

崩塌堆积物对紫色土养分含量的影响

何林东^{1,2,3}, 吴勇^{1,2}, 田耘^{1,2}, 刘灏³, 李洪涛^{1,2}, 王豪^{1,2}

(1.成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3.四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院, 四川 成都 610081)

摘要: [目的] 探讨将崩塌堆积物作为新型土壤改良材料的应用前景, 分析经崩塌堆积物改良后土壤的养分变化情况, 为当地崩塌堆积物利用和紫色土改良工作提供新思路。[方法] 选择经崩塌堆积物改良后的紫色土为研究对象, 利用加权灰色关联度分析对改良后的土壤进行质量评价分析。[结果] 在相同的肥力灌溉水平下, 相较于空白对照组(Y_0), 添加崩塌堆积物能够明显的提升浅层土壤(0—20 cm)的养分含量。其中该层土壤全氮平均含量提升了 3.26%~10.60%, 全磷平均含量提升了 10.61%~43.33%, 有机质平均含量提升了 9.14%~24.12%, 碱解氮平均含量提升了 5.76%~12.73%, 有效磷平均含量提升了 24.75%~46.22%, 速效钾平均含量提升了 16.21%~28.96%, 土壤电导率(EC)提升了 11.32%~27.41%, 不同处理方案下对土壤 pH 值无明显影响; 通过 AHP-灰色关联分析评价模型对各处理组的土壤进行质量初步评价得出, 在 0—20 cm 浅层土壤范围内, 各处理组的灰色关联度大小排序为: Y_2 (岩—土复配比例: 20%) > Y_3 (岩—土复配比例: 30%) > Y_4 (岩—土复配比例: 40%) > Y_1 (岩—土复配比例: 10%) > Y_0 (岩—土复配比例: 0%) > Y_5 (岩—土复配比例: 50%); 在 20—40 cm 深层土壤范围内, 各处理组的灰色关联度大小排序为: Y_5 > Y_4 > Y_3 > Y_2 > Y_1 > Y_0 。[结论] 将崩塌堆积物与土壤进行适当比例的复配处理, 可以对紫色土养分含量产生一定的改善效果。

关键词: 崩塌堆积物; 紫色土; 土壤改良; 土壤养分; 加权灰色关联度分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0066-11

中图分类号: S157.9

文献参数: 何林东, 吴勇, 田耘, 等. 崩塌堆积物对紫色土养分含量的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 66-76. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.007; He Lindong, Wu Yong, Tian Yun, et al. Influence of collapse deposits on nutrient content of purple soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 66-76.

Influence of Collapse Deposits on Nutrient Content of Purple Soil

He Lindong^{1,2,3}, Wu Yong^{1,2}, Tian Yun^{1,2}, Liu hao³, Li Hongtao^{1,2}, Wang Hao^{1,2}

(1.College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059, China; 2.State Key Laboratory for Geological Disaster Prevention and

Geological Environment Protection, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3.Sichuan Institute of Land and Space Ecological Restoration and Geological Hazard Prevention and Control, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: [Objective] The application prospects of using landslide deposits as a new type of soil improvement material were explored, and the changes in soil nutrients after landslide deposit improvement were analysed in order to provide new approaches for local landslide deposit utilisation and purple soil rehabilitation. [Methods] Purple soil improved by landslide deposits was selected as the research object, and the quality of the improved soil was analysed using weighted grey correlation analysis. [Results] At the same fertility irrigation level, adding collapsed deposits significantly increased the nutrient content of topsoil (0—20 cm) compared to the blank control group (Y_0). The average total nitrogen content in this layer of soil increased by 3.26% to 10.60%, the average total phosphorus content increased by 10.61% to 43.33%, the average organic matter content increased by 9.14% to 24.12%, the average alkaline nitrogen content increased by 5.76% to 12.73%, the average effective phosphorus content increased by 24.75% to 46.22%, the average

收稿日期: 2024-03-19

修回日期: 2024-04-17

资助项目: 2023年度四川省科技计划重点研发项目“川中丘陵崩塌台地区域适度规模化整治及面源污染综合治理技术研究与示范”(2023YFS0365); 四川省自然资源厅项目“四川省黄河流域地下水资源调查(2023—2025)”(N5100012023000974)

第一作者: 何林东(1998—), 男(汉族), 四川省巴中市人, 硕士研究生, 研究方向为地质资源与地质工程。Email: hole101112@163.com。

通信作者: 吴勇(1966—), 男(汉族), 四川省资阳市人, 博士, 教授, 主要从事地下水灾害与污染防治等方面的研究。Email: Ywu@cdut.edu.cn。

available potassium content increased by 16.21% to 28.96%, and the soil electrical conductivity (EC) increased by 11.32% to 27.41%. The different treatment schemes had no significant effect on soil pH value. Using the AHP grey correlation analysis evaluation model, a preliminary evaluation of the soil quality of each treatment group was conducted. Within the topsoil (0—20 cm), the grey correlation degree of each treatment group was ranked as follows: Y_2 [rock soil composite ratio (RSCR): 20%] > Y_3 (RSCR: 30%) > Y_4 (RSCR: 40%) > Y_1 (RSCR: 10%) > Y_0 (RSCR: 0%) > Y_5 (RSCR: 50%). The grey correlation degree of each treatment group within the deep soil range of 20—40 cm was ranked as follows: Y_5 > Y_4 > Y_3 > Y_2 > Y_1 > Y_0 . [Conclusion] An appropriate proportion of composite treatment between landslide deposits and soil can improve the nutrient content of purple soil.

Keywords: collapse deposits; purple soil; soil improvement; soil nutrients; weighted grey correlation analysis

川中丘陵区地处长江上游核心区域,是以传统碎片化耕作方式为主的农业区,也是新时代打造更高水平高标准农田“天府粮仓”示范区^[1]。然而,该地区农田土壤贫瘠化和水土流失现象却十分严重。一方面是由于该地区独特的崩塌台地地貌,崩塌堆积物较多,造成土地碎片化严重,土地连片整治的效果较差,另一方面则是由于该地区集中分布着大量土壤结构较差和综合肥力较低的紫色土^[2]。据相关资料^[3],川中丘陵区耕地紫色土不仅有72%属中低产田土,单产较低,营养贫瘠,而且该地区紫色土土层浅薄,母岩疏松,极易发生土壤侵蚀现象。在雨季时期,由于紫色土的渗透性差、抗冲蚀能力弱,导致该地区水土流失情况十分严峻,各市县平均每年被冲走的泥沙多达 2.50×10^9 t,远远超出土壤允许流失量。在干旱时期,该地区紫色土遇水易板结,不仅使得坡面流增大,加大了土壤侵蚀可能性,还使传统施加的农肥无法完全渗透利用,从而导致农民过量施肥,过剩的肥料在黏土表面形成表面流排入附近流域,又会造成严重的面源污染问题。近年来,随着自然和人为干扰因素的增强,川中丘陵农耕地紫色土水土流失、土壤侵蚀等问题持续加重,不仅加剧了长江流域干支岸线生态的退化,也暴露出长江流域生态治理点散面广量大的现实难题。因此,针对川中丘陵地区崩塌堆积物资源化利用和紫色土改良的研究迫在眉睫。随着科学技术的发展,土壤改良研究的不断深入,有研究表明,一些非金属矿物原料(如沸石、膨润土、砂岩、蒙脱石、石膏、蛭石、珍珠岩等)不但能提供土壤所需求的有益矿物元素,而且相比于传统的物理改良措施,能更加显著的改善土壤结构和土壤综合质量^[4],增加土壤的渗透性能和调整酸碱度^[5],提升土壤保水保肥的能力,减少水土流失。

