

边坡修复中边坡类型及绿化植物对目标群落有效性的研究

陈早雄

(铁汉山艺环境建设有限公司, 广东 深圳 518003)

摘要:【目的】研究绿化植物和受损边坡对生态修复的有效性,探索重建目标植物群落的主要依据。【方法】用AHP方法分析绿化植物和受损边坡在边坡修复中的有效性,按有效性排序选择先锋和建群种植物构建目标植物群落。【结果】受损高速公路边坡体量大,且主要分布于经济发达和人口密集区域,对环境和社会经济影响大,因此修复受损高速公路边坡见效快,且对总体目标贡献率高达50.24%;不同种及不同生活型的植物有效性差别很大,可有多种组合搭配模式,但针对目标群落应首选对修复类型最有效的植物作为绿化植物。【结论】拟以灌草型、乔灌草型和藤草型植物群落分别作为山区高速公路边坡、废弃矿山堆积坡和采石场石质边坡修复重建的目标植物群落。

关键词:边坡类型;边坡修复;层次分析;目标植物群落

中图分类号:S812.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)04-0085-09

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2024.04.010



自21世纪以来,随着我国社会经济快速发展,在全国范围内兴起了基础设施建设高潮,兴建公路、铁路、水利、矿山、工业园区和基础设施改造等工程项目遍地开花。伴随着大量的施工开挖、爆破、劈山采石、弃渣弃土等,既破坏了天然植被,又造成了大量创伤和裸露边坡,使原本脆弱的生态结构及其服务功能遭到破坏,引发了一系列生态环境问题^[1-2]。因此,关于受损边坡生态修复问题受到了学术界的高度关注,且陆续开展了一系列相关的科学研究工作^[3],并取得了一些重要研究成果,其中一个重要的共识是目前的受损边坡生态修复仍有一定缺陷:一是重建的植物群落由于营养缺乏而导致衰退速度较快;二是以草本植物为主要建群种重建的群落类型比较单一,群落稳定性和景观效果时效性较差;三是对目

标植物群落缺乏合理设计,没有充分发挥乔、灌、草、藤及乡土植物合理搭配的优势,导致重建的植物群落稳定性差;四是群落的外貌体征与周围环境不和谐,景观效果差^[4-7]。这些问题在很大程度上既决定着植物群落的演替方向,又可掣肘重建的植物群落向目标群落演替。然而关于受损边坡类型和绿化植物对边坡修复的有效性以及对构建目标植物群落的影响未见报道。

据此,我们依据恢复生态学的基本原理,结合研究团队多年的生态修复工程实践经验开展本研究,期望厘清不同边坡类型、不同植物和不同生活型的植物对边坡修复的影响,进而针对典型受损边坡提出重建的目标植物群落,为相关受损边坡生态修复提供理论和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 区域概况

深圳市位于113°46′—114°37′ E, 22°27′—22°52′ N,地形地貌以滨海的低山丘陵为主,海拔70~120 m,为南亚热带海洋性季风气候,年均气温22.5℃,极端最高38.7℃,最低0.2℃。年均降水量1924.3 mm。

收稿日期:2023-04-21;修回日期:2023-07-18

基金资助:基岩边坡喷混植生快速绿化技术开发(THSY-2021-02)

作者简介:陈早雄(1980-),男,湖南娄底人,工程师,主要从事生物多样性保护与生态修复工作。

E-mail:441875422@qq.com

土壤以赤红壤、红壤、山地黄壤和滨海沙土 4 个土类为主,多数酸度较高(pH 值 5~6),且多属较贫瘠的土类。原生地带性植被为热带季雨林和南亚热带季风常绿阔叶林,现状植被以天然次生林和灌草丛为主^[8-9]。

1.2 材料

以山区高速公路边坡、废弃矿山堆积坡和采石场岩质边坡(表 1)为修复边坡类型的代表,从众多使用过的草、灌、藤绿化植物中各选择 5 种使用频率较高的乡土植物(表 2)作为研究材料。

表 1 不同边坡的基础条件

Table 1 Foundation conditions of different slopes

边坡类型	地形与坡度	受损面积	受损深度	土地类型与植被
B ₁ 山区高速公路边坡	缓斜坡 < 5°, 斜坡 5°~35°, 陡坡 > 35°	当年, 损斑 < 100 m ² , 镶嵌分布 1~2 年, 损斑 100~500 m ² , 连续分布; > 3 年, 损面 > 500 m ² , 立面连续分布	损面斑块状, ①以原始表土为主; ②人工回填土; ③表土层完全剥离; ④以心土+母质为主	土地类型: 耕地、草地或疏林地; 植被: 乔灌木 + 农田; 次生乔灌 + 农田; 中覆盖的灌草丛
	B ₂ 废弃矿堆积坡	峭坡 > 35°	1~4 年, 损面 > 10 000 m ² , 立面分布	土地类型: 工矿用地 植被: 低覆盖的灌草丛
B ₃ 采石场岩质边坡	垂直壁 > 55°	1~4 年, 损面 > 10 000 m ² , 立面分布	损面为岩石层	土地类型: 未利用土地 植被: 零星植物

