

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 Weixin, YANG Yuantong, FENG Jiayi, et al. Improvement of sewage sludge and enhanced measure on soil of rare earth mine wasteland[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 65-72.

污泥及强化措施对稀土矿区废弃地土壤的改良

彭维新, 杨源通, 冯嘉仪, 吴道铭, 曾曙才
(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究添加城市污泥对稀土矿废弃地土壤的改良作用, 以及在添加污泥基础上添加蔗渣和土壤调理剂的强化效果, 以为稀土矿区土壤改良提供理论依据, 也为城市污泥资源化利用提供新思路。【方法】以稀土矿区土壤为研究对象, 设置 3 个处理: 添加污泥 (T1)、添加污泥+蔗渣 (T2)、添加污泥+蔗渣+土壤调理剂 (T3), 矿区土壤作为对照 (CK), 以剑豆 *Canavalia gladiata* 为种植材料, 通过盆栽试验验证土壤改良效果; 测定土壤理化性质和剑豆生长指标, 运用主成分分析和模糊隶属函数分析方法综合分析不同处理的土壤改良效果。【结果】与对照相比, 3 种处理均极大地改善了矿区土壤的理化性质, 促进了剑豆生长和氮、磷、钾养分元素吸收。其中, T1 处理使土壤容重降低 27.64%, 总孔隙度提高 23.91%, 毛管持水量提高 42.41%, 有机质含量提高 11.01 倍, 全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量大幅增加; T2 处理的土壤物理性质优于 T1, 有机质含量提高 25.9%, pH 提高 0.32; T3 处理的土壤 pH(7.22) 最高, 较 T2 提高 49.17%, 速效磷、速效钾含量分别提高 0.46% 和 11.05%。T2 和 T3 处理植株的总生物量显著高于 T1 和 CK, 且 T2 和 T3 处理之间无显著差异; 单株氮、磷、钾的积累量均在 T2 处理达到最大值, 分别为 934.43、172.07、931.35 mg, 且与其他处理差异显著。CK、T1、T2、T3 的隶属函数平均值分别为 0.06、0.56、0.83、0.90, 土壤改良效果排序为 T3>T2>T1。【结论】添加污泥显著改良矿区土壤, 在添加污泥基础上加入蔗渣和土壤调理剂的改良效果显著增强。

关键词: 剑豆; 稀土矿土壤; 污泥; 蔗渣; 土壤调理剂
中图分类号: S714.6; X705 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2020)05-0065-08

Improvement of sewage sludge and enhanced measure on soil of rare earth mine wasteland

PENG Weixin, YANG Yuantong, FENG Jiayi, WU Daoming, ZENG Shucai
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To study the improvement effect of urban sewage sludge addition on soil of rare earth mine wasteland, and the strengthening effects of adding bagasse and soil conditioner on the basis of sewage sludge, and provide a theoretical guidance for soil improvement of rare earth mining areas and utilization of urban sewage sludge resources. 【Method】The soil of rare earth mine wasteland was selected as research object. Three treatments including adding sewage sludge (T1), adding sewage sludge and bagasse (T2), adding sewage sludge, bagasse and soil conditioner (T3) were set. The soil of rare earth mine wasteland was used as control (CK). *Canavalia gladiata* was chosen as test material to verify soil improvement effect through pot experiment. The physicochemical properties of testing soil and *C. gladiata* growth indexes were determined, and

the soil improvement effects of different treatments were comprehensively analyzed by principal component analysis and fuzzy membership function analysis. 【Result】 Compared with the control, three treatments greatly improved the physicochemical properties of soil in mining area, promoted the growth of *C. gladiata* and the absorption of N, P and K nutrient elements. T1 reduced soil bulk density by 27.64%, increased total porosity by 23.91%, increased capillary water holding capacity by 42.41%, increased the content of organic matter by 11.01 times, and meanwhile greatly increased the contents of total P, alkaline hydrolytic N, available P and available K. The soil physical properties of T2 were better than those of T1, with organic matter content increased by 25.9% and pH increased by 0.32. The soil pH (7.22) of T3 was the highest, which was 49.17% higher than T2, and the contents of available P and available K increased by 0.46% and 11.05% respectively. The total plant biomasses of T2 and T3 were significantly higher than those of T1 and CK, and there was no significant difference between T2 and T3. The accumulations of N, P and K per plant reached the maximums in T2, which were 934.43, 172.07 and 931.35 mg respectively, and significantly different from other treatments. The average subordinate function values of CK, T1, T2 and T3 were 0.06, 0.56, 0.83, 0.90 respectively, and the soil improvement effects were ranked as T3>T2>T1. 【Conclusion】 The addition of urban sewage sludge significantly improves the soil of mining area, and the improvement effect is significantly enhanced by adding bagasse and soil conditioner on the basis of adding sewage sludge.

