

季美彤, 刘宝勇, 于皓, 等. 污泥协同泥炭施加对矿区废弃地土壤养分的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1): 101-110.
JI M T, LIU B Y, YU H, et al. Effects of sludge combined with peat application on soil nutrients in wasteland in mining areas[J].
Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 101-110.
doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.11

污泥协同泥炭施加对矿区废弃地土壤养分的影响

季美彤, 刘宝勇, 于皓, 陈曦

(辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为探究污泥协同泥炭施加对矿区废弃地土壤的影响,以阜新海州露天矿废弃地土壤为研究对象,设置单施污泥(5%、10%、15%)、单施泥炭(5%、10%、15%)、污泥与泥炭配施(污泥5%+泥炭10%、污泥10%+泥炭10%、污泥15%+泥炭10%)以及空白对照共10个处理,并通过盆栽种植黑麦草研究不同污泥和泥炭施用量对矿区废弃地土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH值、含水率、多酚氧化酶和蔗糖酶活性的影响。结果表明,与对照相比,在矿区废弃地土壤中单施污泥、单施泥炭、污泥与泥炭配施均能增加土壤有机质、全氮、有效磷含量及多酚氧化酶和蔗糖酶活性;单施污泥15%、单施泥炭处理能显著增加土壤速效钾含量;单施污泥15%、单施泥炭(10%、15%)、污泥与泥炭配施处理能显著增加土壤含水率。TOPSIS分析结果表明,单施污泥对矿区废弃地土壤的综合改良效果优于污泥与泥炭配施;其中,单施污泥15%处理与对照相比,土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量以及含水率和多酚氧化酶、蔗糖酶活性分别增加151.10%、495.37%、1130.83%、39.71%、115.04%、78.98%、109.58%,对矿区废弃地土壤的改良综合效果优于其他处理。综上,单施污泥15%能够作为矿区废弃地土壤改良技术推荐使用。

关键词:污泥;泥炭;矿区废弃地;土壤养分

中图分类号:X171.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2025)01-0101-10

Effects of Sludge Combined with Peat Application on Soil Nutrients in Wasteland in Mining Areas

Ji Meitong, Liu Baoyong, Yu Hao, Chen Xi

(College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to explore the effects of sludge combined with peat application on the soil of the wasteland in mining areas, in this study, a total of 10 treatments were set up, including single sludge application(5%, 10%, and 15%), single peat application(5%, 10%, and 15%), sludge and peat combined application(sludge 5% + peat 10%, sludge 10% + peat 10%, and sludge 15% + peat 10%), and blank control. The effects of different sludge and peat application rates on soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, pH, moisture content, polyphenol oxidase and sucrase activities in the wasteland soil were studied by planting ryegrass in pots. The results showed that compared with the control, single application of sludge, single application of peat, and combined application of sludge and peat in the soil of the wasteland in the mining area could increase the content of organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and the activities of polyphenol oxidase and sucrase. Sludge application by 15% and peat treatment alone could significantly increase the content of available potassium in soil. Sludge application by 15%, peat application by peat alone, and sludge and peat combined treatment could significantly increase soil moisture content. The results of TOPSIS analysis showed that the comprehensive improvement effect of sludge application on the soil of mine wasteland was better than that of sludge and peat combined application. Among them, compared with the control, soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, water

收稿日期:2024-03-12

基金项目:辽宁省教育厅基金项目(LJ2020JCL011);中国科学院环境生物技术重点实验室开放课题项目(kf2020005);青海省科技厅科技成果转化专项(2022-SF-147)

作者简介:季美彤,在读硕士,研究方向:矿区环境治理,E-mail:1178841096@qq.com

通信作者:刘宝勇,副教授,博士,主要从事矿山环境工程研究工作,E-mail:liubaoyong00@163.com

content, polyphenol oxidase activity and sucrase activity increased by 151.10%, 495.37%, 1130.83%, 39.71%, 115.04%, 78.98%, and 109.58%, respectively, and the comprehensive effect of soil improvement on mine wasteland was better than that of other treatments. In summary, 15% of sludge alone could be recommended as a soil improvement technology for wasteland in mining areas.

Keywords: sludge; peat; wasteland in mining areas; soil nutrients

开发利用矿产资源对国家经济增长起到了重要作用,但随之也对生态环境造成了诸多影响,如土地资源的破坏,废弃土壤物理结构改变、有机质含量降低、营养元素缺乏等。这些都不利于植物的生长,因此,需要对矿区废弃土壤进行合理有效的修复,改善土壤结构和理化性质。截至 2024 年底,阜新海州露天矿计划完成废弃土壤修复任务,共涉及 17 个矿山,面积为 95.67 hm²,修复矿区废弃土壤任务艰巨,土壤改良迫在眉睫。

目前,利用污泥和泥炭对矿区废弃土壤的改良已经进行了较多的研究。吴志强等^[1]将城市污泥施入土壤中发现,污泥施用可显著提高土壤中有机质和养分含量并促进大豆增产,其肥效优于普通化肥。李霞^[2]研究了城市污泥在沙化土壤中的应用,发现污泥的添加能不同程度提高沙化土壤中养分含量。李建斌^[3]研究发现,随着泥炭浓度增加,根际土壤的弱酸提取态含量降低,可还原态、可氧化态和残渣态含量增加。武淑文等^[4]研究发现,污泥应用于矿区废弃地修复是可行的,而且选用重金属含量较低的城市污泥作为土壤改良基质进行改良效果更好。SELDA 等^[5]研究了施加污泥和粉煤灰对盐碱土的影响,结果表明,土壤 ESP 值均随改良剂的施用而降低,土壤性质得到有效改善。彭维新等^[6]通过盆栽试验发现,污泥添加显著促进了剑豆生长和植株内氮磷钾养分元素的积累,蔗渣的强化效果显著,土壤调理剂有抑制剑豆

