

高陡岩质边坡生态修复过程中植物群落与地下生境特征研究

袁磊¹,周建伟^{1*},温冰²,欧虹兵¹

(1. 中国地质大学(武汉) 环境学院,湖北 武汉 430074;2. 中国地质大学(武汉) 地质调查研究院,湖北 武汉 430074)

摘要:为了探讨不同高陡岩质边坡生态修复工艺过程中植物群落与地下生境的特征,以济南市植生袋、生态袋、挂网喷播、植生袋+挂网喷播模式、格构+生态袋+挂网喷播模式5种工艺的典型边坡植物群落为研究对象,对群落的物种多样性与地下生境特征进行了调查研究。结果表明:1)修复工艺固持水土的能力是重塑边坡生境条件的核心,基质的厚度直接影响植物的种类与生长状况;2)植物群落演化的趋势为人工栽植种向本地种或混合方向演化,复合模式下的植物种类最多,覆盖度达90%,景观修复效果最好。挂网喷播覆盖度最低,为10%~30%;3)生境条件与修复年限是影响植物多样性的主要因素,不同修复工艺的植物Pielou均匀度指数、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数为挂网喷播>植生袋、生态袋>复合工艺模式,而Patrick丰富度指数、Margalef丰富度指数为复合工艺模式与挂网喷播模式较高。完成岩质边坡生态修复后的初始几年内植物群落变化最大,植物的多样性随修复年限逐渐升高。该研究可为济南市乃至华北地区的高陡岩质边坡生态修复工作提供参考依据。

关键词:高陡岩质边坡;生态修复;物种多样性;地下生境

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)02-0084-06

Characters of Vegetation Community and Below-ground Habitats of Ecological Restoration Process on High-steep Slope

YUAN Lei¹, ZHOU Jian-wei^{1*}, WEN Bing², OU Hong-bing¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. Institute of Geological Survey and Research, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to explore the characters of vegetation community and below-ground habits of ecological restoration process on different high-steep slope with different technological means, we investigated plant community diversity and below-ground habitats of 5 typical techniques, including slope planting bags, ecological bags, net-suspended spray seeding, planting bags+net-suspended spray seeding, and lattice+ecological bags+net-suspended spray seeding. The results showed that 1) the capability to hold water and soil was the core of restoration technology, the thickness of the substrate directly affected the type and condition of the vegetation. 2) The trend of plant community evolution was the transformation of the cultivated species to native species or mixed species, the complex modes had the most species with the coverage of up to 90%, so its landscape restoration was the best. While the minimum coverage was net-suspended spray seeding technology, only 10%—30%. 3) The major factors influencing species diversity were habitats and repairing ages. Pielou evenness index, Simpson diversity index and Shannon-Wiener diversity index ranked as net-suspended spray seeding>planting bags and ecological bags>composite modes, while Patrick richness index and Margalef richness index of composite modes and net-suspended spray seeding technology

收稿日期:2016-07-02 修回日期:2016-09-01
基金项目:国家自然科学基金面上项目(41572344);山东省济南市国土资源局“济南破损山体高陡边坡地境再造覆绿新技术监测评价与应用示范”项目(JNCZ(HZJS)-GK-2016-0003)。
作者简介:袁磊,男,硕士,研究方向:矿山生态地质与环境地质。E-mail:3360874yl@163.com
*通信作者:周建伟,男,副教授,硕士生导师,研究方向:矿山生态地质与环境地质。E-mail:jw.zhou@hotmail.com

were higher. Plants community changed mostly during a few initial years after ecological restoration of rocky slope,plant community diversity gradually increased with the repairing period. The study could provide some references for ecological restoration on the high-steep rocky slope in Jinan and even North China.