川中丘陵地区以安岳县南薰镇为例,存在近 3.00×10^7 m³崩塌堆积物,其矿物成分以石英、长石和云母为主,将其作为耕地土壤改良材料,不仅可以解决因崩塌堆积物堆积造成的土地碎片化问题,还能

实现崩塌堆积物的资源化利用。因此本文选择经崩塌堆积物改良后的紫色土为研究对象,探讨将崩塌堆积物作为新型土壤改良材料的应用前景,分析经崩塌堆积物改良后紫色土的养分变化情况,并为贫瘠土壤改良工作提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安岳县南薰镇某山村,地理坐标为东经 $105^{\circ}11'20''$,北纬 $29^{\circ}52'21''$,高程约405 m。地貌类型为浅切丘陵,是以传统碎片化耕作方式为主的农业区。研究区属于亚热带湿润季风气候,有冬干、春旱、夏旱、连伏旱的特点,日照多,降雨少,无霜期较长,季节性明显,年平均气温为 18.2 °C,年平均日照时数为 $1\ 193.55$ h。域内年平均降雨量为 924 mm,全年降雨量主要集中在7—10月,总体上表现为春旱、夏雨、秋旱、冬旱。研究区土壤主要以紫色土为主,约占区域可耕地总面积的64.1%。研究区坡耕地不仅坡度大,土层薄,而且土壤退化严重,营养贫瘠。

1.2 试验材料

1.2.1 供试材料 本次供试土壤为川中丘陵地区常见的紫色土。土壤改良材料选用当地常见的崩塌堆积物(图1),其成分大多由砂岩及泥岩组成。研究区原状土样和崩塌堆积物于2023年6月25日取样,带回实验室进行XRD全岩分析,得到矿物组分详见表1。由表1可知,崩塌堆积物的矿物成分中斜长石($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$)和石英(SiO_2)较多。有研究表明耕地土壤中 SiO_2 的含量如果达到60%~80%,说明土壤中的砂粒含量较高。砂粒虽不能提供各种养分元素,但在土壤中构成一种稳定的骨架,对改善土壤的通透性起重要作用^[6]。因此,单从矿物成分上看,利用崩塌堆积物改良土壤能极大的增加土壤内砂粒所占比例,对土壤结构起到一定的优化效果。



a 堆积物



b 破碎处理

图 1 崩塌堆积物及其破碎处理

Fig.1 Collapse deposits and crushing treatment of collapsed deposits

表 1 全岩矿物含量

Table 1 Mineral content of whole rock

土样	全岩矿物含量/%					
	石英	钾长石	斜长石	方解石	黄铁矿	黏土总量
原状土	25.7	0	7.5	10.3	2.2	54.2
崩塌堆积物	33.1	0	48.3	5.2	0	13.4

1.2.2 崩塌堆积物—土壤复配处理 将破碎处理后的崩塌堆积物颗粒(粒径 1~2 mm)按照不同的复配比例(质量占原状土样质量的百分比)掺入土壤中,崩塌堆积物复配所占比例分别为 0%(原土),10%,20%,30%,40%,50%。

为减小因崩塌堆积物分布不均匀对试验造成的影响,在复配土样时,分层掺入崩塌堆积物,称取一定

质量的紫色土,将相应掺量的崩塌堆积物分散在土上并翻拌 3~4 次,继续取土覆盖在翻拌好的土层上方,进行第二层紫色土与崩塌堆积物的翻拌,直到崩塌堆积物与土体混合完毕,确保均匀分布,最后用木铲轻击表面,规整田块。本次复配处理时间为 2023 年 6 月 29 日,并取样分析复配后各处理组的土壤养分背景值(表 2)。

表 2 不同处理下土壤养分含量背景值

Table 2 Background values of soil nutrient content under different treatments

土层深度/cm	处理编号	基础养分含量						
		TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	SOM/(g·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)	AK/(mg·kg ⁻¹)	EC/(μs·cm ⁻¹)
0—20	Y ₀	0.909	0.742	12.3	4.17	63	114.5	10.2
	Y ₁	0.921	0.721	12.55	4.04	63.5	110	10.3
	Y ₂	0.899	0.68	12.1	3.97	64.6	113.4	10.1
	Y ₃	0.905	0.785	12.7	4.14	64.1	119.6	10.2
	Y ₄	0.912	0.625	12.9	4.08	63.9	112.2	10.4
	Y ₅	0.911	0.719	12	4.16	65.6	115.3	10.2
20—40	Y ₀	0.75	0.621	11.25	2.26	32.5	94.5	11.4
	Y ₁	0.742	0.652	11.47	2.15	32.1	94	11.3
	Y ₂	0.751	0.58	11.49	2.22	32.5	93.4	11.4
	Y ₃	0.704	0.685	11.7	2.11	31.8	95.6	11.2
	Y ₄	0.777	0.633	11.57	2.23	33.3	94.2	11.4
	Y ₅	0.746	0.625	11.61	2.3	33.8	90.3	11.3

注:SOM 为土壤有机质含量,EC 为土壤电导率。

1.3 试验设置

本次试验田地位于一山丘顶部,第三级台地,向阳坡,坡度介于 10°~12°,坡顶为林地,林地周边及陡

坎边缘散布有基岩崩落形成的块石。试验区农作物的轮作方式为春夏季种植玉米,秋冬季种植红薯。本次肥力灌溉试验取样于 2023 年 7 月 1 日开始,共设

置 18 个试验小区,每个小区长宽均为 1 m,有效面积为 1 m²,各小区之间间隔 0.2 m。共设计 6 个试验方案,方案 1(Y₁)崩塌堆积物—土壤的复配比例为 10%;方案 2(Y₂)崩塌堆积物—土壤的复配比例为 20%;方案 3(Y₃)崩塌堆积物—土壤的复配比例为 30%;方案 4(Y₄)崩塌堆积物—土壤的复配比例为 40%;方案 5(Y₅)崩塌堆积物—土壤的复配比例为 50%;设置一组空白对照组(Y₀),为原始土样。每个方案设置 3 次重复,取样总周期为 2023 年 7 月 1 日至 2023 年 12 月 30 日,期间每隔 15 d 施加相同肥力的灌溉用水,并在每次施肥前对各方案的 0—20 cm 和 20—40 cm 的土层分别进行取样。