生长和养分吸收的趋势。王厚成^[7]将污泥应用于土壤污染植物修复,发现污泥辅助苜蓿对土壤污染起到较好的修复效果,开发出一种土壤污染植物修复的新技术,并为污泥处置提供了新方向。城市污泥和泥炭中富含有机质、氮、磷、钾等营养元素,能够提高土壤肥力、改善土壤结构,促进植物生长,具有广泛的应用潜力。

目前,大部分矿区废弃地采取单独施用改良剂,以确保土壤养分稳定,将污泥与泥炭混施修复矿区废弃地土壤的研究较少。因此,本研究通过在供试土壤中种植本土植物黑麦草,研究了污泥与泥炭混施对修复矿区废弃地土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH 值、含水率、多酚氧化酶和蔗糖酶活性的影响,旨在为矿区废弃地的生态修复提供实践数据支持,进而为实现污泥循环利用与废弃矿区土壤综合管理的双重目标提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤为辽宁省阜新市海州露天矿废弃地土壤;供试污泥取自辽宁省阜新市蒙古贞污水处理有限公司;供试泥炭取自丹麦品氏纯泥炭;供试黑麦草购自沐阳县桑城镇红绿团苗木场。供试土壤、污泥和泥炭的 pH 值,含水率,有机质,全氮,速效磷,速效钾含量以及蔗糖酶和多酚氧化酶活性见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of the tested soil

项目 Item	pH	含水率/% Moisture content	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	速效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available po- tassium	蔗糖酶/ (mg/(g·d)) Sucrase	多酚氧化 酶/(U/(g· d))Polyphe- nol oxidase
土壤 Soil	6.90	4.53	13.75	0.59	10.2	12.9	12.1	12.3
污泥 Sludge	6.79	56.75	149.95	30.87	398.0	110.0	35.3	28.3
泥炭 Peat	6.77	91.77	275.15	24.99	152.0	150.0	26.1	23.1
GB/T 24600—2009	5.5~10.0	<65	>100					

1.2 试验设计

试验采用两因素完全随机设计,开展不同污

泥和泥炭施加量的盆栽试验,共设 10 个处理。具体污泥和泥炭施加量(占盆土的质量百分比)见

表2。每盆装入土壤800 g,每个处理重复3次,共30盆并种植黑麦草。

表2 试验设计
Tab.2 Experimental design

序号 Number	处理 Treatment	施用量 Application rate	序号 Number	处理 Treatment	施用量 Application rate
I	空白对照	CK	VI	单施泥炭	10%
II	单施污泥	5%	VII	单施泥炭	15%
III	单施污泥	10%	VIII	污泥+泥炭	5%+10%
IV	单施污泥	15%	IX	污泥+泥炭	10%+10%
V	单施泥炭	5%	X	污泥+泥炭	15%+10%

1.3 测定项目及方法

在黑麦草收获后,采集0~20 cm土层土壤经风干后磨碎过0.25 mm和1 mm筛用于后续检测。有机质含量测定采用重铬酸钾容量法—稀释热法^[8],全氮含量测定采用半微量开氏法^[9],有效磷含量测定采用Olsen法(碳酸氢钠法)^[10],速效钾含量测定采用NH₄OAc浸提-火焰光度法^[11],pH值测定采用水土比1:2.5进行测定^[12],含水量测定采用烘干法^[13],蔗糖酶活性测定采用二硝基水杨酸比色法^[14],多酚氧化酶活性测定采用分光光度法^[15]。

1.4 优劣解距离法(TOPSIS)评价模型

本研究采用TOPSIS法对施加污泥与泥炭后的矿区废弃地土壤的全氮、有效磷、速效钾、有机质含量、土壤酶活性等指标进行了决策分析^[16],并结合主成分分析评估这些指标相对于理想最优解和理想最劣解的距离。

本研究运用熵权法计算权重,并处理多个因素之间的相互关系,然后将熵权法与TOPSIS法相结合形成熵权TOPSIS综合评价法。

对同趋化数据 Y_{ij} 进行规范化处理,形成 Z_{ij} ;计算第 j 项指标的熵值 b_j ;计算 j 项指标的熵权 W_j ;确定最优方案和最劣方案(以评价对象的第 j 项指标的最大值 Z_{jmax} 和最小值 Z_{jmin} ,作为各评价对象的最优方案和最劣方案);计算每一个评价对象与最优方案的欧氏距离 D_i^+ 和最劣方案的欧氏距离 D_i^- 。

$$Z_{ij} = Y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_{ij}^2} \quad (1)$$

$$b_j = -\sum_{i=1}^n Z_{ij} \ln Z_{ij} / \ln n \quad (2)$$

式中, $i=1,2,3,\dots,n,j=1,2,3,\dots,m,0 \leq b_j \leq$

1且规定 $Z_{ij}=0$ 时, $Z_{ij} \ln Z_{ij}=0$ 。

$$w_j = (1 - b_j) / (n - \sum_{j=1}^m b_j) \quad (3)$$

式中, $j=1,2,3,\dots,m,0 \leq w_j \leq 1$ 且 $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1$ 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j (Z_{ij} - Z_{jmax})]^2} \quad (4)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j (Z_{ij} - Z_{jmin})]^2} \quad (5)$$