Key words: limestone high-steep slope; ecological restoration; species diversity; below-ground habitat

城镇化进程和道路交通发展的加快,使得越来越多的历史遗留破损山体进入到城市规划区和道路沿线的范围内,大量裸露的高陡岩质边坡恶化了自然环境,对城市生态景观产生了较大影响^[1-2]。从 2012 年起,全国各地陆续启动“矿山复绿”行动,高陡岩质边坡的生态修复工作势在必行。高陡岩质边坡存在植被退化严重、植物种类单一、边坡覆土薄、易水土流失等问题,这些都为高陡岩质边坡生态修复工作提出了挑战,高陡岩质边坡生态修复是一项涉及多学科、多专业、综合性很强的系统工程^[3]。

目前在坡前缺少可覆土空地的情况下,高陡岩质边坡的生态修复技术主要有挂网喷播、植生袋、生态袋等,多种技术组合的复合型工艺也逐渐发展起来。但是不同工艺各具不同的技术特点与适用条件,其植被重建效果差距颇大。目前针对高陡岩质边坡植被群落特征的研究还较少,特别是对于各种高陡岩质边坡生态修复技术,缺乏修复效果方面的对比研究^[4-5]。以济南市典型破损山体高陡岩质边坡生态修复工程为研究对象,通过对不同修复技术边坡的植物种类、盖度、多样性、地下生境与植物根群适应性等方面进行研究,探讨不同技术工艺下边坡的生态修复效果,为高陡岩质边坡生态修复技术的合理选择提供科学依据。

1 研究区概况

济南市地理坐标为 116°11′53″—117°44′33″E,36°02′04″—37°31′21″N,位于我国北方中纬度半湿润地区,属暖温带大陆性季风气候,历年平均降水量在 600~700 mm 之间,多年平均气温 13.6℃,1 月最冷,平均气温-1.9℃,7 月气温最高,平均气温 27℃。

区内广泛出露有寒武系与奥陶系巨厚层灰岩,石灰岩资源十分丰富,几十年来的开采形成了大量的裸露高陡岩质边坡,边坡剥离面大多在 20 m 以上,且坡度陡(>80°)。截至目前,济南市已采取了大量卓有成效的破损山体修复治理工作^[6],累计治理破损山体 165 座,修复破损面积 1 865 万 m²,所采取的修复技术种类多样,为本次研究提供了良好的工作基础条件。

2 研究方法

2.1 野外样方调查

本次主要于 2015 年 9 月份进行样方调查,通过

现场踏勘以及收集资料,了解研究区内高陡岩质边坡生态修复工程,最终选择 5 种不同的修复技术进行植物群落与生境特征的对比研究,5 种技术为植生袋、生态袋、挂网喷播、复合工艺有植生袋+挂网喷播模式、格构+生态袋+挂网喷播模式^[7]。

针对每种技术选择 1~2 个高陡岩质边坡典型修复工程,对岩质边坡生态修复效果进行调查,保证样方尽量分散在整个边坡上,每种技术选择 6 个样方。由于岩质边坡植被群落草本植物可占植物群落的 90%以上,灌木、小乔木密度为 0.5~3 棵/m²,基径最大为 13 mm,高度为 15~108 cm,植株小、种类少。所以样方面积设置为 1 m×1 m。调查记录植物种名,统计各个物种的数量,对于灌木、乔木,还需测量其高度、冠幅。在方便测量观察的边缘等地带,使用折尺测量基质层厚度,以 10 cm 为间隔,现场测量土壤剖面空气温湿度,同时每 10 cm 取 1 次土样采用烘干法测量土壤含水率;观察植物根系的展布状态,是否受到环境胁迫。

表 1 不同修复技术工程概况

Table 1 The project overview of different restoration technologies

修复工艺	工程数量/个	调查区总面积/m ²	草本比例/%
挂网喷播	1	8 300	96.8
植生袋	2	23 000	96.5
生态袋	2	9 500	98.1
植生袋+挂网喷播模式	2	11 500	97.0
格构+生态袋+挂网喷播模式	2	13 000	98.5

2.2 数据处理方法

根据马克平^[8-9]等描述的植物群落多样性测度方法,选择以下指标进行测度。

1)植物多样性指数:

$$\text{Shannon-Wiener} = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i$$

$$\text{Simpson} = 1 - \sum_{i=1}^N P_i^2$$

2)植物群落均匀度指数:

$$\text{Pielou} = (- \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i) / \ln S$$

3)植物群落丰富度指数:

$$\text{Margalef} = (S - 1) / \ln N$$

$$\text{Patrick} = S$$

式中,S—样方内植物种数;N—物种的总个体数; $P_i = N_i / N$,其中 N_i —样方中第 i 个物种的个体数。

利用 Excel 和 SPSS22.0 软件进行数据处理, 计算时每种修复工艺的 6 个样方均先分别求指标值进行显著性检验,再合计各个样方的物种数,计算各工艺指标值作为多样性特征值(表 4)。