Key words: *Canavalia gladiata*; rare earth soil; sewage sludge; bagasse; soil conditioner

稀土有工业“黄金”之称，被人们誉为新世纪高科技与功能材料的宝库，是不可再生的国家级战略资源^[1]。随着科技发展，稀土矿的开采工艺也由池浸、堆浸工艺转变为环境友好型的原地浸矿技术^[2-3]，但落后的生产工艺所引起的矿区废弃地植被破坏、水土流失等一系列生态环境问题并没有得到解决^[4-5]。稀土矿区废弃地土壤生态修复技术主要有工程技术措施、物理化学修复、生物修复以及联合修复^[1]。由于矿场生态系统修复工作大多数情况是在极端条件下开始的，需要达成一连串目标来实现^[6]，并且土壤中有机质和一些营养元素的含量均很低，平均背景值大致是正常植被覆盖土壤的 20%~30%，依靠土壤自身养分很难进行植被恢复，所以大多数矿区恢复前期需要辅以人工措施，其中，增加土壤有机质的含量是矿区生态修复的重要基础^[7-9]。

城市污泥含有大量有机质以及氮、磷等多种养分元素，是一种速效的有机肥料，用于矿区修复，能够迅速有效地提高矿山废弃地的有机质含量和改变土壤团聚结构性能^[10]。有研究表明，随着污泥施用量的增加，矿区土壤的有机质含量增幅为 32.58%~126.95%，碱解氮含量增幅为 77.80%~300.60%，速效磷增幅为 109.83%~596.41%^[11]。但城市污泥作为一种废弃物，含有重金属、有机污染物、病原菌、寄生虫(卵)等有害物质，进行土地利用之前需进行预处理^[12]。相关研究显示，石灰性物质、有机物料、磷酸

盐等可作为土壤改良剂，通过离子吸附、交换、沉淀等钝化作用使土壤重金属的形态发生变化，从而降低其生物有效性^[13]。有机物料蔗渣具有多孔和比表面积大的优点，有研究者在老化的镉污染土壤中施加蔗渣，有效降低了可交换态镉含量，提高了小白菜的产量^[14]。土壤调理剂能明显提高土壤 pH，有效增加土壤中的养分，有研究人员用以碱渣和城市污泥为原材料的土壤调理剂改良酸性菜园土，pH 提高了 0.69，盐基饱和度提高了 33.18%^[15]。但大多数试验仅研究 1 种或者 2 种添加剂对土壤的改良，在污泥的基础上配施蔗渣和土壤调理剂改良土壤的研究鲜有报道。因此，对污泥、蔗渣和土壤调理剂混施于矿山废弃地进行土壤改良的可行性探究很有必要。

剑豆 *Canavalia gladiata* 为多年生藤本豆科植物，广泛分布于我国长江以南地区^[16]。豆科植物具有耐贫瘠、对重金属耐性强的特点，可在矿区废弃地植被恢复中充当先锋种^[17]。本研究以稀土矿废弃地土壤为研究对象，研究污泥添加对土壤的改良效果，并通过进一步添加蔗渣和土壤调理剂对改良效果进行强化，同时以剑豆为种植材料，通过盆栽试验验证土壤改良效果，研究不同处理对矿区土壤理化性质、剑豆生长状况的影响，以期为实现城市污泥的资源化利用提供依据，并将对稀土矿废弃地土壤的改良及对城市污泥资源化利用有着重要的理论意义和实际应用价值。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土样取自广东省梅州市平远县仁居镇黄畲村稀土矿采矿迹地。在矿区迹地随机选取 8 个取样点, 在 0~60 cm 土层取样, 混合均匀, 带回室内风干后备用; 供试污泥取自广州市大坦沙污水处理厂, 经二级处理活性污泥法工艺流程处理, 含水率(w)为 75%~80%, 经 60 d 的露天好氧堆肥处理, 风干后研磨过 5 mm 筛, 备用; 蔗渣取自广东省湛江市某糖厂, 其理化性质: pH 为 6.12, 容重为 0.088

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 灰化碱的质量摩尔浓度为 $3.40\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碳质量分数为 $567\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 氮质量分数为 $4.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碳氮质量比为 135; 土壤调理剂根据董坚^[18]的方法制作而成, 主要原料为钼尾矿。土壤、污泥和蔗渣样品均过 2 mm 筛, 取一部分研磨过 100 目筛, 用于化学性质分析。原土(矿区土)、污泥和土壤调理剂的理化性质如表 1 所示, 污泥基本理化性质均符合《GB/T24600—2009》^[19]要求(表 1)。供试植物为剑豆, 种植前选取 1 个月苗龄且生长高度一致的植株, 供试塑料花盆高 220 mm, 口径 195 mm, 均购于广州市某花卉基地。

表 1 供试原土、污泥、土壤调理剂的理化性质及土地改良用泥国标

Table 1 Physicochemical properties of raw soil, sewage sludge, soil conditioner and national standard of sewage sludge for land improvement

供试材料 Test material	$w/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$				$w/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾
	Organic matter	Total N	Total P	Total K	Alkaline hydrolytic N	Available P	Available K
矿区土 Mine soil	7.93	1.71	0.01	42.85	17.38	2.85	105.49
污泥 Sewage sludge	220.20	21.04	23.63	13.83	1 658.67	1 750.53	2 229.47
土壤调理剂 Soil conditioner	8.31	0.08	0.30	18.39	5.83	8.50	405.61