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (6)$$

将 C_i 值按照大小排序,其值越大表示评价对象的综合评价越高。

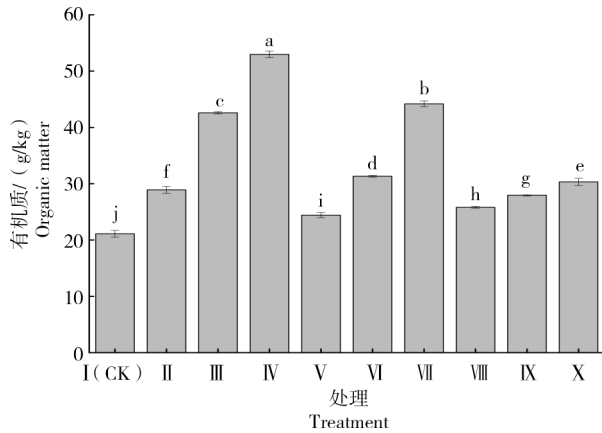
1.5 数据分析

采用SPSS 25.0软件对数据进行整理分析,采用沃勒—邓肯分析法进行显著性分析,采用Origin 2022软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对矿区废弃地土壤有机质含量的影响

从图1可以看出,单施污泥组、单施泥炭组、污泥与泥炭配施组的土壤有机质含量均显著高于对照I处理,而且均呈随施加量增加有机质含量增加的趋势。其中,相比于对照,单施污泥II、III、IV处理的土壤有机质含量分别增加37.01%、101.85%、151.04%;单施泥炭V、VI、VII处理的土壤有机质含量分别增加15.68%、48.47%、109.39%;污泥与泥炭配施VIII、IX、X处理的土壤有机质含量分别增加22.33%、32.55%、43.66%。以上结果表明单施污泥、单施泥炭、污泥与泥炭配施均能够增加土壤中有机质含量。



柱图上方不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同
Different lowercase letters at the top of the bar chart indicated
significant differences among treatments($P < 0.05$). The same
as below

图1 不同处理土壤有机质含量分析

Fig.1 Analysis of soil organic matter content under different treatments

2.2 不同处理对矿区废弃地土壤全氮含量的影响

从图2可以看出,单施污泥组、单施泥炭组、污泥与泥炭配施组的土壤全氮含量均显著高于对照,而且均呈随施加量增加全氮含量增加的趋势。其中,相比于对照,单施污泥II、III、IV处理的土壤全氮含量分别增加167.97%、363.05%、495.37%;单施泥炭V、VI、VII处理的土壤全氮含量分别增加87.91%、235.17%、348.08%;污泥与泥炭配施VIII、IX、X处理的土壤全氮含量分别增加191.31%、301.90%、494.95%。以上结果表明单施污泥、单施泥炭、污泥与泥炭配施均能够增加土壤中的全氮含量。

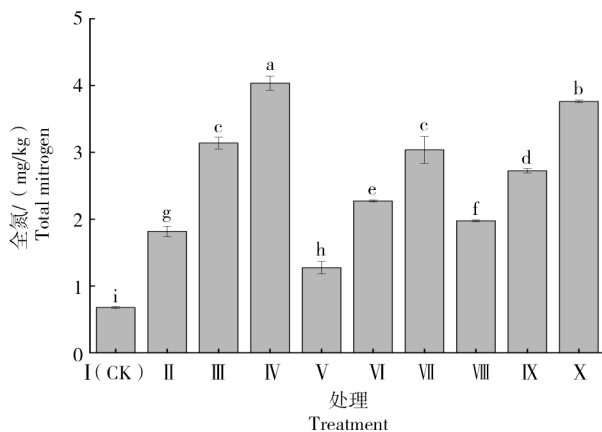


图2 不同处理土壤全氮含量分析

Fig.2 Analysis of total nitrogen content in soil under different treatments

2.3 不同处理对矿区废弃地土壤有效磷含量的影响

从图3可以看出,单施污泥处理相比单施泥炭处理土壤有效磷含量增加程度更为明显。单施污泥组、单施泥炭组、污泥与泥炭配施组的土壤有效磷含量均显著高于对照,而且均呈随施加量增加有效磷含量增加的趋势。其中,相比于对照,单施污泥II、III、IV处理的土壤有效磷含量分别增加529.34%、949.97%、1330.82%;单施泥炭V、VI、VII处理的土壤有效磷含量分别增加75.86%、94.76%、115.90%;污泥与泥炭配施VIII、IX、X处理的土壤有效磷含量分别增加415.80%、819.37%、1178.89%。以上结果表明单施污泥、单施泥炭和污泥与泥炭配施均能够增加土壤有效磷含量。

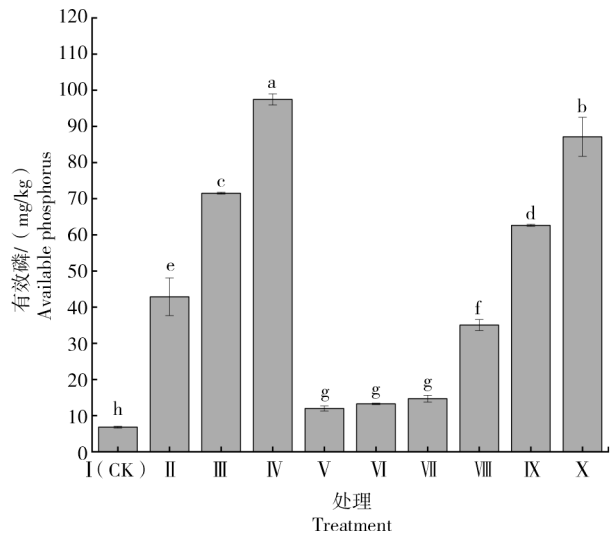


图3 不同处理土壤有效磷含量分析

Fig.3 Analysis of available phosphorus content in soil under different treatments

