



DOI:10.14188/j.ajsh.20251124001

植物废弃物有机肥对石漠化坡地土壤质量及植被恢复的影响

赵江¹, 龚记熠^{1,2}, 李欲轲^{1,2}, 唐明^{1,2}, 张习敏^{1,2}, 文治瑞^{1,2}, 乙引^{1,2*}

(1. 贵州师范大学 生命科学学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州师范大学 喀斯特地区碳中和教育部工程研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为探明植物废弃物有机肥在石漠化坡地生态修复中对土壤质量和植被恢复的影响,明确有机肥添加比例,以及不同坡度条件下的运用效果,在贵州黔西石漠化坡地设置盆栽和大田两种场景,各设置5个处理。盆栽实验设置对照(CK)组和有机肥添加组,比例分别为10%(T1)、20%(T2)、35%(T3)、55%(T4),研究不同处理对盆栽试验下土壤性质、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、黑麦草(*Lolium perenne*)生长的影响;大田实验采用盆栽筛选最佳有机肥比例35%作为添加量,设置1°~5°(T-5)、6°~10°(T-10)、11°~15°(T-15)、16°~20°(T-20)、21°~30°(T-30)5个处理,研究不同坡度下有机肥对土壤性质及植物自然恢复的影响差异。结果表明,盆栽实验下不同有机肥添加处理对土壤理化性质、紫花苜蓿、黑麦草生长及植物自然恢复较对照组均有显著改善($P<0.05$),但是添加量超过35%(T3)后,大部分指标并没有出现显著性增加,表明35%有机肥添加量最佳。大田实验中有有机肥添加(35%)在不同坡度下均能显著改善土壤质量并促进植被恢复,但是在坡度超过15°后的两组(T-20、T-30)处理中差异并不显著($P>0.05$),且各项指标变化量显著低于其他3组处理,表明有机肥在坡度低于15°的石漠化坡地效果更好。综上,植物废弃物有机肥作为石漠化坡地土壤生态修复的肥料来源,对土壤物理结构、养分含量具有显著改善效果,同时促进植被的自然恢复,但受到养分添加比例和坡度条件的限制。

关键词: 石漠化;有机肥;土壤修复;土壤质量;植被恢复

中图分类号: S158

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2026)01-0059-09

Effect of plant waste-derived organic fertilizer on soil quality and vegetation restoration in rocky desertification sloping lands

ZHAO Jiang¹, GONG Jiyi^{1,2}, LI Yuke^{1,2}, TANG Ming^{1,2}, ZHANG Ximin^{1,2}, WEN Zhirui^{1,2}, YI Yin^{1,2*}

(1. College of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, Guizhou, China;
2. Engineering Research Center of Carbon Neutrality in Karst Areas, Ministry of Education, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: To investigate the effects of plant waste-derived organic fertilizer on soil quality and vegetation restoration during the ecological rehabilitation of karst rocky desertification slopes, and to determine the proportion of organic fertilizer added and the application effect under different slope gradients, a study was conducted involving both pot and field experiments on rocky desertification slopes in Qianxi, Guizhou Province. Each experiment comprised 5 test groups. The pot experiment included a control (CK) group and groups with organic fertilizer addition ratios of 10% (T1), 20% (T2), 35% (T3), and 55% (T4). The effects of pot treatments on soil properties and the growth of alfalfa (*Medicago*

收稿日期: 2025-11-24 修回日期: 2025-12-17 接受日期: 2026-02-11

作者简介: 赵江(2000-),男,硕士生,研究方向:农业,E-mail: 15182178319@163.com

*通信作者: 乙引(1967-),男,博士,教授,研究方向:生态学,E-mail: yiyin@gznu.edu.cn

基金项目: 贵州省重大科技成果转化项目“喀斯特石漠化生态恢复技术集成与示范”(黔科合重点2022[010]);贵州省教育厅“揭榜挂帅”科技攻关项目“喀斯特石漠化水肥耦合与生物多样性恢复”(黔教技[2023]004号)

引用格式: 赵江, 龚记熠, 李欲轲, 等. 植物废弃物有机肥对石漠化坡地土壤质量及植被恢复的影响[J]. 生物资源, 2026, 48(1): 59-67.

Zhao J, Gong J Y, Li Y K, et al. Effect of plant waste-derived organic fertilizer on soil quality and vegetation restoration in rocky desertification sloping lands [J]. Biotic Resources, 2026, 48(1): 59-67.

