

# 土石混合工程堆积体土壤理化性状与物种多样性的响应

姚一文<sup>1</sup>, 戴全厚<sup>1</sup>, 林桢桓<sup>2</sup>, 高儒学<sup>1</sup>, 严友进<sup>1</sup>, 伏文兵<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 华力创通工程咨询有限公司, 贵阳 550000)

**摘 要:**为了探讨喀斯特区土石混合工程堆积体植被恢复过程中物种多样性与土壤理化性状的互作关系,以不同恢复时段恢复时间(1,2,4,6 a)依坡倾倒型工程堆积体为研究对象,采用“空间代替时间”的研究方法,研究了不同恢复时间土壤理化性状和植物物种多样性的特征及相互之间的响应机制。结果表明:随恢复时间增加,土石混合堆积体台面和坡面植物种类呈现先上升后下降的趋势,且坡面植物种类(99 种)多于台面(74 种),植物群落逐渐由草本向草灌混交转变。台面和坡面的物种丰富度、多样性、优势度和均匀度指数随恢复年限恢复时间增加均表现为先增加后减小。随植被恢复时间增加,土壤理化性质得到不同程度的改善,其中土壤全氮(TN),全磷(TK),速效磷(AP)和有机质(SOM)含量显著增加,土壤养分含量呈上升趋势,坡面土壤理化性质优于台面。冗余分析(RDA)表明,土壤含水量(MC),容重(BD),TN,TK 和速效钾(AK)在不同恢复时段恢复时间内对植物物种多样性有较大影响;钾素在较短的恢复时间内对物种多样性影响较大,氮素随恢复时间延长影响逐渐增加,MC 和 BD 对台面物种多样性的影响大于坡面,而土壤养分因子对坡面影响较大。因此对土石混合堆积体进行植被恢复时,恢复前期采取添加覆盖物等措施减少水分流失的同时施用钾肥尽量保证植物存活,植物物种种类上选择既能保水保土又能与土壤微生物相互作用补充土壤中营养元素的豆科类植物。

**关键词:**工程堆积体;物种多样性;土壤理化性质;喀斯特区

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0041-08

## Response of Soil Physical and Chemical Properties and Species Diversity to Accumulation Body of Earth-rock Mixing Engineering

YAO Yiwen<sup>1</sup>, DAI Quanhong<sup>1</sup>, LIN Zhihuan<sup>2</sup>, GAO Ruxue<sup>1</sup>, YAN Youjin<sup>1</sup>, FU Wenbing<sup>2</sup>

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2.Guizhou Hualichuangtong Engineering Consultants Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

**Abstract:** To explore the interaction between species diversity and soil physical and chemical properties in the process of vegetation restoration in the karst area soil-rock mixing project, taking the recovery time of different recovery periods (1, 2, 4, 6 years) according to the slope dumping engineering accumulation body as the research object, using the ‘space instead of time’ research method, we studied the characteristics and mutual response mechanisms of soil physical and chemical properties and plant species diversity at different recovery times. The results showed that: with the increase of recovery time, the plant species on the table and slope of the soil-rock mixed deposits showed an upward trend and then decreased, and the plant species (99) on the slope were more than the table (74), and the plant community gradually changed from herbs to mixed grass and shrub; the species richness, diversity, dominance, and evenness index of the table and slope all increased first and then decreased with the increase of recovery time; with the increase of vegetation recovery time, the soil physical and chemical properties improved to varying degree, among which the contents of TN, TK, AP and SOM increased significantly, and the soil nutrient content showed an upward trend; redundancy analysis showed that MC, BD, TN, TK and AK had a greater impact on plant species diversity within different recovery periods; potassium had a greater impact on species diversity within a shorter recovery time; the effect of nitrogen gradually increased with the recovery time, MC and BD had more impact on the tabletop

收稿日期:2020-04-16

修回日期:2020-05-12

资助项目:国家重点研发计划课题项目(2016YFC0502604);贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007);国家自然科学基金(41671275,41461057)

第一作者:姚一文(1995—),男(侗族),贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为生态恢复与重建。E-mail:2101029397@qq.com

通信作者:戴全厚(1969—),男,陕西长武人,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

species diversity than the slope, and soil nutrient factors had a greater impact on the slope. Therefore, when carrying out vegetation restoration on the mixed rock-soil accumulation body, measures such as adding mulch in the early stage of restoration to reduce water loss and applying K fertilizer as far as possible to ensure the survival of plants should be taken. The species of plant species are leguminous plants that can retain water and soil and interact with soil microorganisms to supplement nutrients in the soil.

**Keywords:** engineering accumulation; species diversity; soil physical and chemical properties; karst district

以贵州省为中心的西南喀斯特地区是全球三大岩溶集中分布区之一<sup>[1]</sup>,由于其特殊的地质背景使得其生态环境脆弱,受破坏后自我修复能力较差<sup>[2-3]</sup>。近年来贵州省因经济发展而审批的生产建设项目数量急剧上升,但生产建设项目的实施不仅对地表造成了严重的破坏,而且还形成了大量的土石混合工程堆积体。堆积体物质组成复杂、土壤结构松散、粘聚力差、保水保肥能力差,受雨水冲刷后极易发生泥石流等次生灾害<sup>[4]</sup>,严重影响了当地生态环境及人民群众的生产生活。植被恢复作为改善土壤质量的重要措施之一,能够有效减少土壤侵蚀<sup>[5]</sup>。大量学者<sup>[6]</sup>通过对生态环境较为脆弱的黄土高原地区研究发现植被恢复重建能够改善土壤质量,能明显影响到物种多样性,物种多样性变化也能够间接反映出该地区土壤质量的好坏<sup>[7]</sup>。有研究发现在立地条件相似条件下,随恢复时间增加,物种多样性反而减小;还有学者发现 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数随恢复时间增加呈增大—减小—增大的趋势<sup>[8]</sup>。