2.4 不同处理对矿区废弃地土壤速效钾含量的影响

从图4可以看出,单施泥炭处理的速效钾含量高于单施污泥和污泥与泥炭配施处理的速效钾含量。其中,相比于对照,单施污泥IV处理的土壤速效钾含量增加39.71%;单施污泥II、III处理和混施IX处理的土壤速效钾含量分别减少7.35%、13.24%、1.47%;单施泥炭V、VI、VII处理土壤速效钾含量分别增加77.94%、98.53%、102.94%。以上结果表明单施污泥和单施泥炭均能够增加土壤中速效钾含量。

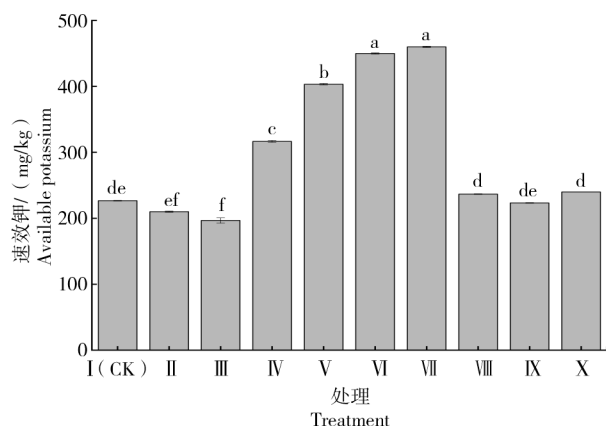


图4 不同处理土壤速效钾含量分析

Fig.4 Analysis of available potassium content in soil under different treatments

2.5 不同处理对矿区废弃地土壤pH值的影响

由图5可知,单施污泥Ⅱ处理的土壤pH值显著高于对照($P<0.05$),单施污泥Ⅳ处理、混施Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ处理的土壤pH值显著低于对照($P<0.05$),其他处理的土壤pH值与对照无显著性差异。以上结果表明单施污泥Ⅱ处理能够显著提高土壤pH值。

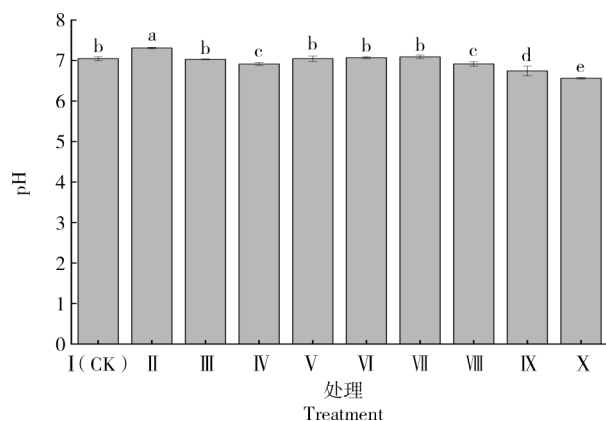


图5 不同处理土壤pH值分析

Fig.5 Analysis of soil pH values under different treatments

2.6 不同处理对矿区废弃地土壤含水率的影响

从图6可以看出,相比于对照,单施污泥Ⅳ处理、单施泥炭Ⅴ和Ⅶ处理、污泥与泥炭配施Ⅸ和Ⅹ处理土壤含水率分别显著增加115.04%、27.43%、59.35%、55.56%、81.76% ($P<0.05$)。单施泥炭Ⅵ处理的土壤含水率相比于对照显著减少60.75% ($P<0.05$)。以上结果表明单施污泥Ⅳ处理对土壤含水率增加最多。

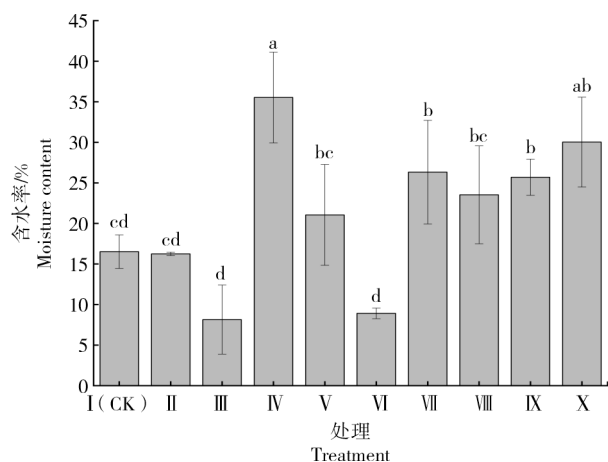


图6 不同处理土壤含水率分析

Fig.6 Analysis of soil moisture content under different treatments

2.7 不同处理对矿区废弃地土壤多酚氧化酶活性的影响

从图7可以看出,单施污泥组、单施泥炭组、污泥与泥炭配施组的土壤多酚氧化酶活性均显著高于对照,而且均呈随施加量增加多酚氧化酶活性增加的趋势。其中,相比于对照,单施污泥Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ处理的土壤多酚氧化酶活性分别显著增加49.60%、64.50%、78.98% ($P<0.05$);单施泥炭Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ处理的土壤多酚氧化酶活性分别显著增加64.29%、68.57%、75.10% ($P<0.05$);污泥与泥炭配施Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ处理的土壤多酚氧化酶活性分别显著增加85.10%、99.59%、125.7% ($P<0.05$)。以上结果表明污泥与泥炭配施处理对土壤中的多酚氧化酶活性增加最多。