供试材料 Test material	pH	$w/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$				
		Cu	Zn	Pb	Cd	Ni
矿区土 Mine soil	4.36	5.08	49.74	76.04	0.25	1.76
污泥 Sewage sludge	5.01	423.66	863.49	48.51	4.55	47.96
土壤调理剂 Soil conditioner	12.14	16.02	89.75	66.61	0.99	8.85
土地改良用泥国标 ^[19]	<6.5	<800	<2 000	<300	<5	<100
National standard of sewage sludge for land improvement	≥6.5	≤1 500	≤4 000	≤1 000	≤20	≤200

1.2 试验设计

1.2.1 植物栽培与管理 盆栽试验场所位于华南农业大学校内温室大棚, 设 3 个处理: T1(矿区土壤与污泥按照干质量比 6:4 混合均匀)、T2(在 T1 处理基础上添加基础质量 2% 的蔗渣)、T3(在 T2 处理基础上添加基础质量 5% 的土壤调理剂), 以矿区原土作为对照(CK)。试验中, CK 和 T1 处理的盆栽土壤基础质量均为 2.5 kg。每盆为 1 个处理, 每处理 5 次重复, 另设 9 盆用于测定种植前的土壤理化性质, 共计 29 盆。盆栽试验自 2016 年 8 月 15 日开始, 在剑豆幼苗期扦插竹竿辅助攀援, 试验过程中定期浇水和除草, 为期 4 个月, 同年的 12 月 15 日采收。

1.2.2 样品采集方法 待种植前的土壤稳定 15 d 后, 采集土壤样品, 风干后按照四分法取其一部分研磨、过筛后备用; 采集种植结束后的植物样品时, 整株挖出, 带回实验室, 自来水冲洗掉附着的微粒,

再用去离子水冲洗 3 次后放置室内晾干。将样品放入信封于 90 ℃ 杀青 0.5 h 后, 70 ℃ 条件下烘干至恒质量, 称其干质量, 并将地上部分(茎叶)和地下部分(根)分开。

1.3 样品分析方法

供试土壤样品测定指标为容重、毛管持水量、总孔隙度、pH, 以及有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量。土壤分析方法均按《土壤农化分析》^[20], 其中容重、毛管持水量和总孔隙度测定采用环刀法; pH 测定采用 pH 计法(水土质量比为 2.5:1.0); 有机质含量测定采用重铬酸钾容量法; 全氮、碱解氮含量测定采用碱解扩散法; 全磷含量测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法; 速效磷含量测定采用 1/2 H_2SO_4 硫酸法; 全钾含量测定采用 NaOH 熔融-火焰分光光度计法; 速效钾含量测定采用 NH_4OAc 浸提-火焰分光光度计法。

供试植物样品观测指标为植株高度、干质量。植株高度采用卷尺测量,干质量采用电子天平测量。化学分析指标为全氮、全磷、全钾含量,先用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮植物样品获得待测液,氮含量用碱解扩散法测定,磷含量用钼锑抗比色法测定,钾含量用火焰分光光度计法测定。

1.4 数据分析方法

所有试验数据利用 Excel 进行录入、整理,采用 OriginLab9.1 绘制统计图。运用 SPSS19.0 对土壤理化性质和供试植物的生长指标进行单因素方差分析、主成分分析和模糊隶属函数分析。按公式 (1) 计算植株元素积累量^[21],按公式 (2)、(3) 计算模糊隶属函数 $R(X_i)$ ^[22]:

植株氮(磷或钾)积累量 =
植株氮(磷或钾)含量 × 植株生物量, (1)

$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, (2)

$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, (3)

式中, X_i 为第 i 个指标测定值, $X_{\max}$ 为所测指标的最大值, $X_{\min}$ 为所测指标的最小值。若 X 指标与土壤改良效果呈正相关,用式 (2);若 X 指标与土壤改良效果呈负相关,用式 (3)。最后将每个处理的各个指标的隶属值累加,并求平均值,平均值越大表示土壤改良效果越好。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤物理性质的影响

不同处理对矿区土壤物理性质的影响如表 2 所示。与 CK 相比,T1~T3 处理的土壤容重降低了 27.64%~38.21%,总孔隙度增加了 23.91%~31.90%,毛管持水量提高了 42.41%~77.84%。T2 和 T3 处理的容重均显著低于 T1,且两者之间无显著差异。T2、T3 处理的土壤总孔隙度显著高于 T1,且两者之间无显著差异。T1 的毛管持水量显著低于 T2、T3。T2、T3 处理的各项指标均优于 T1,而 T1 处理的各项指标优于 CK。

表 2 不同处理对土壤物理性质的影响
Table 2 Effects of different treatments on soil physical properties

