

文章编号:1000-1638(2025)03-0290-12

DOI:10.13484/j.nmgdxzbk.20250308

# 露天矿排土场不同复配土模式下土壤质量评价\*

王鹤燕<sup>1</sup>,李龙<sup>1,2</sup>,张亮<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;

2. 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室,呼和浩特 010018)

**摘要:**采用不同比例风沙土与矿区排土场土壤复配的方式对矿区土壤进行改良,探索不同配土模式下的土壤质量变化情况,为矿区排土场生态环境改善工作提供技术支撑。以鄂尔多斯市伊金霍洛旗荣恒露天矿排土场的3种改良土壤( $P_A$ :风沙土与排土场土壤配比为1:9, $P_B$ :风沙土与排土场土壤配比为2:8, $P_C$ :风沙土与排土场土壤配比为3:7)及1种排土场本土 $P_K$ 作为研究对象,通过主成分分析(PCA)、相关性分析和Norm值的计算,从12个指标中筛选出最小数据集指标,对土壤质量进行评价,研究结果表明:(1)将全数据集(TDS)与最小数据集(MDS)得出的土壤质量指数(SQI)进行线性拟合,两者存在显著正相关关系( $R^2=0.847$ , $P<0.05$ ),表明MDS可以代替TDS对半干旱地区露天矿排土场进行土壤质量评价,MDS选取的指标包括含水率、饱和含水率、全磷;(2)4种样地的SQI分布在0.329~0.829之间,其中 $P_A$ (SQI=0.508)、 $P_B$ (SQI=0.640)、 $P_C$ (SQI=0.829)、 $P_K$ (SQI=0.329)四者之间相关性显著( $P<0.05$ ),对比SQI值 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 均大于 $P_K$ ,表明风沙土与矿区排土场土壤复配对土壤改良效果产生积极影响;(3) $P_C$ 0~20 cm土层的土壤质量指数最大, $P_A$ 、 $P_B$ 的表层土壤质量显著高于深层土壤质量( $P<0.05$ ), $P_C$ 、 $P_K$ 表层土壤与深层土壤质量差异不显著( $P>0.05$ )。通过土壤质量指数计算结果可知 $P_C$ 表层土壤改良效果最佳。

**关键词:**风沙土;排土场;土壤复配;最小数据集;土壤质量

**中图分类号:**S152.5;S153.6 **文献标志码:**A

鄂尔多斯煤田地跨陕、甘、宁、内蒙古、晋五省区,是我国最大的多纪煤田,属于世界特大型煤田之一,埋深2000 m以内的煤炭总资源量约为4万亿t<sup>[1]</sup>。露天煤矿的排土场是煤田开采后形成的典型人为重塑地貌,主要物质成分由剥离土层中的废弃物及煤层上覆的岩土层、煤矸石、煤粉和表土堆积构成<sup>[2]</sup>,矿区排土场的建设主要是采取不经分选直接堆砌、碾压的施工方式,加之土壤的非均匀沉降作用,导致土壤理化性质较差<sup>[3]</sup>,生态环境恶化<sup>[4]</sup>。为了探究矿区排土场废弃土壤的综合治理,国内外学者在风沙土与矿区排土场土壤的特性上开展了大量的研究,发现沙土胶结程度低、黏粒含量少,具有高渗透性,持水能力较差,而矿区排土场土壤与风沙土在土壤机械组成与性质上表现出互补性,将二者按照一定比例复配可形成新的土壤(简称复配土),可以改善矿区土壤的孔隙度、透水性和通气度,利于作物的生长<sup>[5-6]</sup>,加之风沙土作为鄂尔多斯地区土壤类型的重要组成部分,采用风沙土与矿区

\* 收稿日期:2024-04-30;修回日期:2025-02-27

**基金项目:**生态景观经济型植物种筛选与立体配置技术研究项目(2022EEDSKJZDZX012-2);鄂尔多斯露天矿排土场营养土层重塑与植被构建协同修复技术集成与示范项目(2022YY005)

**作者简介:**王鹤燕(2000-),女(蒙古族),内蒙古通辽人,2022级硕士研究生。E-mail:wangheyan2029@163.com

**通信作者:**李龙(1989-),男,吉林桦甸人,副教授,博士。主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。E-mail:lilongdhr@126.com

排土场土壤进行复配具有一定的现实意义。

土壤质量是指土壤在生态系统中保持生物的生产力、维持环境质量、促进动植物健康的能力。联合国在2015年提出了可持续发展目标,在17项目标中有13项都与土壤有直接或间接的关系<sup>[7]</sup>,可见土壤质量已经逐步成为全球可持续发展的重要课题,可以通过物理及化学性质指标对土壤质量进行综合性的评估。然而,土壤质量指标较多,用多个指标进行土壤质量评价的过程过于复杂且周期较长,因此采用最小数据集(MDS)方法对众多指标进行筛选是进行土壤质量评价的关键步骤<sup>[8]</sup>。梅楠等<sup>[9]</sup>使用最小数据集方法,在对黑土耕层土壤的研究中从有机质、pH、容重、速效磷等众多指标中筛选出了最小数据集指标,研究结果表明,最小数据集与全数据集(TDS)所得土壤质量评价结果相同。李雨晨等<sup>[10]</sup>筛选出了以全氮、饱和含水率、过氧化氢酶活性和脲酶活性构成的最小数据集,对宁都县不同整地方式下果园土壤质量进行评价,研究结果表明全数据集与最小数据集存在显著正相关关系。王淑琴等<sup>[11]</sup>筛选出容重、全氮、速效磷等6个指标构成最小数据集,评价了黄土高原半干旱区苜蓿地土壤质量。