1.4 供水和施肥水平

供试用水量参照《2021 年安岳县水资源公报》的耕地用水指标(0.311 8 m³/m²),经换算,试验场地年灌溉用水量为 0.624 m³,因此将各试验小区的施水量设置为 8.7 L/(m²/次)。氮肥采用尿素(含氮 46%),磷肥采用过磷酸钙(含磷素 12%),钾肥采用氯化钾(含钾 60%),施肥水平参照《安岳县农业报告》中施氮量(600 kg/hm²)、施磷量(420 kg/hm²)和施钾量(225 kg/hm²)指标进行换算,将每个试验小区的氮磷钾肥施用量分别设置为 0.111 2,0.426 和 0.489 kg/(m²/次);施肥方式为将配好的肥料颗粒研细后兑制到自来水中,均匀搅拌,待肥料溶解完成后,将其均匀地灌溉在各试验小区的土壤表面。

1.5 样品采集与分析

每个样品由 5~7 个子样品混匀组成,2 个重复处理区域的土样混合为一个样品。土样经自然风干、磨碎后,分别过 1 和 0.074 mm 筛备用,对其养分指标进行检测。全氮采用凯氏法;碱解氮采用标准酸滴定法;全磷采用紫外分光光度法,速效磷采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法;有机质采用重铬酸钾氧化法;

速效钾采用醋酸铵浸取—火焰光度计法。

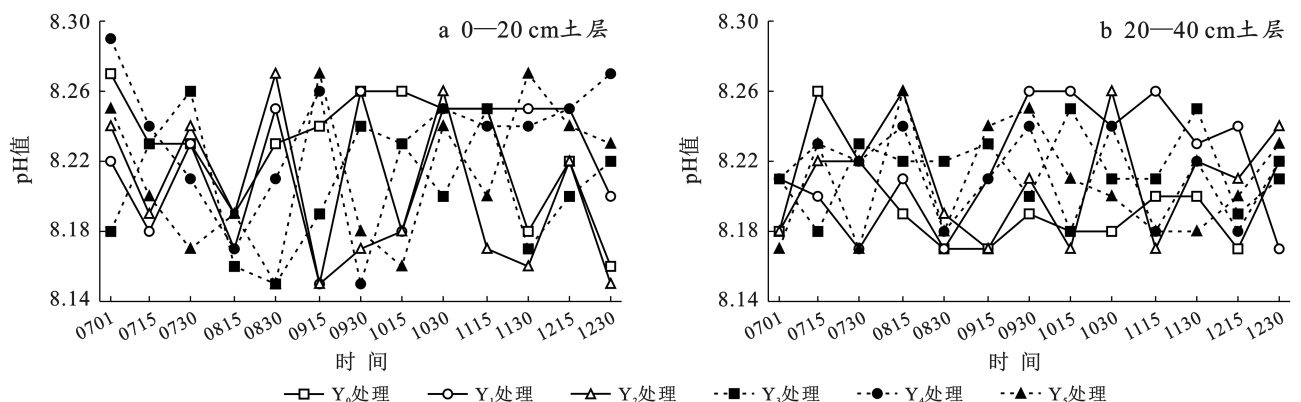
1.6 数据处理

使用统计学软件对试验数据进行处理。并选取 EC、pH 值、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾 8 个影响因子,通过将 AHP 与灰色关联度分析方法相结合,计算试验后不同方案的土壤养分加权灰色关联度,与空白对照组进行对比,定量分析试验后土壤养分的改善状况,进一步明确崩塌堆积物对紫色土养分含量的改善情况。

2 结果与分析

2.1 不同复配比例对土壤环境中 pH 值和 EC 的影响

土壤 pH 值的时空变化特征如图 2 所示。由图 2 可以看出,整个试验期间,0—20 cm 浅层土壤和 20—40 cm 深层土壤的 pH 值随着时间和施肥次数增加无明显变化,且各土层 pH 值大部分处于 8~8.3 之间,与当地作物生长所需的土壤 pH 值相适宜。土壤 EC 值的时空变化特征如图 3 所示。由图 3 可知,在 0—20 cm 浅层土壤范围内,空白对照组(Y₀)的 EC 值变化不明显,方案 Y₁,Y₂,Y₃,Y₄,Y₅ 的变化基本一致,均为先上升后下降,分析是因为改良后土壤的入渗率提高,使得土层中盐分积累加快,导致 EC 值变高;在第 6 次施肥后,方案 Y₁,Y₂,Y₃,Y₄,Y₅ 的 EC 值开始下降,且 EC 值的下降速率与不同方案的入渗率大小成正比关系,即下降速率表现为:Y₅>Y₄>Y₁>Y₂>Y₃,分析可能是因为这一时期降雨量的增大,入渗率越大,则会导致土壤中盐分被淋溶和稀释得越多;在试验后期,方案 Y₁,Y₂,Y₄,Y₅ 的 EC 值大小与空白对照组(Y₀)基本一致,说明土壤本身对其盐分含量也有一定的调节作用。在 20—40 cm 深层土壤范围内,不同方案 EC 值大小与空白对照组(Y₀)无明显差异,总体变化趋势均是在平均值上下小幅度波动。



注:图中 Y₀, Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅ 处理分别代表不同的崩塌堆积物—土壤的复配比例:0(对照,原始土样),10%,20%,30%,40%,50%。下同。

图 2 各处理土壤 pH 值变化特征

Fig.2 Characteristics of soil pH value changes in different treatments

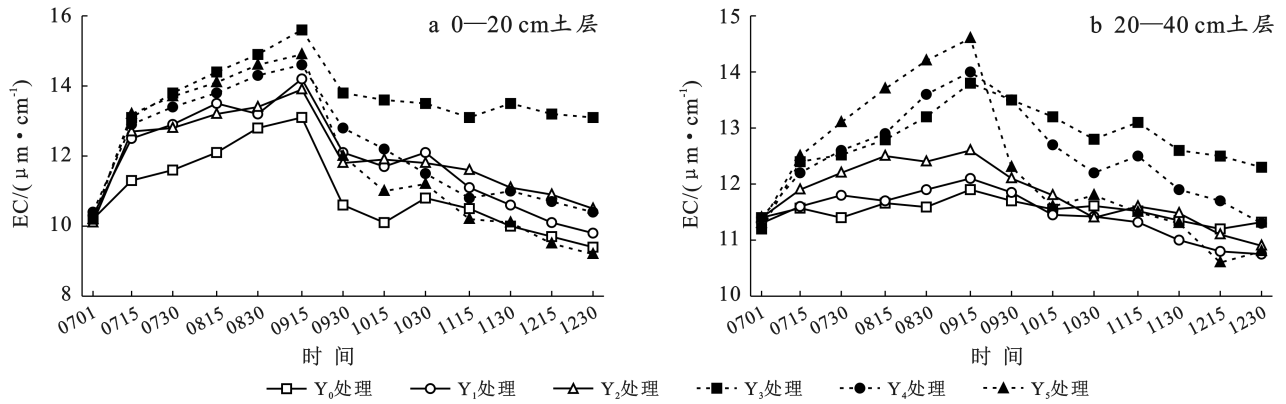


图3 各处理土壤EC变化特征

Fig.3 Changes characteristics of soil EC in different treatments

2.2 不同复配比例对土壤环境中全氮、全磷的影响

土壤中全氮含量的时空变化特征如图4所示。在0—20 cm浅层土壤范围内,土壤的全氮含量总体上呈现先上升后下降的趋势,在整个周期内,方案Y₁, Y₂, Y₃, Y₄和Y₅相比于空白对照组(Y₀)的土壤全氮含量分别提升了6.75%, 7.87%, 10.60%, 5.39%和3.26%。在20—40 cm深层土壤范围内,全氮含量呈缓慢上升趋势,在整个试验周期内,方案Y₁, Y₂, Y₃, Y₄和Y₅相比于空白对照组(Y₀)的土壤全氮含量分别提升了1.88%, 0.808%, 0.67%, 0%和4.17%。分析原因可能是由于: ①在灌溉前期,改良后土壤的团聚体增加,使得土层对氮素的吸收加快,致使土壤的全氮含量变高,但在灌溉后期,随着降雨量的增加,土壤颗粒冲蚀,导致土壤中团聚体被减少而使氮素的吸收降低,最终导致全氮含量的减少。②崩塌堆积物中含有大量含氮成分的矿物组分可能在短时间内提升