sativa) and ryegrass (*Lolium perenne*) were studied. Based on the pot experiment results, the optimal organic fertilizer addition ratio of 35% was selected for the field experiment. The field experiment involved 5 slope gradient groups: 1°–5° (T-5), 6°–10° (T-10), 11°–15° (T-15), 16°–20° (T-20), and 21°–30° (T-30). This experiment aimed to study the differential effects of organic fertilizer (at 35%) on soil properties and spontaneous vegetation regeneration across these slope gradients. The results indicated that in the pot experiment, all organic fertilizer treatments significantly improved soil physicochemical properties, the growth of alfalfa and ryegrass, and plant regeneration compared to the CK group ($P < 0.05$). However, for most indicators, no significant further increase was observed when the addition ratio exceeded 35% (T3), suggesting that 35% is the optimal addition ratio. In the field experiment, the addition of organic fertilizer (35%) significantly enhanced soil quality and promoted vegetation restoration across all slope gradients. However, for the two treatment groups on slopes steeper than 15° (T-20 and T-30), the differences in improvement were not significant ($P > 0.05$), and the magnitude of change in all measured indicators was significantly lower than that in the other three treatment groups (T-5, T-10, T-15). This indicates that the effectiveness of organic fertilizer is greater on rocky desertification slopes with gradients below 15°. In conclusion, plant waste-derived organic fertilizer, as a fertilizer source for soil ecological restoration on karst rocky desertification slopes, significantly improves soil physical structure and nutrient content, while promoting the spontaneous regeneration of vegetation. However, its effectiveness is constrained by nutrient addition ratios and slope conditions.

Key words: rocky desertification; organic fertilizer; soil restoration; soil quality; vegetation recovery

0 引言

中国南方喀斯特是全球三大连片裸露碳酸盐岩区域之一,也是石漠化集中发生的地区。区域在长期的自然及人为活动中出现土壤流失、基岩裸露、生态退化等现象,土地价值丧失,人地矛盾愈加突出^[1-2]。植被恢复措施是当前石漠化治理主要技术之一^[3],而土壤修复可缓解水土流失,改善贫瘠养分,成为植被恢复成效的关键基础^[4]。

贵州作为全国石漠化修复重点区域,截至2016年全省总面积24.5%的区域依然处于石漠化状态^[5]。因此,石漠化治理是当前贵州生态环境建设中的重点。如何利用区域产业副产物作为石漠化土壤恢复中的重要资源一直是研究热点。已有大量研究表明,有机肥在土壤修复、农业生产上具有改善土壤结构、提高土壤肥力、减少面源污染、资源循环利用等优势^[6-7]。植物废料是有机肥的重要来源,主要以农林种植及加工过程中产生的秸秆、菌棒、木屑等植物废弃物为主^[8]。近年贵州大力发展食用菌种植和刺梨加工产业,种植食用菌菌棒超过40亿棒^[9],加工刺梨达到10万t^[10]。废弃菌棒和刺梨残渣成为可利用的重要再生资源。废弃菌棒和刺梨残渣都具有疏松多孔结构,丰富无机养分和有机质成为重要的有机肥来源^[11-12]。通过发酵制作有机肥并改性后作为生物炭在修复土壤重金属污染方面均有较好的效果^[12-14]。

然而,在石漠化地区,土壤退化过程中坡度是重要驱动因素之一^[15]。不同的坡度下水土流失速率存

在较显著差异,导致土壤结构、养分含量、植被恢复效果在不同坡度变异较大^[16-17]。虽然已有研究证实了有机肥对石漠化土壤恢复具有促进作用^[18],但是针对多种植物废料混合施用效果缺少研究,特别是缺乏在不同石漠化坡度下的评估,限制了植物废弃物作为有机肥在石漠化土壤恢复中的推广使用。因此,本研究以废弃菌棒、刺梨残渣和植物秸秆为材料,从土壤理化性质、人工种植和自然恢复3个角度筛选最佳基质配比,并验证在不同坡度场景下的应用效果,以期为石漠化坡地生态修复新技术开发提供一定参考。

1 研究方法

1.1 实验地概况

研究选择在贵州黔西市新仁乡石漠化修复基地(106°04′~106°07′E, 26°48′~26°50′N、海拔870~1360 m)开展,区域位于黔西北,属于典型喀斯特石漠化地区,亚热带季风气候区,降水集中,年均降水890~1180 mm。试验区总面积16 hm²,其中可用耕地面积8.87 hm²,林地面积0.733 hm²,裸露石沟石芽面积6.4 hm²,土壤平均厚度40 cm,土壤中裸露岩石面大但破碎、裂隙(溶蚀洞)多,其中土地坡度在1°~5°占10%、6°~10°占25%、11°~15°占36%、16°~20°占16%、21°~30°占13%,属于重度石漠化地区(图1)。