矿区排土场土壤的改良对矿区生态环境的影响已经引起了广泛关注<sup>[12]</sup>,但是研究大多聚焦在土壤水分和养分等单项土壤理化指标,缺乏对改良地土壤质量的综合评价。因此,本文设置3种复配土比例,研究在不同配土比例下土壤的改良效果。利用主成分分析、相关性分析和Norm值的计算,建立土壤质量评价最小数据集,综合评价复配土对土壤质量的影响,以期对风沙土与矿区排土场土壤复配成土技术在我国煤炭资源主要集中地区——内蒙古自治区鄂尔多斯市及其他同类地区进行矿区生态整治提供理论与技术支撑。

## 1 试验区概况与方法

### 1.1 试验区概况

乌兰集团荣恒煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗纳林陶亥镇阿吉阿玛村(110°21'E, 39°34'N),地处窟野河流域上游,属典型的丘陵沟壑地区。矿山绿化面积达74%,是国家级绿色矿山。研究区属于中温带半干旱、干旱气候,具有明显的大陆性季风气候特征。每年6—8月为雨季,年平均降雨量为340~420 mm;年平均气温为6.2℃,极端最低气温为-31.4℃,极端最高气温为36.6℃,无霜期为130~140 d;年日照时数为2740~3100 h。本文以荣恒煤矿海拔1390 m的排土场平台土壤为研究对象,排土时间为2021年,排土场的土壤成分主要由剥离土层中的废弃物及煤层上覆的岩土层、煤矸石、煤粉和表土等堆积构成,土壤堆积过程经过了剧烈扰动和碾压,地貌平坦且质地较轻,土壤类型为黄绵土,养分含量低,土壤结构性差,是典型的矿区土壤类型,极易发生水土流失。

### 1.2 试验材料与试验设计

土壤复配时间为2022年8月,在排土场平台选取一块平整地进行试验研究,风沙土拉运于库布齐沙漠,其理化性质如表1所示。排土场土壤采用上述选取地土壤,风沙土与排土场土壤复配体积比分别为1:9、2:8、3:7,其中风沙土占比较小是由于风沙土为外来土壤,考虑到可操作性和现实意义,外来土壤运输困难,因此风沙土较排土场土壤占比较小。每种处理3次重复,共计9个试验土穴,每个土穴容积为0.4 m×0.4 m×0.4 m。土穴排列顺序采用随机排列方法,均在土层深度40 cm覆盖不同比例的复配土,40 cm以下为当地土壤。采样时间为2023年3月,分别取风沙土与排土场土壤复配体积比为1:9(P<sub>A</sub>)、2:8(P<sub>B</sub>)、3:7(P<sub>C</sub>)的土壤,以及排土场土壤(P<sub>R</sub>)作为对照组,采用土钻于土壤0~20 cm、20~40 cm深度进行分层采样,每3个重复土样均匀混合后作为该配土情况下土样,共得24份土壤样品,每份土样一部分装进铝盒用于土壤含水率的测定,另一部分装进自封袋用于土壤全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、有机质、pH的测定,并采用环刀(100 cm<sup>3</sup>)在每个土

穴进行土壤容重、饱和含水率、田间持水量样品的采集。以上指标测定方法均参照《土壤农化分析》<sup>[13]</sup>,于 2023 年 4—6 月测定。

表 1 风沙土的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of sandy soil

物理性质				化学性质							
容重/ (g/cm <sup>3</sup> )	含水 率/%	饱和含 水率/%	田间持 水量/%	全氮/ (g/kg)	全磷/ (g/kg)	全钾/ (g/kg)	碱解氮/ (mg/kg)	速效磷/ (mg/kg)	速效钾/ (mg/kg)	有机质/ (mg/kg)	pH
1.321	18.021	24.852	24.123	0.454	0.632	27.562	8.354	5.771	17.557	16.325	7.112

### 1.3 全数据集与最小数据集的构建

以鄂尔多斯市露天矿排土场为研究对象,结合金慧芳等<sup>[14]</sup>研究中指标选取的频度及代表性,共选取 12 个指标作为全数据集指标。将数据标准化后利用主成分分析(Principal component analysis, PCA)<sup>[15]</sup>及各指标的 Norm 值,确定进入最小数据集的指标。Norm 值的计算公式为

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_i^k U_{ik}^2 \lambda_k},$$

式中, $U_{ik}$ 为第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分上的载荷, $\lambda_k$ 为第  $k$  个主成分的特征值。

土壤评价指标的综合性通过土壤质量指数(Soil quality index, SQI)进行表达, SQI 的大小决定土壤质量的好坏。各指标与土壤质量之间的隶属度函数通过指标与土壤质量之间的效应关系建立,本文隶属度函数包括升型、降型分布函数。通过隶属度函数将土壤指标标准化,如果某个指标与土壤功能呈正相关则采用升型分布函数,反之采用降型分布函数。其中,土壤容重和 pH 采用降型分布函数,其余指标均采用升型分布函数。

升型分布函数公式为

$$S_i = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}},$$

降型分布函数公式为

$$S_i = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}},$$

式中, $S_i$ 是土壤理化指标的线性评价模型得分, $X$ 是指标实测值, $X_{\max}$ 和  $X_{\min}$ 分别表示指标实测的最大值和最小值。

