4 种区域的碱解氮含量大小依次为 $QM > ZR > YM > ZB$, QM 与 ZB 间差异显著 ($P < 0.05$), YM 与 ZB 间差异不显著。2024 年 4 种区域的土壤碱解氮含量大小依次为 $QM > YM > ZB > ZR$, 4 种区域间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。2024 年 4 种区域土壤碱解氮的含量相较于 2023 年均不同程度下降。

2023、2024 年 4 种区域的有机质含量大小均表现为 $QM > ZR > YM > ZB$, QM 与 ZB 间差异显著 ($P < 0.05$), YM 与 ZB 间无显著差异。2024 年

QM 与 ZR 有机质含量相较于 2023 年有少许下降, YM 与 ZB 有机质含量较 2023 年有少许上升。

2.3 土壤理化性质相关性分析

针对 13 个土壤理化性质指标之间的相关分析结果见图 7, 其中, 有机质与有效磷、速效钾和碱解氮间呈显著正相关 ($P < 0.05$); 湿密度与速效钾、碱解氮之间和非毛管孔隙度与有机质间呈显著负相关 ($P < 0.05$); 速效钾与田间持水量和总孔隙度间、总孔隙度与碱解氮间以及有机质与毛管孔隙度间呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 含水量与速效钾间、土壤容重与速效钾和碱解氮间、田间持水量与有效磷间呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 田间持水量与碱解氮、毛管孔隙度、速效钾和碱解氮间呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 含水量与碱解氮、田间持水量间、毛管孔隙度与 pH 值间以及 pH 值与速效钾间呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。



*在 0.05 水平相关性显著, **在 0.01 水平相关性极显著, ***在 0.001 水平相关性极显著

* had a significant correlation at the 0.05 level, ** had a extremely significant correlation at the 0.01 level, and *** had a extremely significant correlation at the 0.001 level

图 7 土壤理化性质之间相关性分析

Fig.7 Correlation analysis among the physicochemical property indexes

3 结论与讨论

3.1 农光互补模式光伏电站建设对露天矿排土场土壤物理性质的影响

本研究表明,与2023年相比,2024年土壤自然恢复区和电站周边的含水率下降,湿密度、含水率和容重含量增加。湿密度与容重呈显著正相关。根据张仕艳等^[15]的研究,这是由于春季通常温度逐渐升高,降水量增加、土壤解冻,导致土壤湿度增加。而秋季气温逐渐降低,土壤逐渐变得紧实,孔隙度减少,水分难以保持,湿度降低,因此,土壤较干燥。当春季植物开始生长时,根系能够迅速吸收土壤中的水分,并将多余的水分排泄到土壤中,保持了土壤的湿润程度,且根系的分散能够将土壤中的水分更加充分地吸收,减少了水分的蒸发和流失,使土壤湿度相对较高。秋季植物生长逐渐停止,根系吸水量减少,土壤水分保持较少。春季土壤中水分的增加会导致土壤颗粒之间的紧密度增加,同时也会使土壤颗粒之间的摩擦增大,从而导致容重和湿密度同时上升^[16]。

2024年自然恢复区与电站周边的土壤含水率下降,且2024年玉米与荞麦的土壤含水率高于恢复区、电站周边近一倍,这可能是由于植物根系的吸水性导致土壤湿度的增加,自然恢复区和电站周边并无植物生长,蓄水能力小于玉米和荞麦两区导致含水率降低,另一方面光伏板的遮挡作用也可以有效地阻挡光照强度以及风速导致的水分蒸发。

自然恢复区的容重含量高于电站周边、高于玉米和荞麦区,这可能是由于玉米、荞麦区耕作活动频繁,土壤被翻动,使土壤密度降低,孔隙度增大^[17],因此,玉米和荞麦区的土壤容重最小,而自然恢复区和电站周边地表裸露无植物,且土壤中煤矸石含量较多,营养物质稀缺导致土壤板结严重,因此,土壤容重含量较高。