就喀斯特区土石混合工程堆积体而言,土石混合工程堆积体由于土壤结构不良、养分含量低、持水能力差等原因,导致植被恢复效果不佳<sup>[9]</sup>。从水土流失角度看,当前对于工程堆积体研究主要集中在其坡面侵蚀与产沙规律<sup>[10-11]</sup>及其对土石混合堆积体物理力学性质和坡面稳定性的研究<sup>[12-13]</sup>,而针对其植被恢复过程中物种多样性特征及其与土壤性质之间的响应关系鲜见报道。此外,依坡倾倒型工程堆积体作为最典型的工程堆积体,因堆积方式形成台面与坡面两种立地类型,不同的立地条件,两者植被恢复特征是否存在异同尚不可知,了解土石混合工程堆积体植被自然恢复过程中植物群落组成能够为今后土石混合工程堆积体植被恢复及其生态治理提供更多的理论支持。鉴于此,本文通过研究不同恢复时间土石混合堆积体台面和坡面物种多样性和土壤的基本特性,阐明不同恢复时间土石混合堆积体植被与表层土壤特征的变化规律,探究潜在的可加速土石混合堆积体植被恢复的关键因子,为喀斯特区土石混合堆积体的生态系统修复技术研发提供科学依据。

## 1 研究区概况

试验地位于贵州省贵阳市,属贵州高原中部浅切剥蚀型岩溶低中山丘陵区,海拔为 800~1 300 m,为典型中亚热带湿润季风气候区。年均日照时数约为 1 062.0 h,年平均气温约为 15.1℃,年平均积温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ,年平均相对湿度为 77%,平均年降水量为 1 100~1 300 mm,其中 5—10 月(雨季)降水量约占 79%,无霜期约为 270 d。属中亚热带常绿阔叶林带,植被以常绿阔叶林为主,但是由于人类活动的长期破坏,原生植被已基本不复存在。原成土母质主要以第四纪红色黏土发育而成的黄壤。此外,基于对贵州省贵阳市各区 35 个由线性工程建设而产生土石工程堆积体样地调查结果,发现贵州省贵阳市土石混合工程堆积体的土石比为 25%~40%,坡度在 30°~45°分布居多,堆积时间多数集中在 10 a 以内,因此,本研究采用空间代替时间的研究方法,选择 4 个土石比例为 30%,坡长为 18 m 左右,坡度 30°左右,土壤类型为黄壤的依坡倾倒型土石混合工程堆积体作为研究对象。每个堆积体台面和坡面面积大约为 5 000 m<sup>2</sup>,自然恢复时间(出现植被开始)分别为 1,2,4,6 a 的 4 个土石混合工程堆积体。各堆积体基本信息见表 1,保证除恢复年限恢复时间不同外,坡度、坡长、海拔高度以及其他生态因子基本相似,尽量减少气候、地形等因素带来的影响。

## 2 材料和方法

### 2.1 样地设置及土壤样品采集与分析

利用 GoogleEarth 历史影像地图初步确定工程堆积体的地理位置和面积,然后实地调查确定每个堆积体的具体堆积年份,筛选出立地条件相似的 4 个不同恢复恢复时间(1,2,4,6 a)的土石混合堆积体,每个土石混合工程堆积体分为台面(PL)和坡面(SL)共 8 个样地。研究于 2018 年 7—8 月进行野外样品采集,由于工程堆积体前期植被较少且以草本植物为主,因此本研究的乔灌木样方设置相对于其他样方设置适当进行了扩大,每个堆积体台面或坡面扩大后的乔木样方为整个台面或坡面的面积,研究的 8 个样地

都按对角线设置 3 个 10 m×10 m 灌木样方(共 24 个),记录其种名、株数、树高和冠幅等数据,每个灌木样方内再按对角线(与灌木样方垂直方向)设置 3 个 2 m×2 m 草本样方(共 72 个),分别记录样方内灌木和草本的种名、株数或丛数、高度、盖度等。通过对每个堆积体植物科属、种类及其数量调查后,通过计算

得出其群落 α 多样性和植物群落比重变化。在每个堆积体草本样方内除去表层枯落物后,考虑到工程堆积体表层一般情况下具有覆土层,本研究取样仅仅是 20 cm 以内用 200 cm<sup>3</sup> 环刀随机取土 3 次,8 个样地共 216 个用以测定土壤容重,并取环刀周边土壤用于测定土壤理化性质。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

恢复 时间/a	地理 位置	海拔 /m	堆积 方式	坡向	样地 面积/m <sup>2</sup>	土壤 类型	主要植物 种类
1	106°36′21.6″N, 26°20′08.3″E	1184~1192	依坡倾倒型	阳坡	9397.51	黄壤	野艾蒿( <i>Artemisia lavandulaefolia</i> )、黑麦草( <i>Lolium perenne</i> )、酢浆草( <i>Oxalis corniculata</i> )、狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )
2	106°36′22.8″N, 26°20′05.6″E	1196~1200	依坡倾倒型	阳坡	10606.23	黄壤	酢浆草、草木樨( <i>Melilotus suaveolens</i> )、荩草( <i>Arthraxon hispidus</i> )
4	106°35′53.9″N, 26°34′56.7″E	1268~1280	依坡倾倒型	阴坡	11565.11	黄壤	酢浆草、荩草、蛇床( <i>Cnidium monnieri</i> )
6	106°35′47.6″N, 26°27′56.3″E	1202~1212	依坡倾倒型	半阴坡	11364.83	黄壤	酢浆草、马桑( <i>Coriaria nepalensis</i> )、苦参( <i>Sophora flavescens</i> )