土壤的全氮含量,但也会影响土壤的质地、结构状况、孔隙度、水分和温度状况等,使得土壤养分含量的转化受到影响而导致土壤全氮含量下降。土壤中全磷含量的时空变化特征如图5所示。在0—20 cm浅层土壤范围内,随着灌溉时间和灌溉次数的增加,土壤的全磷含量总体上呈现先下降后快速上升的趋势,几种方案均在第3次施肥前降到最低,随后开始上升;在整个试验周期内,方案Y₁, Y₂, Y₃, Y₄和Y₅相比于空白对照组(Y₀)的土壤全磷含量分别提升了10.61%, 37.95%, 43.33%, 19.60%和39.81%。在20—40 cm深层土壤范围内,方案Y₂, Y₃, Y₄和Y₅的全磷含量呈上升趋势,方案Y₁和空白对照组(Y₀)在其平均值范围内上下波动;在整个试验周期内,方案Y₁, Y₂, Y₃, Y₄和Y₅相比于空白对照组(Y₀)的土壤全磷含量分别提升了10.35%, 22.66%, 43.70%, 28.92%和40.11%。

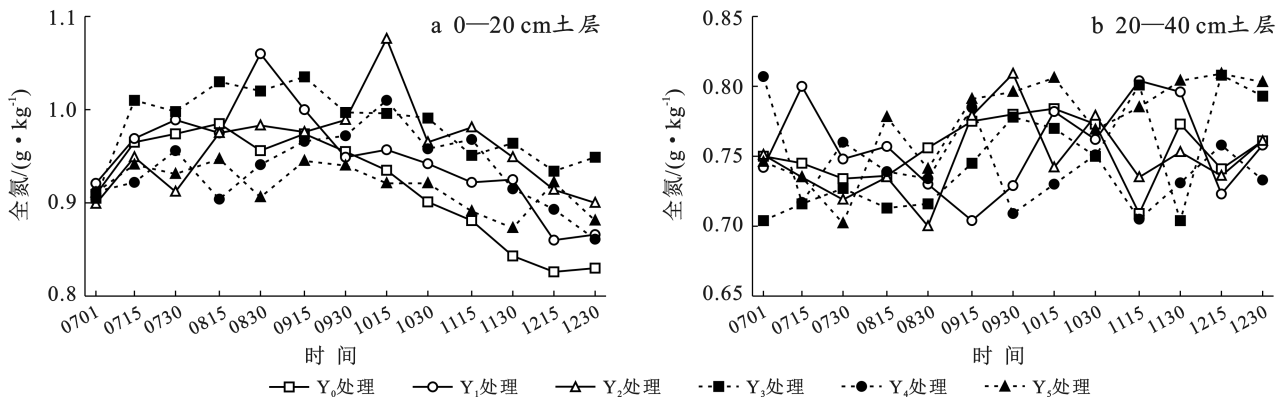


图4 各处理土壤全氮含量变化特征

Fig.4 Changes of soil total nitrogen content in different treatments

2.3 不同复配比例对土壤环境中有机质的影响

不同复配比土壤中有有机质含量的时空变化特征如图6所示。

由图6可知,在0—20 cm浅层土壤范围内,随着灌溉时间和灌溉次数的增加,经不同复配方案改良后土壤的有机质含量总体上呈现先上升后稳定波动

的趋势,且各方案在整个试验期间的有机质含量均大于空白对照组(Y_0),分别提升了 9.14%,18.70%,24.12%,22.31%和 23.62%。在 20—40 cm 深层土壤范围内,灌溉初期,有机质含量无明显变化,但随着一定灌溉次数的累计,有机质含量呈缓慢上升趋势,且各方案的有机质含量均大于空白对照组(Y_0),在整个

试验周期内,方案 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 相比于空白对照组(Y_0)的土壤有机质含量分别提升了 5.99%,7.49%,8.28%,9.96%和 7.14%。土壤经崩塌堆积物复配后,能使土壤有机质含量得到较大的增长,这可能是添加崩塌堆积物后土层的团聚性增强,土粒比表面积变大,使有机质不易被分解,导致有机质的累积。