指标权重计算公式为

$$W_i = \frac{C_i}{\sum C_i},$$

式中, $W_i$ 为第  $i$  个指标的权重, $C_i$ 为第  $i$  个指标的公因子方差。

土壤质量指数计算公式为

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i,$$

式中, $W_i$ 为第  $i$  个指标的权重, $S_i$ 为第  $i$  个指标的隶属度值。

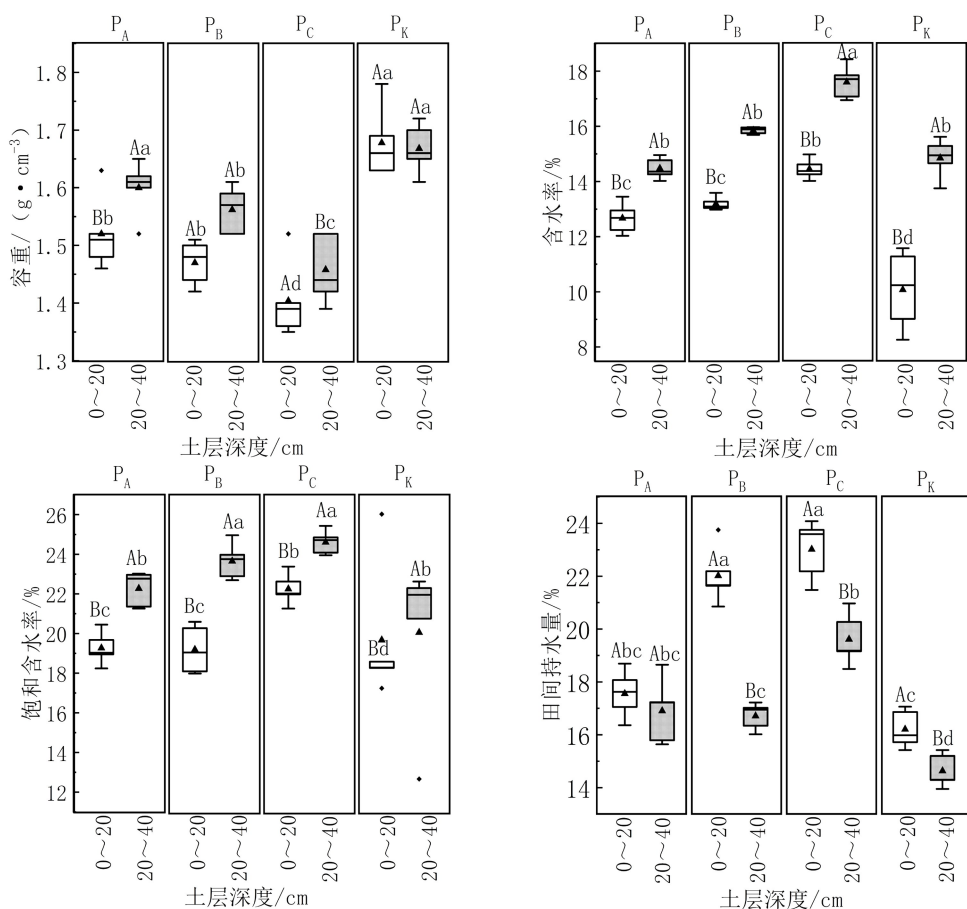
### 1.4 数据处理

本文运用 Excel 2020 对数据进行预处理,应用 SPSS 27 对数据进行描述性统计分析、相关性分析和主成分分析,使用 Origin 2021 进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤复配模式对不同土层土壤理化性质的影响

由图1可知,实验测得的4种物理性质中含水率、饱和含水率在4种不同样地的0~20 cm和20~40 cm土层间皆差异显著( $P < 0.05$ )。容重为 $1.351 \sim 1.782 \text{ g/cm}^3$ ,整体表现为 $P_K > P_A > P_B > P_C$ ;含水率为 $8.264\% \sim 18.432\%$ ,饱和含水率为 $12.662\% \sim 26.025\%$ ,田间持水量为 $13.952\% \sim 24.084\%$ ,这3种指标整体表现为 $P_C > P_B > P_A > P_K$ 。容重在 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 样地中表现为0~20 cm土层显著小于20~40 cm土层( $P < 0.05$ ),在 $P_K$ 样地表现为0~20 cm土层与20~40 cm土层差异不显著( $P > 0.05$ );含水率、饱和含水率在4个样地中皆表现为0~20 cm土层显著小于20~40 cm土层( $P < 0.05$ ),田间持水量在 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_K$ 样地中表现为0~20 cm土层显著大于20~40 cm土层( $P < 0.05$ ),在 $P_A$ 样地中表现为0~20 cm土层和20~40 cm土层差异不显著( $P > 0.05$ )。



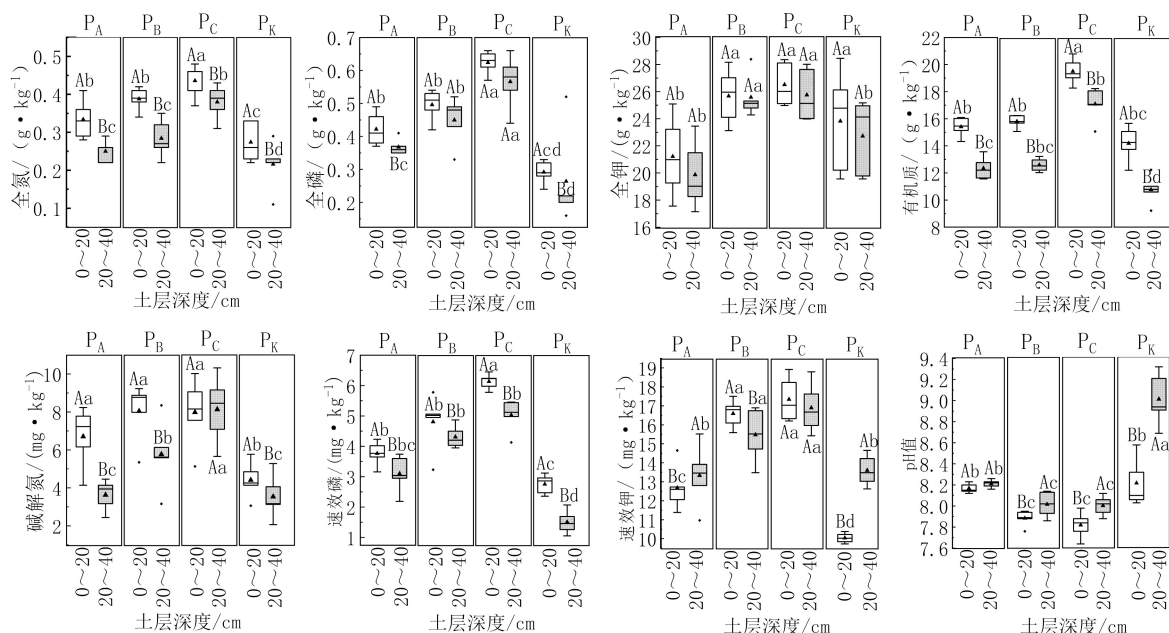
不同大写字母代表同一样地不同土层之间各指标差异显著( $P < 0.05$ ),不同小写字母代表不同样地各土层之间各指标差异显著( $P < 0.05$ ),▲表示均值,◆表示异常值,—表示中值线。