1.2 实验材料

实验中混合型有机肥主要由菌渣、刺梨渣和玉米秸秆组成。菌渣和刺梨渣由贵州伍英农业科技发

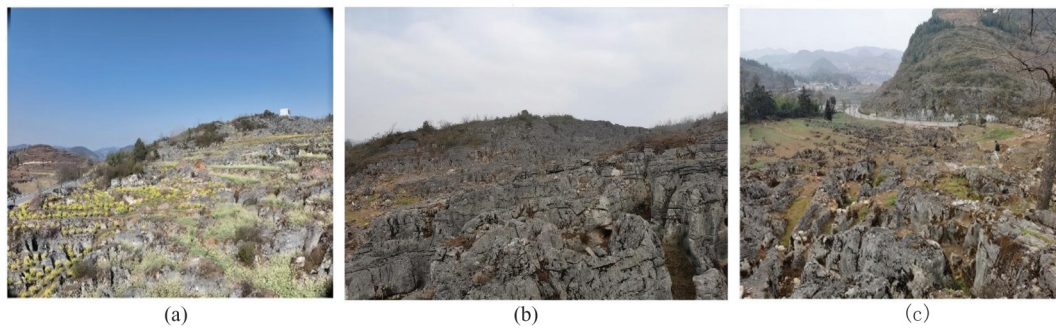


图1 研究区石漠化现状

Figure 1 Status of rocky desertification in the study area

展有限公司提供,玉米秸秆采自实验基地。实验前3种材料先经过粉碎与发酵处理,菌渣、刺梨渣和玉米秸秆分别粉碎成粒径5、10、20 mm的颗粒,粉碎后分别与水按照质量比1:1、1:0.8和1:3混合均匀,用塑料薄膜密封后在常温下发酵25 d,发酵后摊开晾干,添加前分别按照1:1:1的质量比混合均匀备用。同时实验过程中选用研究区常见的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.)作为盆栽实验材料,种子由贵州省农业科学院草业所提供。

1.3 试验设计

试验在贵州黔西市新仁乡基地分别设置盆栽和大田两个场景。盆栽试验主要分析不同植物种植效果,大田试验主要分析植物自然恢复以及不同坡度的影响,两种场景下均对土壤理化性质展开分析。盆栽试验在基质总量控制下,向石漠化土壤中添加不同重量的废物生物基质材料,共设置5组,其中1个对照组,每组10个重复,每组基质总质量25 kg,统一使用白色花盆(Φ60 cm\H45 cm)种植,各组基质配比见表1。大田实验以不同坡度设置处理组,分别是坡度1°~5°(CK-5)、6°~10°(T-10)、11°~15°(T-15)、16°~20°(T-20)、21°~30°(T-30),各组设置1 m×1 m样方10个,含添加有机肥处理5个和无添加对照5个,有机肥添加量依据盆栽结果择优选择,其他条件一致。

1.4 样品采集及测定

1.4.1 土壤样品采集与测定

种植植物或自然恢复(通过施加有机肥,为退化的土壤生态系统提供物质基础和初始动力,使其逐步、自主地恢复到一种更具生产力、稳定性和持续性的健康状态的过程)2年后,分别在花盆和大田样方按照五点采样法用土壤环刀(10 cm)采集土壤样品。每盆/样方各取样5份,每份不少于500 g,分别测定以下指标:土壤容重采用环刀法、土壤孔隙度采用饱和法、土壤含水量采用烘干法^[19]、pH值采用电位法^[20]、有机质采用重铬酸钾氧化法^[21]、全氮采用半微量凯氏法^[22]、全磷采用碱熔-钼锑抗分光光度法、全钾采用火焰光度法^[23]、无机氮采用碱解扩散法^[24]、速效磷采用钼锑抗比色法^[25]、速效钾醋酸铵采用火焰光度计法^[26]。

1.4.2 植物样品采集与测定

盆栽实验中分别在播种后测定发芽率,播种30 d测定成活率,播种后150 d测定地上生物量、地下生物量和根冠比。自然恢复实验中在添加基质后150 d鉴别植物种类、植物密度(每平方米地上草本植物数量)、地上生物量、地下生物量和根冠比指标,植物鉴定参照《中国植物志》^[27]和《贵州植物志》^[28]。

1.5 数据分析

盆栽实验与不同坡度大田实验各指标变化量—某一坡度下有机肥处理指标数值—对应坡度对照组

表1 实验设计

Table 1 Experimental design

	处理组 石漠化土壤/%		生物基质有机肥配比/%		处理组 石漠化土壤/%		生物基质有机肥配比/%
	CK	100			T-5	65	35
盆栽实验	T1	90	10	大田实验	T-10	65	35
	T2	80	20		T-15	65	35
	T3	65	35		T-20	65	35
	T4	45	55		T-30	65	35

指标数值。数据分析中使用WPS、Origin2024b、ArcMap 10.6等软件进行数据整理、统计分析、图标制作。采用单因素方差(One-wayANOVA)结合邓肯氏多重比较检验(Dun-can's)分别对有机肥添加比例、坡度下不同处理组间土壤理化性质、人工种植、自然恢复等进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质比较

针对不同配方基质在盆栽实验中展开理化性质分析,结果见表2。在11项土壤理化性质中除pH值外,其余指标均呈现出随着处理组添加生物废弃物的增加而变化的趋势。在添加量超过10%后的各处理组(T)均优于对照组(CK),表明添加生物废弃物有助于改善石漠化地区土壤理化性质,增加土壤孔隙度和含水量,提高土壤有机质及氮、磷、钾含量。但是在不同处理组之间存在差异,整体上随着添加量从10%(T1)增加到55%(T4),基质中土壤孔隙度、土壤含水量、有机质、全氮、全磷、全钾、无机氮、有效磷和有效钾9项指标呈现逐渐增加趋势;土壤容重呈现减少趋势,但是添加量从35%(T3)增加到45%(T4)时,两者在土壤孔隙度、土壤含水量、全磷、全钾、无机氮、有效磷和有效钾7项指标变化上差异不显著,并且pH值出现酸化现象。综合分析发现,虽然增加生物废弃物有利于改善石漠化土壤理化性质,但是并不是添加量越高越好,当添加量超过35%后土壤指标并不随着添加量的增加发生改善,甚至部分指标出现反向变化。

