

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.023.

高儒学, 戴全厚, 伍小涛, 等. 喀斯特区土石工程堆积体坡面植被恢复评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 45-52, 63.

Gao Ruxue, Dai Quanhong, Wu Xiaotao, et al. Assessment on Vegetation Restoration on the Slope Surface of Accumulation Body of Earth-rock Mixing Engineering in Karst area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 45-52, 63.

喀斯特区土石工程堆积体坡面植被恢复评价

高儒学^{1,3}, 戴全厚², 伍小涛^{1,3}, 魏志龙^{1,3}, 雷德雨¹

(1.中共贵州省委党校, 贵阳 550025;

2.贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 3.贵州生态文明研究协同创新中心, 贵阳 550025)

摘要: [目的]对喀斯特区土石工程堆积体坡面植被恢复进行评价, 以期对喀斯特区工程堆积体生态修复提供基础理论支撑, 并为生态文明建设提供参考依据。[方法]选取喀斯特区不同恢复年限(3, 5, 7 a)及不同植被类型(草地及草灌混交)的公路线性土石工程堆积体为研究对象, 运用主成分分析法, 选取石砾含量、土壤物理参数、土壤化学指标、水力学参数及植物群落指标构建评价指标体系, 分析了土石工程堆积体坡面植被恢复特征与各生态影响因子之间的互作关系。[结果](1) 喀斯特区土石工程堆积体坡面植被恢复过程是一个不断对资源和空间重新分配的过程, 随着恢复时间的增加, 坡面植被物种丰富度逐渐降低, 群落的优势种越来越明显。(2) 土壤有机质、自然含水率和饱和导水率是影响土石工程堆积体坡面植被恢复初期的主要因子, 而植被恢复又有助于改善其坡面土壤结构状况及养分含量, 其坡面植被恢复的前期重点是如何改善坡面土壤水力学特性。(3) 喀斯特区土石工程堆积体坡面先锋植被群落构建阶段的植被恢复模式可采取草灌混交, 后逐步考虑增加乔木, 同时适当搭配一定的深根植物。[结论]改善坡面土壤水力学特性有助于喀斯特区土石工程堆积体坡面初期植被恢复, 可采取先草灌混交、后逐步搭配深根乔木的植被恢复模式。

关键词: 喀斯特区; 土石工程堆积体; 植被恢复效应; 生态修复

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0045-08

Assessment on Vegetation Restoration on the Slope Surface of Accumulation Body of Earth-rock Mixing Engineering in Karst area

Gao Ruxue^{1,3}, Dai Quanhong², Wu Xiaotao^{1,3}, Wei Zhilong^{1,3}, Lei Deyu¹

(1. Party School of the Guizhou Provincial Committee, Guiyang 550025, China;

2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Collaborative Innovation

Center for Ecological Civilization Research of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to evaluate the vegetation restoration on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering in karst area, and to provide basic theoretical support for ecological restoration of accumulation in karst area and provide reference for ecological civilization construction. [Methods] The highway linear accumulation bodies of earth-rock mixing engineering were selected as the research object with different recovery years (3, 5, 7 a). Different vegetation types (grassland and grass irrigation) were selected as the research objects. The gravel content, soil physical parameters, soil chemical indicators, hydraulics parameters and plant community indexes were selected. The interaction between the vegetation restoration characteristics and the ecological influence factors was analyzed by using principal component analysis. [Results] (1) The process of vegetation restoration of the slope of the

收稿日期: 2023-04-10

修回日期: 2023-10-25

资助项目: 贵州省 2023 年度哲学社会科学规划青年课题 (23GZQN40); 2023 年度贵州省党校 (行政学院、讲师团) 系统课题 (2023SWDXKTQN03); 国家自然科学基金项目 (42167044)

第一作者: 高儒学 (1991—), 男, 贵州织金人, 博士, 讲师, 主要从事生态文明与区域发展研究。E-mail: 2235274067@qq.com

通信作者: 戴全厚 (1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

accumulation body of earth-rock mixing engineering was a process of continuous redistribution of resources and space. With the increase of recovery time, the species richness of the slope vegetation gradually decreased, and the dominant species of the community became more and more obvious. (2) Soil organic matter, natural moisture content and saturated water conductivity were the main factors affecting the initial stage of vegetation restoration on the slope surface of the accumulation body of earth-rock mixing engineering, but the vegetation restoration also helped to improve the slope soil structure and nutrient content. (3) The early focus of vegetation restoration on the slope surface was how to improve the hydrodynamics characteristics of slope soil. The vegetation recovery mode of the construction stage of the pioneer vegetation community of the accumulation body of earth-rock mixing engineering could be mixed, and trees should be added gradually, and some deep root plants should be matched appropriately together. [Conclusion] Improving the slope soil hydrodynamics characteristics is conducive to the initial vegetation recovery on the slope surface of the accumulation body of earth-rock mixing engineering in karst area. Meanwhile, the vegetation restoration mode can be adopted by mixing of grass and shrub, and then gradually with deep-rooted trees. The results can provide basic theoretical support for the ecological restoration of accumulation body of engineering in karst area.