图1 不同配土比例土壤物理性质

Fig. 1 Soil physical properties with different proportion of soil

由图2可知,4种样地的全氮含量在 $0.114 \sim 0.487 \text{ g/kg}$ 之间,表现为0~20 cm土层显著大于20~40 cm土层( $P < 0.05$ );全磷含量在 $0.165 \sim 0.661 \text{ g/kg}$ 之间, $P_A$ 、 $P_K$ 表现为0~20 cm土层显著大于20~40 cm土层( $P < 0.05$ ),而 $P_B$ 、 $P_C$ 表现为两个土层之间差异不显著( $P > 0.05$ );全钾含量在 $17.142 \sim 28.466 \text{ g/kg}$ 之间,4种样地均表现为0~20 cm土层与20~40 cm土层差异不显著( $P >$

0.05); 有机质含量在 9.225~20.782 g/kg 之间,4 种样地中均表现为 0~20 cm 土层显著大于 20~40 cm 土层( $P<0.05$ ); 碱解氮含量在 2.061~10.320 mg/kg 之间, $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_K$  表现为 0~20 cm 土层显著大于 20~40 cm 土层( $P<0.05$ ),而  $P_C$  表现为两个土层之间差异不显著( $P>0.05$ ); 速效磷含量在 1.050~6.452 mg/kg 之间,4 种样地均表现为 0~20 cm 土层显著大于 20~40 cm 土层( $P<0.05$ ); 速效钾含量在 9.732~18.914 mg/kg 之间, $P_A$ 、 $P_K$  均表现为 20~40 cm 土层显著大于 0~20 cm 土层( $P<0.05$ ), $P_B$  表现为 0~20 cm 土层显著大于 20~40 cm 土层( $P<0.05$ ),而  $P_C$  表现为两个土层之间差异不显著( $P>0.05$ ); pH 值在 7.64~9.32 之间, $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_K$  均表现为 20~40 cm 土层显著大于 0~20 cm 土层( $P<0.05$ ),而  $P_A$  表现为两个土层之间差异不显著( $P>0.05$ )。可以发现,随着风沙土复配比例的增大,土壤全氮含量、全磷含量、全钾含量、有机质含量、碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量整体均表现出增大的趋势,而土壤 pH 则表现为减小的趋势。



不同大写字母代表同一样地不同土层之间各指标差异显著( $P<0.05$ ),不同小写字母代表不同样地各土层之间各指标差异显著( $P<0.05$ ),▲表示均值,◆表示异常值,—表示中值线。

图2 不同配土比例土壤化学性质

Fig. 2 Soil chemical properties with different proportion of soil

## 2.2 土壤质量评价指标最小数据集的构建

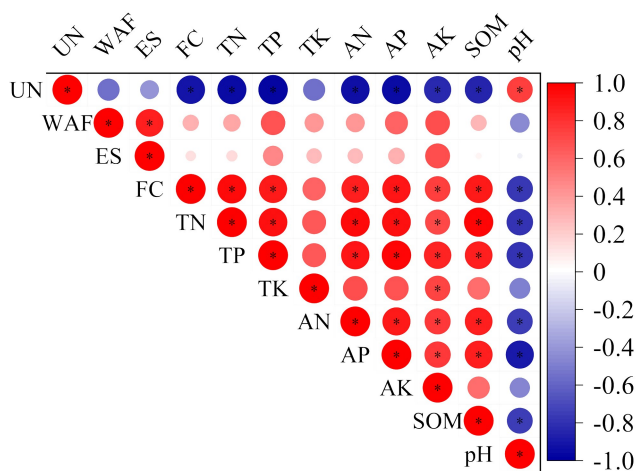
对 12 项指标进行主成分分析,结果见表 2,特征值  $\geq 1$  的主成分有两组,其累计贡献率达到 88.078%,可以说明这两组主成分有较好的解释能力。

针对所有指标筛选出最小数据集指标,将载荷值的绝对值  $\geq 0.5$  的指标分为一组,如果一个指标同时出现在两组主成分中,则根据其相关性分析结果将它加入到相关性低的一组中,即得到如下分组情况。第 1 组:TP(全磷)、AP(速效磷)、UN(容重)、TN(全氮)、AN(碱解氮)、ES(饱和含水率)、SOM(有机质)、AK(速效钾)、pH、TK(全钾);第 2 组:FC(田间持水量)、WAF(含水率)。对指标进行相关性分析,结果见图 3,若同一组内 2 个指标显著相关( $P<0.05$ ),则保留 Norm 值较高的指标。在第一组中,TP 的 Norm 值(2.922)最大,AP、UN、TN、AN、ES、SOM 的 Norm 值大于 2.6298(最大 Norm 值的 0.9 倍),其中 AP、UN、TN、AN、SOM 与 TP 显著相关( $P<0.05$ ),ES 与 TP 相关性不显著( $P>0.05$ ),因此第一组中 TP、ES 进入最小数据集。第二组中 WAF 的 Norm 值(2.035)最大,FC 的 Norm 值小于 1.8315(最大 Norm 值的 0.9 倍),因此 WAF 进入最小数据集。最后进入最小数据

集的指标有 TP、ES、WAF。本研究初始为 12 个理化性质指标,然后筛选出最小数据集指标 3 个,其中物理指标有 1 个,化学指标有 2 个,指标筛选率为 25%。