2.2 有机肥对人工种植的影响

为了进一步验证不同配方基质在植物种植中的效果,研究中选择研究区域多、分布广泛的紫苜蓿和黑麦草为种植材料通过盆栽实验开展对比分析,结果见表3。当基质生物废弃物添加量超过10%(T1),与对照组相比各指标具有显著差异,表明添加生物废弃物有助于提高实验材料在石漠化地区土壤中的萌发与生长。但是不同处理组之间存在差异,整体上随着添加量从10%(T1)增加到55%(T4),两个实验对象的发芽率、成活率、地上生物量、地下生物量4项指标呈现逐渐增加趋势,根冠比呈现减少趋势;但是添加量从35%(T3)增加到45%(T4)时,紫苜蓿各项指标在T3和T4处理组之间差异不显著,黑麦草也只在地上生物量和地下生物量2个指标上变化明显。综合分析发现,虽然增加生物废弃物有利于提高紫苜蓿和黑麦草在石漠化土壤中的萌发与生长,但并不是添加量越高越好,当添加量超过35%后紫苜蓿和黑麦草各项指标并不随着添加量的增加而发生改善。

2.3 有机肥对植被自然恢复的影响

为了排除特定植物的影响,研究中通过植物自然恢复实验进一步评估不同配方基质的效果,结果见表4。当基质生物废弃物添加量超过10%(T1)后,植株密度、地上生物量、地下生物量、根冠比4个指标显著优于对照组,但是在植物种类上没有显著差异,说明生物废弃物能促进自然条件下植物在石漠化土壤中的生长,但是不能改变植物种类的分布情况。同时发现不同处理组之间也存在差异,整体上随着添加量从10%(T1)增加到55%(T4),植株

表2 土壤理化性质比较
Table 2 Comparison of soil physicochemical properties

项目	T1	T2	T3	T4	CK
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.1±0.02 ^a	1.0±0.02 ^{ab}	0.9±0.01 ^b	0.8±0.01 ^c	1.2±0.02 ^a
土壤孔隙度/%	46.8±1.15 ^c	55.2±2.21 ^b	67.3±3.44 ^a	68.1±2.63 ^a	42.9±3.48 ^d
土壤含水量/%	8.2±0.51 ^c	9.7±0.67 ^b	12.4±0.82 ^a	11.1±0.44 ^a	7.5±0.53 ^d
pH值	7.2±0.01 ^a	7.2±0.03 ^a	7.1±0.02 ^a	6.3±0.02 ^b	7.5±0.03 ^a
有机质/(g·kg ⁻¹)	21.4±1.88 ^d	32.8±2.44 ^c	40.4±1.57 ^b	49.6±2.31 ^a	15.3±4.11 ^e
全氮/(g·kg ⁻¹)	2.1±0.12 ^d	3.2±0.09 ^c	3.9±0.14 ^b	4.7±0.26 ^a	1.4±0.15 ^e
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.26±0.03 ^c	0.48±0.05 ^b	0.69±0.02 ^a	0.72±0.03 ^a	0.14±0.02 ^d
全钾/(g·kg ⁻¹)	2.6±0.07 ^c	3.4±0.04 ^b	4.1±0.12 ^a	4.6±0.09 ^a	2.3±0.05 ^c
无机氮/(mg·kg ⁻¹)	234.6±5.62 ^c	301.2±8.44 ^b	354.1±6.47 ^a	358.3±4.65 ^a	205.5±9.21 ^d
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	12.4±1.35 ^c	19.9±2.42 ^b	26.9±2.99 ^a	28.1±3.43 ^a	11.2±2.44 ^c
有效钾/(mg·kg ⁻¹)	96.4±9.61 ^c	119.1±10.03 ^b	141.9±8.47 ^a	145.4±11.32 ^a	90.7±10.48 ^c

注:不同小写字母表示在0.05水平上相同指标各组之间的差异显著性(以下表格相同)。
Note: Different lowercase letters denote significant differences at the 0.05 level among groups for the same index (the same for the following tables).