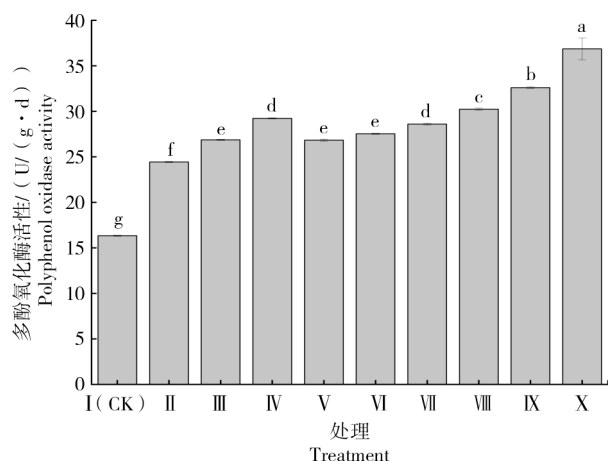


图7 不同处理土壤多酚氧化酶活性分析

Fig.7 Analysis of polyphenol oxidase activity in soil under different treatments

2.8 不同处理对矿区废弃地土壤蔗糖酶活性的影响

从图 8 可以看出,单施污泥组、单施泥炭组、污泥与泥炭配施组的土壤蔗糖酶活性均显著高于对照,而且均呈随施加量增加蔗糖酶活性增加的趋势。其中,相比于对照,单施污泥 II、III、IV 处理的土壤蔗糖酶活性分别显著增加 80.99%、103.14%、109.58% ($P < 0.05$);单施泥炭 V、VI、VII 处理的土壤蔗糖酶活性分别显著增加 36.68%、55.69%、72.45% ($P < 0.05$);污泥与泥炭配施 VIII、IX、X 处理的土壤蔗糖酶活性分别显著增加 54.50%、60.93%、67.51% ($P < 0.05$)。以上结果表明污泥和泥炭的施用能够显著增加土壤中蔗糖酶活性。

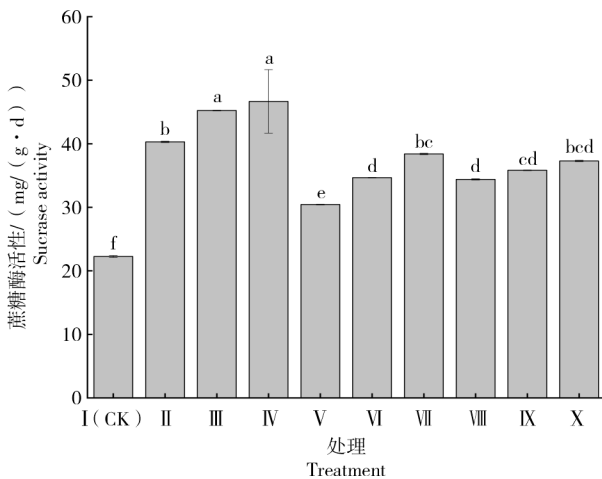


图 8 不同处理土壤蔗糖酶活性分析

Fig.8 Analysis of sucrose activity in soil under different treatments

2.9 优劣解距离法(TOPSIS)分析

基于 TOPSIS 原理对土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、含水量、pH 值、蔗糖酶活性、多酚氧化酶活性进行评价。筛选出对于修复土壤的最佳配施量。熵权法与 TOPSIS 法基本原理相结合,形成本研究中所运用的熵权 TOPSIS 综合评价法。

利用公式(1)(2)(3)进行指标熵权法的权重分析,结果如表 3 所示,有机质含量的权重为 16.8%,速效磷含量的权重为 20.9%,蔗糖酶活性的权重为 7.4%,含水率的权重为 13.6%,多酚氧化酶活性的权重为 6.9%,速效钾含量的权重为 24.2%,全氮含量的权重为 10.2%,其中,指标权重最大值为速效钾含量,最小值为多酚氧化酶活性。

表 3 指标权重的计算结果

Tab.3 The weight of indicators calculated

指标 Indicator	信息熵值 e Information entropy	信息效用值 d Information utility	权重/% Weight
有机质含量 Organic matter content	0.852	0.148	16.779
速效磷含量 Available phosphorus	0.817	0.183	20.869
蔗糖酶活性 Sucrase activity	0.935	0.065	7.368
含水率 Moisture content activity	0.880	0.120	13.597
多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase content	0.939	0.061	6.918
速效钾含量 Available potassium content	0.787	0.213	24.225
全氮含量 Total nitrogen	0.910	0.090	10.244

利用公式(4)(5)对指标进行评价,从表 4 可以看出,D+和D-值分别刻画了评价对象与最佳和最劣解(即A+或A-)之间的欧几里得距离。D+和D-值的数值越大,距离越远。理想的状况是D+值尽可能小,而D-值尽可能大,这表示研究对象既接近最佳解,又远离最劣解。此外,还有一个综合度得分(C值)。各指标的综合得分由大到小依次为:污泥 15% > 泥炭 15% > 污泥 15% + 泥炭 10% > 污泥 5% + 泥炭 10% > 污泥 10% + 泥炭 10% > 泥炭 10% > 污泥 10% > 泥炭 5% > 污泥 5% > CK。

表 4 TOPSIS 评价法计算结果

Tab.4 TOPSIS evaluation method calculation results

处理 Treatment	正理想解距离 (D+)Positive ideal solution distance	负理想解距离 (D-)Negative ideal solution distance	综合得分指数 (C)Compos- ite Score In- dex	排序 Sort
I	0.939	0.118	0.112	10
II	0.753	0.286	0.275	9
III	0.675	0.522	0.4361	7
IV	0.299	0.851	0.739	1
V	0.799	0.311	0.280	8
VI	0.664	0.525	0.441	6
VII	0.474	0.722	0.603	2
VIII	0.564	0.613	0.520	4
IX	0.600	0.501	0.454	5
X	0.533	0.648	0.548	3