Keywords: karst area; accumulation body of earth-rock mixing engineering; vegetation restoration effect; ecological restoration

2012年国务院出台的《关于进一步促进贵州经济社会又好又快发展的若干意见》(国发〔2012〕2号)对贵州具有划时代的里程碑意义,贵州由此迎来了后发赶超的“黄金十年”;随着贵州经济的高速发展,工程建设项目如雨后春笋般涌现,由此形成了大量的工程堆积体。

工程堆积体的形成不仅改变了区域的水文状况,还有可能出现严重的水土流失,进而导致水资源匮乏、土体结构不良、土壤养分不足等。国内外相关研究表明,植被恢复不仅可有效控制水土流失^[1-3],植物根系还能吸收一些特殊矿物元素^[4],进一步改善堆积体土壤特性^[5-6],从而逐步实现堆积体生态恢复重建^[7]。堆积体植被恢复存在诸多的限制因子,包括土壤质地、水分、养分、植被配置模式等^[8-9]。有研究指出,堆积体生态重建的关键在于改善土壤肥力状况、筛选适宜的植被复垦模式及控制植被密度^[10];堆积体植被恢复过程表现为由单一的物种组成结构逐渐发展为复杂的物种组成结构,并逐渐趋于动态的平衡^[7],而后优势种逐步显现^[11];植被恢复可改善堆积体的土壤容重、土壤持水量、孔隙度及土壤养分^[12-14];恢复煤矿区堆积体植被物种多样性可选择矮化木本植物物种(如灌木和半灌木)进行低密度种植^[15],菊科及禾本科的草本植物可作为滑坡堆积体植被恢复的先锋植物^[16]。随着演替年限的增加,滑坡堆积体坡面植被的恢复在很大程度上抑制了坡体养分的流失,利于土壤养分的保持^[17]。

整体来看,当前相关研究主要集中在不同类型堆

积体植被恢复限制因子、植物种类筛选、恢复模式搭配、恢复评价等几方面。而从植被恢复效应角度研究公路线性土石工程堆积体的相关报道鲜见,尤其是喀斯特区。因此,本文选取喀斯特区3种不同恢复年限及两种不同植被类型的公路线性土石工程堆积体为研究对象,运用主成分分析法,分析土石工程堆积体坡面植被恢复特征及其各生态影响因子之间的互作关系,进一步揭示土石工程堆积体坡面植被恢复效应。研究结果可为喀斯特区工程堆积体生态修复提供基础理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验场地位于贵州省贵阳市花溪区。花溪区位于东经106°27′—106°52′,北纬26°11′—26°34′;地处长江、珠江分水岭,苗岭山脉中段,海拔在999~1 656 m。花溪区地质构造为扬子准地台次级构造单元黔北台隆遵义断拱之贵阳复杂构造变形区,出露有泥盆纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪、第四纪红色黏土(老风化壳)等不同地质年代的岩层母质;地貌类型以山地和丘陵为主。年平均气温15.6℃,年降水量1 450.8 mm,年日照时数1 287.4 h,全年无霜期270 d,气候类型属于典型中亚热带湿润季风气候区,同时又具有高原型季风气候的特点,因此其具有气候温和、雨热同期、降水充沛、降水夏秋冬春少等特点^[18];植被类型为中亚热带常绿阔叶林植被带;地表

土壤有黄壤、石灰土、水稻土和紫色土等。

1.2 试验设计

1.2.1 植物样地设置与调查 对贵阳市花溪区及周边线性工程项目产生的工程堆积体进行详细调查,在了解清楚堆置方式、植被类型、植被恢复时间、植被恢复模式、土壤类型、坡度、坡向、坡长及石粒含量等基本情况的基础上,选取较具代表性的 3 个恢复时段(3,5,7 a),2 种植被覆盖类型(草地及草灌混交)的公路线性工程形成的依坡倾倒型堆积体,共计 6 座作为本研究的试验样地。调查区域为堆积体坡面,样方设

置采取五点法,在植被类型为草灌混交地的试验样地设置 5 个 10 m×10 m 的典型样方,在每个典型样方中设置 5 个 1 m×1 m 的草本层小样方;在植被类型为草地的试验样地设置 5 个 1 m×1 m 的草本层小样方;共计 15 个灌木层样方、90 个草本层小样方。调查指标包括灌木:种名、数量、多度、高度、地径、冠幅、盖度及生物量等。草本:种名、数量、多度、高度、盖度及生物量等。植物标本的鉴定参照《中国植物志》《中国植被》和《贵州植物志》等。各样地基本情况详见表 1。

表 1 研究样地基本概况
Table 1 Basic overview of the study plots

地理位置		海拔/ m	恢复 年限/a	植被类型 (覆盖度/%)	石砾 含量/%	坡向	坡长/ m	坡度/ (°)	优势生长 植被
经度(E)	纬度(N)								
106°36′23.84″	26°20′4.68″	1203.05	3	草地(46)	31.48	正南坡	18.3	31.5	狗牙根[Cynodon dactylon (L.) Pers.]、草木樨(Medicago falcata L.)、白车轴草(Trifolium repens L.)、飞蓬(Erigeron acer L.)
106°36′19.20″	26°20′4.47″	1194.80	3	草灌混交(58)	30.40	正南坡	19.6	33.0	草木樨(Medicago falcata L.)、狗牙根[Cynodon dactylon (L.) Pers.]、白车轴草(Trifolium repens L.)、飞蓬(Erigeron acer L.)、马桑(Coriaria nepalensis Wall.)
106°35′49.01″	26°34′50.45″	1294.10	5	草地(50)	33.72	北坡	15.0	33.0	白车轴草(Trifolium repens L.)、苎草[Arthraxon hispidus (Thunb.) Makino.]、野艾蒿(Artemisia lavandulaefolia DC.)
106°35′56.35″	26°34′55.74″	1282.49	5	草灌混交(55)	31.41	北坡	19.5	34.5	白车轴草(Trifolium repens L.)、苎草[Arthraxon hispidus (Thunb.) Makino.]、马桑(Coriaria nepalensis Wall.)
106°35′42.81″	26°27′52.56″	1209.36	7	草地(60)	32.26	西北坡	19.8	40.0	白车轴草(Trifolium repens L.)、飞蓬(Erigeron acer L.)
106°35′51.33″	26°27′58.51″	1207.99	7	草灌混交(62)	33.18	西北坡	15.3	37.5	白车轴草(Trifolium repens L.)、马桑(Coriaria nepalensis Wall.)