处理 ¹⁾ Treatment	容重 Bulk density		总孔隙度 Total porosity		毛管持水量 Capillary moisture	
	容重 ²⁾ /(g·cm ⁻³) Bulk density	变化率 ³⁾ % Change rate	总孔隙度 ²⁾ % Total porosity	变化率 ³⁾ % Change rate	毛管持水量 ²⁾ /(g·kg ⁻¹) Capillary moisture	变化率 ³⁾ % Change rate
CK	1.23±0.02a		53.66±0.82c		345.44±19.86c	
T1	0.89±0.01b	-27.64	66.49±0.47b	23.91	491.94±13.54b	42.41
T2	0.77±0.01c	-37.40	70.17±0.46a	30.77	600.34±14.23a	73.89
T3	0.76±0.02c	-38.21	70.78±0.69a	31.90	614.34±45.14a	77.84

1)CK: 矿区土壤,T1: 添加污泥,T2: 添加污泥、蔗渣,T3: 添加污泥、蔗渣、土壤调理剂;2)表中数据为平均值±标准误($n=5$),同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法);3)各处理的变化率均为与对照比较

1)CK: Mine soil, T1: Adding sewage sludge, T2: Adding sewage sludge and bagasse, T3: Adding sewage sludge, bagasse and soil conditioner; 2)Data were means ± standard errors ($n=5$), and different letters in the same column indicated significant differences($P<0.05$, Duncan's test); 3)The change rates of different treatments were compared with control

2.2 不同处理对土壤化学性质和养分含量的影响

不同处理对矿区土壤的化学性质和养分含量的影响如表 3 所示。土壤 pH 在 T3 处理达到最大 (7.22),较 T2 提高 49.17%,土壤呈弱碱性,其余处理土壤呈酸性或强酸性,T2 比 T1 提高 0.32。T2、T3 处理的有机质含量显著高于 T1 和 CK,T2 比 T1 提高 25.9%,而 T1 又显著高于 CK11.01 倍。T1~T3 处理土壤中养分含量丰富,全氮、全磷质量分数分别为 5.97~9.64 和 8.44~11.42 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,T2、T3 处理的全磷含量显著高于 T1 和 CK,且相互间差异不显著;T1~T3 处理的碱解氮质量分数为 739.68~849.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且 3 个处理间无显著差异。T3 处理的速效磷和速效钾含量均为最大值,其质量分数分别为 695.35 和 1 126.88 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别比

T2 处理提高 0.46% 和 11.05%;CK 处理的土壤仅全钾含量显著高于其他处理,可能的原因是稀土矿区土壤全钾含量较高。整体来看,T1、T2 和 T3 处理土壤养分含量丰富,T3 处理土壤的化学性质优于其他处理。

2.3 不同处理对剑豆生长和养分吸收的影响

由表 4 可知,T1~T3 处理条件下剑豆植株高度与 CK 处理无显著差异。地上部生物量最大值出现在 T2 处理,较 T1 处理增加了 73.66%,与 T3 处理无显著差异。值得注意的是,植物地下部生物量的最大值出现在 CK,显著高于 T1 和 T3 处理,与 T2 处理无显著差异,T1~T3 处理条件下的植株地下部生物量无显著差异。T2、T3 处理的全株生物量显著大于 T1 和 CK,T1 处理显著大于 CK。

表 3 不同处理对土壤化学性质的影响¹⁾

Table 3 Effects of different treatments on soil chemical properties

处理 Treatment	pH	w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)		
		有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Alkaline hydrolytic N	速效磷 Available P	速效钾 Available K
CK	4.36±0.12c	7.93±1.10c	1.71±0.55b	0.02±0.01c	42.85±1.59a	17.38±0.17b	2.85±0.26b	105.49±12.97d
T1	4.52±0.02c	95.25±5.60b	5.97±0.24ab	8.44±1.48b	35.19±1.94b	757.22±53.20a	675.27±4.24a	866.26±20.51c
T2	4.84±0.02b	119.92±9.34a	8.14±1.22a	10.07±0.40a	30.76±0.61b	849.43±77.01a	692.16±7.45a	1 014.74±51.03b
T3	7.22±0.02a	120.46±3.54a	9.64±1.28a	11.42±0.31a	31.23±0.80b	739.68±29.22a	695.35±6.51a	1 126.88±14.44a

1)CK: 矿区土壤, T1: 添加污泥, T2: 添加污泥、蔗渣, T3: 添加污泥、蔗渣、土壤调理剂; 表中数据为平均值±标准误(n=5), 同列数据后的不同小写字母表示差异显著(P<0.05, Duncan's法)

1)CK: Mine soil, T1: Adding sewage sludge, T2: Adding sewage sludge and bagasse, T3: Adding sewage sludge, bagasse and soil conditioner; Data were means ± standard errors (n=5), and different letters in the same column indicated significant differences(P<0.05, Duncan's test)

表 4 不同处理对植株生长的影响¹⁾

Table 4 Effects of different treatments on the growth of plants

处理 Treatment	植株高度/cm Plant height	单株生物量/g Biomass per plant		
		地上部 Aboveground of plant	地下部 Underground of plant	全株 Total plant
CK	221.97±57.98a	5.90±1.57c	1.18±0.21a	7.08±1.73c
T1	224.83±20.03a	13.48±0.34b	0.48±0.09b	13.96±0.43b
T2	288.70±35.95a	23.41±1.55a	0.75±0.17ab	24.16±1.70a
T3	318.17±43.50a	19.82±2.45a	0.52±0.04b	20.34±2.41a