表 2 绿化植物

Table 2 Names of the used green plants

草本植物		灌木及小乔木		藤本植物	
C ₁	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	C ₆	夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	C ₁₁	爬山虎 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>
C ₂	假俭草 <i>Eremochloa ophiuroides</i>	C ₇	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	C ₁₂	常春藤 <i>Hedera nepalensis</i>
C ₃	百喜草 <i>Paspalum natatum</i>	C ₈	黄荆 <i>Vitex negundo</i>	C ₁₃	铁线莲 <i>Clematis florida</i>
C ₄	地毯草 <i>Axonopus compressus</i>	C ₉	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	C ₁₄	葛藤 <i>Argyreia seguinii</i>
C ₅	结缕草 <i>Crotalaria pallida</i>	C ₁₀	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	C ₁₅	扶芳藤 <i>Euonymus fortunei</i>

1.3 方法

首先根据文献资料^[10]结合多年来施工的实践经验,参考车生泉^[13]和赵静^[14]的护坡植物选择及综合利用价值评价方法,编列出评判植物对修复边坡适宜性和使用价值的定性指标(表 3),作为综合评判不同修复类型及不同绿化植物在生态修复中的有效性和赋值^[11-12]的依据。然后采用层次分析(AHP)法^[15-16]计算不同修复类型(B_i)及每种绿化植物(C_i) in 边坡修复中有效性的权重值,并据此研究适宜各类边坡重建的目标植物群落及其物种配置模式。

层次结构模型如下:

A 目标层:建成与周围环境协调一致、种类丰富、结构稳定、防护和景观效果好的植物群落,促使受损边坡土地逐步向良性发展。

B 准则层(边坡类型):选择山区高速公路边坡(B₁)、废弃矿堆积坡(B₂)和采石场岩质边坡(B₃)3 个代表性的边坡类型作为准则层(B)的不同因子,分析各自在边坡修复中对总体目标(A)的有效性。

C 评价因子层(绿化植物):以表 1 中 15 种植物(C₁-C₁₅)作为评价重建植物群落的基本因子,分析其

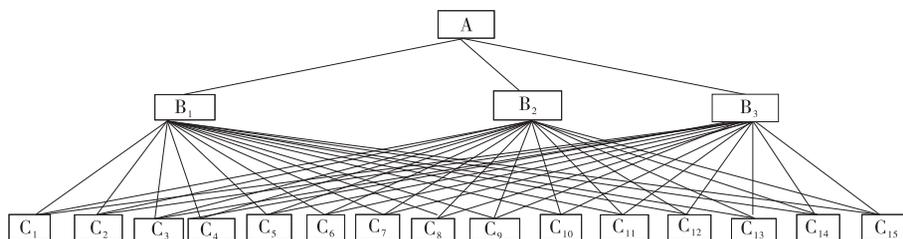


图 1 受损边坡生态修复的层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure of ecological restoration of damaged slope

表 3 选择生态修复植物的有效性评价及其赋值标准

Table 3 Evaluation of effectiveness and evaluation criteria of selection of ecological restoration plants

评价项目	拟选护坡植物的评价依据	等级和赋值范围			
		高(4.1~5.0)	中(3.1~4.0)	低(2.1~3.0)	差(<2.1)
1 综合生态学特性	具有良好生态适应性,保持生态系统结构、功能、物种多样性、群落结构稳定性,对景观效果贡献较大的特点	综合生态效益高	综合生态效益较高	具有一定维持生态平衡的能力	易使水体生态失衡
2 主要生物学特性	具有适宜的生活型、生态型、生长态势和抗耐逆性(光、温、水、土和病虫害等),物候期、绿期、繁殖、分蘖和再生性,侵占、化感、排它及种间竞争特性	生长发育和抗逆性优良	生长发育和抗逆性较好	生长发育和抗逆性一般	抗逆性差
3 对景观效果贡献	植物色彩丰富,形态优美,有增强群落景观的观魅力;优化群落结构,增加空间层次感和季相效果,在景观中发挥作用的时间	综合价值高	综合价值很高	观赏价值一般	无观赏价值
4 经济价值	包括饲用、食用、药用和农副产品的加工原料;栽培、管理的难易程度及植物的后处理等问题	综合价值高	综合价值较高	直接经济价值低	无直接经济价值