1.2.2 土壤样地设置及样品采集 采用五点法在堆积体坡面布置采样点,采样点位于植物样方内。首先,用镰刀及锄头等工具轻轻将地表枯落物去除,然后用 200 cm³的环刀分五层(A:0—10 cm,B:10—20 cm,C:20—40 cm,D:40—60 cm,E:60—80 cm)采集地表土壤原状土,用于测定土壤容重、含水率及饱和导水率,每个土层采集 3 个环刀样;另外用质封袋在各层采集 3 kg 左右的土石混合样,带回室内风干后测定石砾组成、土壤机械组成、团聚体及基本理化性质。

1.2.3 样品测定方法 堆积体石砾含量采用筛分法测定;容重采用环刀法测定、总孔隙度=(1-容重/比重)×100;土壤有机质采用重铬酸钾消解—硫酸亚铁铵滴定法测定、土壤水解氮的采用碱解—扩散吸收法测定、土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定、土壤速效钾采用乙酸铵浸提法—原子吸收分光光度计法测定;自然含水率采用烘干法(105 ℃)测定;饱和导水率采用恒定水头法测定;Shannon-Wiener = $-\sum P_i \ln P_i$ (P_i 为某一层级(乔木、灌木或草本)第 i 个物种的个体数占有物种个体数的比值);植物地上生物量采用平均标准木法进行测定。

1.3 主成分分析

1.3.1 评价指标体系 土石工程堆积体坡面植被恢复效应受到其构造、土壤特性、水文特性及植物特性的综合影响,各影响因子之间既是独立的,也是相互作用和相互影响的,评价指标应该选取具有代表性和便于度量的指标,应遵循系统性、典型性、科学性、可操作性、全面性及真实性原则。指标体系详见表 2。

1.3.2 评价方法与数据处理 各评价指标对植被恢复效应的影响程度或贡献率可以通过权重来反映,权重的确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法,其中客观赋权法包括相关系数法、主成分分析法、回归分析法和灰色关联度法等,为了避免人为因素的影响,本研究采用主成分分析法来确定评价指标权重^[19]。

数据分析通过 SPSS 分析软件完成,图表通过 Excel 2010 和 Origin 10.5 制作完成。

2 结果与分析

2.1 土石工程堆积体坡面植被群落特征

2.1.1 植被恢复多样性特征 从表 3 可以看出,工程堆积体的 Margalef 指数无论哪个恢复年限的堆积

体均为草地最大,恢复 7 a 的草灌混交地该指数最小,反映出草地的物种相较于草灌混交地而言更为丰富;且相同植被覆盖类型堆积体随着恢复时间的增加,Margalef 指数逐渐减小,即物种丰富度逐渐降低。Simpson 指数是反映群落优势度的指标,群落的优势种越明显,其值越小,可以看出对于恢复 3 a 和 5 a 的堆积体而言,Simpson 指数草灌混交地均小于草地,恢复 7 a 的堆积体 Simpson 指数最小的为草灌混交地,表明随着植物群落的演替和恢复时间的增加,群落的优势种越来越明显。Shannon-Wiener 指数表现为 3 个恢复时段下均为草地最大,表明草地物种数量较多且分布均匀;草地的 Shannon-Wiener 指数随着恢复年限的增加逐渐减小。Pielou 指数表现为草地最大,反映出在堆积体植被群落演替初期植被的空间分布较为均匀;另外,同一植被覆盖类型的堆积体 Pielou 指数随着恢复年限的增加逐渐减小,表明随着恢复年限的增加,植被的空间分布随机性越明显。

2.1.2 地上生物量特征 土石工程堆积体坡面植被地上生物量如表 4 所示。各个恢复年限的工程堆积体植物地上生物量均表现为草灌混交地明显大于草地;随着恢复时间的增加地上生物量逐渐增大,其中恢复 7 a 的地上生物量显著大于恢复 3 a 的,恢复 7 a

与恢复 5 a 之间差异不显著,恢复 5 a 与恢复 3 a 之间差异亦不显著。同一植被覆盖类型的堆积体地上生物量均随着恢复时间的增加逐渐增大;各恢复时段内植被覆盖类型为草地的地上生物量最小。同一植被覆盖类型的堆积体,随着恢复年限的增加,Shannon-Wiener 指数均逐渐减小,地上生物量均逐渐增大,物种优势种逐渐凸显,反映出堆积体植被恢复过程是一个不断对资源和空间重新分配的过程。

表 2 土石工程堆积体坡面植被恢复效应指标体系

Table 2 Index system of vegetation restoration effect on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

目标层	项目层	指标层
土石工程堆积体坡面植被恢复效应	石砾含量指标	石砾含量(D_1)
		总孔隙度(D_2)
	土壤物理指标	土壤团聚体破坏率($>0.25\text{ mm}$)(D_3)
		有机质(D_4)
		水解氮(D_5)
	土壤化学指标	有效磷(D_6)
		速效钾(D_7)
		自然含水率(D_8)
	水力学参数	饱和导水率(D_9)
		Simpson 指数(D_{10})
	植物群落指标	地上生物量(D_{11})

表 3 土石工程堆积体坡面植被恢复物种多样性指数

Table 3 Species diversity index of vegetation restoration on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

恢复年限/a	植被覆盖类型	Margalef 指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数
3	草地	4.908±0.63A	0.935±0.09A	2.930±0.05A	0.910±0.03A
	草灌混交	3.079±0.80A	0.927±0.15A	2.777±0.20A	0.912±0.17A
5	草地	4.668±0.81A	0.898±0.14A	2.656±0.20B	0.825±0.04AB
	草灌混交	2.468±0.39A	0.863±0.04A	2.280±0.32AB	0.805±0.05A
7	草地	4.642±0.92A	0.849±0.13A	2.468±0.25B	0.767±0.05B
	草灌混交	2.301±0.42A	0.828±0.11A	2.051±0.22B	0.740±0.04A

注:表中不同大写字母代表同一植被覆盖类型下不同恢复年限内指标差异显著($p<0.05$),下同。

表 4 工程堆积体坡面植被恢复地上生物量特征

Table 4 The aboveground biomass characteristics of vegetation restoration on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

恢复年限/a	植被覆盖类型	植物地上生物量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
3	草地	3.30±0.60B
	草灌混交	13.10±2.10B
5	草地	4.57±0.93AB
	草灌混交	19.77±3.45AB
7	草地	4.97±0.85A
	草灌混交	23.10±3.85A