土壤容重(BD)采用环刀法测定;土壤含水量(MC)测定采用烘干称重法;半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量(TN)和铵态氮含量(AN);重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质(SOM);钼锑抗比色法测定土壤全磷含量(TP),有效磷(AP);全钾(TK)、速效钾(AK)的测定利用碳酸氢钠法和醋酸氨浸提—火焰光度法。

2.2 数据分析与处理

采用丰富度指数 Margalef、多样性指数 Shannon-Wiener、均匀度指数 Pielou 和优势度指数 Simpson-Weiner 共 4 个指标对 α 多样性进行评价。计算公式如下:

Margalef 丰富度指数

$$R = (S - 1) / \ln N \tag{1}$$

Shannon-Wiener 多样性指数

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \tag{2}$$

Simpson 优势度指数

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \tag{3}$$

Pielou 均匀度指数

$$E = H' / \ln S \tag{4}$$

式中:S 为样方内的物种总数目(个);ln 为自然对数;N 为样方内观察到的所有物种的个体总数; $P_i$  为第  $i$  种的个体占样方内总个体数的比例。

运用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),多重比较采用最小显著性差异法(LSD),并采用 CANOCO 5.0 软件进行冗余分析(RDA)研究植被物种多样性和土壤因子之间的相关性,并用向前筛选法(Foward selection)和蒙特卡洛置换检验(Monte permulation test)进行环境因子

筛选和显著性检验<sup>[14]</sup>,预测得出各恢复时间内土壤因子对物种多样性的贡献率。采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2018 软件制图。

3 结果与分析

3.1 土石混合堆积体植被群落物种组成及其多样性变化特征

在调查的 24 个大样地中,共记录到维管植物 113 种,隶属 44 科 101 属,不同恢复年限恢复时间的工程堆积体植物群落组成的科属种变化特征见图 1。随着恢复时间的增加,台面植物的科、属、种数呈一定的波动趋势,具体为先减小后增加再减小;坡面植物的科、属、种数总体呈现先增加后降低的趋势,且在恢复时间为 2 a 的堆积体坡面表出现多属同归于少数科的情况。综合整理研究区台面和坡面植物种类,发现坡面植物种类(99 种)明显高于台面(74 种),挑选前 10 种物种数最多的科类(图 2)发现生态适应性较强的植物主要集中在菊科(Composita)、禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminous),三者物种数之和占群落物种比例在台面(54.05%)、坡面(44.44%),占群落前十科的比例在台面和坡面依次为 72.7%,65.7%。

从植物群落层次来看(图 3),台面和坡面上各恢复年限恢复时间内物种数目表现为草本层>灌木层>乔木层,恢复时间为 1 a 和 2 a 的堆积体草本植物占绝对优势,当恢复时间达到 6 a 时,台面乔、灌层比重分别上升到 5.41%,6.82%,而台面草本层下降 10.81%,坡面的草本层下降了 19.56%。表明随恢复时间的增加,乔灌层物种数所占比重逐渐上升,草本层有所下降,且坡面草本层植物种类下降幅度大于台面。