在边坡修复中对各边坡类型(B_i)及总体目标(A)的有效性(图 1)。

1.3 判断矩阵及绿化植物的分值标定

采用李自珍^[17]的层次分析和专家咨询方法,依据表 3 中的定性指标对各因子(绿化植物)作两两比较,进行综合评判并标定分值,形成数值判断矩阵表(表 4)。

表 4 判断矩阵表

Table 4 Judgment Matrix

F_i	F_j				权重 W_i
	F_1	F_2	...	F_n	
F_1	α_{11}	α_{12}	...	α_{1n}	α_1
F_2	α_{21}	α_{22}	...	α_{2n}	α_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
F_n	α_{n1}	α_{n2}	...	α_{nn}	α_n

判断矩阵的确定:以准则层为例,首先逐对比较基本因素 F_i 和 F_j 对修复目标 A 贡献的大小,给出它们之间的相对比重 α_{ij} 。根据分析、对比研究结果,一般认为当 F_i 和 F_j 对修复目标 A 贡献相差很小时,可取 $\alpha_{ij} = 1$;当 F_i 比 F_j 贡献稍大时,取 $\alpha_{ij} = 3$,如若介于二者之间时可取 $\alpha_{ij} = 2$ (以下类推);当 F_i 比 F_j 贡献大时,取 $\alpha_{ij} = 5$;当 F_i 比 F_j 贡献很大时,取 $\alpha_{ij} = 7$;当 F_i 比 F_j 贡献非常大于时,可取 $\alpha_{ij} = 9$;当 F_i 比 F_j 的

贡献小时,则 $\alpha_{ij} = 1 / \alpha_{ji}$ 。这样,就可以确定 α_{ij} 的值,进而得到判断矩阵 A (表 3)

1.4 求判断矩阵特征向量与最大特征根的数学模型

(1) 计算判断矩阵每一行元素的乘积 M_i

$$M_i = \prod_{j=1}^n \alpha_{ij}, j = 1. 2. 3 \dots \dots n$$

(2) 计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{w}_i, \bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}, i = 1, 2, 3, \dots \dots n$

(3) 对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1 \bar{W}_2 \dots \dots \bar{W}_n]^T$ 正规化

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \text{ 则 } W = [W_1 W_2 \dots \dots W_n]^T \text{ 即为所求的特征向量。}$$

(4) 计算判断矩阵最大特征根 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n w_i} \text{ 其中 } (AW)_i \text{ 为 } AW \text{ 的第 } i \text{ 个元素。}$$

(5) 检验判断矩阵的一致性

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI}$$

式中: CI 为一致性指标; n 为矩阵阶数; CR 为随机一致性比例; RI 为平均随机一致性指标。

(6) 层次总排序及其一致性检验

$$CI = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_i CI_j}{\sum_{j=1}^m \alpha_i RI_j} RI, CR = \frac{CI}{RI}$$

式中： α_i 为特征向量； CI_i 和 RI_i 分别为与 α_i 对应B层或C层中判断矩阵的一致性指标和随机一致性指标。

用Excel 2007软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 不同边坡类型对总体目标的有效性分析

不同边坡类型对总体目标的判断矩阵及权重值计算结果如表5。3个边坡类型对总体目标的权重值

排序为 $B_1 > B_2 > B_3$ ，表明修复山区高速公路边坡对实现总体目标有效性最大，因而更具重要性。该判断矩阵特征向量的最大特征根 $\lambda_{max} = 3.1886$ ， $CI = 0.0839$ ， $RI = 0.8897$ ， $CR = 0.0943 \leq 0.10$ ，因此，该判断矩阵具有满意的一致性。

2.2 绿化植物对修复不同边坡的有效性分析

从15种绿化植物(C_1, C_2, \dots, C_{15})对3个不同边坡(B_1, B_2, B_3)的判断矩阵及单排序和一致性检验计算结果(表6,表7和表8)可以看出,15种绿化植物在3个边坡类型中的有效性及其变化规律。

表5 判断矩阵A-B及一致性检验

Table 5 Judgement matrix A-B and consistency test

A	B ₁	B ₂	B ₃	权重 W _i	λ _{max}	CI	RI	CR
B ₁	1	3	5	0.5024				
B ₂	1/3	1	3	0.2939	3.1886	0.0839	0.8897	0.0943
B ₃	1/5	1/3	1	0.2037				