2.2 土石工程堆积体坡面土壤特性

2.2.1 土壤物理特性 土石工程堆积体坡面土壤总

孔隙度和团聚体稳定性特征见图 1 及图 2 所示。可以看出,土石工程堆积体孔隙整体较为发育,总孔隙度总体表现为随恢复时间的增加逐渐减小;恢复时段为 3 a 的堆积体,表层总孔隙度均小于底层;可能是堆积体形成后的沉降作用所致。植被覆盖类型为草灌混交的堆积体土壤团聚体破坏率均大于草地,且随着恢复时间的增加逐渐增大,反映出植被恢复对堆积体土壤结构状况有一定的改善作用。

2.2.2 土壤养分特征 土石工程堆积体土壤养分特征如图 3 所示。植物措施对堆积体速效养分有一定的改善作用,但是效果有一定的差异;恢复时间对堆积体速效养分无明显影响,主要是由于土壤中的碱解氮含量易受土壤水热条件和生物活动的影响而发生

变化,而植物对速效磷及速效钾的吸收利用对其含量会产生影响;同时,生物和环境因素也会对速效钾含量造成影响。整体来看,土壤有机质含量表现为随着土层加深逐渐减小的趋势,但是大部分差异并不显著。对于 3 个恢复时段的工程堆积体而言,草灌混交地的土壤有机质含量均大于草地,因此,恢复前期,灌草搭配有助于提高工程堆积体土壤有机质含量。

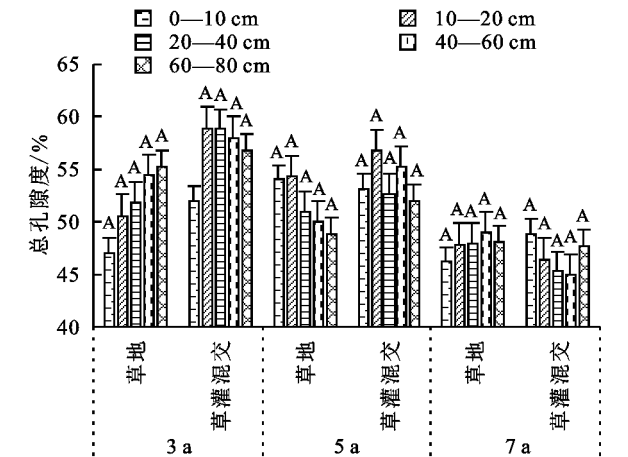


图 1 工程堆积体土壤总孔隙度特征

Fig. 1 Characteristics of the total porosity of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

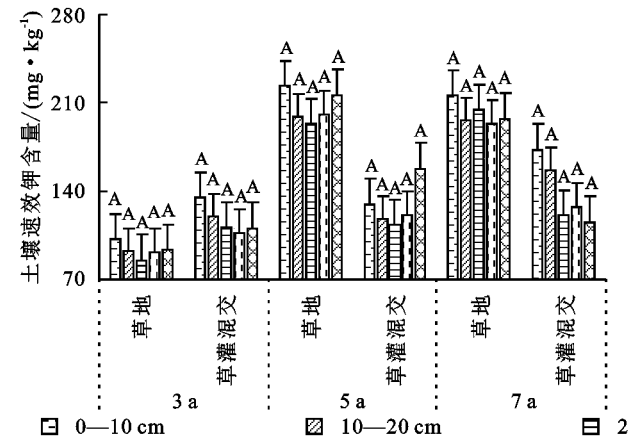
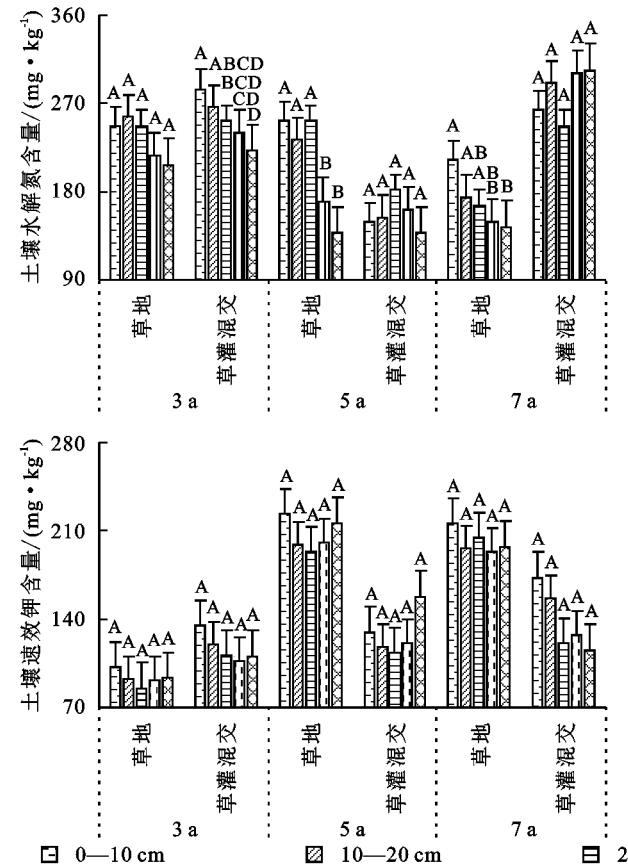


图 3 工程堆积体土壤养分特征

Fig. 3 Soil nutrient characteristics of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