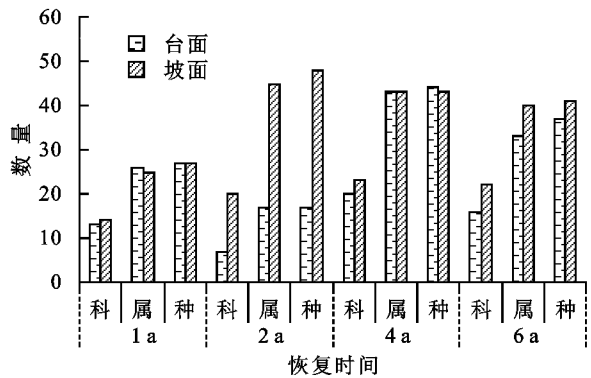


图 1 不同恢复期土石混合堆积植物物种组成

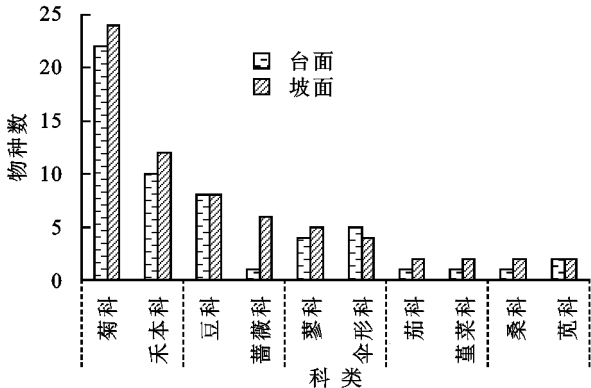


图 2 研究区物种前 10 科

土石混合堆积体台面和坡面植物物种多样性随

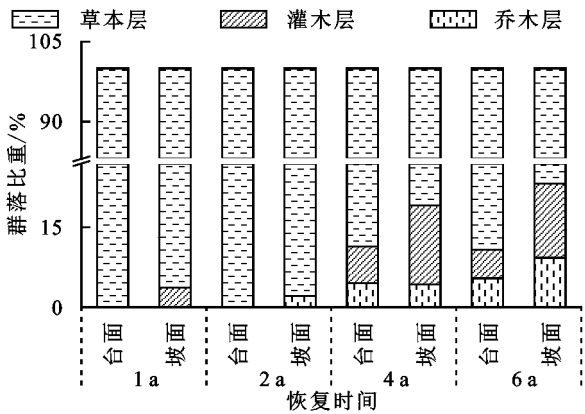
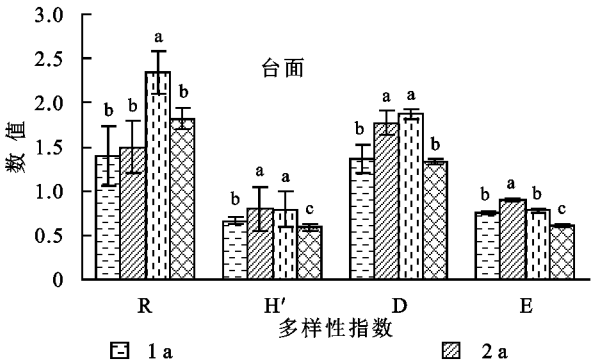


图 3 不同恢复时间植物群落比重

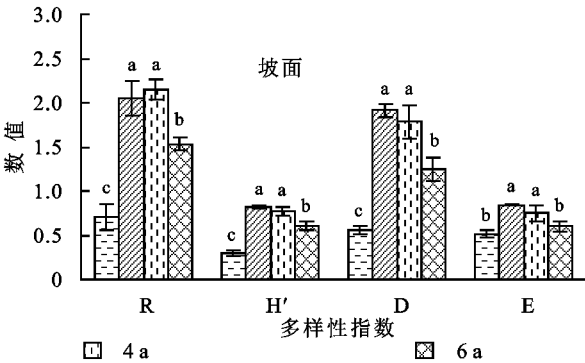


图 4 不同恢复年限恢复时间植物物种多样性比较

3.2 土石混合工程堆积体土壤理化性状

土石混合堆积体植被恢复过程中,各理化指标随恢复时间增加均有不同程度变化,具体见表 2。堆积体植被恢复对 SOM 含量具有显著影响,表现为随植被恢复时间增加而增加,恢复 6 a 的有机质含量台面上是 1 a 的 3.4 倍,坡面为 3.7 倍;TN,TP 含量在两种不同位置含量随时间变化具有一定的波动性,整体表现为恢复 6 a 的样地显著高于其他恢复时间样地的含量( $p<0.05$ )。植被恢复对 AN 影响不明显,随恢复时间增加其含量在台面和坡面呈先增加后降低趋势,但 5 a 的恢复时间 AN 含量内只增长了 8.5%;AK 含量随植被恢复时间变化趋势与 AN 相同。在台面上 6 a 的 BD 高于 1 a,这可能与土壤沉降有关,

恢复时间的变化如图 4 所示,各物种多样性指数随恢复时间增加都表现出“先上升,后下降”的变化趋势。但不同多样性指数变化幅度、最大值出现年份不尽相同。台面上,Margalef 指数在植被恢复前期(1 a 和 2 a)数值较低且差异不显著,恢复 4 a 时达到最大值为 1.87,与恢复前期比差异显著( $p<0.05$ )。Simpson 指数和 Pielou 指数均在恢复时间为 2 a 时最高,且这两种指数在各恢复时间内具有一定差异。坡面上,Margalef 指数最大值出现在 4 a,是恢复时间 1 a 的 3.07 倍,其余 3 种指数最大值皆出现在恢复时间为 2 a,4 种多样性指数在恢复前期(1 a 和 2 a)和后期(6 a)相比差异显著( $p<0.05$ )。

坡面 BD 随恢复时间延长而减小。MC 随恢复时间的增加反而减少,说明在植被在恢复 5 a 后并没有显著改善土壤的贮水能力涵养水分功能。此外,对于同一恢复时间的台面和坡面来说,BD 和 SOM 在台面与坡面之间(除 4 a)差异显著( $p<0.05$ ),TP 和 TK 除恢复时间为 2 a 时台面与坡面之间差异显著外,其余都不显著。

3.3 植被物种多样性与土壤理化性质关联分析

本研究采用冗余分析(RDA)来呈现物种多样性与土壤环境的关系,其中土壤环境因子作为解释变量,物种多样性作为响应变量,分析 2 组变量得到植物物种多样性与土壤环境因子的双序图(图 5)。在排序图中,带有实心箭头的线表示植被物种多样性,空心箭头的线表

注:R 为丰富度指数,H'为多样性指数,D 为优势度指数,E 为均匀度指数。不同小写字母表示同一指数在不同恢复时段恢复时间差异显著( $p<0.05$ )。

示土壤环境因子。由图 5 可知,BD,TK,MC,AN,TN 在 4 种不同恢复的工程堆积体上与箭头连线较长,说明对 物种多样性影响较大,其中 MC 和 BD 对台面物种多样性的影响大于坡面,而土壤养分对坡面影响较大。