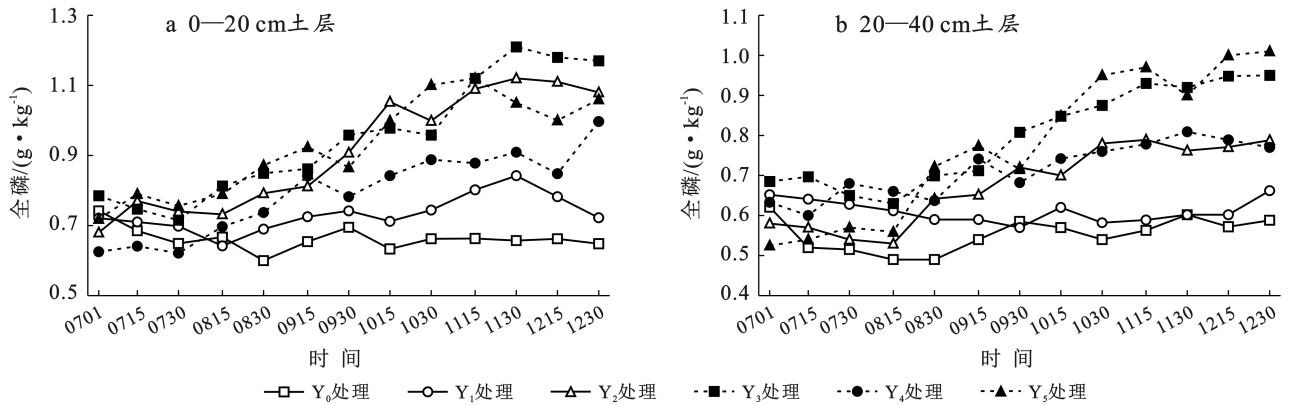


图5 各处理土壤全磷含量变化特征

Fig.5 Changes of soil total phosphorus content in different treatments

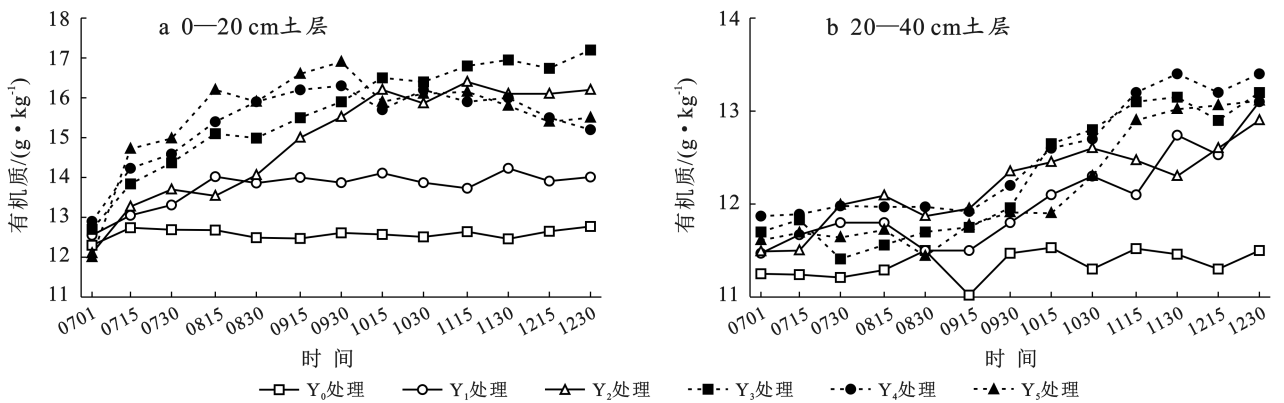


图6 各处理土壤有机质含量变化特征

Fig.6 Changes of soil organic matter content in different treatments

2.4 不同复配比例对土壤环境中碱解氮、有效磷及速效钾的影响

土壤中碱解氮含量的时空变化特征如图 7 所示。在 0—20 cm 浅层土壤范围内,不同处理组的碱解氮含量总体上都呈现先上升后下降的趋势,且该层各方案的碱解氮含量均大于空白对照组(Y_0)。分析可能是因为氮元素是玉米生长中不可或缺的重要无机营养,在生长期对于氮元素的需求量较大,因此土壤中的碱解氮被玉米根系所吸收,导致了土壤中氮素的相对减少^[7]。在整个试验周期内,方案 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 相比于空白对照组(Y_0)的土壤碱解氮含量分别提升了 5.76%,10.65%,11.92%,10.34%和 12.73%。在 20—40 cm 深层土壤范围内,该层各方案的碱解氮含量呈缓慢上升趋势;方案 $Y_1, Y_2, Y_3,$

Y_4, Y_5 相比于空白对照组(Y_0)的土壤碱解氮含量分别提升了 4.55%,4.79%,8.57%,8.88%和 11.90%。分析可能是由于灌溉次数和灌溉时间的增加会加速氮素的迁移转化,导致累积在表层土壤的碱解氮向深层土壤迁移。

土壤中有效磷含量的时空变化特征如图 8 所示。在 0—20 cm 浅层土壤范围内,不同处理组土壤的有效磷含量总体上都呈现先上升后下降的趋势,在整个试验周期内,方案 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 相比于空白对照组(Y_0)的土壤有效磷含量分别提升了 26.32%,24.75%,46.22%,30.90%和 28.63%。在 20—40 cm 深层土壤范围内,该层各改良方案的有效磷含量与空白对照组(Y_0)无明显区别,且均表现为在平均值上下波动,说明将复配处理不能改善 20—40 cm 深层土壤

的有效磷含量。

土壤中速效钾含量的时空变化特征如图9所示。在0—20 cm浅层土壤范围内,土壤速效钾含量在总体上表现为先短暂上升后在平均值上下小幅度波动,在方案 Y_4 、 Y_5 和空白对照组(Y_0)处理下的土壤速效钾含量在总体上表现先上升后下降。分析可能因为方案 Y_4 、 Y_5 处理下土壤的抗冲蚀性最低,而在试验

后期的降雨量升高,导致其土壤中速效钾的水溶性钾和交换性钾易被降水淋失。在整个试验周期内,方案 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 相比于空白对照组(Y_0)的土壤平均速效钾含量分别提升了20.42%、16.21%、24.20%、19.05%和28.96%。在20—40 cm深层土壤范围内,各改良方案和空白对照组(Y_0)的速效钾含量差异不大,都在其平均值上下小幅度波动。