3 结果与分析

3.1 不同修复工艺的地下生境特征

天然条件下,高陡岩质边坡赋存土壤基质极为困难,所以高陡岩质边坡生态修复的核心工作即为重塑植物生长所需的生境条件。根据野外调查测试,几种生态修复工艺所采用的土壤基质为营养土或草炭土,营养物质丰富,成分上差别不大,其主要差别在于基质厚度与初始播撒植物种子时的位置。基质厚度与植物根系的生长空间、温湿度及水分条件密切相关。

3.1.1 根系与土壤基质厚度分析 根据 JACKSON R B 与徐恒力^[10-11]等研究,中纬度地区禾本科植物根系主体一般集中在 0~30 cm 土层中;灌木和乔木根系主体一般集中在 10~50 cm 土层中,其中 20~50 cm 土层根所占比例则超过 50%。笔者等人在山东、河南地区的石灰岩山坡上采用样坑法^[12]来统计根系的分布情况,统计坑壁面出露的根系,按粗根(直径>1 cm)、中根(直径 1~0.2 cm)和细根(直径<0.2 cm)划分,得到不同深度的细根频率分布曲线。

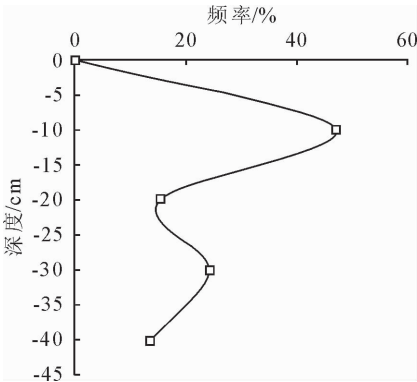


图 1 样坑细根频率分布

样坑总频率分布曲线在 10 cm 和 30 cm 处各有 1 个波峰。结合植被样方调查,样坑附近草灌乔类植物均有分布,分析得 0~20 cm 为草本植物的根群圈范围;第 2 个波峰 20~40 cm 为灌木、乔木的植物的根群圈范围。植物根系生长需要充足的空间,当土壤基质厚度较薄时,根系生长就会受到抑制。

野外的根系观察结果表明,当基质厚度<30 cm 时,植物根系受到明显的胁迫作用,根系呈现为在土壤基质与岩壁的接触面上水平向生长,特别是一些工艺上先对岩质边坡进行水泥砂浆喷浆再进行植被

修复工作的边坡,根系无法扎入岩石裂隙,而未进行喷浆的边坡可见到根系扎入裂隙或中一强风化岩石^[13-14],岩石裂隙在传输和储存水分与养分方面也具有重要的作用^[15]。基质厚度浅的挂网喷播技术几乎没有灌木与乔木物种;植生袋与生态袋有少量灌木生长,其株高相比平原区正常株龄的同种类植物要低近 1 倍;而复合型模式下的边坡基质较厚,草灌乔植物兼有分布,且长势良好。

种子播撒位置也影响植物物种的选择,如植生袋与生态袋技术,袋子出于防止水土流失与提高强度设计,网眼较小,所有混入袋内基质的植物种子以禾本科为主,若要种植花卉或灌木,只能在袋子上凿出孔洞进行点种。

表 2 不同修复工艺的基质厚度特征

修复工艺	修复年限/a	基质厚度/cm	种子播撒位置
挂网喷播	6	8~15	喷播基质
植生袋	3	15~30	袋内基质或点种
生态袋	4	25~35	袋内基质
植生袋+挂网喷播模式	2	25~40	喷播基质
格构+生态袋+挂网喷播模式	2	40~50	喷播基质

3.1.2 温湿度与水分分析 土壤温湿度与含水率是植物根系生理状况的重要影响因素,对各个边坡土壤不同深度的含水率、温湿度进行测量,多次测量取均值。

表 3 不同土壤深度的温湿度与含水率

土壤深度/cm	温度/℃		相对湿度/%		含水率/%
	1 月	8 月	1 月	8 月	
0~10	-2.1	28.49	89.30	90.70	15.71
10~20	0.18	26.44	90.99	94.48	18.20
20~30	0.90	25.91	91.21	96.65	20.58
30~40	1.36	25.73	91.15	97.51	22.32
40~50	1.87	25.61	90.92	97.79	22.57