表 2 不同恢复时间土石混合工程堆积体土壤理化性质

指标	1 a		2 a		4 a		6 a	
	PL	SL	PL	SL	PL	SL	PL	SL
BD/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.17±0.04Ac	1.35±0.09Ba	1.38±0.06Aa	1.28±0.07Bb	1.22±0.01Ab	1.25±0.15Ab	1.29±0.10Aa	1.19±0.15Bc
MC/%	31.57±2.25Aa	37.82±2.71Ba	24.00±2.91Ab	26.01±6.26Ab	24.64±1.06Ab	24.46±0.86Ab	22.21±2.83Ac	24.75±6.56Bb
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.74±0.15Ab	0.82±0.09Ac	1.55±0.13Aa	2.02±0.48Aa	0.82±0.11Ab	1.39±0.32Bbc	1.59±0.07Aa	1.70±0.25Aab
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	5.49±0.35Ab	4.94±0.23Ab	3.72±0.30Ac	5.66±0.58Bb	4.76±1.48Abc	4.55±0.86Ab	7.20±0.48Aa	7.71±0.51Aa
TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	8.69±1.18Aab	8.67±0.64Ab	8.41±1.29Aab	7.85±0.37Bbc	7.15±0.29Ab	7.32±0.59Ac	9.90±0.28Aa	9.80±0.01Aa
AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	46.08±4.83Aa	45.56±9.72Ac	68.57±5.48Aa	76.46±2.84Aa	50.63±6.96Aa	61.40±10.88Bb	50.01±24.01Aa	60.24±4.11Bb
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	54.48±5.23Ac	57.28±2.35Ac	63.31±2.50Aa	70.97±3.20Ba	58.56±3.34Abc	69.00±2.48Abc	78.54±3.56Aab	82.05±3.59Ab
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	45.58±4.80Ab	46.30±4.83Ab	62.93±6.60Aa	91.64±18.25Ba	63.95±5.01Aa	84.82±5.84Ba	51.48±2.88Ab	46.85±4.75Ab
SOM/(mg·kg <sup>-1</sup> )	7.73±1.83Ac	9.68±0.43Ad	21.95±1.44Ab	25.92±2.52Bb	16.26±2.87Abc	18.97±0.54Ac	41.46±1079Aa	36.02±4.85Ba