表6 判断矩阵B₁-C及一致性检验

Table 6 Judgement matrix B₁-C and consistency test

B ₂	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	权重 W _i	一致性检验
C ₁	1/5	1/3	1/5	1/5	1/9	1/5	1/3	1/3	1/7	1/3	1/5	3	1	1/5	1	0.0792	
C ₂	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	3	1/5	3	1/5	1/3	1/7	3	5	1	1/3	0.0775	
C ₃	1	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	5	1/3	1/5	5	1	5	5	7	9	0.0661	
C ₄	1/3	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/3	1/5	1/9	1	1/5	1	1/3	1/3	1/3	0.0688	
C ₅	1/9	1/7	1/9	1/7	5	5	1/5	5	1/7	1/5	1/9	3	1	3	1	0.0744	
C ₆	1	1	3	1	1/5	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	0.0704	
C ₇	1	1	1/3	1	1/7	1/3	3	5	7	7	1	3	3	7	7	0.0611	CI=0.0733
C ₈	1/3	3	1	3	1/3	3	5	1/3	1/3	1/5	3	3	5	7	9	0.0618	RI=0.0821
C ₉	1/7	1/7	3	1/7	1/3	7	7	7	1	7	5	9	7	5	7	0.0775	CR=0.8938
C ₁₀	5	7	3	7	1	3	5	7	3	7	1	7	9	9	1/5	0.0669	
C ₁₁	1/9	1/7	5	1/3	1/7	1/3	3	1/3	1/7	1	1/5	1	3	3	5	0.0719	
C ₁₂	1/3	1/3	1/5	5	1/5	1/3	1	3	1/7	1/3	1/5	3	3	5	5	0.0625	
C ₁₃	1/5	1/5	3	7	1/7	3	1/3	1	1/7	3	3	5	3	1/3	1/5	0.0552	
C ₁₄	1	1	1/3	1	1/7	1/3	1/5	1/7	7	3	5	3	5	7	7	0.0598	
C ₁₅	1	3	1/3	3	1/3	1	3	1/3	1/7	3	3	5	5	1/3	1/5	0.0469	

(1) 在3个边坡类型中绿化植物的有效性分别排序前5位的是：①高速公路边坡(B₁)中依次是：狗牙根、假俭草、紫穗槐、结缕草和爬山虎；②废弃矿堆积坡(B₂)中依次是：结缕草、夹竹桃、紫穗槐、车桑子和胡枝子；③采石场石质边坡(B₃)中依次是：爬山虎、常春藤、扶芳藤、铁线莲和葛藤。

(2) 绿化植物种群有效性权重值变化：同种植物在

不同修复类型中有效性不同，以C₄为例，在B₁修复类型中其权重值为0.0688，在B₂中为0.0467，在B₃中只有0.0339；同时，不同种植物在同一修复类型中权重值都不相同，甚至差别很大。

(3) 绿化植物有效性级别的变化：按权重值大小将绿化植物有效性划分为3个级别，即：I级(较低)，权重值≤平均值(0.0667)、II级(较高)，权重值在

表 7 判断矩阵 B_2-C 及一致性检验
Table 7 Judgement matrix B_2-C and consistency test

B_2	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	权重 W_i	一致性检验
C_1	3	1	1/3	3	1/3	1	3	1/3	1/7	3	3	5	5	1/3	1/5	0.057 9	
C_2	1/3	3	1	3	1/7	7	5	1	1/9	1/7	1/5	3	1	3	1/5	0.046 7	
C_3	1/5	1/3	1/7	1	1/7	1/3	1/5	1/3	1/7	1	1/5	3	3	1/3	1/5	0.054 2	
C_4	1/7	3	3	3	1/5	1/9	1/3	1/3	1/3	1/9	1/3	3	3	1	1/3	0.046 7	
C_5	5	3	7	7	1	7	7	7	1	7	5	9	7	5	1/3	0.159 8	
C_6	1/5	1/3	1/3	1	1/7	5	7	7	7	1	1	7	9	9	1/5	0.112 7	
C_7	5	1/3	1/3	5	1/5	1/3	1	5	5	1	1	5	5	3	3	0.071 4	
C_8	1	1/3	3	5	1/7	5	1	1/5	1/9	1/7	1	3	3	3	1/3	0.040 4	$CI=0.027 8$
C_9	1/7	5	5	5	3	1/9	3	5	5	5	1/3	3	5	3	1	0.092 1	$RI=0.293 6$
C_{10}	1	1/3	3	5	1/5	1/3	1	3	1/7	5	1/5	3	5	7	7	0.072 3	$CR=0.094 7$
C_{11}	1/3	3	1	7	1/7	3	1/3	1	1/7	3	3	5	3	1/3	1/5	0.069 8	
C_{12}	1/3	1/5	1/5	1/3	1/9	1/9	1/3	1/3	3	1/7	1/5	1	1/3	1/3	1/3	0.034 9	
C_{13}	7	7	7	7	1	9	9	9	1	1/7	1/5	1/3	5	3	1/5	0.038 8	
C_{14}	1/5	1/5	1/3	1/3	1/7	1/9	1/3	1	1/5	1/9	1/5	3	1	1/3	1/5	0.034 9	
C_{15}	3	1	1/3	3	1/7	1	1/5	1/7	1/9	1/5	3	9	9	9	9	0.067 4	