从表 3 可知,一定厚度的土壤深度能够有效地消减大气温湿度的涨落值,为植物根系营造相对稳定且适宜的环境;表层土壤含水率最低,蒸散发最为强烈,20~50 cm 土壤含水率达到 20% 以上,深层土壤既可补充上层蒸散发失水,也可为本层位的植物根系提供水分。由此可知,土壤基质的厚度是高陡岩质边坡适宜地下生境条件的重要影响因素。

3.2 不同修复工艺植物类型特征

通过对不同覆绿工艺的植物物种统计分析(表 4),可发现各类技术间存在明显差异。5 种典型工

表 4 不同修复工艺植物类型特征

Table 4 The plant community features of different restoration technologies

植物名称	植生袋	生态袋	挂网喷播	植生袋+挂网 喷播模式	格构+生态袋+ 挂网喷播模式
紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)	+			++	++
刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)				++	++
紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	++		++		+
胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)				+	
黄荆(<i>Vitex negundo</i>)	—	—	—	—	—
高羊茅(<i>Festuca arundinacea</i>)	+++	++		+++	+++
狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>)	++	+++	+		
波斯菊(<i>Cosmos bipinnata</i>)				+	+
金鸡菊(<i>Coreopsis drummondii</i>)	+			+	+
野菊(<i>Chrysanthemum indicum</i>)				—	—
锦葵(<i>Malva sinensis</i>)				+	+
爬山虎(<i>Parthenocissus tricuspidata</i>)	+			+	+
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	--	--	--	—	—
紫马唐(<i>Digitaria violascens</i>)	—		—	—	—
灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)	—	—	—		
其他本地中山枣(<i>Ziziphus montana</i>)、苘草(<i>Arthraxon hispidus</i>)、藟(<i>Cirsium japonicum</i>)等	—	--	--	—	—

注: + 代表人工栽植种, ++ 代表人工种植较多种, +++ 代表人工栽植优势种, — 代表自然入侵种, -- 代表自然入侵较多种, --- 代表自然入侵优势种。

艺边坡共出现 31 个植物种, 其中灌木-小乔木 6 种, 隶属于 4 科 6 属, 主要为豆科(Leguminosae); 草本植物共有 23 种, 隶属于 8 科 22 属, 主要为禾本科(Gramineae) 和菊科(Asteraceae); 藤本植物有 2 种, 隶属于卫矛科(Celastraceae) 和葡萄科(Vitaceae)。

挂网喷播边坡植物物种以本地自然入侵草本为主要物种, 先锋物种如紫花苜蓿、狗牙根数量逐年减少, 挂网喷播技术是 5 种技术中土壤基质最薄的, 同时水土流失也是最为严重的, 而岩质边坡 10 cm 深度内温度夏季可达 40℃, 冬季低至-5℃, 不利的温度条件使得多年生植物难以仅凭借 10 cm 左右的土壤基质存活, 故其边坡植物群落逐渐演化为以本地 1 年生草本为主的植物群落结构^[16]; 植生袋技术与生态袋技术相仿, 群落中物种以禾本科为主, 优势种为人工种植的多年生草本植物, 此外群落中混生一定的自然入侵草本植物和在袋子上凿洞点种的花卉或者小灌木; 2 种复合工艺的覆绿边坡植物种类最多, 植被景观为草灌结合并搭配菊科花卉点缀, 植被群落显现出的初步演化规律为优势种由高羊茅等多年生草本向紫穗槐等灌木与本地草本混合的方向演化, 目前由于修复年限尚只有 2 a, 自然入侵种数量较少。