表3 有机肥对人工种植紫花苜蓿和黑麦草的影响
Table 3 Effects of organic fertilizer on cultivated alfalfa and ryegrass

植物	生物指标	T1	T2	T3	T4	CK
紫花苜蓿	发芽率/%	76.2±3.66 ^c	81.4±4.15 ^b	89±2.48 ^a	90.4±3.66 ^a	75.5±3.79 ^c
	成活率/%	69.1±2.06 ^c	74.3±2.42 ^b	78.9±3.12 ^a	80.2±3.47 ^a	62.4±3.01 ^d
	地上生物量/(g·m ⁻²)	2 406.3±40.1 ^c	2 937.3±50.1 ^b	3 531.5±61.8 ^a	3 633.0±58.5 ^a	2 017.3±59.7 ^d
	地下生物量/(g·m ⁻²)	1 345.0±40.2 ^c	1 558.1±44.1 ^b	1 702.0±30.7 ^a	1 744.5±44.0 ^a	1 247.7±40.4 ^c
	根冠比/%	57.4±3.23 ^b	53.6±2.26 ^c	48.2±3.59 ^d	48.8±4.11 ^d	61.3±3.88 ^a
黑麦草	发芽率/%	66.5±2.011 ^b	67.9±2.47 ^{ab}	72.4±4.15 ^a	71.7±3.28 ^a	63.8±4.52 ^b
	成活率/%	59.3±3.89 ^{bc}	63.6±2.46 ^b	77.4±3.88 ^a	78.1±4.15 ^a	51.2±3.42 ^c
	地上生物量/(g·m ⁻²)	2 774.4±109.9 ^d	3 264.6±54.6 ^c	3 765.6±75.4 ^b	4 131.2±90.1 ^a	2 265.5±75.8 ^c
	地下生物量/(g·m ⁻²)	1 486.6±58.1 ^c	1 745.2±34.9 ^b	1 782.6±54.6 ^b	1 952.8±48.0 ^a	1 345.3±58.1 ^d
	根冠比/%	52.6±1.42 ^b	53.7±3.48 ^b	47.2±2.09 ^c	47.7±1.61 ^c	59.4±2.48 ^a

密度、地上生物量、地下生物量3项指标呈现逐渐增加趋势,根冠比呈现减少趋势,但是添加量从35%(T3)增加到45%(T4)时,在T3和T4处理组之间差异不显著。综合分析发现,虽然增加生物废弃物有利于自然条件下植物在石漠化土壤中的生长,但并不是添加量越高越好,当添加量超过35%后各项指标并不随着添加量的增加发生改变。

2.4 有机肥对不同坡度土壤理化性质的对比

已有研究表明,在石漠化地区坡度是增加土壤侵蚀作用的重要因素^[29],坡度增加土壤厚度减少、土壤含水量降低、地表径流增大、土壤有机物质和氮磷钾流失加剧^[30-31]。为了验证添加有机肥后在不同坡度下的效果,研究中选择前期实验中筛选的最优T3(生物基质含量35%)处理组作为土壤基质,选择在5个不同坡度展开验证。发现在不同坡度下,土壤理化性质改变量整体上随着坡度增加而减少,且坡度越大土壤各项指标变化量越小。同已有石漠化地区坡度与土壤理化性质变化研究结果趋势相一致,水土流失对土壤理化性质产生了负面效应,进一步验证土壤理化性质的恶化是石漠化恢复的重要限制因素^[32]。有机肥添加在T-20和T-30两种坡度下有10项指标变化量差异不显著,表明添加生物肥虽然在低坡度石漠化地区对土壤的改善效果较好,但是随着坡度增加,这种改善效应逐渐被稀释减弱,在坡

度低于15°下使用有机肥土壤质量改善效果更突出(表5)。

2.5 有机肥对不同坡度下植被自然恢复的影响

坡度不仅是石漠化地区水土流失的重要驱动因素^[33],同样与植被恢复过程也紧密相关,不同坡度下植被恢复效果差异较大^[34]。通过进一步实验发现,坡度增加对植被自然恢复也产生了影响,在添加生物基质后虽然对不同坡度下植被自然恢复具有一定促进作用,但是随着坡度增加,这种促进效益逐渐减弱,并在不同坡度下各项指标变化量出现显著差异,整体上在坡度低于15°时使用有机肥对植被恢复效果更好(表6)。

3 讨论

3.1 有机肥添加比例对石漠化土壤修复与植被恢复的影响

本研究通过盆栽实验系统评估了不同植物废弃物有机肥添加比例(10%、20%、35%、55%)对石漠化土壤理化性质及植被生长的影响。结果表明,所有添加处理均显著改善了土壤结构、养分含量及植物生长状况,但并非添加比例越高效果越好。当添加比例达到35%(T3)时,土壤容重显著降低,孔隙度、含水量、有机质及氮磷钾含量显著提升,同时紫花苜蓿与黑麦草的发芽率、成活率及生物量也达到

表4 有机肥对植被自然恢复的影响
Table 4 Effects of organic fertilizer on natural vegetation restoration

生物学指标	T1	T2	T3	T4	CK
植物种类/种	8±0.14 ^a	9±0.36 ^a	9±0.42 ^a	8±0.61 ^a	8±0.27 ^a
植株密度/(株·m ⁻²)	23.4±1.44 ^c	29.3±2.42 ^b	36.4±3.92 ^a	38.5±2.47 ^a	21.3±1.88 ^c
地上生物量/(g·m ⁻²)	3 125.2±35.47 ^{cd}	3 567.6±42.21 ^b	4 129.4±45.22 ^a	4 205.5±35.73 ^c	2 988.4±28.65 ^d
地下生物量/(g·m ⁻²)	2 156.7±46.44 ^c	2 211.5±35.48 ^{bc}	2 301.4±41.47 ^a	2 318.2±38.06 ^a	2 121.3±27.59 ^c
根冠比/%	69.3±3.48 ^{ab}	62.7±2.65 ^b	56.1±3.17 ^c	55.7±2.79 ^c	71.4±3.22 ^a