1)CK: 矿区土壤, T1: 添加污泥, T2: 添加污泥、蔗渣, T3: 添加污泥、蔗渣、土壤调理剂; 表中数据为平均值±标准误(n=5), 同列数据后的不同小写字母表示差异显著(P<0.05, Duncan's法)

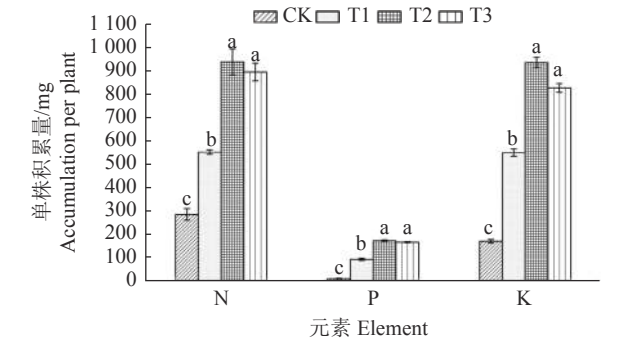
1)CK: Mine soil, T1: Adding sewage sludge, T2: Adding sewage sludge and bagasse, T3: Adding sewage sludge, bagasse and soil conditioner; Data were means ±standard errors (n=5), and different letters in the same column indicated significant differences(P<0.05, Duncan's test)

T1~T3 处理条件下种植剑豆, 其氮、磷、钾平均单株积累量显著高于 CK(图 1)。在 T2 处理条件下, 氮、磷、钾的平均单株积累量在植株体内处于最

大值, 分别达到 934.43、172.07、931.35 mg, 分别为对照的 3.29、17.33、5.49 倍。T2、T3 处理的剑豆植株氮、磷、钾的平均单株积累量无显著差异, 但均显著高于 T1。可见, 植株氮、磷、钾的平均单株积累量总体变化趋势与地上部生物量、总生物量一致。

2.4 基于土壤和植物指标的对土壤改良效果的综合评价

运用主成分分析和模糊隶属函数对土壤的容重、总孔隙度、毛管持水量、pH 以及有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量, 植株的高度、单株总生物量和单株氮、磷、钾积累量进行土壤改良效果的综合评价。由图 2a 可知, 影响土壤改良效果评价的前 3 个主成分可以包含所测指标的大量信息, 其特征值分别为 14.488、1.072 和 0.440, 线段斜率的绝对值越大则特征值越大, 具有整体的大部分特征; 反之则特征值越小, 只代表小部分特征。从特征值可推算出, 前 3 个主成分贡献率分别为 90.549%、6.700% 和 2.751%, 总贡献率 100%。说明



相同元素柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05, Duncan's法)

Different lowercase letters on the columns of the same element indicated significant differences among different treatments(P<0.05, Duncan's test)

图 1 不同处理对植株养分元素积累量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on nutrient element accumulations in plant

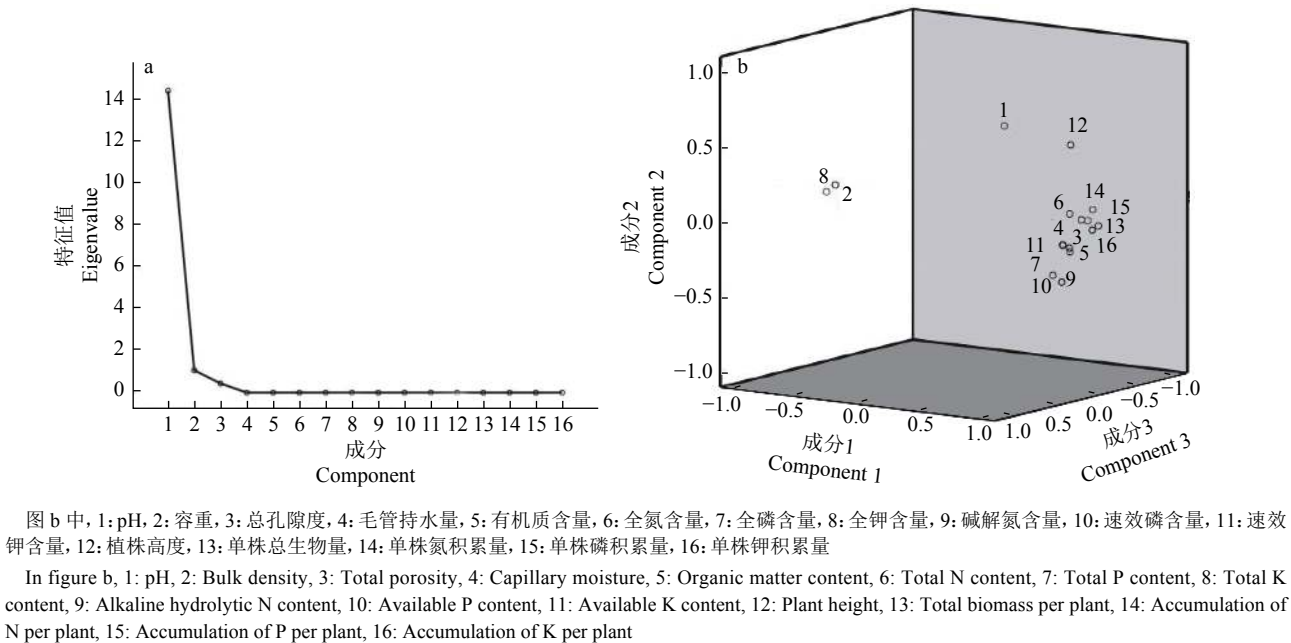


图 2 土壤改良效果综合评价的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of comprehensive evaluation on soil improvement effect