注:PL 表台面,SL 表坡面,不同小写字母表示不同恢复时间同一坡位差异显著,不同大写字母表示同一恢复时间不同位置差异显著( $p<0.05$ )。

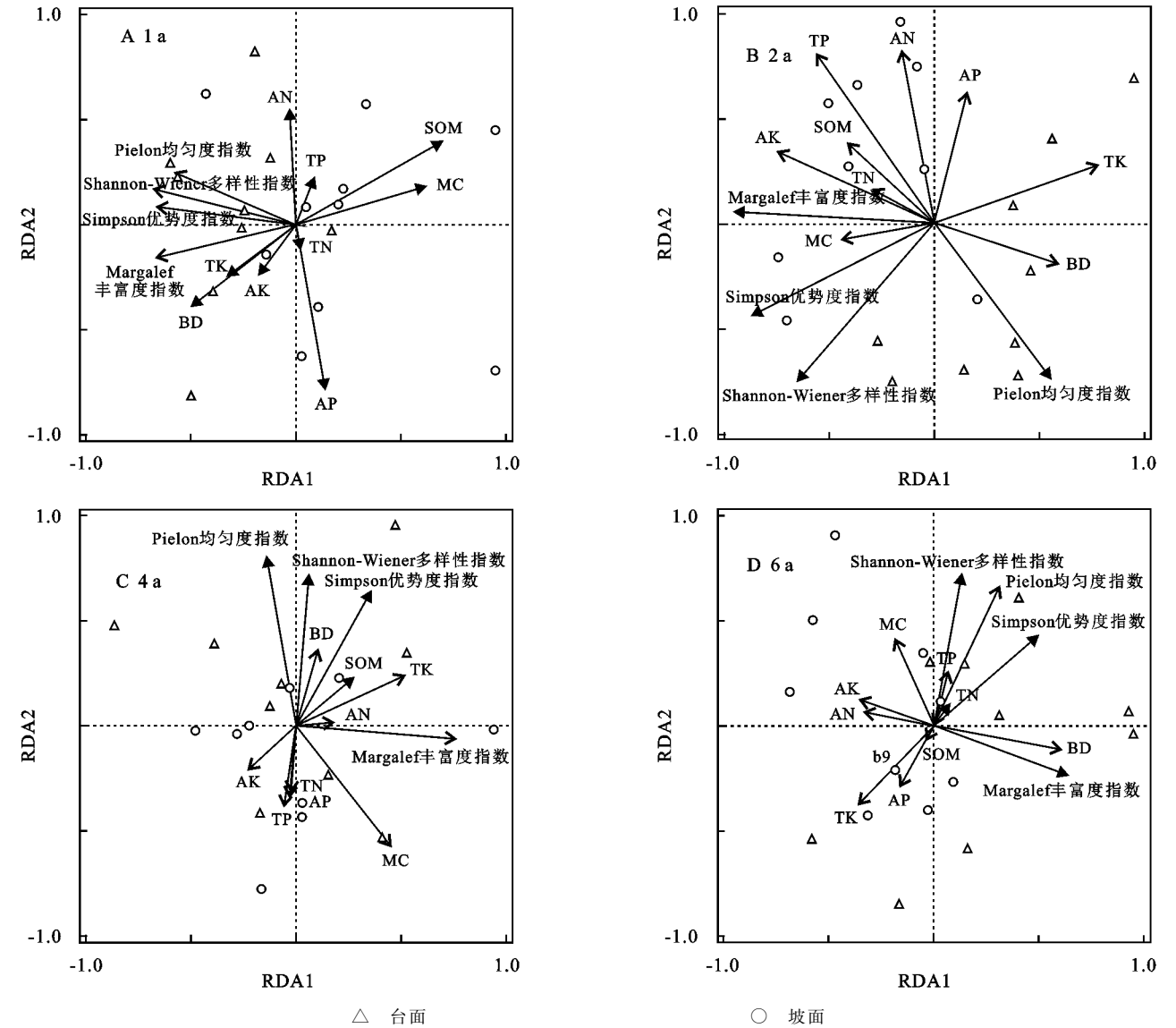


图 5 植物物种多样性和土壤理化性质关系的 RDA 双序图

从恢复时间和空间位置上看,恢复时间为 1 a 的堆积体(图 5A),TK,BD 和 AK 与 4 种多样性指数呈正相关关系,MC,AP 和 SOM 与各指数呈负相关关系,且坡面上受磷元素影响较大;恢复时间为 2 a 的堆积体(图 5B),Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数与 MC,AK, TN 呈正相关关系,与 BD 和 TK 呈负相关关系,而 Pielou 均匀度指数与 BD 和 TK 呈正相关关系。多

样性在台面上主要受到氮素和含水量影响,坡面受 TK 影响;恢复时间为 4 a 的堆积体(图 5C),Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数与 BD,SOM 等呈正相关关系,Margalef 丰富度指数与 MC 和 AN 呈正相关关系且 AN 与其夹角最小表明与 Margalef 指数相关性强;恢复时间为 6 a 的堆积体(图 5D),4 种多样性指数与 TP,TN 和 BD 呈正相关关系。其中 BD 与 Margalef 指数相关性大于它与其他多样性指数。MC 和 AP 对台面物种多样性影响较大,TN 和 TP 影响体现在坡面。

为了更加直观地表现解释变量对植物物种多样性的影响,采用向前筛选法和蒙特卡洛检验对环境因子进行排序,选取累计贡献率超过 70%的环境因子,默认这些因子在各恢复时间内对植物物种多样性起主要影响作用。结果见表 3,不同恢复时段恢复时间内,各土壤因子对物种多样性的影响程度也不同。在恢复时间为 1 a 的堆积体 SOM,AP 和 MC 贡献率之和为 78.3%,其中 SOM 贡献率为 48.2%,远大于其他指标且影响显著( $p<0.05$ );恢复时间 2 a 时,TK 和 AK 贡献率之和达到 84.5%,对物种多样性更是具有极显著影响( $p<0.01$ )。随恢复时间增加,影响物种多样性的土壤因子也增加,且土壤因子贡献率较为平均,恢复时间 4 a 时 MC,TK,AK 和 BD 贡献率分别为 29%,23.8%,13.8%,10.7%;BD,TN,TK 和 AK 对恢复时间为 6 a 的物种多样性累计贡献率达到 72%。

表 3 理化性质在 RDA 分析中的前瞻性选择特征

恢复 时间/a	环境 因子	解释 变量/%	贡献率/ %	F	p
1	SOM	22.9	48.2	4.8	0.020
	AP	8.7	18.2	1.9	0.176
	MC	5.7	11.9	1.3	0.280
2	TK	55.8	59.6	20.2	0.002
	AK	23.3	24.9	16.8	0.002
	MC	17.3	29.0	3.8	0.056
4	TK	14.2	23.8	2.7	0.110
	AK	8.3	13.8	1.9	0.186
	BD	6.4	10.7	1.5	—
	BD	12.4	26.3	2.3	0.130
6	TN	8.0	16.8	1.6	0.210
	TK	7.7	16.1	1.4	0.260
	AK	6.0	12.8	1.1	—

4 讨论

4.1 植被恢复过程中物种多样性特性

群落构成是群落结构的重要组成部分,其物种组成变化在一定程度上反映了群落外貌,是植物群落对所处环境各因素综合反映的外部表现<sup>[15]</sup>。本研究发

现,堆积体台面与坡面前期基本以草本植物为主,随恢复时间增加,乔灌木植物种类增加。研究区植物以菊科、禾本科和豆科为主,原因在于三者属于耐干扰植物<sup>[16]</sup>,具有高繁殖力和高生长率,并将主要资源分配给维持生殖生长,能在植被恢复前期占据一定优势。物种多样性是退化生态系统恢复与重建的重要内容与标志,但并非多样性高的群落其结构一定稳定,还与群落演替动态有密切关系<sup>[17]</sup>。Odum<sup>[18]</sup>认为物种多样性在群落演替前期不断增大,中期达到峰值后随时间增加出现降低趋势。这与本研究发现 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数均表现出先增加后降低的变化趋势相同,但变化程度以及台面和坡面各指数峰值出现年份不尽相同。原因在于恢复前期,土壤质地被严重破坏,地表裂隙大,养分流失严重,从而导致植被物种单一,物种多样性和均匀度指数较低。随恢复时间增加,埋藏在堆积体土壤中的草本种子经过一段时间的积累,利用其生长速度快,基数大,扩散能力强等特点<sup>[8]</sup>,大面积在堆积体上定居,植物种类快速增加,此阶段的丰富度指数较高。随植被恢复时间延长,多年生植物开始介入,群落结构变化导致研究区域的小生境发生变化。由于不同的植物物种具有不同的资源生态位<sup>[19]</sup>,生态幅较窄的物种逐渐消失,适应能力强的物种存留下来。加上乔灌木形成的林下小环境不利于某些草本植物的生长,从而导致物种多样性和丰富度指数降低。但谢晋阳等<sup>[20]</sup>通过对暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征分析发现物种多样性随群落演替进行逐渐增加,在演替顶极达到最大。这可能与研究区本地条件有关,土石混合工程堆积体,结构复杂,土壤养分易流失,限制植物生长,植物群落演替达到顶级所需时间相对于暖温带落叶阔叶林有所减少,导致植物物种多样性变化也具有差异。此外,本研究发现坡面植物种类多于台面,造成其原因可能是植物种子主要是靠风、虫、雨水等媒介进行传播繁殖,坡面更容易接收到外来种子,降雨也会导致雨水夹杂植物种子从台面向坡面移动。其次,研究区虽然选择离人群较远,尽量排除人类干扰,但仍有放牧和其他人类活动对此产生影响。