表5 有机肥对不同坡度土壤理化性质的影响

Table 5 Effects of organic fertilizer on soil physicochemical properties across different slope gradients

理化指标	T-5	T-10	T-15	T-20	T-30
土壤容重变化量/(g·cm ⁻³)	-0.2±0.02 ^b	-0.2±0.01 ^b	-0.1±0.03 ^a	-0.1±0.03 ^a	-0.1±0.01 ^a
总孔隙度变化量/%	15.8±1.01 ^a	16.4±1.37 ^a	13.1±1.89 ^b	9.4±2.01 ^c	8.6±1.77 ^c
土壤含水量变化量/%	4.9±0.87 ^a	4.8±0.54 ^a	4.1±0.36 ^b	3.3±0.62 ^c	2.9±0.23 ^c
pH值变化量	-0.1±0.02 ^a	-0.1±0.01 ^a	-0.1±0.02 ^a	-0.1±0.01 ^a	0.0±0.02 ^a
有机质变化量/(g·kg ⁻¹)	24.1±2.22 ^a	24.2±1.98 ^a	16.4±2.47 ^b	11.2±1.44 ^c	10.3±2.05 ^d
全氮变化量/(g·kg ⁻¹)	2.6±0.23 ^a	2.5±0.17 ^a	1.9±0.09 ^b	1.1±0.12 ^c	0.9±0.25 ^c
全磷变化量/(g·kg ⁻¹)	0.51±0.09 ^a	0.52±0.07 ^a	0.43±0.06 ^b	0.31±0.14 ^c	0.28±0.09 ^c
全钾变化量/(g·kg ⁻¹)	1.9±0.21 ^a	1.8±0.08 ^a	1.4±0.06 ^b	0.9±0.24 ^c	0.8±0.12 ^c
无机氮变化量/(mg·kg ⁻¹)	146.1±9.42 ^a	148.3±11.34 ^a	126.2±7.47 ^b	99.5±9.29 ^c	90.3±10.17 ^c
有效磷变化量/(mg·kg ⁻¹)	15.1±2.31 ^a	14.8±1.48 ^a	11.3±3.02 ^b	8.5±2.35 ^c	7.2±1.27 ^c
有效钾变化量/(mg·kg ⁻¹)	50.3±6.77 ^a	50.7±5.93 ^a	43.4±4.12 ^b	35.2±6.48 ^c	31.4±5.11 ^c

表6 有机肥对不同坡度下植被自然恢复的影响

Table 6 Effects of organic fertilizer on natural vegetation restoration across different slope gradients

指标	T-5	T-10	T-15	T-20	T-30
草本植物密度变化量/(株·m ⁻²)	15.3±2.11 ^a	15.1±1.83 ^a	12.4±1.42 ^b	10.3±1.67 ^c	9.6±1.04 ^c
地上生物量变化量/(g·m ⁻²)	1121.5±24.69 ^a	1097.2±31.05 ^a	955.8±26.37 ^b	827.4±16.48 ^c	790.4±23.56 ^d
地下生物量变化量/(g·m ⁻²)	180.2±31.43 ^a	174.5±26.71 ^a	152.3±19.38 ^b	118.4±25.05 ^c	102.1±22.47 ^c
根冠比变化/%	-15.1±2.31 ^c	-14.8±1.47 ^c	-13.1±2.92 ^b	-11.5±3.13 ^a	-10.9±0.99 ^a

最优。继续增加至55%(T4)后,大部分指标未出现显著提升,甚至部分指标如pH值出现下降趋势,这表明过量添加可能导致土壤酸化或养分失衡,反而不利于植物生长。这一结果与已有研究相符,即适量有机肥可改善土壤微环境,但过量可能引起盐分累积或微生物活性抑制^[6-7]。

此外,自然恢复实验进一步证实,35%的添加比例在促进植被自然定居方面效果最佳,表现为植株密度和生物量显著提高,但植物种类组成未发生显著变化。这说明有机肥主要通过改善立地条件促进现有植物种的生长,而非引入新物种。这一发现对于石漠化地区的植被恢复实践具有指导意义,即通过改善土壤基础条件可有效提升生态系统的自我修复能力。

3.2 坡度对有机肥修复效果的影响机制

大田实验结果表明,有机肥在坡度低于15°的坡地上修复效果更为显著。随着坡度增加(尤其是>15°),土壤容重、孔隙度、含水量及养分含量的改善幅度逐渐减弱,植被自然恢复的各项指标也呈现相同趋势。这与前人的研究结论一致,即坡度是影响石漠化地区水土流失和土壤退化的重要因素^[15,17]。在陡坡条件下,降雨径流加剧,土壤和养分更易流失,导致有机肥的持留时间和有效性降低,修复效果受限。