表 8 判断矩阵 B_3-C 及一致性检验
Table 8 Judgement matrix B_3-C and consistency test

B_3	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	权重 W_i	一致性检验 Consistencytest
C_1	1	1	3	1	1/5	1/3	1/5	1/7	1/9	1/5	3	9	9	9	9	0.054 8	
C_2	1	1	1/3	1	1/7	1/3	3	1/5	1/9	17	1	3	3	3	1/3	0.042 6	
C_3	1/3	3	1	3	1/9	3	1/3	1/3	1/9	1/7	1/5	3	1	3	1/5	0.038 0	
C_4	1	1	1/3	1	1/7	1/3	1/5	1/7	1/9	1/7	1/5	1/3	5	3	1/5	0.033 9	
C_5	5	7	9	7	1	3	5	7	1/3	7	1	7	9	9	1/5	0.062 4	
C_6	3	3	1/3	3	1/3	1	3	1/3	7	3	3	5	5	1/3	1/5	0.053 6	
C_7	5	1/3	3	5	1/5	1/3	1	3	5	5	1/5	3	5	7	7	0.070 3	
C_8	7	5	3	7	1/7	3	1/3	1	3	3	3	5	3	1/3	1/5	0.048 1	
C_9	9	9	9	9	3	1/7	1/5	1/3	1	7	5	9	7	5	1/3	0.049 0	$CI=0.067 8$
C_{10}	5	7	7	7	1/7	1/3	1/5	1/3	1/7	1	1/5	3	3	1/3	1/5	0.061 5	$RI=0.778 4$
C_{11}	1/9	3	3	5	5	5	1/7	5	3	5	1/9	1/7	1/3	1/5	1	0.134 4	$CR=0.087 1$
C_{12}	1/9	1/3	1/3	3	1/7	1/5	1/3	1/5	1/9	1/3	1/7	1	1/3	5	7	0.095 9	
C_{13}	1/9	1/3	1	1/5	1/9	1/5	1/5	1/3	1/7	1/3	1/9	3	1	3	3	0.082 3	
C_{14}	1/3	1	5	5	1	1/3	5	1/3	1/5	5	1	7	9	9	9	0.077 3	
C_{15}	1/9	1/3	1/3	1/3	1/9	3	1/7	3	1/5	3	1/9	1/5	1/3	1	5	0.095 9	

0.066 7~0.073 4($\geq 60\%$ 平均值)之间,Ⅲ级(最高),权重值 ≥ 0.0734 。由此可见 15 种植物在修复 B_1 、 B_2 和 B_3 个边坡类型中,Ⅰ级有效性依次占比为 46.67%、53.33% 和 60.00%,即Ⅰ级有效性按 B_1 、 B_2 和 B_3 顺序呈递增趋势;Ⅱ级有效性在 B_1 、 B_2 和 B_3 中分别占比为 26.67%、20.00% 和 6.67%,呈递减趋势;Ⅲ级有效性在 B_1 和 B_2 中各占 26.67%,但在 B_3 中有突破性增长,达到 33.33%。

(4)不同生活型植物对边坡修复的有效性。从以上单排序结果还可以看出:在 B_1 中草、灌、藤植物有效性的权重值比例依次为:0.366 0、0.337 7 和 0.296 3,草本植物有效性占比最大;在 B_2 中 3 者占比依次为 0.365 3、0.388 9 和 0.245 8,灌木+小乔木略占优势;在 B_3 中 3 者占比依次为:0.231 7、0.282 5 和 0.485 8,藤本植物占绝对优势。表明不同生活型植物与边坡修复类型有一定的关联性,即在高速公路边坡中草本