土壤田间持水量与土壤容重呈显著负相关关系,随着土壤容重的增大,土壤单粒、复粒、团粒的结合程度和孔隙率也会有所减小^[18],土壤田间持水量便会降低;相反,当土壤容重变得越来越小时,土壤的粒径结合较疏松,孔隙度较大,从而增强了土壤的持水保水能力,因此,田间持水量也会增加^[19]。此外,土壤的有机质含量对田间持水量也存在一定的影响,有机质可以增加土壤的持水能力,

提高土壤的保水和固结能力,所以,有机质含量较高的土壤其田间持水量也相对较高。因此,结合土壤有机质的变化情况,2023年秋季土壤田间持水量小于2024年春季时期;结合土壤容重的变化情况,玉米与荞麦区土壤田间持水量就会大于电站周边区域、大于自然恢复区。

土壤孔隙度与土壤容重呈显著负相关关系,2023年秋季时期枯枝落叶可以补充到土壤中,增加土壤有机质含量,增加土壤的孔隙度以及结构稳定性,加速了秋季植物根系的疏松土壤作用,加大土壤孔隙度,使土壤容重变小^[20]。自然恢复区与电站周边区域的孔隙度始终小于玉米区与荞麦区,这可能是由于玉米与荞麦区土壤受到人为耕种扰动和植物根系生长的影响较大,虽然自然恢复区与电站周边区域为裸露地表,土壤中煤矸石等沙砾^[21]占比较高,但总孔隙度、毛管孔隙度与非毛管孔隙度含量仍小于玉米与荞麦区。

3.2 农光互补模式光伏电站建设对露天矿排土场土壤化学性质的影响

与2023年相比,2024年土壤的pH、电导率和有机质含量增加。土壤pH与湿密度和电导率呈极显著正相关关系。由于土壤中养分含量是一定的,根据“盐随水来,盐随水走”的原理,水分蒸发的降低有助于减少表层盐的累积^[22],与此同时植物的根从土壤中吸取水分,并把水的蒸发转变成植物的蒸腾,它又是一层阻止盐随着水向地表聚集的障碍^[23],因此,当2024年植物生长时,随着春季土壤的湿密度增加,pH和电导率也会相应的增加。而土壤有机质含量的增加可能是由于植物生长会释放根系分泌物质和残留物质到土壤中^[24],这些有机物质会逐渐分解并增加土壤有机质含量,并且春季通常有雨水和温暖的气候,这些条件有利于微生物的活动和分解有机物。微生物在这个时期会更活跃,加速有机物质的分解,增加土壤中的有机质含量^[25]。

4个区域的土壤pH值没有显著差异,土壤酸碱度均适合植被生长。但因为光伏板的遮挡,土壤蓄水能力增加,以及植物在生长过程中通过根系吸收,都会减少土壤中盐分的积累^[26],从而表现为电导率降低。

相关性分析表明,有机质含量与土壤各养分之间都呈显著正相关,4种区域的有机质含量不同,玉米喜欢富含有机质的土壤,但荞麦对土壤有

机质含量的要求并不高。而电站周边由于没有微生物分解或合成的有机物质,且其他养分含量均不高,导致有机质的含量最少。

相对于 2023 年,2024 年土壤的有效磷、速效钾以及碱解氮含量下降。有效磷、速效钾和碱解氮的含量都能体现土壤中可供吸收的磷肥、钾肥和氮素的供应水平^[27],由于 2023 年秋季凋落物覆盖或作物根系和秸秆的分解,使得土壤中的营养物质含量明显增加^[28]。因此,玉米与荞麦区的 3 个指标的含量都大于电站周边和自然恢复区。

在光伏电站建设后,电站内土壤质量恢复的效果显著高于电站周边区域,土壤含水率、田间持水量、土壤孔隙度、有效磷、速效钾、碱解氮和有机质的含量均明显高于电站周边区域。在对光伏电站内进行玉米、荞麦种植处理后,土壤田间持水量、孔隙度、有效磷、速效钾和碱解氮的含量能显著提高。