表 2 土壤质量指标 PCA 结果及 Norm 值  
Table 2 Soil quality index PCA results and Norm values

指标	分组	主成分		Norm 值	最小数据集
		PC1	PC2		
全磷 TP	1	0.989	0.078	2.922	进入
速效磷 AP	1	0.980	-0.062	2.894	
容重 UN	1	-0.968	0.008	2.858	
全氮 TN	1	0.952	-0.275	2.835	
碱解氮 AN	1	0.939	-0.141	2.779	
饱和含水率 ES	1	0.918	-0.272	2.735	进入
有机质 SOM	1	0.879	-0.356	2.640	
速效钾 AK	1	0.854	0.388	2.576	
pH	1	-0.810	0.270	2.419	
全钾 TK	1	0.722	0.055	2.133	
田间持水量 FC	2	0.403	0.899	1.707	
含水率 WAF	2	0.605	0.716	2.035	进入
特征值		8.716	1.853		
方差贡献率/%		72.633	15.445		
累计贡献率/%		72.633	88.078		



\* 代表相关性显著( $P < 0.05$ )。

图 3 土壤质量评价指标 Pearson 相关系数热图

Fig. 3 Pearson correlation coefficient heat map of soil quality evaluation index

### 2.3 最小数据集合理性检验

通过主成分分析得到全数据集和最小数据集指标的公因子方差并计算因子权重(表 3)。根据土壤质量指数(SQI)公式计算出全数据集和最小数据集的 SQI,为检验最小数据集评价结果的可靠性,

在评价了指标因子隶属度和权重的基础上,运用加权综合法和模糊数学中的加乘法,计算基于不同数据集的土壤质量指数。其中全数据集土壤质量指数(SQI-TDS)在 0.345~0.720 之间,平均值为 0.508;最小数据集土壤质量指数(SQI-MDS)在 0.315~0.855 之间,平均值为 0.577。对全数据集和最小数据集的土壤质量指数进行线性回归分析(图 4)可知,SQI-TDS 和 SQI-MDS 呈现显著正相关关系( $R^2=0.847, P<0.05$ ),回归方程为  $y=1.323x-0.095$ 。方程拟合结果表示半干旱地区露天矿排土场土壤质量可以用最小数据集代替全数据集评价。

表 3 土壤质量评价指标体系及各数据集权重分布

Table 3 Soil quality evaluation index system and data centralization redistribution

指标	全数据集 TDS		最小数据集 MDS	
	公因子方差	因子权重	公因子方差	因子权重
容重	0.938	0.089		
含水率	0.879	0.083	0.547	0.240
饱和含水率	0.971	0.092	0.751	0.329
田间持水量	0.916	0.087		
全氮	0.982	0.093		
全磷	0.985	0.093	0.983	0.431
全钾	0.524	0.050		
碱解氮	0.902	0.085		
速效磷	0.965	0.091		
速效钾	0.879	0.083		
有机质	0.899	0.085		
pH	0.730	0.069		

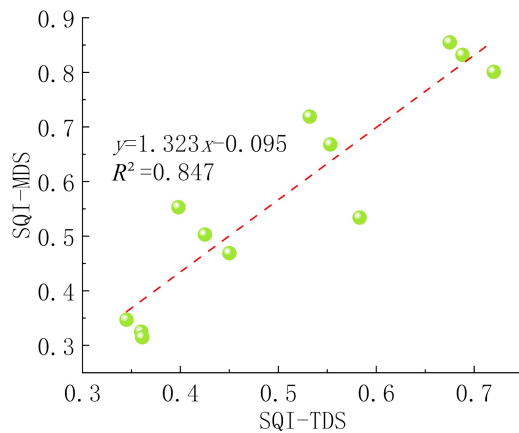


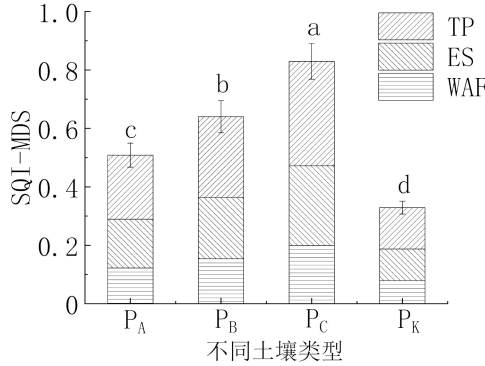
图 4 全数据集和最小数据集的 SQI 线性拟合

Fig. 4 SQI linear fitting of full data set and minimum data set

## 2.4 不同复配比例下的土壤质量评价

通过最小数据集计算出不同土壤复配模式下的土壤质量指数(SQI),如图 5 所示,选取了 3 个复配土壤样地以及 1 个矿区未复配情况下的土壤样地(对照组)。通过土壤质量指数计算公式得出 4 种样地的 SQI,由图 5 可知,4 个样地的 SQI 分布在 0.329~0.829 之间,其中,PA:SQI=0.508,

$P_B$ : $SQI=0.640$ , $P_C$ : $SQI=0.829$ , $P_K$ : $SQI=0.329$ , 四者之间相关性显著( $P<0.05$ )。通过查阅相关资料,将土壤质量指数划分为 5 级,分别为:低, $0<SQI\leq 0.2$ ; 较低, $0.2<SQI\leq 0.4$ ; 中等, $0.4<SQI\leq 0.6$ ; 良, $0.6<SQI\leq 0.8$ ; 优, $0.8<SQI\leq 1.00$ <sup>[16]</sup>,则  $P_A$  土壤质量属于中等水平, $P_B$  土壤质量属于良好水平, $P_C$  土壤质量属于优等水平, $P_K$  土壤质量属于较低水平。对比  $SQI$  值, $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$  均大于  $P_K$ ,其中  $P_C>P_B>P_A>P_K$ ,说明风沙土与矿区排土场黄绵土复配可以起到改良土壤的作用。