植物有效性占优,在废弃矿堆积坡中灌木有效性占优,在采石场石质边坡中藤本植物有效性占绝对优势。

2.3 层次总排序及一致性检验

层次总排序及一致性检验结果显示(表9),15种植物对修复受损边坡有效性的总排序为:结缕草>爬

山虎>夹竹桃>紫穗槐>狗牙根>胡枝子>车桑子>扶芳藤>假俭草>常春藤>地毯草>葛藤>铁线莲>百喜草>黄荆。层次总排序结果证明绿化植物对某一受损边坡的贡献不同于其对总体目标的贡献,反映出局部与整体、少因素与多因素等的差异性。

表9 层次总排序及一致性检验

Table 9 Hierarchy total sorting and consistency test

B_i	B_1	B_2	B_3	层次总排序
	0.502 4	0.293 9	0.203 7	
C_1	0.079 2	0.057 9	0.054 8	0.068 0
C_2	0.077 5	0.046 7	0.042 6	0.061 3
C_3	0.066 1	0.054 2	0.038 0	0.056 9
C_4	0.068 8	0.046 7	0.033 9	0.055 2
C_5	0.074 4	0.159 8	0.062 4	0.097 1
C_6	0.070 4	0.112 7	0.053 6	0.079 4
C_7	0.061 1	0.071 4	0.070 3	0.066 0
C_8	0.061 8	0.040 4	0.048 1	0.052 7
C_9	0.077 5	0.092 1	0.049 0	0.076 0
C_{10}	0.066 9	0.072 3	0.061 5	0.067 4
C_{11}	0.071 9	0.069 8	0.134 4	0.084 0
C_{12}	0.062 5	0.034 9	0.095 9	0.061 2
C_{13}	0.055 2	0.038 8	0.082 3	0.055 9
C_{14}	0.059 8	0.034 9	0.077 3	0.056 0
C_{15}	0.046 9	0.067 4	0.095 9	0.062 9
一致性检验	CI	0.027 8	0.067 8	$CI=0.058 8$
	RI	0.514 9	0.514 9	$RI=0.514 9$
	CR	0.082 1	0.087 1	$CR=CI/RI=0.114 2$

2.4 重建目标植物群落及其有效性分析

目标群落指的是受损边坡修复后植物的种类组成和层次结构目标^[18]。根据以上15种绿化植物对3个受损边坡生态修复的有效性,即可按照不同边坡类型、护坡要求和预期的景观效果构建相应的目标植物群落。

2.4.1 山区受损高速公路边坡的目标植物群落

(1) 修复山区受损高速公路边坡的主要限制因子:坡面多以贫瘠生土、破碎岩石和大量的裸露边坡为主,抗蚀能力弱,滑坡、泥石流和山洪风险大;小气候复杂多变,边坡稳定性较差(坡度 $\geq 45^\circ$),客土基材与坡面容易分离或脱落^[19]。(2) 边坡修复方向:以生态恢复、边坡防护与景观协调为主,即既要恢复被破坏的植被,又要防止水土流失,还要注重公路景观效果。(3) 目标植物群落:一般要求在短期内达到生态护坡和景观效果的双重目的,为此修复前期拟以比较容易构建

的草本型植物群落为主,然后通过自然演替和人工培育快速形成稳定的草灌型目标植物群落;不宜栽植乔木,因为乔木自身重量较大,会导致边坡不稳。(4) 植物选择:按照2.2研究结果,首选对修复高速公路边坡有效性比较高的狗牙根、百喜草、假俭草等分别作为先锋植物构建草本植物群落,待边坡初步稳定后再栽植适量紫穗槐、车桑子、夹竹桃和黄荆等灌木分别作为建群种或优势种构建草灌型目标植物群落。(5) 预期效果:既可提高群落的稳定性及护坡保持水土功能,又可通过不同类型植物的高度、形态、生长态势等方面的不同表现,建成物种丰富度高、景观富于变化、稳定性好的灌草型植物群落。

2.4.2 废弃矿山堆积坡的目标植物群落

废弃矿山堆积坡是由剥离表土、开采的岩石碎块和低品位矿石堆积而成的废石堆积地,其周围植被多以次生林地和灌木草地为主。(1) 生态修复的主要限制因子:土壤基

质以结构松散的矿渣为主,干旱、贫瘠、水土保持功能差,容易形成水土流失、塌坡和泥石流,引发区域地质灾害;堆积物中含有不同程度的污染物,特别是潜在的重金属对环境污染的风险更大^[20]。(2)边坡修复方向:既恢复其生态功能,又尽可能地发挥土地使用价值,故以修复成林地或牧业用地为宜。(3)拟建目标植物群落:以乔灌草型植物群落为重建的目标植物群落。(4)植物选择与应用:选摘抗旱、耐盐碱、耐贫瘠等抗逆性强、根系发达、生长速度快,且对修复废弃矿山堆积坡有效性最高的结缕草、夹竹桃、紫穗槐、车桑子和胡枝子(见2.2的表述)等作为先锋或建群种植物。(5)预期效果:通过这些植物的快速生长降解堆积坡土壤毒性,促进活性化,使其更有利于植物生长,为当地物种入侵创造有利条件。从而逐步实现群落的自然演替,逐渐融入当地自然环境,并达到稳定状态。最终既恢复其生态功能,又提高了土地使用价值,还具有较高的景观价值。