值得注意的是,即使在坡度较大的T-20和T-30处理中,有机肥仍对土壤和植被有一定改善作用,但效果不显著。这提示在高坡度石漠化区域,单纯依靠有机肥添加可能不足以实现快速修复,需结合工程措施(如梯田、拦沙坝等)或植被固土技术,形成“工程-生物-肥料”协同修复模式。

4 结 论

有机肥作为土壤生态修复的重要资源,能够有效减缓土壤酸化与次生盐渍化,改善土壤物理结构,提升有机质与无机养分供应,并优化土壤微生态。针对石漠化土壤的专项研究表明,当有机肥添加量为35%时,对土壤物理结构和养分含量具有显著改善作用,同时促进了植被的自然恢复。该效益在不同坡度条件下均得到体现,但在低于15°的坡地中效果尤为突出。

参考文献

- [1] 袁道先, 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.
Yuan D X. Global perspective on karst rocky desertification and the control strategies and experiences in China [J]. Pratacultural Science, 2008, 25(9): 19-25.
- [2] 白晓永, 张思蕊, 冉晨, 等. 我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38

- (12): 1903-1914.
- Bai X Y, Zhang S R, Ran C, et al. Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in Southwest China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1903-1914.
- [3] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 等. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6577-6585.
- He X J, Wang L, Ke B, et al. Progress on ecological conservation and restoration for China Karst [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [4] 薛建辉, 周之栋, 吴永波. 喀斯特石漠化山地退化土壤生态修复研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 135-145.
- Xue J H, Zhou Z D, Wu Y B. Research progresses on ecological remediation of the degraded soil in Karst rocky desertification mountainous areas [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(6): 135-145.
- [5] 我国岩溶地区石漠化状况公报[N]. 中国自然资源报, 2019-01-09 (005).
- Bulletin of rocky desertification status in karst areas of China [N]. China Natural Resources News, 2019-01-09(005).
- [6] 沈秉涛, 王妍, 刘云根, 等. 秸秆混掺对石漠化地区土壤水氮分布的影响[J]. 节水灌溉, 2023(6): 66-75, 82.
- Shen B T, Wang Y, Liu Y G, et al. Effect of straw blending on the distribution of water and nitrogen in soils of rocky desertification areas [J]. Water Saving Irrigation, 2023(6): 66-75, 82.
- [7] 陈盛, 黄达, 张力, 等. 秸秆还田对土壤理化性质及水肥状况影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 1-11.
- Chen S, Huang D, Zhang L, et al. The effects of straw incorporation on physicochemical properties of soil: a review [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 1-11.
- [8] 李银凤, 刘晓柱. 贵州省食用菌产业现状与可持续发展分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(16): 160-164.
- Li Y F, Liu X Z. The status and sustainable development of edible fungi industry in Guizhou [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(16): 160-164.
- [9] 郭旭, 胡灿, 卢小兵, 等. 贵州省刺梨产业高质量发展问题及对策研究[J]. 北方园艺, 2021(21): 143-151.
- Guo X, Hu C, Lu X B, et al. Study on problems and countermeasures of high-quality development of *Rosa roxburghii* industry in Guizhou Province [J]. Northern Horticulture, 2021(21): 143-151.
- [10] 代晓航, 魏超. 两种配方废弃菌棒堆肥中微生物多样性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 275-280, 321.
- Dai X H, Wei C. Microbial diversity in composting of two formulated waste sticks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 275-280, 321.
- [11] 文雄. 两种改性生物炭对黄壤Cd钝化效应研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- Wen X. Effect of two modified biochar on Cd passivation of yellow soil [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [12] 常肖锐. 利用废弃菌棒创制生物有机肥及其应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- Chang X R. Production of bio-organic fertilizer from waste mushroom sticks and its application research [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [13] 纪艺凝. 改性废弃木耳菌棒生物炭对土壤镉-铅污染的钝化效果及机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- Ji Y N. Passivation effects and mechanisms of modified biochar from waste auricularia auricula substrate on cadmium-lead contaminated soil [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [14] 陈彦君, 赵筱青, 普军伟, 等. 滇东南喀斯特山区石漠化程度与坡位因子的关联机制研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 379-391.
- Chen Y J, Zhao X Q, Pu J W, et al. Correlation mechanism between rocky desertification degrees and slope position factors in karst mountainous area of southeast Yunnan [J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(2): 379-391.
- [15] 王晨阳, 戴全厚, 甘贤民, 等. 基于放水冲刷草本形态变化对石漠化坡地产流影响研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 22-28.
- Wang C Y, Dai Q H, Gan X M, et al. Study on the impact of herbaceous morphological changes on runoff generation in karst rocky desertification slopes based on water erosion experiments [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 22-28.
- [16] 方乾, 赵龙山, 樊春华, 等. 石漠化区薄土层坡地雨水转化及土壤侵蚀影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 88-97.
- Fang Q, Zhao L S, Fan C H, et al. Influencing factors of rainwater transformation and soil erosion in thin soil hillslope of rock desertification regions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8): 88-97.
- [17] 陈金珂, 蒲俊兵, 李建鸿, 等. 典型岩溶流域不同坡度