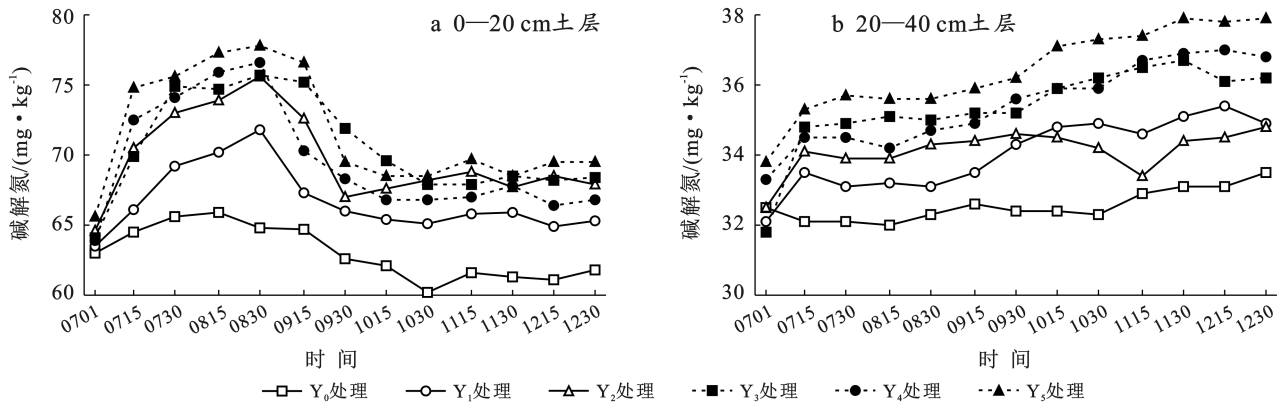


图7 各处理土壤碱解氮含量变化特征

Fig.7 Changes in soil alkaline nitrogen content in different treatments

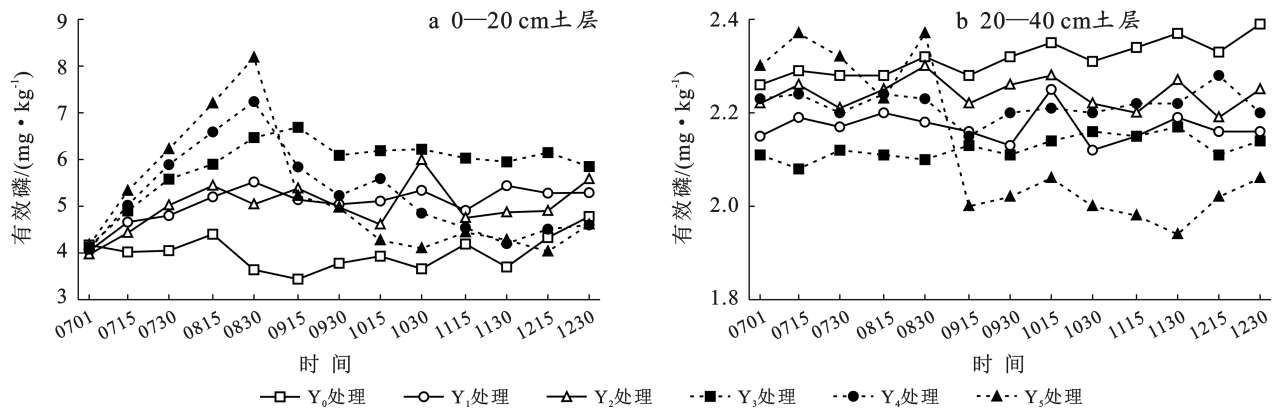


图8 各处理土壤有效磷含量变化特征

Fig.8 Changes in soil available phosphorus content in different treatments

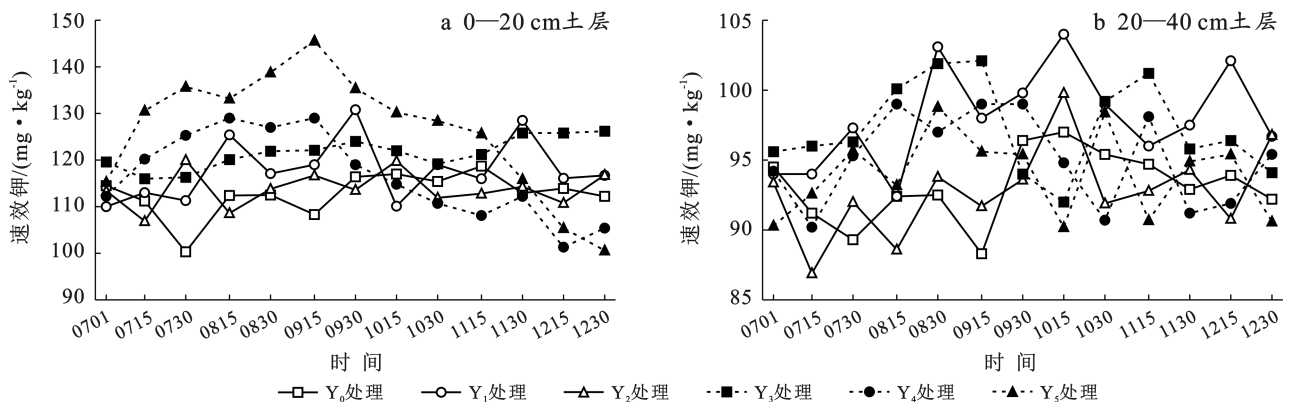


图9 各处理土壤速效钾含量变化特征

Fig.9 Changes in soil available potassium content in different treatments

2.5 土壤养分加权灰色关联度分析

2.5.1 层次分析法

(1) 建立层次结构模型。根据此次试验目标设置目标层,指标层和方案层。具体的层次结构如图 10 所示。

(2) 权重计算。具体的计算步骤^[8]:通过判断矩阵计算几何平均值,进行归一化计算,得到各指标的权重值,再将各指标进行求和,得到向量 $S=(S_1, S_2,$

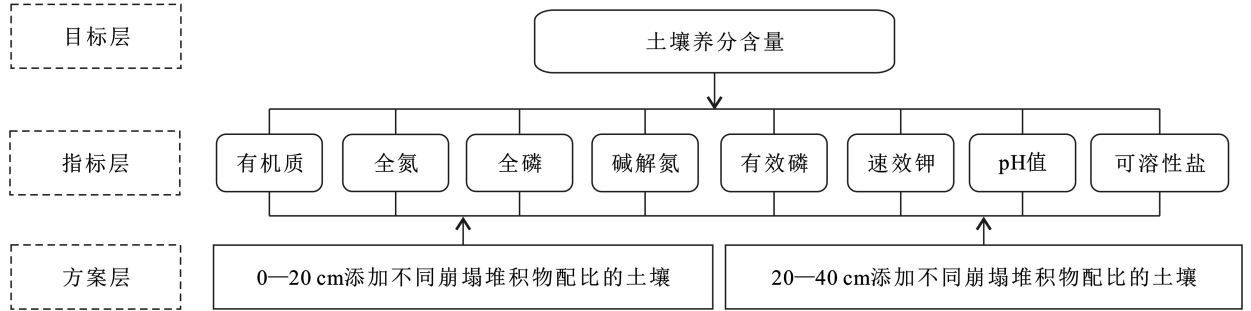


图 10 土壤养分质量层次分析
Fig.10 Hierarchical analysis of soil nutrient quality

(3) 一致性检验。为确保最终评价结果不存在底层逻辑错误,需要对矩阵进行一致性检验。当检验结果小于 0.1 时,通过检验。计算公式为^[9]:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为指标个数; CI 为一一致性指标; RI 为平均随机一致性指标; CR 为一一致性检验结果。

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |A(0,j) - A(i,j)| + \rho \max_i \max_j |A(0,j) - A(i,j)|}{|A(0,j) - A(i,j)| + \rho \max_i \max_j |A(0,j) - A(i,j)|} \quad (4)$$

$$\gamma_n = \sum_{k=1}^n \omega_i \cdot \xi_{0i}(k) \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (5)$$

式中: ρ 为分辨系数,一般取值为 0.5; $\max_i \max_j |A(0,j) - A(i,j)|$ 为第 j 个变量序列与参考序列之间差值绝对值中的最大值; $\min_i \min_j |A(0,j) - A(i,j)|$ 为第 j 个变量序列与参考序列之间差值绝对值中的最小值; ω_i 为指标权重; γ_n 为

$S_3 \dots S_m)^T$,并计算出判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} :

$$S_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m s_i \omega_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(AW)_i}{\omega_i} \quad (2)$$

式中: ω_i 为判断矩阵每一行标度值连乘并开 m 次平分; W 为 ω_i 的归一化处理结果; s_i 为判断矩阵中的每列元素求和值; λ_{\max} 为最大特征值。

2.5.2 灰色关联分析理论及模型建立

(1) 构建目标序列与参考序列。将目标序列以不同深度和不同方案条件下,不同指标的最大值作为基准,除去最大值后的其他实际测量值设置为参考序列进行对照,并对相应指标值进行归一化处理。

(2) 计算关联系数。将标准序列与参考序列之间差值代入公式(4),得到两个序列之间的关联系数,并由公式(5)计算出关联度大小:

参考序列与第 n 个方案的关联度。

2.5.3 加权灰色关联度计算 由于本次研究的指标层指标总共为 8 项(有机质,全氮,全磷,碱解氮,速效磷,速效钾,EC, pH 值),因此构建 8 阶矩阵进行 AHP 层次分析。运用 SPSSAU 软件与以往专家学者在川中丘陵地区的研究成果^[10-11],得出各养分的主观权重值(表 3)。

表 3 各养分指标判断矩阵及主观权重
Table 3 Judgment matrix and subjective weights of nutrient indicators