4.2 植被恢复过程中土壤因子特征

土壤为植物生长提供生存空间和营养元素,其理化性质变化将会影响植物生长发育而植被恢复可以改善土壤理化特性<sup>[21]</sup>。本研究表明,随土石混合工程堆积体恢复时间的增加,植被正向演替过程中,土壤性质均得到不同程度的改善,SOM 含量显著提高,养分含量明显增加。恢复 6 a 的 TK 含量相对于恢复时间 1 a 提高了 13.9%、TN 含量提高了 114.9%,



表明植被恢复能提高土壤养分,但提高的程度存在差异。随植被恢复时间延长,SOM 含量明显增加,其原因是由于植物枯枝落叶分解和根系分泌物是土壤有机质的重要来源<sup>[22]</sup>,植物凋落物分解提高了 SOM 含量<sup>[23]</sup>。此外,植被还可以通过根系分泌及其脱落物向地下输送有机质,利用自身进行生物量的投入来改变 SOM 含量<sup>[24]</sup>,并且植物枯枝落叶分解后产生的营养元素逐渐释放到土壤中,为各种营养元素提供养分来源。不同恢复时段恢复时间的台面和坡面 AK 和 AP 含量呈先上升后下降的趋势,原因在于土壤磷素是一种沉积性矿物,植物生长所需要的磷元素由植被凋落物和有机质分解提供<sup>[25]</sup>,随着植被恢复,地表覆盖物增加,加速矿物质的分解和养分的积累进而提高 AK 含量,恢复后期植被生长,发育会消耗大量的 AK,导致其含量下降。此外,有学者<sup>[26]</sup>发现,BD 随恢复时间增加而减小,而本研究发现坡面 BD 随恢复时间增加而减小,台面反之,其原因可能是前者是由于植物根系活动引起土壤松动和动植物残体为有机质提供来源导致 BD 随恢复时间增加而下降,后者原因在于土石混合堆积体在重力作用下土壤发生沉降,致使土壤质地紧密,导致数值偏大。综上所述,随土石混合工程堆积体恢复时间的增加,其植被正向演替过程中对土壤理化性质起到了不同程度的改善作用,但对土壤化学性质影响程度明显大于土壤物理性质。

#### 4.3 植被恢复过程中土壤理化因子对物种多样性响应

土壤是植物生长的重要物质基础,土壤理化性质的不同,影响着生长于其中的植物,从而影响到物种多样性<sup>[15]</sup>。本研究发现,BD,MC,TK,AK,AN 在 4 种不同恢复时段恢复时间的工程堆积体上与箭头连线较长,说明对物种多样性影响较大。恢复时间较短的堆积体,钾素对促进植被恢复有较大影响,随恢复时间增加,作用效果有所下降,氮素作用效果明显。此外,MC 和 BD 对台面物种多样性的影响大于坡面,而土壤养分对坡面影响较大,原因可能是工程堆积体台面土壤发生沉降使其较为紧实,土壤通透性差,地表容易板结,导致植物种子萌发后,根系不易吸收水分。而坡面土壤较为疏松,但水土流失严重,特别是强降雨下,养分容易混合雨水从地表径流和堆积体孔隙间流失,导致植被对土壤养分吸收减弱。在恢复时间为 2 a 的堆积体上 MC 与各指数呈正相关关系。水分是植物生长发育的必要条件,对土壤性质和植物生长影响较大,进而影响到植物的分布格局。随恢复时间增加,BD 与丰富度指数表现为负相关关系。其过大会使得土壤紧实,进而影响根系生长<sup>[27]</sup>。恢复时间增加 BD 减小,植物根系更容易吸收土壤水

分,使更多植物种类能够存活。恢复后期各多样性指数与 TN 和 SOM 都呈正相关,研究表明<sup>[28]</sup>随着植被演替的进行,植物生物量和地表凋落物增加,土壤微生物也在增加,从而导致土壤中的 TN 含量也上升。此外,由于恢复年限恢复时间的增加,根系微生物含量也随之增加,使更多的有机氮矿化作用促进植物生长<sup>[29]</sup>。这都表明在植被恢复过程中,土壤质量在不断的改善,并反过来促进植被生长发育,推动植被演替的正向进行,而植被恢复进一步提高土壤质量。速效磷与各物种多样性指数皆表现为负相关关系,其原因可能是土壤中磷的含量与成土母质有关,工程堆积体结构复杂,土壤来源广泛,磷含量受土壤类型和气候条件影响较大,而受植被演替中群落结构的影响较小<sup>[30]</sup>。