利用公式(6)计算理想中间值,结果如表 5 所

示,正、负理想解(非距离)分别代表评价指标的最大值和最小值(即最优解和最劣解),正理想解通常是通过选择每个指标的最大值来构建。理想解代表处理在每个评价维度上所期望的最优性能,负理想解通过选择每个指标的最小值来确定。理想解代表了处理在每个评价维度上所期望避免的最劣性能。

表5 TOPSIS理想中间值展示
Tab.5 TOPSIS ideal median value display

指标 Indicator	正理想解 Positive ideal solution	负理想解 Negative ideal solution
有机质含量 Organic matter content	0.999 996 86	0.000 003 14
速效磷含量 Available phosphorus content	0.999 998 91	0.000 001 09
蔗糖酶活性 Sucrase activity	0.999 995 90	0.000 004 10
含水率 Moisture content	0.999 996 35	0.000 003 65
多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity	0.999 995 16	0.000 004 84
速效钾含量 Available potassium content	0.999 996 20	0.000 003 80
全氮含量 Total nitrogen content	0.999 970 24	0.000 029 76

注:因中间值结果在小数点后6位体现差异,故保留8位小数。

Note: Because the median result reflected the difference in 6 decimal places, 8 decimal places were retained.

由 TOPSIS 评价法结果可知(表4),单施污泥15%综合得分指数最高,基于TOPSIS理论综合度得分C值越大(表示该研究对象距离最劣解越远)而研究对象越好的原理,可以得出单施污泥15%可用作矿区废弃地土壤改良的最优施放量。

3 结论与讨论

本研究表明,单施污泥、泥炭与二者混施对土壤理化性质及酶活性有不同程度的影响。污泥中含有丰富的有机质和植物必需的营养元素,如氮磷钾等,对土壤理化性质改善和植物生长发育具有重要的作用。已有研究发现,污泥有机质中含有胡敏酸等物质,这些物质不仅对植物的生长具有刺激作用,还可以激活土壤中的酶活性^[17]。本研究结果表明,污泥和泥炭的施加显著增加了矿区废弃

土壤中的有机质含量和酶活性,这与之前的研究结果一致。此外,有机质还能提高土壤的保水性,改善土壤的通透性和结构,促进土壤中的气体交换和水分循环。KWARCIAK-KOZŁOWSKA等^[18]研究发现,在土壤中施加城市污泥可以改善土壤的物理、化学和生物特性,对于植被和退化的生态系统的恢复具有重要作用。已有研究表明,在陆地生态系统的物质循环过程中,土壤氮素发挥着重要作用^[19]。土壤氮素含量过低将不能满足区域内作物的生产需要,过量则会造成区域水体富营养化等环境问题^[20]。由于受到自然因素和人为因素的共同影响,土壤全氮含量通常具有较强的时空差异性^[21]。磷元素与植物能量生化反应有一定关系,许多的酵素代谢中依赖磷酸作用,是植物生长和生殖不可缺少的元素之一^[22]。钾元素能维持细胞的正常含水量、减少水分的蒸腾损失,提高植物的抗旱、抗寒能力。合理的钾素施用和分配能够调节土壤的肥力,施用适量的污泥和泥炭有利于提高土壤中速效钾的含量^[23]。本研究结果显示,单施污泥、单施泥炭、污泥与泥炭配施均能增加土壤的全氮和有效磷含量,单施泥炭可以增加土壤速效钾含量。因此,单施污泥、泥炭与二者混施可以有效提高土壤的氮磷钾含量。其中,单施污泥Ⅱ,Ⅲ处理和混施Ⅸ处理速效钾含量下降,原因可能为植株根系具有较高的吸收养分和水分的能力。速效钾容易受温度、水分、作物吸收等影响,推测植物的生长发育加剧了对速效钾的需求量,导致速效钾含量下降。

施加污泥对改善土壤结构和提升土壤肥力有至关重要的作用。污泥可增加土壤养分,增加土壤中阳离子的交换量,增强土壤微生物活性,提高土壤代谢能力,中和酸性土壤使其酸碱平衡。本研究结果表明,单施污泥可有效增加土壤中速效磷、全氮及有机质的含量,其中,单施污泥15%处理对土壤有机质、全氮、有效磷、含水率及蔗糖酶含量的提升优于单施泥炭和混施,说明不同处理对土壤养分具有不同的改善作用,并表现出了互补效应。赖发英等^[24]通过盆栽试验发现,施用城市污泥后,土壤中全氮含量随污泥施用量的增加而增加。孙永明等^[25]通过盆栽试验发现,城市污泥施用后有利于提高矿业废弃土壤的肥力。潘志强等^[26]研究发现,污泥养分充足,具有很高的肥力。张丽珍等^[27]研究发现,腐殖酸一类的介质可防止土

壤对磷肥的固定,提高了磷肥的肥效。ZUO 等^[28]研究发现,经过污泥和泥炭改良的土壤中氮和磷含量明显增加,改善了土壤的物理化学性质。这些研究发现与本研究结论一致。

泥炭因其良好的保水性和透气性,能有效改善旱地或排水不良的土壤结构,同时还能吸附和稳定重金属离子,降低土壤重金属活性。泥炭还可为土壤提供养分并促进土壤中难溶性磷酸盐溶解,从而增加土壤磷的含量。泥炭中的多孔结构为钾离子提供了存储空间,并且其较高的 CEC(阳离子交换量)意味着泥炭能够吸附和保留更多的钾离子,从而增加土壤钾的含量。当泥炭被用于土壤改良时,它可以作为一个钾离子的库,在植物生长期间逐渐释放钾离子,从而提高土壤中速效钾的含量。刘子刚等^[29]研究发现,泥炭有利于土壤中营养元素的增加,促进植物的生长和发育,改善土壤的结构和水分保持能力,这与本研究结果一致。