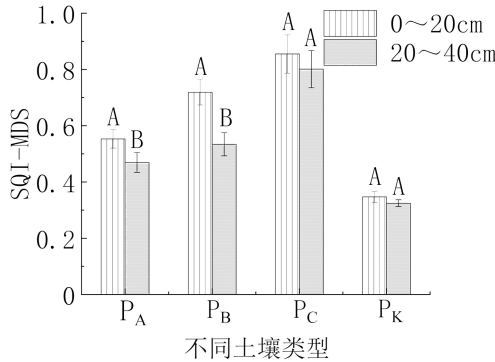


不同小写字母代表同样地之间的  $SQI$  差异显著( $P<0.05$ )。

图 5 最小数据集下不同土壤复配比例的土壤质量指数

Fig. 5 Soil quality index of different soil composition ratios under the minimum data set

通过最小数据集计算出不同土壤复配模式下不同土层深度的土壤质量指数( $SQI$ ),结果如图 6 所示。从整体来看, $P_C$  0~20 cm 土层的土壤质量指数最大,而  $P_A$ 、 $P_B$  0~20 cm 的土壤质量显著高于 20~40 cm 的土壤质量( $P<0.05$ ), $P_C$ 、 $P_K$  20~40 cm 的土壤质量与 0~20 cm 的土壤质量差异不显著( $P>0.05$ ),由此可知,风沙土与排土场土壤复配对土壤质量的提高起到了积极影响。



不同大写字母代表同样地不同土层之间的  $SQI$  差异显著( $P<0.05$ )。

图 6 最小数据集下不同土壤复配比例的不同土层土壤质量评价

Fig. 6 Evaluation of soil quality in different soil layers with different soil compound ratios on the minimum data set

### 3 讨论

#### 3.1 不同土壤复配模式对不同土层土壤理化性质的影响

$P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$  土壤容重整体上小于  $P_K$ ,说明土壤复配对改善土壤结构产生了积极影响,且  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$  均表现为 20~40 cm 土层容重大于 0~20 cm 土层容重,该结果与柴华等<sup>[17]</sup>认为土壤容重随土层深度增加而增加的结论一致,说明矿区排土场土壤结构差,重型机械的运输与碾压增强了土壤压实程度,破坏了土壤孔隙结构<sup>[18]</sup>,加之复杂的组成物质如砾石等,导致其容重较大进而导致土壤保水性能

不佳,而与风沙土复配能够有效改善矿区排土场土壤结构,使土壤透气性和水土保持效果更加协调。 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$  含水率、饱和含水率、田间持水量整体上大于  $P_K$ ,说明土壤复配改变了土壤水分移动路径,改善了土壤的保水性能。4种样地含水率均表现为20~40 cm 土层大于0~20 cm 土层,这可能是因为水分在重力作用下向更深层移动,与刘富强等<sup>[19]</sup>的研究结果一致;4种样地饱和含水率均表现为20~40 cm 土层大于0~20 cm 土层,这可能是由于深层土壤的细颗粒黏性土含量较多,吸水保水性较强,而表层土壤粗颗粒较多,空隙较大,吸水保水性较差;4种样地田间持水量均表现为0~20 cm 土层大于20~40 cm 土层,这与闫焯琛等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,说明表层土壤结构的改良效果优于深层土壤。

$P_K$  20~40 cm 土层的全氮含量与  $P_K$  0~20 cm 土层以及其他3种样地的各土层皆存在显著差异性,这可能是由于矿区排土场土壤结构复杂,因此相同样地各土层养分含量差异显著<sup>[21]</sup>。周磊等<sup>[22]</sup>的研究表明,风沙土中全氮含量较为稳定,这可能是复配土中全氮含量高于排土场土壤全氮含量的根本原因。 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_K$  的碱解氮含量在两个土层之间差异显著( $P < 0.05$ ),可能是由于土壤氮元素的绝大部分都来源于有机质,故有机质含量与碱解氮含量呈现正相关关系,本研究中  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_K$  有机质含量在不同土层间差异显著( $P < 0.05$ ),所以氮元素在不同土层之间差异显著; $P_A$ 、 $P_K$  的全磷含量, $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_K$  的速效磷含量在两个土层之间表现出显著差异性( $P < 0.05$ ),这可能是由于土壤中的全磷来源于动物排泄物等,因此表层土壤磷元素高于深层土壤。4种样地的全钾含量在不同土层差异不显著( $P > 0.05$ ),在  $P_C$  中速效钾含量表现为在两个土层之间差异不显著( $P > 0.05$ ),这可能是由于风沙土含量的增多导致土壤孔隙增大,并且在雨水的淋溶下,钾元素更易在土壤中运移,使深层土壤与浅层土壤之间钾元素差异不显著,也可能与排土场复杂的土壤组成有关<sup>[23]</sup>。有机质含量在4种样地中均表现为0~20 cm 土层显著大于20~40 cm 土层( $P < 0.05$ ),主要是因为土壤表层累积较多凋落物及其光照、水分、通透性较好,能有效促进凋落物的分解,增加土壤养分含量,为土壤酶促反应提供较多的底物。随着土层加深,通气状况下降,土壤养分含量减少,导致表层和深层土壤的养分含量差异显著( $P < 0.05$ )<sup>[24]</sup>。pH 值在  $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_K$  中皆表现为20~40 cm 土层大于0~20 cm 土层,这与杨晋炜等<sup>[25]</sup>的研究结果一致,土壤表层与深层水热条件存在明显不同,表层土壤受到空气和雨水的浸润,易造成表层土壤 pH 小于深层土壤 pH 的现象。