影响因子	有机质	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	速效钾	EC	pH 值
有机质	1	1	2	1/2	1	2	1/3	1/3
全氮	1	1	3	1/2	1	2	3	2
全磷	1/2	1/3	1	1/3	1/2	1	1/2	2
碱解氮	2	2	3	1	5	6	5	3
效磷	1	1	2	1/5	1	2	1	3
速效钾	1/2	1/2	1	1/6	1/2	1	1/3	3
EC	3	1/3	2	1/5	1	3	1	1
pH 值	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	1/3	1	1
归一化权重	12.74%	13.12%	6.03%	31.75%	12.64%	7.43%	11.98%	4.31%

经一致性检验计算得出, $\lambda = 8.015$, $CI = 0.0763$, 而 8 阶矩阵 RI 为 1.41, 则一致性指标 $CR = 0.0763 < 0.1$, 因此, 通过一致性检验, 计算出的主权重有效。

以有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾的测定值作为比较序列, 进行无量纲化处理(表 4), 然后采用灰色关联分析法, 计算不同方案的关联系数及加权关联度。

表 4 不同方案土壤养分含量的归一化结果

Table 4 Normalization results of soil nutrient content for different schemes

土层深度/cm	方案	有机质	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	速效钾	EC	pH 值
0—20	Y ₀	0.816 3	0.721 8	0.857 1	0.856 7	0.624 7	0.661 5	0.703 3	0.794 6
	Y ₁	0.827 7	0.671 0	0.961 8	0.895 3	0.684 4	0.689 0	0.845 4	0.981 7
	Y ₂	1	0.764 3	1	0.975 6	1	0.715 3	0.873 1	0.875 4
	Y ₃	0.921 5	0.971 3	0.716 4	1	0.746 7	0.728 5	1	0.880 2
	Y ₄	0.841 4	0.943 1	0.695 5	0.913 7	0.663 5	1	0.801 9	1
	Y ₅	0.805 0	1	0.844 0	0.864 2	0.657 5	0.695 4	0.757 1	0.842 9
20—40	Y ₀	0.770 1	0.868 0	0.805 0	0.796 9	0.699 8	0.672 8	0.794 6	0.712 3
	Y ₁	0.757 0	0.875 5	0.793 7	1	0.732 6	0.706 7	0.842 9	0.766 1
	Y ₂	0.913 1	0.986 9	1	0.689 2	1	0.726 6	0.875 4	0.882 1
	Y ₃	0.608 5	0.925 0	0.830 1	0.868 2	0.738 6	1	1	0.810 9
	Y ₄	1	0.906 6	0.816 4	0.595 9	0.759 5	0.700 3	0.981 7	0.854 4
	Y ₅	0.629 4	1	0.910 2	0.896 2	0.821 8	0.739 8	0.880 2	1

由表 5 可知, 在 0—20 cm 浅层土壤, 不同方案的关联度大小排序为: $Y_2(0.8939) > Y_3(0.8177) > Y_4(0.7937) > Y_1(0.7712) > Y_0(0.6699) > Y_5(0.6213)$, 可以看出 0—20 cm 浅层土壤经过方案 Y₁, Y₂, Y₃ 和 Y₄ 的改良后, 其土壤养分效果均得到提升, 其中使用 Y₂ 方案改良土壤后, 改善土壤养分的效果达到最佳; 在 20—40 cm 深层土壤, 不同方案的关联度大小排序

为: $Y_5(0.8687) > Y_4(0.8516) > Y_3(0.8441) > Y_2(0.8429) > Y_1(0.8219) > Y_0(0.8066)$, 可以看出 20—40 cm 深层土壤经过崩塌堆积物改良后, 其土壤养分效果均得到提升, 其中使用 Y₅ 方案改良土壤后, 改善土壤养分的效果达到最佳; 综合来看, 研究区土壤在与崩塌堆积物进行复配后, 其土壤养分含量得到一定的提升。

表 5 不同方案土壤养分含量指标的关联系数、权重及关联度

Table 5 Correlation coefficients, weights, and correlation degrees of soil nutrient content indicators for different schemes

土层深度/cm	方案	有机质	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	速效钾	EC	pH 值	关联度
0—20	Y ₀	0.725 3	0.685 8	0.840 1	0.765 7	0.611 7	0.652 5	0.703 3	0.787 6	0.669 9
	Y ₁	0.736 7	0.635 2	0.944 8	0.804 3	0.671 4	0.681 2	0.845 4	0.974 7	0.771 2
	Y ₂	1	0.728 3	1	0.884 6	1	0.806 3	0.873 1	0.868 4	0.893 9
	Y ₃	0.830 5	0.935 3	0.699 4	1	0.733 7	0.719 5	1	0.873 2	0.817 7
	Y ₄	0.750 4	0.907 1	0.678 5	0.822 7	0.650 5	1	0.801 9	1	0.793 7
	Y ₅	0.714 0	1	0.827 3	0.773 2	0.644 5	0.686 4	0.757 1	0.835 9	0.621 3
20—40	Y ₀	0.734 1	0.859 3	0.784 0	0.887 9	0.686 8	0.672 8	0.794 6	0.719 3	0.806 6
	Y ₁	0.812 3	0.886 5	0.772 7	1	0.719 6	0.706 7	0.842 9	0.773 1	0.821 9
	Y ₂	0.877 2	0.977 9	1	0.780 2	1	0.726 6	0.875 4	0.875 1	0.842 9
	Y ₃	0.572 5	0.916 0	0.809 1	0.959 0	0.751 6	1	1	0.803 9	0.844 1
	Y ₄	1	0.897 6	0.795 4	0.686 9	0.772 5	0.820 3	0.981 7	0.847 4	0.851 6
	Y ₅	0.593 4	1	0.889 2	0.987 2	0.834 8	0.739 8	0.880 2	1	0.868 7
权重		0.127 4	0.131 2	0.060 3	0.317 5	0.126 4	0.074 3	0.119 8	0.043 1	—

3 讨论

本次研究涉及多变量和多指标, 从各指标检测值

可直观地得出部分规律。但养分指标、崩塌堆积物掺入比例、取样误差等因素对结果的影响错综复杂, 难以尽数表述到位。为进一步对比不同崩塌堆积物掺

入比例对紫色土养分含量的改良效果,采用了加权灰色关联度分析方法,将8种养分指标进行了归一化处理,将不同崩塌堆积物掺入比例的改良效果进行直接比较,结果较为准确直观。由上文分析可知,在崩塌堆积物掺入条件下,除方案 Y_5 处理下的0—20 cm 土层的加权灰色关联度小于空白对照组,其余处理组各土层的加权灰色关联度均大于空白对照组,说明利用崩塌堆积物改良土壤养分含量是可行的,一方面是因为崩塌堆积物与土壤复配后,能显著地改善土壤渗透率,使施用的化肥养分能最大程度地入渗到土壤中,并减少了因土壤板结或形成钙质结核造成的水土流失,另一方面则是因为崩塌堆积物中的矿物成分比表面积大,且具有很强的离子交换能力、吸附能力,将其施加到土壤中以后,不仅能极大地增加土壤复粒或团聚体,还能起到很好的供肥保肥作用^[12]。但是从整体上看,土壤养分含量的改善效果并不与复配比例成正比反比关系,其中方案 Y_5 的加权灰色关联度小于空白对照组(Y_0),且远小于其他改良方案,说明崩塌堆积物的复配比例也会影响土壤养分含量的改善效果,原因可能是因为过大的复配含量,使得土壤的结构孔隙较大,颗粒之间的黏结强度变小,而试验期间正值雨季,土壤在遇水容易渗透的同时,水对颗粒间的接触破坏较大,反而造土壤养分的流失,对土壤质量的改善效果产生负效应。由此可见,崩塌堆积物的掺入比例对土壤养分含量的改善有着至关重要的影响。