前 3 个主成分的指标能够解释 4 种处理对土壤的改良效果。通过图 2b 进一步分析各指标在 3 个主成分上的向量值, 主成分 1 中向量绝对值大于 0.7 的指标有容重、总孔隙度、毛管持水量和有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量以及植株高度、单株总生物量和单株氮、磷、钾积累量; 主成分 2 的指标有 pH; 主成分 3 没有指标。

通过主成分分析筛选出 16 个指标, 对其进行模糊隶属函数分析, 计算出各性状的土壤改良效果系数, 依据平均隶属函数值判断 4 种处理对土壤改良的效果。由表 5 可知, CK、T1、T2 和 T3 处理的 16 个指标的平均隶属函数值分别为 0.06、0.56、

表 5 土壤理化性质和植物生长状况的隶属函数值

Table 5 Subordinate function values of soil physicochemical properties and plant growth status				
指标 ¹⁾ Index	CK	T1	T2	T3
pH ^a	0	0.12	0.17	1.00
容重 ^b Bulk density	0	0.72	0.98	1.00
总孔隙度 ^a Total porosity	0	0.75	0.96	1.00
毛管持水量 ^a Capillary moisture	0	0.54	0.95	1.00
有机质含量 ^a Organic matter content	0	0.78	1.00	1.00
全氮含量 ^a Total N content	0	0.54	0.81	1.00
全磷含量 ^a Total P content	0	0.74	0.88	1.00
全钾含量 ^a Total K content	1.00	0.37	0	0.04
碱解氮含量 ^a Alkaline hydrolytic N content	0	0.89	1.00	0.87
速效磷含量 ^a Available P content	0	0.97	1.00	1.00
速效钾含量 ^a Available K content	0	0.74	0.89	1.00
植株高度 ^a Plant height	0	0.03	0.69	1.00
总生物量 ^a Total biomass	0	0.40	1.00	0.78
单株氮积累量 ^a N accumulation of plant	0	0.41	1.00	0.93
单株磷积累量 ^a P accumulation of plant	0	0.51	1.00	0.96
单株钾积累量 ^a K accumulation of plant	0	0.50	1.00	0.86
平均值 Mean	0.06	0.56	0.83	0.90
综合排序 Synthetic ordering	4	3	2	1

1) “a” 表示该指标与土壤改良效果呈正相关, “b” 表示呈负相关

1) “a” indicated the index was positively correlated with soil improvement effect, and “b” indicated the negative correlation

0.83 和 0.90。由此可见, 3 种处理对稀土矿区土壤改良效果的排序为 T3>T2>T1。

3 讨论与结论

污泥含有丰富的有机质, 颗粒细微, 对矿区土壤团粒结构和稳定性有促进作用^[23-24]。有学者认为改良沙土的土壤密度、土壤容重、总孔隙度与污泥施用量呈显著相关关系^[25]。施用有机质含量越高的污泥, 对矿区土壤的持水保水能力提升越大, 而良好的土壤保水能力对于植物修复矿区土壤的过程十分重要^[26]。本研究发现, 单施污泥能有效改善矿区土壤的物理性质, 这与前人研究结果^[25]一致。蔗渣也是一种保水性能良好的基质, 它具有容重小、毛管孔隙度大 (>50%) 的特点^[27]。本研究中蔗渣的添加显著强化了污泥对土壤物理性质的改良效果, 表明污泥和蔗渣混施比单一施用污泥对矿区土壤物理性质的改良效果更好。土壤调理剂的加入对土壤物理性质的影响不明显。

土壤 pH 影响着土壤溶液中的离子组成及化学反应, 一般来说, pH 为 6.5~7.5 对植物的生长发育最为有益^[28]。土壤 pH 控制土壤中重金属形态变化及在土壤-植物系统的迁移, 有研究者对 Cd 质量分数为 2.5 mg·kg⁻¹ 的黑土进行冻融试验, 结果表明随着土壤 pH 提高, 土壤中 Cd 的可交换态浓度逐渐降低, 铁锰氧化态和残渣态的浓度逐渐升高^[29]。本研究也发现, 添加污泥对土壤 pH 无显著影响, 在添加污泥基础上加入蔗渣可显著提高土壤 pH。蔗渣对酸性土壤的改良效果与灰化碱和氮含量有关, 灰化碱和有机氮矿化使土壤 pH 升高^[30]。在添加了污泥和蔗渣基础上再加入土壤调理剂后, pH 由 4.84 上升至 7.22, 这主要是因为土壤调理剂本身呈强碱性, pH 为 12.14。所以, 蔗渣和土壤调理剂 (尤其是后者) 对于土壤 pH 有显著调节作用。