### 3.2 最小数据集下不同土壤复配比例的土壤质量评价

土壤质量是指土壤在生态系统中保持生物的生产力、维持环境质量、促进动植物健康的能力,能够较为客观地反映土壤的情况<sup>[26]</sup>。实验可以测得的土壤指标较多,若根据一个或几个指标来代表土壤的整体状况显然存在片面性,最小数据集法因其可操作性强并简单易行而被广泛应用于土壤质量评价指标的筛选,为土壤质量评价工作提供了便捷。

本文通过最小数据集法从全数据集的12个指标中筛选出了3个具有代表性的指标:WAF(含水率)、ES(饱和含水率)、TP(全磷)。含水率、饱和含水率是土壤的物理指标,其中含水率是指土壤中所含水分的质量与土壤总质量的比值,饱和含水率是指土壤孔隙中完全充满水时水的质量与土壤总质量的比值,两者表征土壤保水性能的好坏。本文中排土场土壤与风沙土复配有效地改善了土壤的结构,从而提高了土壤的含水率、饱和含水率,所以本文筛选出土壤含水率、饱和含水率指标进入最小数据集具有一定的代表性,与刘慧敏等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。全磷是土壤的化学指标,也是土壤固相部分的重要组成部分,能够表征土壤养分含量。本文中排土场土壤与风沙土复配使土壤全磷含量呈现出显著提升趋势,改善了矿区土壤贫瘠的现状,因此本文筛选出土壤全磷指标进入最小数据集具有一定代表性,胡伟等<sup>[28]</sup>基于最小数据集进行土壤质量评价中将全磷选入最小数据集,与本文结果一致。综上所述,本文通过主成分分析及 Norm 值的计算得到的最小数据集(WAF、ES、TP)具有一定

的合理性。

本文土壤复配技术主要是将风沙土与矿区排土场理化性质较差的土壤进行不同比例混合,目的是提高矿区排土场土壤的质量,从而达到改善矿区生态环境的最终目标,土壤复配这项技术现已得到广泛应用<sup>[29]</sup>。研究结果表明,4种样地的SQI相关性显著( $P < 0.05$ ), $P_A$ 土壤质量属于中等水平, $P_B$ 土壤质量属于良好水平, $P_C$ 土壤质量属于优等水平, $P_K$ 土壤质量属于较低水平,对比SQI值, $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 均大于 $P_K$ ,其中 $P_C > P_B > P_A > P_K$ 。SQI表征土壤的综合质量情况,根据SQI排序结果可知, $P_K$ 土壤质量最差,这可能是由于矿区排土场的土壤属于重构土壤,其组成物质复杂,包括砾岩、粉砂岩、页岩和采煤过程中产生的废弃物,因此其土壤结构极差<sup>[30]</sup>。而 $P_C > P_B > P_A > P_K$ ,说明风沙土与矿区土复配能够有效提高矿区排土场土壤的质量, $P_C$ 的效果最显著,表明在风沙土与排土场土壤复配比例为3:7的情况下复配效果最佳,能够有效改善土壤的渗透性和保水性能。这说明矿区排土场土壤与风沙土的物理性质表现出互补性,养分组成也大不相同,恰当的复配比例能够有效地改良土壤的结构从而提高其质量。从不同土层来看, $P_C$  0~20 cm土层的土壤质量指数最大,且4种样地的浅层土壤质量显著高于深层土壤质量( $P < 0.05$ ),即随土层深度增加,土壤质量逐渐变差,与赵娜等<sup>[31]</sup>的研究结果一致,这可能是由于土壤表层凋落物积累且细根生物量较大,凋落物分解后归还到土壤中的养分在表层积累较多,使得表层土壤质量高于深层土壤质量。

## 4 结论

(1) 随着风沙土复配比例的增大,土壤容重、pH整体呈现出降低的趋势,土壤含水率、饱和含水率、田间持水量、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾整体呈现出升高的趋势。

(2) 通过主成分分析、相关性分析和Norm值的计算,从12个指标中筛选出3个最小数据集指标,包括含水率、饱和含水率、全磷。

(3) 通过土壤质量指数计算公式,得出矿区排土场4种样地的SQI分布在0.329~0.829之间,其中, $P_A:SQI=0.508$ , $P_B:SQI=0.640$ , $P_C:SQI=0.829$ , $P_K:SQI=0.329$ ,四者之间相关性显著( $P < 0.05$ ),对比SQI值, $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 均大于 $P_K$ ,其中 $P_C > P_B > P_A > P_K$ 。

(4) 通过对矿区排土场不同样地不同土层计算SQI,可以看出 $P_C$  0~20 cm土层的土壤质量指数最大,表明 $P_C$ 表层土壤改良效果最佳, $P_A$ 、 $P_B$ 的表层土壤质量显著高于深层土壤质量( $P < 0.05$ ), $P_C$ 、 $P_K$ 表层土壤与深层土壤质量差异不显著( $P > 0.05$ )。研究结果可以为我国露天矿排土场及其他同类地区进行矿区生态环境改善提供理论与技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 涂庆,于光,黄启.鄂尔多斯盆地能源矿产矿权叠置问题对策分析[J].中国矿业,2013,22(4):15-18.
- [2] 王党朝,刘慧芳,肖武,等.胜利一号露天煤矿北排土场土壤物理性质空间分布研究[J].中国煤炭,2018,44(11):135-140,145.
- [3] WANG S F,CAO Y G,BAI Z K,et al. Spatial characteristics of reconstructed soil texture in dumping site of loess open-pit mining area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35:40-51.
- [4] 宝海风,康萨如拉,贺晓,等.西鄂尔多斯露天煤矿集中分布区景观格局动态[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2020,51(5):516-524.
- [5] WANG H Y,HAN J C,TONG W,et al. Analysis of water and nitrogen use efficiency for maize (*Zea mays* L.) grown on soft rock and sand compound soil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2017,97(8):2553-2560.
- [6] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛.毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J].中国土地科学,2012,26(8):

87-94.