2.3 土石工程堆积体坡面植被恢复评价

对土石工程堆积体坡面植被恢复效应进行主成

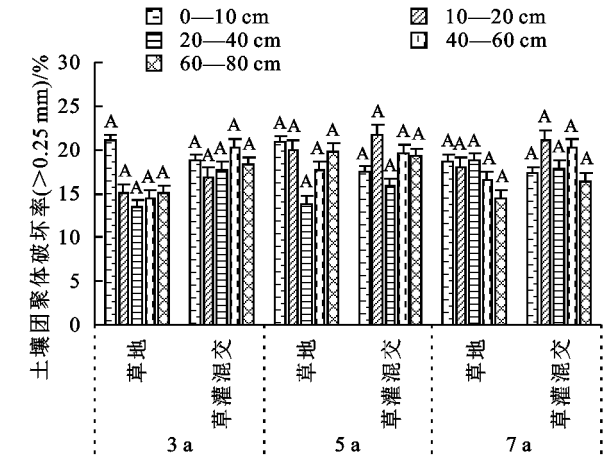
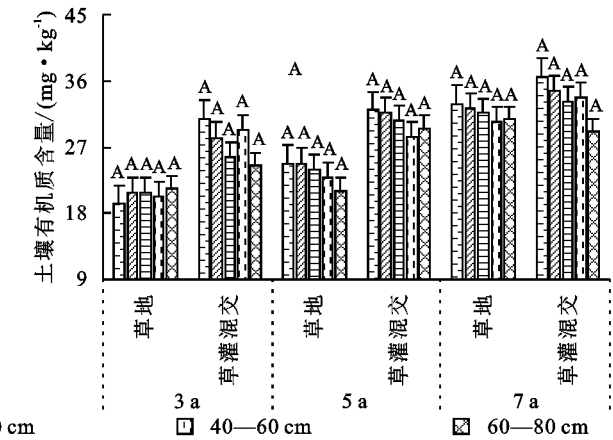
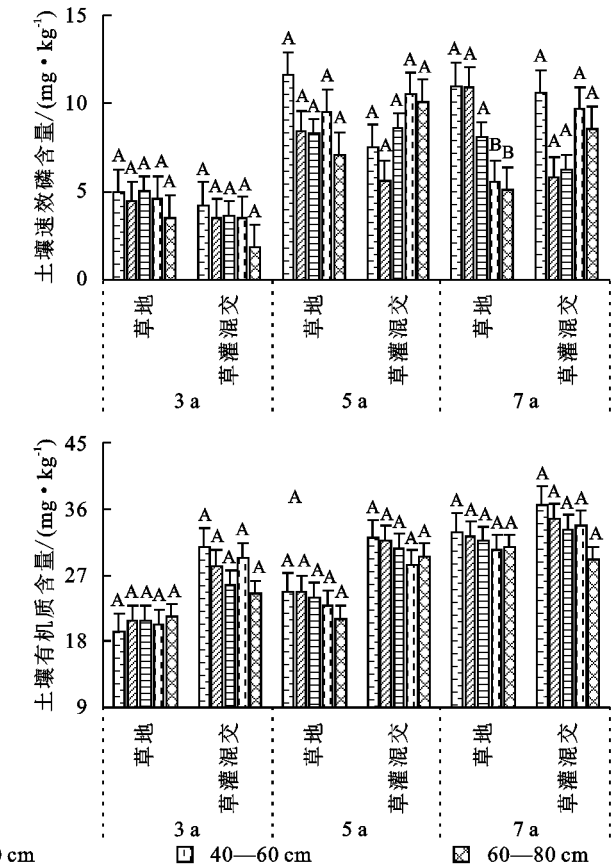


图 2 工程堆积体土壤团聚体稳定性特征

Fig. 2 Stability characteristics of the soil aggregates of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

2.2.3 水力学特性 土石工程堆积体土壤自然含水率和土壤饱和导水率特征见图 4—5。

可以看出,随着恢复时间的增加,土壤自然含水率表现为逐渐增大,尤其是植被覆盖类型为草灌混交的土石工程堆积体规律性较为明显;而饱和导水率基本呈现减小的趋势,这有可能是由于本文研究的堆积体最长堆存年限仅为 7 a,因此其坡面土粒沉降作用对土壤饱和导水率影响较大。



分析,结果如图 6 所示。对于恢复三年的堆积体而言,第 1 主成分(PC1)方差贡献率为 62.3%,第 2 主

成分为 15.0%。土壤有机质、自然含水率、饱和导水率是影响土石工程堆积体坡面植被恢复的关键因子,地上生物量主要受到土壤团聚体、总孔隙度、土壤有机质的影响,而 Simpson 指数主要受到饱和导水率、水解氮及自然含水率的影响。对于恢复五年的堆积体而言,第 1 主成分(PC1)方差贡献率为 61.4%,第 2 主成分为 22.3%。土壤有机质、饱和导水率、自然含水率是影响土石工程堆积体坡面植被恢复的关键因子,地上生物量主要受到总孔隙度、速效钾、土壤有机质、土壤团聚体的影响,而 Simpson 指数主要受到饱和导水率及自然含水率的影响。对于恢复七年的堆积体而言,第 1 主成分(PC1)方差贡献率为 60.8%,第 2 主成分为 22.3%。土壤有机质、饱和导水率、自然含水率是影响土石工程堆积体坡面植被恢复的关键因子,地上生物量主要受到砾石含量、有效磷及水解氮的影响,而 Simpson 指数主要受到自然含水率、有机质及饱和导水率的影响。

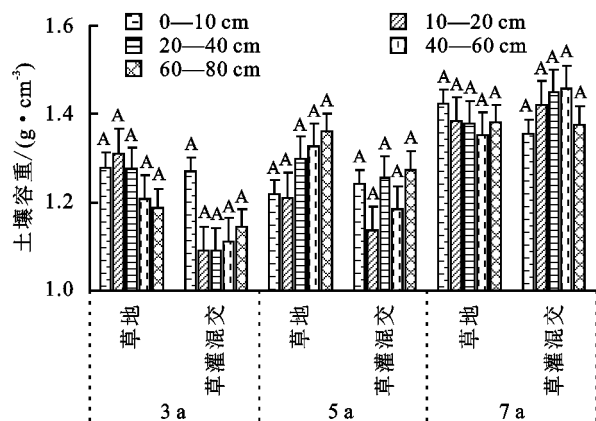


图 4 工程堆积体土壤自然含水率特征

Fig. 4 Soil natural moisture content characteristics of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