污泥与泥炭的混合施用可以在一定程度上缓解各自的局限性。污泥可以提供土壤所需的养分,而泥炭则有助于改善土壤结构。泥炭有改善土壤的优势,故施加泥炭显著提高了污泥的改良效果。在混施污泥 15%+泥炭 10% 土壤中多酚氧化酶活性提升显著,且泥炭的施用刺激了污泥的活性,增强了土壤多酚氧化酶活性,这可能是由于泥炭和污泥都富含有机物,提供了更多的有机物和能量源,从而促进了土壤微生物的生长和酶活性。同时,泥炭中的酸性条件可能有助于稳定酶蛋白,进一步提高了酶的活性^[30]。在不同处理中,污泥与泥炭混施对土壤养分提升不显著,主要可能因为污泥中含有大量的营养元素,而泥炭对养分的改善能力却显著低于污泥,两者结合产生稀释作用,使营养元素含量显著低于单施污泥,但泥炭因其独有的高保水能力和高度多孔的结构特征,使其能吸附相对于单施污泥来说更多的交换阳离子,提高土壤代谢能力和微生物活性,优化微生物群落,为微生物提供适宜的生长环境,使土壤中蔗糖酶活性显著增强。本研结果显示,污泥单施或与泥炭配施均能提高土壤蔗糖酶活性,这可能是由于污泥提供了易于微生物降解的有机物,从而激活了土壤中的蔗糖酶活性^[31]。

土壤酶活性主要调节土壤生物化学过程,且对土壤中的微生物活性具有指示作用。污泥提高

微生物活性的作用与泥炭改良土壤孔隙度的作用,在一定程度上提高了土壤酶的活性。使污泥与泥炭混施显著提高土壤多酚氧化酶活性,同时又因为泥炭对交换阳离子的吸附作用导致相较于混施,单施污泥的蔗糖酶活性显著增强。

本研究表明,污泥协同泥炭混施可有效改良矿区废弃地土壤理化性质,如全氮、有效磷、速效钾等,同时对改善土壤 pH、含水率也有一定作用,能显著增加土壤酶的活性。其中,在单施污泥 15% 处理后对土壤有机质、全氮、有效磷、含水率及蔗糖酶含量增加最显著;单施泥炭 15% 处理后对土壤速效钾含量提升最显著。在污泥与泥炭混施中,污泥 10%+泥炭 15% 处理对多酚氧化酶活性提升最显著。不同处理有效改善了土壤质量,同时控制 pH 值在合理范围内。此外,本研究利用 TOPSIS 理论,以测定 7 种土壤指标为基础,分析了 10 种处理对土壤质量的变化情况,基于该理论,认为 TOPSIS 的评价方法的结果可以运用于水土保持效益评价^[32],而且在其他水土保持效益评价方面可以期待有更广泛的应用。由 TOPSIS 评价法计算结果可知,综合评价得分由大到小依次为:污泥 15% > 泥炭 15% > 污泥 15%+泥炭 10% > 污泥 5%+泥炭 10% > 污泥 10%+泥炭 10% > 泥炭 10% > 污泥 10% > 泥炭 5% > 污泥 5% > CK,其中,单施污泥 15% 改良效果最为出色,可作为一种对矿区土壤改良的良好技术。

参考文献:

- [1] 吴志强,顾尚义,李海英. 城市污泥用于铅锌矿区重金属污染修复的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(4): 49-53, 58. WU Z Q, GU S Y, LI H Y. Experimental study on the use of municipal sludge for the remediation of heavy metal pollution in lead-zinc mining area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(4): 49-53, 58.
- [2] 李霞. 城市污泥在科尔沁沙地土壤改良中的应用及风险分析[D]. 长沙:湖南农业大学, 2013. LI X. Application and risk analysis of municipal sludge in soil improvement in Horqin sandy land[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [3] 李建斌. 泥炭土改良铅锌矿渣下木本植物修复效果研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2018. LI J B. Study on the effect of woody phytoremediation under peat-soil improvement of lead-zinc slag[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
- [4] 武淑文,杨迎冬,黄成. 城市污泥用于尾矿废弃地土壤改良的可行性研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(33): 12993-12994, 12998.