整体来看,在光伏电站农光互补模式的影响下,农作物种植区的土壤质量优于电站内自然恢复区,优于电站周边区域。农光互补项目的存在不仅节约了用地资源,促进了农业智能化和产业化发展^[29],还有助于土壤理化性质的改善、提高土壤肥力,改善光伏电站建设过程中对地表、植被以及生态环境造成的破坏^[30],但是农光互补模式对土壤理化性质、物种多样性和生态环境的多样化之间的联系和影响机理还需要进一步研究,为农业可持续发展提供有效的方法。

参考文献:

- [1] 刘小磊. 我国农光互补产业发展现状与展望[J]. 产业创新研究, 2023(22): 65-67.
LIU X L. Development status and prospects of agricultural photovoltaic complementary industry in China[J]. Industrial Innovation, 2023(22): 65-67.
- [2] 杨新旺,姚娟. “农光互补”项目后评价逻辑框架研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(4): 32-34.
YANG X W, YAO J. Research on the logical framework of post evaluation of the "Agricultural Photovoltaic Complementary" project[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2022, 12(4): 32-34.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋检测规范 第 4 部分 海水分析: GB 17378—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Marine testing specification part 4: seawater analysis: GB 17378-2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [4] 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 R T, YUAN L M, MENG Z J. Effects of plant measures on soil improvement of desert photovoltaic power station[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(10): 182-188.
- [5] 袁方,张振师,卜崇峰,等. 毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 287-294.
YUAN F, ZHANG Z S, BU C F, et al. Wind speed flow field and wind erosion control measures at photovoltaic power plant project area in mu us sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 287-294.
- [6] 张金萍. 浅谈互助县并网光伏电站建设使用林地对生态环境的影响[J]. 农家参谋, 2019(12): 124.
ZHANG J P. On the impact of forest land on the ecological environment in the construction of grid-connected photovoltaic power stations in Huzhu county[J]. The Farmers Consultant, 2019(12): 124.
- [7] 刘文祥,万丹,甘国权,等. 干热河谷区光伏电站建设的生态效应与植被恢复探讨[J]. 中国水土保持, 2023(1): 15-19.
LIU W X, WAN D, GANG Q, et al. Ecological effect and vegetation restoration of photovoltaic power station construction in hot and dry valley areas[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(1): 15-19.
- [8] 赵伟文,梁文俊,魏曦. 几种人工林土壤物理性质对比研究[J]. 山西农业科学, 2018, 46(7): 1116-1120.
ZHAO W W, LIANG W J, WEI X. Comparative study on soil physical properties of several plantations[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(7): 1116-1120.
- [9] 张焱,白秀梅,郭汉清,等. 基于最小数据集的关帝山典型植被类型土壤质量评价[J]. 山西农业科学, 2022, 50(5): 675-681.
ZHANG Y, BAI X M, GUO H Q, et al. Soil quality evaluation of typical vegetation types in Guandi Mountain based on minimum dataset[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 675-681.
- [10] 陈婷,李廷亮,张晋丰,等. 山西省玉米种植区土壤养分含量特征[J]. 山西农业科学, 2022, 50(2): 213-222.
CHEN T, LI T L, ZHANG J F, et al. Characteristics of soil nutrient content in maize planting area of Shanxi province[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 213-222.
- [11] 安政臻. 海州露天矿区土地综合利用及生态恢复适宜性分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
AN Z Z. Suitability analysis of land comprehensive utilization and ecological restoration in Haizhou open-pit mining area[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [12] 刘宝勇,甄博珺,潘琪,等. 露天矿排土场不同复垦模式下的土壤修复效果研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(6): 53-57.
LIU B Y, ZHEN B J, PAN Q, et al. Study on soil remediation effect of open-pit mine dump under different reclamation modes[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(6): 53-57.
- [13] 刘宝勇,李岩岩,刘欣玲,等. 基于海州露天矿排土场不同复垦模式下小气候效应研究[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 88-96.