3.3 不同修复工艺植被覆盖度

覆盖度是直观反映修复效果的指标, 同时也可在一定程度上反映出植物的生长状况。挂网喷播技

术植被覆盖度最低, 总体为 30%, 当坡度>70°时, 覆盖度降至 10% 以下; 植生袋与生态袋技术植被覆盖度为 40%~50%, 其也存在较大面积整体裸露的现象; 植生袋+挂网喷播模式植被覆盖度可达 80%, 格构+生态袋+挂网喷播模式植被覆盖度最高, 为 90%。几乎所有的修复工程都存在反坡(反坡即局部与整体坡向相反的边缘部位) 植被覆盖率近乎零的现象, 其原因为高陡岩质边坡反坡难以进行养护, 植物缺水严重难以存活。

3.4 不同修复工艺植物多样性分析

3.4.1 多样性指数与均匀度指数分析 植物多样性在生态学上表征的意义是: 一定数量的总体, 种间数量分布越均匀、物种数目越多, 多样性越高^[17]。利用 SPSS 做 5 种工艺共 30 个样方的单因素方差分析, 5 种工艺的多样性与均匀度指数的平均值均位于 95% 的置信区间内, 标准差为 0.03~0.26, 表明各修复工艺样方之间数据差异不大。显著性检验结果表明生态袋与植生袋技术($P=0.32$)、2 种复合技术($P=0.76$) 间不具有显著性差异, 其他工艺两两之间均有显著性差异($P<0.05$)。结合表 5 可将 5 种修复工艺的植物多样性特征明显分为 3 类, 挂网喷播技术多样性指数最高, 生态袋与植生袋技术次之, 2 种复合技术最低。

分析可知, 生境条件与修复年限是影响植物多样性的主要因素。完成岩质边坡生态修复后的初始几年内, 植物群落变化最大, 开始群落优势种为人工

栽植物种,随着水土流失的加剧和后期养护频率的降低,岩质边坡的生境条件逐渐恶化,以人工栽植物种为优势种的群落慢慢被本地物种所入侵。这在挂网喷播技术中表现尤为明显,因为其固持水土的能力最差,人工种植先锋物种在随后的几年内大量死亡,到目前(6 a 后)只有本地草本存活下来,群落中没有优势种,每种草本数量很少但分布较为均匀,所以挂网喷播多样性指数最高。植生袋与生态袋技术修复年限为 3~4 a,固持水土能力较好,植物群落尚以人工栽植物种为优势种,但本地草本数量所占比例逐年上升。植生袋与生态袋人工栽植优势种高羊茅、狗牙根占物种总个数的比例分别为 63. 2%、66. 3%,物种数量比挂网喷播多,但是种间数量分布不均匀,植物多样性较高。而 2 种复合技术的多样性指数最低,主要原因是工程覆绿时间仅为 2 a,群落尚处于演化初期,人工栽植的高羊茅占物种总个体数的 80%以上,本地物种入侵尚不明显,种间数量分布极不均匀。多种覆绿技术组合的工程形式营造了更良好的生境条件,有利于人工栽植物种的存活,所以复合模式下的植物多样性最低。

在本次统计分析中,植物均匀度与多样性指数呈显著正相关关系,3 种指标特征均呈现出挂网喷播>植生袋、生态袋>复合工艺模式。可见在本研究中两者所表示的信息具有很强的相似性,这说明当群落种间数量分布不均匀时,多样性指数主要受群落中植物分布的均匀程度决定,也就是说多样性指数很大程度上是与均匀度指数重叠的。

表 5 不同修复工艺下植物多样性特征

Table 5 The plant diversity features of different restoration technologies

修复工艺	Shannon-Wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数	Patrick 丰富度指数	物种 总个体数
挂网喷播	2. 337	0. 823	0. 975	2. 912	11	31
植生袋	1. 198	0. 529	0. 545	1. 796	9	86
生态袋	1. 233	0. 559	0. 535	1. 832	10	136
植生袋+挂网喷播模式	0. 658	0. 226	0. 249	2. 271	14	306
格构+生态袋+挂网喷播模式	0. 658	0. 210	0. 223	3. 001	19	403

对于 Margalef 指数来说,挂网喷播与格构+生态袋+挂网喷播模式没有显著性差异($P=0. 62$),植生袋、生态袋、挂网喷播+植生袋模式没有显著性差异($P>0. 05$),即 5 种工艺的 Margalef 指数可以分为上述 2 类,格构+生态袋+挂网喷播模式植物种类为 19 种,是所有工艺中植物物种数最多的;而挂网喷播植物物种数虽只有 11 种,但是其总物种数却远小于前者,因此这两者 Margalef 指数相对较高;植生袋、生态袋、挂网喷播+植生袋模式 3 种工艺则因植物种类数较少、物种总个体数相对较多而指数值较低。