- 等级下的土壤侵蚀与石漠化分布特征耦合分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 1-9.
- Chen J K, Pu J B, Li J H, et al. Coupling of rocky desertification distribution and soil erosion under different slope grades in a typical karst basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 1-9.
- [18] 李忠意, 杨希, 赵新儒, 等. 有机物料对喀斯特地区石灰土有效 N、Fe、Zn 含量的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7743-7750.
- Li Z Y, Yang X, Zhao X R, et al. Effect of organic materials on the content of available N, Fe and Zn in karst calcareous soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7743-7750.
- [19] 程东娟, 张亚丽. 土壤物理实验指导[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- Cheng D J, Zhang Y L. Soil physics experiment guide [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.
- [20] 李强, 文唤成, 胡彩荣. 土壤 pH 值的测定国际国内方法差异研究[J]. 土壤, 2007, 39(3): 488-491.
- Li Q, Wen H C, Hu C R. Difference between international and domestic methods in determining soil pH [J]. Soils, 2007, 39(3): 488-491.
- [21] 蔡兴, 王腾飞, 付小波, 等. 重铬酸钾容量法和高频红外碳硫仪法测定土壤中有机质含量的比较研究[J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 253-258.
- Cai X, Wang T F, Fu X B, et al. Comparative study on the determination of organic matter content in soil using potassium dichromate volumetric method and high-frequency infrared carbon sulfur analyzer method [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(7): 253-258.
- [22] 汪欣, 向兆, 李策, 等. 全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量方法的优化探索[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 438-440.
- Wang X, Xiang Z, Li C, et al. Exploration on optimization of the method for determination of total nitrogen content in soil by automatic Kjeldahl nitrogen analyzer [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(3): 438-440.
- [23] 陶曙华, 王洁敏, 苗雪雪, 等. 高氯酸-氢氟酸联合消解法测定土壤中全量氮磷钾[J]. 中国测试, 2022, 48(9): 78-83.
- Tao S H, Wang J M, Miao X X, et al. Determination the total amount of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil by perchloric acid-hydrofluoric acid digesting system [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(9): 78-83.
- [24] 张珮仪, 温腾, 张金波, 等. 扩散法测定土壤无机氮¹⁵N 丰度方法优化研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 948-957.
- Zhang P Y, Wen T, Zhang J B, et al. On improving the diffusion method for determination of $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ and $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ in soil extracts [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 948-957.
- [25] 李萍, 李明明, 王浩, 等. 改良钼锑抗比色法测定不同谷子材料组织磷含量[J]. 激光生物学报, 2020, 29(3): 237-244.
- Li P, Li M M, Wang H, et al. Determination of phosphorus content in different millet tissues by modified molybdenum-antimony anti-colorimetric method [J]. Acta Laser Biology Sinica, 2020, 29(3): 237-244.
- [26] 张乃凤. 土壤速效钾的测定: 醋酸铵浸提、火焰光度计测定法[J]. 土壤肥料, 1974(1): 33-35.
- Zhang N F. Determination of available potassium in soil: ammonium acetate leaching and flame photometer determination [J]. Soils and Fertilizers, 1974(1): 33-35.
- [27] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- Chinese Academy of Sciences, Flora of China Editorial Committee. Flora of China [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [28] 陈谦海. 贵州植物志: 第10卷[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2004.
- Chen Q H. Guizhou Zhi Wu Zhi [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 2004.
- [29] 邓大鹏, 刘琦, 卢耀如, 等. 贵州贞丰—关岭花江喀斯特石漠化地区土壤厚度的空间分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 197-206.
- Deng D P, Liu Q, Lu Y R, et al. Spatial distribution characteristics of soil thickness in the Zhenfeng-Guanling Huajiang karst rocky desertification area in Guizhou Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 197-206.
- [30] 王明明, 王世杰, 白晓永, 等. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6083-6097.
- Wang M M, Wang S J, Bai X Y, et al. Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [31] 王思砚, 苏维词, 范新瑞, 等. 喀斯特石漠化地区土壤含水量变化影响因素分析: 以贵州省普定县为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 171-175, 180.
- Wang S Y, Su W C, Fan X R, et al. Influence factors of soil moisture in karst rocky desertification region: a

- case study of Puding County, Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(3): 171-175, 180.
- [32] 熊华, 刘济明, 于飞, 等. 中度石漠化植被恢复自然障碍因子分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 255-260.
- Xiong H, Liu J M, Yu F, et al. Analysis of natural obstacles to vegetation restoration in moderate rocky desertification [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(16): 255-260.
- [33] 刘梁美子, 占车生, 胡实, 等. 黔桂喀斯特山区植被变化及其地形效应[J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2433-2446.
- Liu L M Z, Zhan C S, Hu S, et al. Vegetation change and its topographic effects in the karst mountainous areas of Guizhou and Guangxi [J]. Geographical Research, 2018, 37(12): 2433-2446.
- [34] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3425-3434.
- Tong X W, Wang K L, Yue Y M, et al. Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3425-3434.