研究区的气候特征明显,试验阶段包含了降雨丰富的时期。有研究^[13]表明降雨对紫色土表层的速效养分流失影响较大。本次所选耕地整体有一定坡度,试验区位于坡体末端,降雨径流携带的养分易聚集于试验区的表层土壤中,且在强降雨时,试验区土壤水分入渗受到限制,壤中流产流和养分淋失显著减少^[14];此外,试验期连续耕作又使得作物根系吸收了深层土壤中的部分养分。以上可能是表层土壤养分含量大于深层土壤养分含量的原因。本次试验时间为2023年7—12月,期间正值玉米成熟期和红薯成长期,对氮、磷等营养元素吸收最为强烈时期,选择该时段进行试验具有一定典型性和代表性。预测在耕地农作物的整个生长时期,作物对土壤中氮、磷等养分的吸收量会更多,表层和深层土壤养分含量差距会更为明显。

本次试验的对照组虽无施用处理,但部分养分含量依旧比背景值有所增加,可能是试验期间耕地轮作等人为影响,使得相邻无施用区域也随之受益。本次试验研究成果可为川中丘陵地区崩塌堆积物资源化利用和紫色土改良工作提供有效参考。

4 结论

(1) 在相同的肥力灌溉水平下,除方案 Y_5 处理下的0—20 cm 土层的加权灰色关联度小于空白对照组,其余处理组各土层的加权灰色关联度均大于空白对照组。由此可知,在土壤中掺入适量的崩塌堆积物可以较为显著地改善紫色土养分含量,建议进一步在川中丘陵地区高标准农田建设和土壤改良工作中推广应用。

(2) 基于AHP-灰色关联分析法能对不同崩塌堆积物掺入处理的土壤养分变化含量进行综合评价分析,可将土壤改良效果转化为综合得分比较,为川中丘陵地区崩塌堆积物资源化利用和紫色土改良提供有效数据支撑。

参考文献 (References)

- [1] 蓝红星,冯文慧,胡原.新时代打造更高水平“天府粮仓”的国际经验、现实基础与发展对策[J].四川农业大学学报,2024,42(2):240-247.
Lan Hongxing, Feng Wenyi, Hu Yuan. International experience, practical basis and development countermeasures for building a higher level of “Tianfu granary” in the new era [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024,42(2):240-247.
- [2] 娄义宝.侵蚀条件下紫色土坡耕地耕层质量变化特征及适宜性研究[D].重庆:西南大学,2019.
Lou Yibao. Study on the Characteristics and suitability of quality changes in the cultivated layer of purple soil slope farmland under erosion conditions [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [3] 王玄德.紫色土耕地质量变化研究[D].重庆:西南农业大学,2004.
Wang Xuande. Research on changes in quality of purple soil farmland [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2004.
- [4] 郝秀珍,周东美.沸石在土壤改良中的应用研究进展[J].土壤,2003,35(2):103-106.
Hao Xiuzhen, Zhou Dongmei. Zeolite application as soil amendment [J]. Soils, 2003,35(2):103-106.
- [5] 左建,孔庆瑞.沸石改良碱性土壤作用的初步研究[J].河北农业大学学报,1987,10(3):58-64.
Zuo Jian, Kong Qingrui. Research of zeolite improving alkalization soils [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1987,10(3):58-64.
- [6] 杨尽.利用矿物改良土地整理新增耕地贫瘠土壤研究[D].四川 成都:成都理工大学,2010.
Yang Jin. Research on the use of minerals to improve the

- barren soil of newly added farmland in land consolidation [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2010.
- [7] 刘景辉,刘克礼.春玉米需氮规律的研究[J].内蒙古农牧学院学报,1994,15(3):12-18.
Liu Jinghui, Liu Keli. Study on the nitrogen requirements of spring corn [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural and Animal Husbandry College, 1994, 15(3):12-18.
- [8] 方舰.生物炭对土壤环境的影响及安全性评价[D].天津:天津理工大学,2020.
Fang Jian. Impact and safety evaluation of biochar on soil environment [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
- [9] 韩利,梅强,陆玉梅,等.AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J].中国安全科学学报,2004,14(7):86-89.
Han Li, Mei Qiang, Lu Yumei, et al. Analysis and study on AHP-fuzzy comprehensive evaluation [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7):86-89.
- [10] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].应用生态学报,2016,27(5):1445-1452.
Tang Bingzhe, He Binghui, Yan Jianmei. Gray correlation analysis of the impact of land use type on soil physical and chemical properties in the hilly area of central Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5):1445-1452.
- [11] 李杉,马鑫文,吴勇,等.川中丘陵区农村生活污水资源化利用后的土壤养分特征[J].水土保持通报,2022,42(6):114-120.
Li Shan, Ma Xinwen, Wu Yong, et al. Soil nutrient characteristics after rural domestic sewage resource utilization in hilly areas of central Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 114-120.
- [12] 李越,徐曼,谢永红,等.不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响[J].环境科学,2024,45(2):974-982.
Li Yue, Xu Man, Xie Yonghong, et al. Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil [J]. Environmental Science, 2024, 45(2):974-982.
- [13] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74.
Fu Tao, Ni Jiupa, Wei Chaofu, et al. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2003, 9(1):71-74.
- [14] 牛文全,郭超.根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J].应用生态学报,2010,21(11):2785-2791.
Niu Wenquan, Guo Chao. Effects of rhizosphere soil permeability on water and nutrient uptake by maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11):2785-2791.
- [28] Xiao Jianhua, Ye Dongting, Xie Xiaosong, et al. Numerical simulation of the airflow at the world's largest concentrated solar power plant in a desert region [J]. Solar Energy, 2022, 232:421-432.
- [29] 毛东雷,蔡富艳,杨余辉,等.新疆策勒4个典型下垫面近地层风速脉动特征[J].干旱区研究,2017,34(1):126-135.
Mao Donglei, Cai Fuyan, Yang Yuhui, et al. Wind speed fluctuation near ground surface over four typical underlying surfaces in Qira, Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1):126-135.
- [30] 包慧娟,李振山.风沙流中风速纵向脉动的实验研究[J].中国沙漠,2004,(2):132-135.
Bao Huijuan, Li Zhenshan. Longitudinal intensity of airflow turbulence with sand grain saltation in a wind tunnel [J]. Journal of Desert Research, 2004, (2): 132-135.
- [31] 叶天歌,高晓清,李振朝.湖泊光伏电站湍流特征及稳定度的对比分析[J].高原气象,2022,41(4):1006-1016.
Ye Tiange, Gao Xiaqing, Li Zhenchao. Comparative analysis of turbulence characteristics and stability of lake photovoltaic power plant [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4):1006-1016.

(上接第 65 页)