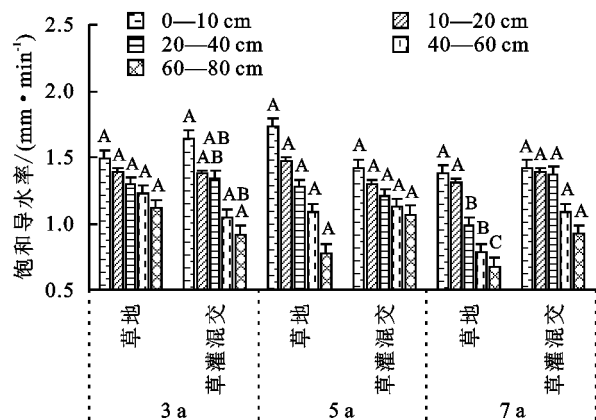


图 5 工程堆积体土壤饱和导水率特征

Fig. 5 Characteristics of soil saturated water conductivity of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

整体来看,在土石工程堆积体坡面植被恢复的前七年时段内,土壤有机质、自然含水率和饱和导水率是影响坡面植被恢复的共性因子。前五年内,堆积体

坡面植被地上生物量主要受到土壤团聚体、总孔隙度的共性影响,而后有效磷及水解氮等养分指标逐渐产生影响。另一方面,群落的优势种在前七年时段内均主要受自然含水率及饱和导水率的影响,表明土石工程堆积体坡面植被恢复的前期重点是如何改善其坡面土壤水力学特性。

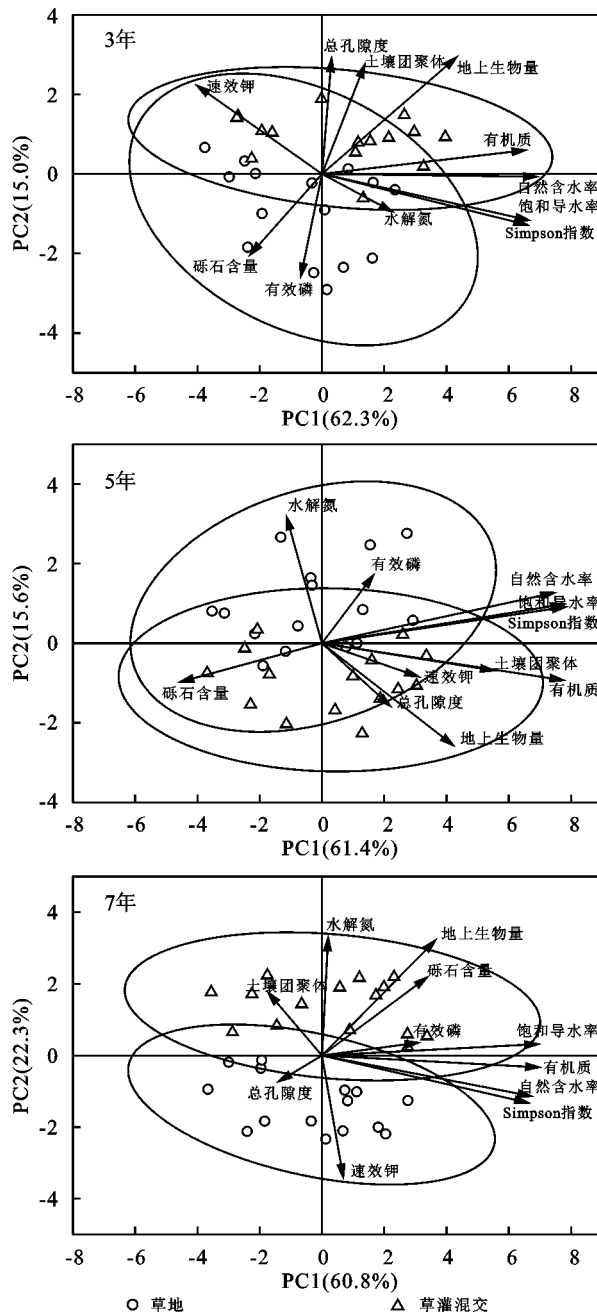


图 6 土石工程堆积体坡面植被恢复的主成分(PCA)分析

Fig. 6 Analysis of the principal components (PCA) of vegetation restoration on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering

3 讨论

工程堆积体坡面植被恢复是其坡面生态系统构建的基础。植物群落的恢复演替是植被对土壤不断

适应与改造的过程,同时也是不同物种在土壤水分和养分等资源下相互竞争和替代的过程^[20]。本研究表明,随着恢复时间的增加,土石工程堆积体坡面植被高度、生物量等逐渐增大,植被恢复逐渐得到改善,Żońierz等^[11]对煤矿区堆积体植被恢复研究亦得出类似的结论。这主要是由于堆积体的形成过程严重破坏了原有生态环境,改变了土壤水文状况和养分特征,但是植被恢复的水分及营养物质来源于土壤,因此,在堆积体形成初期,其坡面植被主要以一年生草本为主,主要由于一年生的草本植物种子多为R型策略的物种,能够生产多而小、易扩散的种子,且一年生植物具有较强的适生性,能适应堆积体的贫瘠条件,为堆积体土壤种子库提供种源^[21];但是随着恢复时间的增加,堆积体内部结构逐渐发生变化,尤其是沉降作用对其影响较大,一定程度上可能增加了其保水保肥性能,因此有利于植被的生长;姚一文^[13]及彭东海^[22]等研究均表明植被的恢复不断改善着堆积体土壤理化性质,而土壤理化性质的改善又促进了植物群落的发育和恢复发展;李宁宁等^[17]研究也表明黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体植被盖度、地上地下生物量、枯落物蓄积量、土壤有机质和全氮含量均随着植被演替年限的增加呈增加趋势。而土壤中养分的分布以及营养物质的配置受到植被的根系形态与发育状况的影响^[23],植物根系可以改变土壤的力学以及水文特征进而促进土壤团聚体的形成和稳定^[24],植被恢复能促进土壤结构和肥力的恢复,继而促进整个生态系统结构和功能的恢复^[25];因此,在堆积体植被恢复初期,可考虑配套一定的深根植物,进一步改良堆积体土壤特性。