- WU S W, YANG Y D, HUANG C. Feasibility study on soil amelioration of municipal sewage sludge in mining tailing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(33): 12993-12994, 12998.
- [5] SELDA O, USTUN S, ROULA K. Reclamation of saline sodic soils with the use of mixed fly ash and sewage sludge[J]. Arid Land Research and Management, 2015, 29(1): 41-54.
- [6] 彭维新, 杨源通, 冯嘉仪, 等. 污泥及强化措施对稀土矿区废弃地土壤的改良[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 65-72. PENG W X, YANG Y T, FENG J Y, et al. Sludge and strengthening measures for soil improvement in waste land in rare earth mining area[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 65-72.
- [7] 王厚成. 城市污泥生命周期中重金属变化及对土壤污染植物修复的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. WANG H C. Study on the change of heavy metals in the life cycle of urban sludge and its impact on phytoremediation of soil pollution[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [8] 国家环境保护总局. 土壤质量有机质测定—重铬酸钾容量法—稀释放热法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Determination of organic matter in soil mass-potassium dichromate volumetric method-dilution heat method: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [9] 国家环境保护总局. 土壤质量全氮测定—半微量开氏法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Total nitrogen determination of soil mass-semi-micro kelvin: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [10] 国家环境保护总局. 土壤质量有效磷测定—Olsen法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Soil quality-determination of available phosphorus in Olsen method: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [11] 国家环境保护总局. 土壤质量速效钾测定—火焰光度法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Determination of available potassium in soil quality by flame photometry: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [12] 国家环境保护总局. 土壤质量pH测定—pH计测量: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Soil quality pH determination-pH meter measurement: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [13] 国家环境保护总局. 土壤质量含水率测定—烘干法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Determination of soil quality moisture content-drying method: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [14] 国家环境保护总局. 土壤质量蔗糖酶测定—二硝基水杨酸比色法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Soil quality sucrase assay-dinitrosalicylic acid colorimetric method: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [15] 国家环境保护局. 土壤质量多酚氧化酶测定—分光光度法: GB/T 17138—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Soil quality polyphenol oxidase assay-spectrophotometry: GB/T 17138-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [16] 李亦然, 张兴刚, 李泽东, 等. 基于TOPSIS法的鲁中南山区不同混交林水土保持效益评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 108-117. LI Y R, ZHANG X G, LI Z D, et al. Evaluation of soil and water conservation benefits of different mixed forests in hilly area of middle southern of Shandong province by TOPSIS[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 108-117.
- [17] 杨涛, 林逢凯, 陈秀荣, 等. 城市污泥对黑麦草和高羊茅生长的影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5): 33-39. YANG T, LIN F K, CHEN X R, et al. The impact of excess sludge on the growth of *Lolium perenne* L. and *Festuca arundinacea* [J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(5): 33-39.
- [18] KWARCIAK-KOZŁOWSKA A, FIJAŁKOWSKI KL. Efficiency assessment of municipal landfill leachate treatment during advanced oxidation process (AOP) with biochar adsorption (BC) [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112309.
- [19] 王家强, 彭杰, 柳维扬, 等. 干旱区荒漠河岸线土壤全氮空间变异特征研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 12-19. WANG J Q, PENG J, LIU W Y, et al. Spatial heterogeneity characteristic of soil total nitrogen in desert riparian forest of arid area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 12-19.
- [20] 杨小林, 李义玲, 朱波, 等. 紫色土小流域不同土地利用类型的土壤氮素时空分异特征[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2807-2813. YANG X L, LI Y L, ZHU B, et al. Spatial and temporal variations of soil nitrogen under different land uses in a small watershed in the purple soil area, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(10): 2807-2813.
- [21] 代子俊, 赵霞, 李德成, 等. 近30年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 338-350. DAI Z J, ZHAO X, LI D C, et al. Spatio-temporal variation of soil total nitrogen in Huangshui river basin and its affecting factors in the past 30 years [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 338-350.
- [22] 王逊. 堆肥污泥对林地土壤及植物的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.

- WANG X. Study on the effects of compost sludge on woodland soil and plants[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [23] 尚虹, 谭国栋, 张灿, 等. 污泥堆肥对迎春和紫穗槐生长的影响及其施用量确定[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 215-217, 222.
- SHANG H, TAN G D, ZHANG C, et al. Effects of sewage sludge compost on growth of *Jasminum nudiflorum* and *Amorpha fruticosa* and determination of application rate[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 215-217, 222.
- [24] 赖发英, 王国锋, 孙永明, 等. 城市污泥对矿区土壤性状的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(2): 349-354.
- LAI F Y, WANG G F, XUN Y M, et al. Effects of municipal sewage sludge on mine soil properties[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica 2010, 24(2): 349-354.
- [25] 孙永明, 郭衡焕, 孙辉明, 等. 城市污泥在矿区废弃地复垦中应用的可行性研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(6): 22-25.
- SUN Y M, GUO H H, SUN H M, et al. Feasibility study on municipal sewage sludge in the mining area of land reclamation [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(6): 22-25.
- [26] 潘志强, 张淑琴, 任大军, 等. 城市污泥的直接施用对矿区土壤修复的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 189-193, 183.
- PAN Z Q, ZHANG S Q, REN D J, et al. Effects of direct application of sewage sludge on soil remediation in abandoned mining area[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 189-193, 183.
- [27] 张丽珍, 陈伟, 史静, 等. 腐殖酸钠对紫花苜蓿生长及生物量的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(1): 101-109.
- ZHANG L Z, CHEN W, SHI J, et al. Effects of sodium humate on growth and biomass of alfalfa[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(1): 101-109.
- [28] ZUO W G, GU C H, ZHANG W J, et al. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land[J]. Science of Total Environment, 2019, 654: 541-549.
- [29] 刘子刚, 马学慧, 李晓宇, 等. 测定泥炭中有机质含量的两种方法之比较[J]. 湿地科学, 2023, 21(3): 465-469.
- LIU Z G, MA X H, LI X Y, et al. Comparison of two methods for determination of organic matter content in peat[J]. Wetland Science, 2023, 21(3): 465-469.
- [30] AHMAD A, CHOWDHARY P, KHAN N, et al. Effect of sewage sludge biochar on the soil nutrient, microbial abundance, and plant biomass: a sustainable approach towards mitigation of solid waste[J]. Chemosphere, 2022, 287: 132112.
- [31] WANG Q, HU X H, MA Y H, et al. Enhancing sugar beet yield and quality in Northeast China: investigating the synergistic impact of sugar mill filter mud and biochar on black soil [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 326: 112680.
- [32] 李亦然, 张兴刚, 李泽东, 等. 基于 TOPSIS 法的鲁中南山区不同混交林水土保持效益评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 108-117.
- LI Y R, ZHANG X G, LI Z D, et al. Evaluation of soil and water conservation benefits of different mixed forests in hilly area of middle southern of Shandong province by TOPSIS [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 108-117.

著作权使用声明

本刊已许可中国知网以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含中国知网著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。

《山西农业科学》编辑部