3. 4. 2 丰富度指数分析 植物丰富度有 2 个表征指标,一是 Patrick 丰富度指数,只考虑植物种数的数量,该判断标准下复合工艺模式相对较高,其他 3 种工艺相差不大;二是 Margalef 丰富度指数,该指数同时考虑物种数量与总个体数 2 个因素,在样方内植物种数相差不大的情况下,样方内物种总个体数相对少者丰富度高,故而格构+生态袋+挂网喷播模式与挂网喷播模式丰富度指数较高,其他三者较低。

利用 SPSS 分析后,5 种工艺各样方的 2 项丰富度指数平均值位于 95%的置信区间内。Margalef 指数标准差为 0. 17~0. 31,Patrick 指数标准差为 0. 50~1. 14,表明各修复工艺样方之间数据差异不大,但同一工艺不同样方物种种数是存在一定差异的,这与样方面积小有一定关系。

显著性分析结果表明,对于 Patrick 指数来说,挂网喷播、植生袋、生态袋三者之间不存在显著性差异($P>0. 05$),其他工艺间有显著性差异。表 5 各工艺 Patrick 指数也反映了同样的规律,这与各工艺生境条件不同、初始种植物种差异有关。复合工艺模式由于土壤基质最厚,地下生境条件更有益于多种植物生存,另外复合工艺在选择人工栽植种时除了普遍的禾本科草本外,还栽种了耐寒耐贫瘠的豆科灌木与菊科的花卉点缀,在生态修复的同时增强了观赏性。而挂网喷播、植生袋、生态袋则基本都为禾本科人工栽植种和本地草本,因此植物种类少。

4 结论与讨论

通过对 5 种修复工艺的边坡地下生境条件分析表明,不同修复工艺的区别在于基质厚度与保持水土的能力,基质厚度与保持水土能力表现为格构+生态袋+挂网喷播模式>植生袋+挂网喷播模式>生态袋>植生袋>挂网喷播。基质厚度的不足明显对植物根系的生长产生胁迫作用,灌木和乔木根系主体一般集中在 20~50 cm 土层中,所以基质厚度仅 15 cm 的挂网喷播技术边坡几乎没有灌木生长,而复合工艺边坡灌木数量较多。

5 种工艺的边坡共出现 31 个植物种,其中灌木-小乔木 6 种,隶属于 4 科 6 属;草本 23 种,隶属于 8 科 22 属;藤本 2 种,隶属于 2 科 2 属。挂网喷播技术边坡主要为本地草本;植生袋与生态袋技术边坡优势种为人工栽植的多年生草本,混生有本地草本植物;复合工艺呈现出优势种由高茅茅等多年生草本向紫穗槐等灌木与本地草本混合方向演化。

覆盖度是直观反映修复效果的指标,各工艺覆盖度关系为复合工艺模式>植生袋、生态袋>挂网喷播,局部反坡地带由于难以养护覆盖度最低。

植物均匀度与多样性指数呈现出挂网喷播>植生袋、生态袋>复合工艺模式,丰富度指数则为复合工艺模式与挂网喷播技术相对较高。分析其主要原因生境条件与修复年限的不同,适宜的生境条件有利于人工种植物种的存活,本地物种入侵速度相对就慢,而修复时间越久,水土流失不断加剧,植物群落演化的时间越长,本地物种相对人工种植种更具竞争优势,所以挂网喷播技术边坡多样性指数最高,复合工艺模式最低。

从高陡岩质边坡长久的生态修复效果上来看,显然复合工艺模式特别是格构+生态袋+挂网喷播工艺更具优势,植物种类多、安全、美观,但是其存在施工难度大、造价昂贵的制约,适用于对安全性和景观性要求高的环境;植生袋、生态袋技术造价一般,景观效果较好,适用于坡度较缓或高度中等的边坡;挂网喷播技术施工速度快、短期效果良好,随后人工种植物种大面积死亡或被本地物种侵占,其适用于应急绿化施工或与其他技术搭配使用。各种修复工艺各具特点与适用条件,在破损山体修复过程中,要依据地质环境特点灵活的选择合适的修复工艺达到长久覆绿的效果。