- LIU B Y, LI Y Y, LIU X L, et al. Microclimates of junkyards with different reclamation modes, a case study in the Haizhou surface mine[J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(1): 88-96.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 张仕艳, 原海红, 陈奇伯, 等. 水电工程建设对土壤理化性质的影响研究: 以金安桥水电站为例[J]. *亚热带水土保持*, 2013, 25(4): 10-13.
- ZHANG S Y, YUAN H H, CHEN Q B, et al. Study on the impact of hydropower projects to soil physical-chemical properties: case study for Jin anqiao hydropower station project[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2013, 25(4): 10-13.
- [16] 北京林业大学. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982: 132-133.
- Beijing Forestry University. Soil science[M]. Beijing: China Forestry Press, 1982: 132-133.
- [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.
- 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.
- [18] 马博. 沙箱法测定土壤田间持水量实验研究与应用分析[J]. *陕西水利*, 2023(8): 68-70.
- MA B. Experimental study and application analysis of soil field water capacity determination by sandbox method[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2023(8): 68-70.
- [19] 王鹤燕, 李龙, 李强, 等. 半干旱地区露天矿排土场复垦对土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(4): 174-183.
- WANG H Y, LI L, LI Q, et al. Influence of reclamation of open pit dumps on soil physical properties in semiarid regions[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(4): 174-183.
- [20] 杨文珊. 高山砾石化驱动的高寒草甸群落和地表微生境及温室气体通量变化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- YANG W S. Changes in alpine meadow community, surface microhabitats and greenhouse gas fluxes driven by alpine gravelization[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [21] 李叶鑫, 吕刚, 王道涵, 等. 北方草原区露天煤矿外排土场平台土体裂缝形态特征[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3781-3792.
- LI Y X, LÜ G, WANG D H, et al. Morphological characteristics of ground fissures at surface coal mine dump in northern grassland of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3781-3792.
- [22] 王玉辉, 何兴元, 周广胜. 放牧强度对养草草原的影响[J]. *草地学报*, 2002, 10(1): 45-49.
- WANG Y H, HE X Y, ZHOU G S. Effects of grazing intensity on grassland[J]. *Acta Grassland*, 2002, 10(1): 45-49.
- [23] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. *土壤通报*, 1999, 30(4): 158-159.
- YU R P, CHEN D M. Saline soil resources and their development and utilization in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(4): 158-159.
- [24] 刘文国, 赵强, 杨艳美. 秸秆还田处理对土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(27): 111-117.
- LIU W G, ZHAO Q, YANG Y M. Straw returning: effects on soil physical and chemical properties and maize yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(27): 111-117.
- [25] 何丽娟, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 种植甘草对风沙土机械组成与养分的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(2): 169-176.
- HE L J, MENG Z J, DANG X H, et al. Effects of planting *Glycyrrhiza uralensis* on mechanical composition and nutrients of aeolian sandy soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(2): 169-176.
- [26] RAVI S. Resources: Partner crop plants with solar facilities[J]. *Nature*, 2015, 524: 161.
- [27] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. *中国草地*, 2001, 23(4): 41-47.
- RONG Y P, HAN J G, WANG P, et al. The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties[J]. *Grassland of China*, 2001, 23(4): 41-47.
- [28] 王月玲, 蔡进军, 张源润, 等. 半干旱退化山区不同生态恢复与重建措施下土壤理化性质的特征分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 11-14.
- WANG Y L, CAI J J, ZHANG Y R, et al. Soil physical and chemical properties during different ecological restoration or reconstruction in semi-arid degraded mountain area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(1): 11-14.
- [29] 沈天成. 古浪黄花滩沙漠区域光伏发电项目水土保持方案编制探讨[J]. *甘肃科技*, 2018, 34(10): 1-3.
- SHEN T C. Discussion on water and soil conservation scheme of photovoltaic power generation project in Huanghutan desert area of Gulang [J]. *Gansu Science and Technology*, 2018, 34(10): 1-3.
- [30] 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.