2.4.3 采石场岩质边坡植物群落 岩质边坡是废弃采石场最常见的受损边坡类型。(1)修复这类受损边坡面临的主要限制因子有:坡度陡峭或有悬空,崖面几乎没有任何土壤或松散基质,小气候条件严酷,原生植被及其生存条件多已被深度破坏而荡然无存^[21];(2)修复方向:以生态防护为主,突出生态效益,采用工程技术措施修理边坡、处理浮石、构筑种植平台和种植槽等,配置适宜的客土和基质;(3)拟建的植物群落:以藤本—小灌木—草本植物为混合型植物群落;④植物选择:按边坡岩性、坡度、表面形态等特点,拟选择适宜的藤本植物作为建群种和优势种。其中:种植平台拟选狗牙根、结缕草等草本植物作先锋植物,以爬山虎、常春藤等藤本植物作为建群种和优势种;在石壁修筑的种植槽和边坡小平台内回填的种植土上种植狗牙根、假俭草、爬山虎、长春藤、紫穗槐和黄荆等植物,为建立草、灌、藤复合型植物群落创造条件;在石崖空穴或裂缝栽种爬山虎、铁线莲、扶芳藤、紫穗槐、黄荆等藤本及灌木或小乔木,利用藤本植物下垂覆盖裸露岩体;在坡脚的种植槽中栽植爬山虎、葛藤、常春藤和车桑子、紫穗槐和夹竹桃等攀缘、带花植物,这样有利形成协调的景观植物群落,并具有强大的水土保持功能,其景观视觉效果更显生动鲜活。

3 讨论

本研究结果发现,修复高速公路边坡对实现总体目标的有效性高达50.24%,这是因为在研究区域内受损高速公路边坡是3个修复类型中体量最大,且主要分布于人口密集和经济发达区域,其潜在生态风险以及对社会经济发展的负面影响最大,因此比较容易取得修复成效^[22],对总体目标的贡献率最大。

同种植物在不同边坡类型中,不同种植物在同一种边坡类型中,以及草、灌、藤植物在相同或不同边坡类型中的有效性都不相同。这主要是因为每种边坡类型都包含大量生态因子,每一因子都不是孤立地对绿化植物起作用,而绿化植物总是生活在多种生态因子交织成的复杂网络之中,同时,由于绿化植物因竞争排斥而难以长期共存,也难以形成生态位重叠而表现出千差万别的适宜性,以及对边坡修复的有效性差别^[23]。

本研究依据不同边坡类型、边坡修复的限制性因子、修复方向和要求^[24-26],结合不同植物在不同受损边坡修复中的有效性权重值进行品种选择和搭配,提出了修复受损边坡的目标植物群落,为定性和量化设计与重建目标植物群落做了一些尝试,期待后续研究再作进一步完善和提高。

4 结论

对山区高速公路边坡、废弃矿山堆积坡和采石场石质边坡及15种当地近年常用的15种绿化植物进行层次分析结果证明,不同边坡类型对边坡修复的有效性具有决定性的影响,其中受损边坡规模、边坡地形、坡度、基质植物生存条件遭受破坏的程度等是重要影响因素;绿化植物对边坡修复的有效性随边坡类型的变化而变化,但每种边坡都有适宜性相对较好、生态位相对协调的一些植物,它们对提高边坡修复有效性具有不可替代的作用,也是重建目标植物群落首选的先锋植物和建群种的主体成分。

参考文献:

- [1] 申桂顺,丁鹏.山体边坡生态修复方法初探[J].生态与环境工程,2011,(13):201-202.
- [2] 刘学录.我国景观生态学尺度效应研究进展[J].甘肃农业大学学报,2021,56(6):1-9.