参考文献:

[1] 刘中亮,郝岩松,万福绪. 我国石质困难地植被恢复与重建[J]. 南京林业大学:自然科学版,2010,34(2):137-141.
LIU Z L,HAO Y S,WAN F X. A review of vegetation restoration and rehabilitation on rocky sites in China[J]. Journal of Nanjing Forestry University; Natural Science Edition,2010,34(2):137-141. (in Chinese)

[2] 石丽丽. 京西石灰石采石场废弃地植被恢复效果及其评价研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.

[3] JIM C Y. Ecological and landscape rehabilitation of a quarry site in Hong Kong[J]. Restoration Ecology,2001,9(1):85-94.

[4] 唐强,闫红伟,赵彦博,等. 西安镇道路绿地植物多样性分析[J]. 西北林学院学报,2012,27(2):226-229.
TANG Q,YAN H W,ZHAO Y B,*et al.* Analyses of plant diversity of road green space in Xi'an township[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(2):226-229. (in Chinese)

[5] 王太平,杨晓明. 高速公路边坡植物群落物种多样性[J]. 西北林学院学报,2012,27(2):230-234.
WANG T P,YANG X M. species diversity of plant community on highway slope[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(2):230-234. (in Chinese)

[6] 赵入臻. 城市破损山体景观修复研究——以济南奥体中心为例[D]. 济南:山东建筑大学,2012.

[7] 袁磊,周建伟,温冰,等. 一种用于高陡岩质边坡生态护坡的结构系统[P]. 中国专利:CN 205134340 U.2016-04-06.

[8] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法(Ⅰ): α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性,1994,2(4):231-239.
MA K P,LIU Y M. Measurement of biological community diversity(1): α measurement of diversity (the upper part)[J]. Biodiversity Science,1994,2(4):162-168. (in Chinese)

[9] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法(Ⅰ): α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性,1994,2(3):162-168.
MA K P,LIU Y M. Measurement of biological community diversity(1): α measurement of diversity (the lower part)[J]. Biodiversity Science,1994,2(3):231-239. (in Chinese)

[10] JACKSON R B,CANADELL J,EHLERINGER J R,*et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. Oecologia,1996,108(3):389-411.

[11] 徐恒力,孙自永,马瑞. 植物地境及物种地境稳定层[J]. 地球科学,2004,29(2):239-246.
XU H L,SUN Z Y,MA R. Plant below-ground habitat and stable layer of plant species in habitat[J]. Earth Science,2004(2):239-245. (in Chinese)

[12] 冯全洲,徐恒力. 土地复垦的覆土厚度及覆土基质确定[J]. 安徽农业科学,2009,37(25):12091-12094.
FENG Q Z,XU H L. Thickness and material of covering soil on land reclamation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2009,37(25):12091-12094. (in Chinese)

[13] 贾浩然,宁立波,李明,等. 岩体裂隙的生态学意义研究:以河南省宜阳县锦屏山采石场为例[J]. 环境科学与技术,2014,37(9):48-54.
JIA H R,NING L B,LI M,*et al.* Ecological significance of rock fracture: case study of a quarry in Jinping mountain of Yiyang county,Henan province[J]. Environmental Science & Technology,2014,37(9):48-54. (in Chinese)

[14] ZWIENIECKI M A,NETWTON M. Roots growing in rock fissures:their morphological adaptation[J]. Plant and Soil,1995,172:181-187.

[15] DOBCHUK B S,BARBOUR S L,ZHOU J. Prediction of water vapor movement through waste rock [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,2014,130(3):293-302.

[16] 段玉婷,王志泰,徐小明,等. 石质边坡人工植被群落动态研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):75-81.
DUAN Y T,WANG Z T,XU X M,*et al.* Artificial vegetation community dynamics of rocky slope[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):75-81. (in Chinese)

[17] BUNKER D E,DECLERCK F,BRADFORD J C,*et al.* Species loss and aboveground carbon atorage in a tropical forest [J]. Science,2005,310(5750):1029-1031.