对于恢复时间不同的土石混合堆积体,土壤因子对物种多样性的贡献度也不相同,研究发现随恢复时间增加,影响程度有所差异,TK 和 AK 在恢复时间为 2 a 贡献率之和达到了 84.5%,表明此段恢复时间里,钾素对物种多样性的影响较大,成为限制植物生长发育的主要因子,而到恢复时间为 6 a 时,TK 和 AK 贡献率分别为 16.1%,12.8%。两种土壤因子分别下降了 72.99%,48.59%,MC 从恢复时间 1 a 的 11.9%到恢复时间 4 a 的 29%,贡献率上升了 2.4 倍。表明各土壤因子在不同时期对植物的作用不同,成为植物生长发育的主要影响因子也会随之改变。因此在防治土石混合堆积体水土流失上,植被恢复方面前期应该针对主要缺乏的钾素进行补充,使植被能够存活下来,同时进行人为干扰减少堆积体上的水分蒸发。随恢复时间增加,植被正向演替进行,影响植物生长发育的因素变多,增加土壤养分的投入能够更好地促进植物生长。植物物种选择既能保水、保土又能与土壤微生物相互作用补充土壤中氮素类营养元素的豆科类或与豆科植物互利共生植物。

## 5 结论

(1) 研究区土石混合堆积体台面植物共 32 科、71 属、74 种,坡面植物共 39 科、91 属、99 种,随土石混合堆积体恢复时间增加,各堆积体植物种类呈现增加趋势,且坡面植物种类明显高于台面;各多样性指数随堆积体恢复时间增加表现出先增加后降低。

(2) 土石混合堆积体植被恢复时间增加,土壤多项理化性质得到改善。土壤 TN,TK,AP 和 SOM 含量随恢复时间总体表现为上升趋势,AN 和 AK 含量表现为先增加后降低。随土石混合堆积体植被恢复时间增加,环境因子对物种多样性的贡献率也不同,MC,BD,TN,TK 和 AK 在不同恢复时段恢复时间

内对植物物种多样性影响较大,其中钾素在初期对植被恢复作用效果明显,氮素在后期影响较大。

(3) 台面植被易受土壤物理因子影响,而坡面更易受土壤养分影响,因此从水土保持的角度看,考虑到土石混合堆积体保水能力差,植被类型建议以草灌混交恢复为主,植物物种种类上选择既能保水保土又能与土壤微生物相互作用补充土壤中营养元素的豆科类植物。

#### 参考文献:

- [1] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [2] Zhang Y, Xu X, Li Z, et al. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019,650:2657-2665.
- [3] Zhao C, Long, J, Liao H K, et al. Dynamics of soil microbial communities following vegetation succession in a karst mountain ecosystem, Southwest China [J]. Scientific Reports, 2019,9(1).DOI:10.1038/s41598-018-36886-z.
- [4] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展[J].水土保持学报,2018,32(6):1-8,39.
- [5] 郭索彦,姜德文,赵永军,等.建设项目水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):51-56.
- [6] Ling Z, Wang J, Bai Z, 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.
- [7] Pang D B, Cao J H, Dan X Q, et al. Recovery approach affects soil quality in fragile karst ecosystems of southwest China: Implications for vegetation restoration[J]. Ecological Engineering, 2018,123:151-160.
- [8] 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.
- [9] Halofsky J E, McCormick L H. Establishment and growth of experimental grass species mixtures on coal mine sites reclaimed with municipal biosolids[J]. Environmental Management, 2005,35(5):569-578.
- [10] 张翔,高照良.不同坡长条件下娄土堆积体坡面产流产沙过程[J].水土保持研究,2018,25(6):79-84,93.
- [11] 陈卓鑫,王文龙,康宏亮,等.砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J].生态学报,2019,39(17):6545-6556.
- [12] Fredlund D G, Krahn J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977,14(3):429-439.
- [13] 李树武,聂德新,刘惠军.大型碎屑堆积体工程特性及稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4126-4131.
- [14] Grime J P. Vegetation classification by reference to strategies[J]. Nature, 1974,250(5461):26-31.
- [15] 何芳兰,徐先英,尉秋实,等.祁连山青海云杉人工林与天然林群落结构特征及物种多样性比较研究[J].西北林学院学报,2016,31(5):1-7.
- [16] Wang L X, Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition in different climatic zones[J]. Acta Botanica Sinica, 2003,45(4):399-407.
- [17] Oliver C D, Larson B C. Brief notice: forest stand dynamics (update edition)[J]. Forest Science, 1996,42(3).DOI:10.1093/forestscience/42.3.397.
- [18] Odum E P. The strategy of ecosystem development[J]. Science, 1969,164(3877):262-270.
- [19] Ricotta C, Avena G. On the relationship between Pielou's evenness and landscape dominance within the context of Hill's diversity profiles [J]. Ecological Indicators, 2003,2(4):361-365.
- [20] 谢晋阳,陈灵芝.暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征[J].生态学报,1994,14(4):337-344.
- [21] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(5):877-887.
- [22] 周印东,吴金水,赵世伟,等.子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化[J].西北植物学报,2003,23(6):895-900.
- [23] 杨波,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的减水减沙效益[J].土壤学报,2017,54(6):1357-1368.
- [24] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J].水科学进展,2016,27(2):256-265.
- [25] 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.
- [26] 廖超林,傅灵芝,盛浩,等.紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能[J].农业工程学报,2014,30(21):111-119.
- [27] Liu J L, Ha V N, Shen Z, et al. Characteristics of bulk and rhizosphere soil microbial community in an ancient *Platycladus orientalis* forest[J]. Applied Soil Ecology, 2018,132:91-98.
- [28] Li J, Liu Y, Hai X, et al. Dynamics of soil microbial C : N : P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment[J]. Science of the Total Environment, 2019,693. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.133613.
- [29] 周建斌,陈竹君,李生秀.土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J].生态学报,2000,21(10):1718-1725.
- [30] 罗琰,苏德荣,纪宝明,等.辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系[J].草业学报,2018,27(3):33-43.