- [7] 张甘霖,吴华勇.从问题到解决方案:土壤与可持续发展目标的实现[J].中国科学院院刊,2018,33(2):124-134.
- [8] YU P J,HAN D L,LIU S W,et al. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland[J]. *Catena*,2018,171:280-287.
- [9] 梅楠,谷岩,李德忠,等.基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2021,37(12):91-98.
- [10] 李雨晨,熊翱宇,平原,等.基于最小数据集的宁都县不同整地方式下果园土壤质量评价[J].水土保持学报,2023,37(4):342-350.
- [11] 王淑琴,罗珠珠,牛伊宁,等.基于最小数据集的黄土高原半干旱区苜蓿地土壤质量评价[J].中国草地学报,2023,45(7):81-90.
- [12] 王蓉,康萨如拉,牛建明,等.草原区露天煤矿复垦恢复过程中植物多样性动态:以伊敏矿区为例[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2013,44(6):597-606.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 金慧芳,史东梅,陈正发,等.基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J].农业工程学报,2018,34(7):155-164.
- [15] ASKARI M S,HOLDEN N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management [J]. *Geoderma*,2014,230-231:131-142.
- [16] 马芊红,张光辉,耿韧,等.黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J].水土保持研究,2018,25(4):30-35,42.
- [17] 柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义[J].生态学报,2016,36(13):3903-3910.
- [18] 李禹凝,王金满,张雅馥,等.干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展[J].土壤,2023,55(3):494-502.
- [19] 刘富强,窦超银,李祥瑞,等.滴灌水量对风沙土豆根区硝态氮及水分分布的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(2):131-139.
- [20] 闫焯琛,赵廷宁,张艳,等.不同植物恢复措施对采石矿废弃地土壤物理性质的改良效果及评价[J].浙江农林大学学报,2019,36(6):1062-1068.
- [21] 苗春光,杨惠惠,毕银丽,等.丛枝菌根真菌与沙棘对露天矿排土场的联合改良效应[J].煤田地质与勘探,2021,49(2):202-206.
- [22] 周磊,辛志杰,杜品廷,等.褐煤腐植酸对科尔沁沙地风沙土土壤特性及荞麦产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(6):62-72.
- [23] 丁翔,白中科.黄土区露天煤矿复垦土地植被覆盖度监测及影响因素[J].经济地理,2017,37(11):198-204.
- [24] 杨支齐,杜虎,曾馥平,等.广西主要人工林生态系统氮储量格局[J].生态学报,2022,42(13):5446-5457.
- [25] 杨晋炜,刘强,任衍斌,等.江苏海安里下河地区富硒土壤分布特征及成因[J].地质通报,2025,44(1):173-184.
- [26] 刘鑫,王一博,杨文静.青藏高原植被退化背景下土壤质量评价方法研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2020,56(2):143-153.
- [27] 刘慧敏,韩海荣,程小琴,等.不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响[J].北京林业大学学报,2021,43(6):50-59.
- [28] 胡伟,刘文辉,刘凯强,等.基于最小数据集土壤质量评价及生物指标的确立[J].草地学报,2024,32(12):3855-3867.
- [29] SUN Z H,HAN J C. Effect of soft rock amendment on soil hydraulic parameters and crop performance in Mu Us Sandy Land,China[J]. *Field Crops Research*,2018,222:85-93.
- [30] 王凯,那恩航,张亮,等.阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征[J].干旱区研究,2021,38(2):402-410.
- [31] 赵娜,孟平,张劲松,等.华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J].应用生态学报,2014,25(2):351-358.

## Evaluation of Soil Quality under Different Compound Soil Modes in Dump of Open-Pit Mine

WANG Heyan<sup>1</sup>, LI Long<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>1</sup>

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Key Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** The soil in the mining area was improved by mixing aeolian-sandy soil and the soil in the mining area's dump at different ratios, and the changes in soil quality under different soil-mixing patterns were explored to provide technical support for the improvement of the ecological environment in the mining area's dump. Taking three kinds of improved soils ( $P_A$ : the ratio of aeolian-sandy soil to the soil in the dump is 1 : 9;  $P_B$ : the ratio of aeolian-sandy soil to the soil in the dump is 2 : 8;  $P_C$ : the ratio of aeolian-sandy soil to the soil in the dump is 3 : 7) and one native soil  $P_K$  in the dump of Rongheng Open-pit Mine in Yijinhuoluo Banner, Ordos City as the research objects, through principal component analysis (PCA), correlation analysis and the calculation of Norm value, the minimum data set indicators were screened out from 12 indicators to evaluate the soil quality. The research results show that: (1) The soil quality index (SQI) obtained from the total data set (TDS) and the minimum data set (MDS) is linearly fitted, and there is a significant positive correlation between them ( $R^2=0.847, P<0.05$ ), indicating that MDS can replace TDS to evaluate the soil quality of the open-pit mine dump in semi-arid areas. The indicators selected in the minimum data set include: moisture content, saturated moisture content, and total phosphorus. (2) The SQI of the four sample plots is distributed between 0.329 and 0.829, among which  $P_A$  (SQI=0.508),  $P_B$  (SQI=0.640),  $P_C$  (SQI=0.829),  $P_K$  (SQI=0.329), and the correlation among the four is significant ( $P<0.05$ ). Comparing the SQI values,  $P_A$ ,  $P_B$ , and  $P_C$  are all greater than  $P_K$ , indicating that the mixing of aeolian-sandy soil and the soil in the mining area's dump have a positive impact on soil improvement. (3) The soil quality index of the  $P_C$  0–20 cm soil layer is the highest. The surface soil quality of  $P_A$  and  $P_B$  is significantly higher than that of the deep-layer soil ( $P<0.05$ ), while there is no significant difference in soil quality between the surface soil and the deep-layer soil of  $P_C$  and  $P_K$  ( $P>0.05$ ). It can be seen from the calculation results of the soil quality index that the improvement effect of  $P_C$  surface soil is the best.

**Key words:** sandy soil; dump; soil compound; minimum data set; soil quality