- [3] 许文年,夏振尧,戴方喜,等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用[J]. 中国水土保持, 2005, 4(12): 31-33.
- [4] LI Shaoli, XU Wennian, LIU Lirong. Study on eco-restoration of excavated-rockslope: A case study of QiusuoZhongchuang Center Project inYichang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(4): 130-137.
- [5] 包维楷,陈庆恒. 退化山地生态系统恢复和重建问题探讨[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 22-27.
- [6] 朱兆华,陈晓蓉,徐国刚,等. 受损边坡生态修复与景观重建技术探索与实践[J]. 江西农业学报, 2016, 28(10): 75-81.
- [7] 徐国钢,赖庆旺,李永华,等. 岩石边坡快速生态修复新技术[J]. 草业科学, 2003, 20(11): 72-74.
- [8] 贺握权,李志丹,高桂娟. 高陡石质边坡生态修复初期植物组合优化研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 759-767.
- [9] Gao G J, Yuan J G, Han R H, *et al.* Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(4): 303-311.
- [10] 袁银,廖浩斌,刘永金. 等. 深圳市生态修复裸露边坡的植物群落特征研究[J]. 广东林业科技, 2013, 29(3): 60-65.
- [11] 陈晓蓉,徐国钢,朱兆华,等. 深圳地区道路边坡植物配置及群落建植技术[J]. 草业科学, 2013, 30(9): 1359-1364.
- [12] 祝遵凌,胡海波,芦建国. 不同植物配置模式在边坡防护中的应用比较[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2022(12): 17-20.
- [13] 车生泉,可燕. 上海地区水生观赏植物资源多样性及其利用初探[J]. 上海农学院学报, 1997, 15(4): 293-300
- [14] 赵静,刘利华. 护坡植物的选择[C]//土木建筑学会2009年学术年会论文集, 2009: 497-499.
- [15] 陈影,张利,董加强,等. 废弃矿山边坡生态修复中植物群落配置设计—以太行山北段为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 154-162.
- [16] 李翔,杜小姣,朱敏群,等. 用AHP法构建耐荫植物综合评价指标体系筛选耐荫植物[J]. 草原与草坪, 2015, 35(5): 84-91.
- [17] 李自珍,应用生态学研究[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1991.
- [18] 李少丽,许文年,丰瞻,等. 边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究[J]. 中国水土保持, 2007, 12(5): 53-55.
- [19] 刘龙,公路植被群落诱导技术初探[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007(7): 17-20.
- [20] 杨瑞卿,张亚红,徐芳,等. 废弃采石场植被修复效果的调查与研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2019, 34(1): 81-86.
- [21] 方文,潘声旺,何平,等. 先锋种丰富度对边坡植被群落特征及其护坡效益的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3654-3662.
- [22] 潘声旺,袁馨,胡明成,等. 初始绿化植物生活型构成对边坡植被群落特征及水土保持性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 217-224.
- [23] 潘声旺,胡明成,罗竞红,等. 绿化植物的生活型对边坡植被物种多样性及护坡性能的影响[J]. 生物多样性, 2015, 23(3): 341-350.
- [24] 王永林. 高速公路边坡绿化中藤本植物的选择与应用[J]. 公路, 2011(9): 233-235.
- [25] 袁剑刚,周先叶,陈彦,等. 采石场悬崖生态系统自然演替初期土壤和植被特征[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 53-58.
- [26] 王琼,辜再元,周连碧. 废弃采石场景观设计与植被恢复研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(6): 57-59.

Study of slope types and the effectiveness and target communities of green plants in slope restoration

CHEN Zao-xiong

(*Techand Shanyi Environment Construction Co., Ltd., Shenzhen 518003, China*)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to investigate the effectiveness of green plants and damaged slopes for ecological restoration and to explore the main basis for rebuilding the target plant community. [Method] The effectiveness of green plants and damaged slopes in slope restoration was analyzed by Analytic Hierarchy Process (AHP) method, and the target plant communities were constructed by selecting pioneer and constructive plant species in order of effectiveness. [Result] This study found that the volumes of damaged highway slope bodies were large and mainly located in economically developed and densely populated areas, which had a high impact on the environment and social economy. And therefore the restoration of damaged highway slopes had a quick effect and the contribution rate to the overall target was as high as 50.24%. The effectiveness of different species and life types of plants varied greatly and could be combined in a variety of ways, but the most effective plant for the type of restoration should be preferred as the green plant for the target community. [Conclusion] The plant communities of “shrub—herb” type, “arbor—shrub—herb” type, and “liana—herb” type were proposed as the target plant communities for the restoration and reconstruction of mountainous highway slopes, accumulated slopes of abandoned mine, and rocky slopes of quarries respectively.

Key words: slope type; slope restoration; analytic hierarchy process; target plant community

(责任编辑 刘建荣)