单施污泥, 污泥和蔗渣混施, 以及污泥、蔗渣和土壤调理剂混施均能改善矿区土壤养分状况。污泥能使土壤养分从极缺或缺乏状态提高到较丰富甚至丰富状态^[31], 主要原因是污泥含有丰富的有机质和氮、磷等各种养分; 蔗渣的有机质含量高, 可以改善赤泥中有机质以及碱解氮、速效磷和速效钾的含量, 其含有的纤维素和少量蔗糖在某些情况下可以转化为单糖^[32]。本研究中单施污泥使稀土矿区土壤中有有机质、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量显著增加, 这与前人研究结果一致^[31]。本研究还发现, 添加蔗渣显著增加了土壤中全磷含量, 这主要是因为蔗渣中含有大量的纤维素, 在土壤中腐烂分解后, 提高了土壤磷含量。值得一提的是, 污泥、蔗渣和土

壤调理剂的添加显著降低了土壤全钾含量, 但显著提高了速效钾含量, 这是因为稀土矿区土壤本身全钾含量远高于污泥和土壤调理剂, 而污泥中速效钾含量大幅高于土壤, 同时蔗渣和土壤调理剂的加入对钾可能起到活化作用。

有相关研究^[21, 33-34]发现, 污泥能够促进合果芋 *Syngonium podophyllum*、香彩雀 *Angelonia salicariifolia*、高羊茅 *Festuca arundinacea* 和万寿菊 *Tagetes erecta* 等草本植物生长。本研究中单施污泥、污泥和蔗渣混施均有效促进了剑豆地上部生物量、总生物量的增加以及植株体内氮、磷、钾养分元素的积累, 主要原因可能是污泥施用提高了土壤养分含量, 同时改变了土壤微生物和酶活性, 提高了土壤的综合肥力, 从而能够促进植物叶绿素含量和光合速率, 因而促进植物生长。但植株地下部生物量最大值出现在 CK 处理, 且显著高于单施污泥以及污泥、蔗渣和土壤调理剂混施, 原因可能是污泥中含有的重金属对植物根系生长有抑制作用^[21]。正常生长的植物, 全氮和全磷含量一般分别占干质量的 1%~5% 和 0.2%~0.5%^[21]。矿区土 (CK 处理) 种植的植株氮、磷、钾的质量分数分别为 4.01%、0.14%、2.39%, 其他处理植株 3 种营养元素的质量分数分别为 3.87%~4.38%、0.66%~0.82%、3.86%~4.05%。4 种处理的植株氮含量均处于正常值, 除原土处理磷含量低于正常值外, 其他处理的磷含量均高于正常值。说明在稀土矿区废弃地土壤施用污泥种植剑豆的过程中, 均未发生因土壤中的重金属含量过高而引起植物吸收和转运营养元素能力下降的情况^[35]。在本研究中, 污泥添加显著促进了剑豆生长和植株体内氮、磷、钾养分元素的积累, 而蔗渣的加入进一步促进了剑豆生长和养分积累, 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。

近年来, 主成分分析常用来综合评价土壤肥力状况, 此法运用降维思想于原始的诸多变量线性组合, 从中提取出较少且彼此独立的新变量来表达整体的信息, 能够处理好变量之间的相关性, 从而客观评价不同处理的土壤肥力质量差异^[36-37]。分析不同处理土壤的改良效果最直观的方法往往是在其土壤上种植植物, 通过土壤肥力情况和植株的生长指标科学评判土壤质量及对植物的适应性^[38]。本研究依据土壤和植物的 16 个指标, 采取主成分分析抽取 3 个主成分中特征值较大的指标, 再利用模糊隶属函数对这些指标赋值定量分析, 从而对土壤改良效果进行综合评判。此方法避免了传统评价中只强调土壤指标中某一项或某几项性状而忽略植物

对基质适应性的偏差^[39]。本研究中,依据不同处理的模糊隶属函数平均值综合排名,得分最高为矿区土与污泥、蔗渣和土壤调理剂混施的土壤(T3处理)。当然,从简化操作和节约成本的角度出发,本研究中,不添加土壤调理剂亦可以达到改良土壤和促进剑豆生长的目的。另外,关于污泥和蔗渣的最合适的添加比例,以及污泥添加是否会带入重金属造成土壤污染,值得今后进行深入研究。

参考文献:

- [1] 罗才贵,罗仙平,苏佳,等.离子型稀土矿山环境问题及其治理方法[J].金属矿山,2014(6):91-96.
- [2] 钟志刚,周贺鹏,胡洁,等.南方离子型稀土矿绿色提取技术研究进展[J].金属矿山,2017(12):76-81.
- [3] 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,等.稀土开发导致的环境问题及土壤稀土污染治理措施初探[J].安全与环境学报,2014,14(5):245-251.
- [4] 曾敏,彭红霞,刘凤梅,等.安远新龙稀土矿山地质环境综合治理研究[J].金属矿山,2011(3):136-139.
- [5] 闫美,王璐,郝存忠,等.煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应[J].生态学报,2019,39(5):1838-1845.
- [6] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
- [7] 李小飞,陈志彪,陈志强.南方稀土采矿恢复地土壤稀土元素含量及植物吸收特征[J].生态学杂志,2013,32(8):2126-2132.
- [8] ROBINSON B, GREEN S, MILLS T M, et al. Phytoremediation: Using plants as biopumps to improve degraded environments[J]. Soil Res, 2003, 41(3): 599-611.
- [9] 陈莺燕,刘文深,丁锬博,等.有机改良剂及生物炭对离子型稀土矿尾砂地生态修复的改良探究[J].环境科学学报,2018,38(12):4769-4778.
- [10] 何士龙,钱奎梅,王丽萍,等.污泥在矿区废弃地复垦中的应用实验[J].环境科技,2009,22(4):15-21.
- [11] 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.
- [12] 徐雪云,朱航,邹华.混合污泥堆肥在无锡茶园的应用研究[J].华南农业大学学报,2013,34(2):277-280.
- [13] 何飞飞,曾建兵,吴爱平,等.改良剂修复利用镉污染菜地土壤的田间效应研究[J].中国农学通报,2012,28(31):247-251.
- [14] 孙文博,莫创荣,安鸿雪,等.施用蔗渣对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响研究[J].农业环境科学学报,2013,32(9):1793-1799.
- [15] 黄庆,林小明,柯玉诗,等.多元酸性土壤调理剂在辣椒上的施用效果研究[J].广东农业科学,2007,34(1):42-44.
- [16] 中国科学院《中国植物志》编委会.中国植物志:第41卷[M].北京:科学出版社,1995:208.
- [17] DE MELO RANGEL W, DE OLIVEIRA LONGATTI S M, FERREIRA P A A, et al. Leguminosae native nodulating bacteria from a gold mine As-contaminated soil: Multi-resistance to trace elements, and possible role in plant growth and mineral nutrition[J]. Int J Phytorem, 2017, 19(10): 925-936.
- [18] 董坚.一种钼尾矿酸性土壤调理剂及其生产工艺:CN102826926A[P].2012-12-19.
- [19] 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.城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质:GB/T24600—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [21] 王婧,莫其锋,储双双,等.污泥堆肥对园林植物合果芋(*Syngonium podophyllum*)生长及重金属吸收累积的影响[J].生态学杂志,2018,37(6):1752-1758.
- [22] 梁丹妮,郭兴燕,兰剑.6份沿阶草种质对干旱胁迫的生理响应[J].草业科学,2016,33(2):184-191.
- [23] 万俐,赵君凤,付永胜,等.不同絮凝剂对活性污泥特性及除污效能的影响研究[J].环境工程,2017,35(2):49-52.
- [24] 黄殿男,谭杰,傅金祥,等.城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果[J].水土保持学报,2017,31(1):326-330.
- [25] 丘锦荣,卫泽斌,吴长安,等.不同干燥处理对城市污泥物理性质和农业利用的影响[J].生态环境学报,2009,18(1):106-110.
- [26] 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):28-31.
- [27] 张硕,余宏军,蒋卫杰.发酵玉米芯或甘蔗渣基质的黄芩育苗效果[J].农业工程学报,2015,31(11):244-250.
- [28] 陈婵婵,肖斌,余有本,等.陕南茶园土壤有机质和pH值空间变异及其与速效养分的相关性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(1):182-188.
- [29] 王洋,刘景双,王金达,等.土壤pH值对冻融黑土重金属Cd赋存形态的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):574-578.
- [30] 吴敏,韦家少,孙海东,等.植物物料及其生物炭对酸性土壤的改良[J].热带作物学报,2016,37(12):2276-2282.
- [31] 付克强,王殿武,李贵宝,等.城市污泥与湖泊底泥土地利用对土壤-植物系统中养分及重金属Cd、Pb的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):62-66.
- [32] 张林丰,任乐辉,何月田,等.利用制糖副产物土壤化赤泥的效果[J].环境工程学报,2018,12(4):1228-1236.
- [33] 储双双,赖灿,WEI X H,等.污泥堆肥混合基质对香彩雀生长开花的影响及植物适应性评价[J].生态学杂志,2014,33(4):966-972.
- [34] 刘强,陈玲,邱家洲,等.污泥堆肥对园林植物生长及重金属积累的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(6):870-875.
- [35] 安志装,王校常,施卫明,等.重金属与营养元素交互作用的植物生理效应[J].土壤与环境,2002,11(4):392-396.
- [36] 杨旭初,叶会财,李大明,等.基于模糊数学和主成分分析的长期施肥红壤旱地土壤肥力评价[J].中国土壤与肥料,2018(3):79-84.
- [37] 吴海燕,金荣德,范作伟,等.基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):325-334.
- [38] 刘梦娇,夏少攀,王峻,等.城市污泥农用对植物-土壤系统的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4134-4142.
- [39] 杨帅,高照良,白皓,等.矿山废弃地植物种植模式对土壤改良效果[J].水土保持学报,2017,31(3):134-140.