土石工程堆积体坡面植被恢复受到众多因素的影响。堆积体集水状况因地形条件不同而异,这会进一步影响到堆积体坡面含水状况,进而对其坡面植被恢复产生影响;堆积体环境状况不同,其植被种源存在差异,对其植被恢复亦存在很大影响;堆积体表层覆土厚度及覆土来源可直接影响到其植被恢复状况,因为表层覆土能为植被恢复初期草本植物生长提供最基本的条件,覆土来源关系到土壤的养分质量问题,也能直接影响到植被恢复。另一方面,堆积体植被恢复还受到其治理措施的影响;不合理的治理措施会增加堆积体坡面水土流失^[26],致使堆积体坡面养分流失,植被难以恢复或恢复较差。人工恢复应注重植被搭配模式,结合堆积体土石比、养分特征及水文状况等基本特性进行选择;有研究表明灌木林对堆积体坡面土壤侵蚀综合防治效果最佳^[27],本研究结果表明在各个恢复时段内,堆积体植被类型为草灌混交的植被恢复效应均较好,因此,土石工程堆积体先锋

植被群落构建阶段可选择草灌混交这一搭配模式作为其植被恢复模式,后逐步考虑增加乔木。

4 结论

(1) 随着恢复时间的增加,土石工程堆积体坡面植被物种丰富度逐渐降低,植被的空间分布随机性越明显;随着植物群落的演替和恢复时间的增加,群落的优势种越来越明显;土石工程堆积体坡面植被恢复过程是一个不断对资源和空间重新分配的过程。

(2) 土石工程堆积体坡面植被恢复对土壤结构状况及养分含量有一定的改善作用,土壤有机质、自然含水率和饱和导水率是影响土石工程堆积体坡面植被恢复初期的主要因子,其坡面植被恢复的前期重点是如何改善其坡面土壤水力学特性。

(3) 可选用草灌混交这一搭配模式作为土石工程堆积体坡面先锋植被群落构建阶段植被恢复模式,后逐步考虑增加乔木,同时适当搭配一定的深根植物。

参考文献(References):

- [1] 漆良华,张旭东.湘西北小流域植被恢复综合效应评价[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2):71-77.
Qi L H, Zhang X D. Integrative effect evaluations on vegetation restoration patterns based on soil vegetation system in watershed, northwest Hunan Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2013, 37(2): 71-77.
- [2] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: 126714.
- [3] Scotton M, Andreatta D. Anti-erosion rehabilitation: Effects of revegetation method and site traits on introduced and native plant cover and richness[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145915.
- [4] Cerqueira B, Vega F A, Silva L F O, et al. Effects of vegetation on chemical and mineralogical characteristics of soils developed on a decantation bank from a copper mine[J]. Science of the Total Environment, 2012, 421: 220-229.
- [5] Vangronsveld J, Sterckx J, Van Assche F, et al. Rehabilitation studies on an old non-ferrous waste dumping ground: Effects of revegetation and metal immobilization by beringite[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1995, 52(1/2): 221-229.
- [6] 笄玉亭,张华明,邓小群,等.植被恢复对高速公路工程堆积体土壤性质的影响[J].水土保持应用技术, 2020(4): 1-3.
Zan Y T, Zhang H M, Deng X Q, et al. Influence of vegetation restoration on soil properties of expressway engineering accumulation body[J]. Technology of Soil

- and Water Conservation, 2020(4):1-3.
- [7] 郝蓉,白中科,赵景逵,等.黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J].生态学报,2003,23(8):1470-1476.
- Hao R, Bai Z K, Zhao J K, et al. Vegetation dynamics during plant rehabilitation in degraded mined land of large opencast coal mine within loess area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(8):1470-1476.
- [8] 魏忠义,王秋兵.大型煤矸石山植被重建的土壤限制性因子分析[J].水土保持研究,2009,16(1):179-182.
- Wei Z Y, Wang Q B. Research on limited factors of reclaimed soil in the large coal wastes pile in Fushun west opencast coal mine[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009,16(1):179-182.
- [9] 王改玲,白中科.安太堡露天煤矿排土场植被恢复的主要限制因子及对策[J].水土保持研究,2002,9(1):38-40.
- Wang G L, Bai Z K. Main limiting factors for re-vegetation and measures of dumping site in antaibao opencast mine[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002,9(1):38-40.
- [10] 谷裕,王金满,王洪丹,等.黄土区露天煤矿排土场植被恢复的水肥响应[J].生态学杂志,2016,35(12):3233-3241.
- Gu Y, Wang J M, Wang H D, et al. Response of soil water and soil fertility to vegetation restoration in an opencast coal-mine in a loess area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(12):3233-3241.
- [11] Żolnierz L, Weber J, Gilewska M, et al. The spontaneous development of understory vegetation on reclaimed and afforested post-mine excavation filled with fly ash[J]. Catena, 2016,136:84-90.
- [12] 王丽艳,韩有志,张成梁,等.不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J].生态学报,2011,31(21):6429-6441.
- Wang L Y, Han Y Z, Zhang C L, et al. Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(21):6429-6441.
- [13] 姚一文,戴全厚,林赓桓,等.土石混合工程堆积体土壤理化性状与物种多样性的响应[J].水土保持研究,2021,28(2):41-48.
- Yao Y W, Dai Q H, Lin Z H, et al. Response of soil physical and chemical properties and species diversity to accumulation body of earth-rock mixing engineering [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):41-48.
- [14] 陆永欢,戴全厚,姚一文,等.工程堆积体植被类型对土壤有机碳组分特征及影响因素研究[J].水土保持学报,2022,36(6):316-322.
- Lu Y H, Dai Q H, Yao Y W, et al. Effects of vegetation types on soil organic carbon components characteristics and its influencing factors in engineering deposits[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(6):316-322.
- [15] Zhao Y, Zhang P, Hu Y G, et al. Effects of re-vegetation on herbaceous species composition and biological soil crusts development in a coal mine dumping site[J]. Environmental Management, 2016,57(2):298-307.
- [16] 崔艳红,史常青,孙丽文,等.5·12地震后北川次生灾害迹地植被的自然恢复与更新[J].浙江农林大学学报,2018,35(2):219-226.
- Cui Y H, Shi C Q, Sun L W, et al. Vegetation restoration and regeneration of the secondary disaster area in Beichuan after the May 12,2008 earthquake[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018,35(2):219-226.
- [17] 李宁宁,张光辉,王浩,等.黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体植被演替特征及土壤养分响应[J].山地学报,2018,36(5):669-678.
- Li N N, Zhang G H, Wang H, et al. Properties of vegetation succession on shallow landslide deposits in loess hilly and Gully Region and the related response of soil nutrient [J]. Mountain Research, 2018,36(5):669-678.
- [18] 牟叶果,陈清霞,李龙波,等.贵阳市花溪区表层土壤硒空间分异特征及其影响因素[J].环境科学学报,2022,42(8):415-424.
- Mou Y G, Chen Q X, Li L B, et al. Spatial differentiation and influencing factors of surface soil selenium in Huaxi District, Guiyang[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(8):415-424.
- [19] 牛星.伊敏露天煤矿废弃地植被恢复及其效果研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- Niu X. Studies on revegetation and restoration effects of Yimin opencast mining wasteland [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [20] 王玉红.喀斯特典型工程堆积体土壤侵蚀特征研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- Wang Y H. Characteristics of soil erosion in typical engineering accumulation in karst region[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [21] 谢伟,钱晓彤,王东丽,等.鄂尔多斯矿区排土场苜蓿恢复地土壤种子库的演变特征[J].中国水土保持科学,2020,18(4):29-37.
- Xie W, Qian X T, Wang D L, et al. Evolution characteristics of soil seed bank during *Medicago sativa* restoration in the dump of a mining area in Ordos, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(4):29-37.
- [22] 彭东海,侯晓龙,何宗明,等.金尾矿废弃地不同植被恢复阶段物种多样性与土壤特性的演变[J].水土保持学报,2016,30(1):159-164.
- Peng D H, Hou X L, He Z M, et al. Evolution of species diversity and soil characteristics at different stages of vegetation restoration in gold tailings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(1):159-164.

- amendments using X-ray computed tomography [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 695.
- [19] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374-382.
- [20] Su Z G, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin, China [J]. Pedosphere, 2010, 20(6): 736-746.
- [21] 刘国顺, 陈江华. 中国烤烟灌溉学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 36-46.
- Liu G S, Chen J H. China tobacco irrigation science [M]. Beijing: Science Press, 2012: 36-46.
- [22] 刘国顺. 烟草栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 212-220.
- Liu G S. Tobacco Cultivation [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 212-220.
- [23] 白岗栓, 耿伟, 何登峰. 保水剂施用量对秦巴山区土壤特性及烤烟生长的影响 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2019, 45(3): 343-354.
- Bai G S, Geng W, He D F. Effects of super absorbent polymer with different application rates on soil characteristics and flue-cured tobacco growth in Qinba Mountain Area [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2019, 45(3): 343-354.
- [24] 庄文化, 冯浩, 吴普特. 高分子保水剂农业应用研究进展 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 265-270.
- Zhuang W H, Feng H, Wu P T. Development of super absorbent polymer and its application in agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(6): 265-270.
- [25] 王宗恒, 马志远, 苏兆亮, 等. 不同保水剂施用量对烟草生长品质的影响 [J]. 现代农业科技, 2019(20): 11-12, 14.
- Wang Z H, Ma Z Y, Su Z L, et al. Effects of different super absorbent polymers residue levels on growth quality of tobacco [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(20): 11-12, 14.
- [26] 范富, 张庆国, 侯迷红, 等. 保水剂对不同质地土壤保肥性影响的研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 115-120.
- Fan F, Zhang Q G, Hou M H, et al. Effects of super absorbent polymer on nutrient retaining property in soils with different textures [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 115-120.
- [27] 李霞, 张丹, 青会, 等. 保水剂结合豌豆翻压对季节性干旱区新垦植烟土壤的改良效应及烤烟品质的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 288-293, 300.
- Li X, Zhang D, Qing H, et al. Impact of water retention agent combined with *Pisum sativum* linn application on improvement of newly cultivated soil and flue-cured tobacco quality in seasonal drought area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 288-293, 300.
- [28] 程辉斗, 温永琴, 陆富, 等. 土壤供钾水平与云南烤烟含钾量关系的研究 [J]. 烟草科技, 2000, 33(3): 41-43.
- Cheng H D, Wen Y Q, Lu F, et al. Research on the relationship between soil potassium supply level and potassium content in Yunnan tobacco [J]. Tobacco Science & Technology, 2000, 33(3): 41-43.
- [29] 许自成, 黎妍妍, 肖汉乾, 等. 湘南烟区生态因素与烤烟质量的综合评价 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 226-234.
- Xu Z C, Li Y Y, Xiao H Q, et al. Evaluation of ecological factors and flue-cured tobacco quality in tobacco-growing areas in southern Hunan, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 226-234.

(上接第 52 页)

- [23] Mou P, Mitchell R J, Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment [J]. The Journal of Applied Ecology, 1997, 34(3): 645-656.
- [24] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- Liu J Y, Zhou Z C, Su X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [25] Parrotta J A. The role of plantation forests in rehabilitating degraded tropical ecosystems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1992, 41(2): 115-133.
- [26] 郭建英, 何京丽, 李锦荣, 等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 296-303.
- Guo J Y, He J L, Li J R, et al. Effects of different measures on water erosion control of dump slope at opencast coal mine in typical steppe [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 296-303.
- [27] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area [J]. Catena, 2015, 128: 44-53.