

# 植物护坡工程质量的等级评价研究

胡兴<sup>1</sup>, 陈璋<sup>1</sup>, 李成俊<sup>1</sup>, 张琼瑛<sup>1</sup>, 李绍才<sup>1</sup>, 龙凤<sup>1</sup>, 孙海龙<sup>2</sup>, 李付斌<sup>3</sup>

(1. 四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护  
国家重点实验室, 四川 成都 610064; 3. 四川省彭州市山地生态工程技术研究中心, 四川 彭州 611934)

**摘要:** 在国内外边坡生态恢复工程及评价理论研究的基础上, 以结构稳定和功能持续为导向, 结合系统工程理论与植物护坡工程质量特征, 建立了以力学、植被及基质 3 大类评价指标为主体的植物护坡工程质量评价指标体系。通过层次分析法确定各指标权重及排序, 并以灰色系统理论为依据, 构建递阶多层次灰色综合评价模型, 用于四川省彭州市升平镇人工边坡 3 类不同工程措施植物护坡工程(种子格栅、植物网、喷播植草)的实例评价。评价结果显示, 3 类植物护坡工程措施质量等级均为良以上, 且喷播植草植物护坡工程措施优于种子格栅、植生网, 符合实际情况, 说明构建的评价体系及质量等级划分方法科学可行, 能比较客观准确地反映植物护坡工程系统的质量状况与等级, 具有较强的实用价值。

**关键词:** 植物护坡; 工程质量评价; 等级划分; 指标体系; 灰色评价法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)03-0180-06

中图分类号: TU45

## Grade Evaluation on Quality of Slope Protection Engineering by Vegetation

HU Xing<sup>1</sup>, CHEN Zhang<sup>1</sup>, LI Cheng-jun<sup>1</sup>, ZHANG Qiong-ying<sup>1</sup>,

LI Shao-cai<sup>1</sup>, LONG Feng<sup>1</sup>, SUN Hai-long<sup>2</sup>, LI Fu-bin<sup>3</sup>

(1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu,

Sichuan 610064, China; 3. Institute of Mountain Ecological Engineering Technology, Pengzhou, Sichuan 611934, China)

**Abstract:** On a basis of understanding the domestic and foreign theoretical researches on ecological restoration engineering and related evaluations, the quality characteristics of slope protection engineering by vegetation were summarized and an evaluation index system was established in combination with the systematic engineering theory by threading structure stability & functional continuity as a guidance. This system contained three main evaluation indexes: mechanical protection quality, slope plant community quality and base material quality. Analytic hierarchy process(AHP) was conducted to determine the weight and order of each index. Meanwhile, according to the grey system theory, a low-cost hierarchy grey comprehensive evaluation model was constructed to evaluate the slope vegetation protection engineering handled with three different engineering measures in Pengzhou City, Sichuan Province, China. Results showed that the grades for all the slopes were ranked as good and the grades that slopes with the injection technology of thick layer base material mixture were better than those disposed with seed grilles or vegetation nets, which coincided with the factual account. All these outcomes indicated that the evaluation index system and its grades could objectively and accurately reflect the quality and grade of the slope vegetation protection system, which means that it has good practical values.

**Keywords:** slope protection by vegetation; engineering quality evaluation; grade classification; indexes system; grey evaluation method

收稿日期: 2012-10-18

修回日期: 2012-12-14

资助项目: 国家科技支撑计划项目“龙门山地震带震损坡体生态修复技术与示范”(2011BAK12B04); 四川省科技支撑计划项目“植物护坡工程设计与施工关键技术开发”(2011FZ0118)

作者简介: 胡兴(1987—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 硕士研究生, 主要从事边坡生态修护工程研究。E-mail: alessandro76@126.com。

通信作者: 龙凤(1983—), 女(汉族), 四川省资阳市人, 博士, 讲师, 从事生态恢复工程方面研究。E-mail: phenix111@yahoo.com。

随着社会经济的快速发展,我国交通、水电、矿业等基础设施建设日益增加,大量削坡形成各类次生裸地,不仅破坏原生植被与坡体结构,致使生物多样性锐减、表层土壤碎落滑塌,诱发物种退化、水土流失等严重的生态问题,也是产生滑坡、泥石流等地质灾害的主要原因<sup>[1-2]</sup>,对环境保护事业造成了极大隐患。如何对具有较强异质性的破损边坡实施兼顾工程效果与景观功能的生态防护措施,恢复坡面植被,减少水土流失,维持坡地生态系统健康,成为广大水土保持、岩土和生态工程科研工作者共同关注的热点问题<sup>[3]</sup>。

近年来,植物护坡工程在各类裸露边坡的防护中得到了广泛应用,但有关植物护坡工程的质量评价仍大多停留在“成功或失败”的粗略认识上,更多只是片面地对坡面植物群落、景观效果及水土保持效应等方面进行割裂的定性评价,脱离了工程效应的长久性、动态性及系统性,未能为工程效益评估提供可靠依据<sup>[4-7]</sup>。为此,本文在结合系统工程理论及植物护坡工程本质特征的基础上,旨在构建科学可行的植物护坡工程质量评价体系,定量评价植物护坡工程质量,为植物护坡工程推广改善及监测管理提供建议。

## 1 试验数据与研究方法

### 1.1 研究区概况与工程措施

研究区位于四川盆地西北部的彭州市升平镇,属典型的亚热带季风气候,年平均气温 16.3℃,最热月(7月)平均气温 25.8℃,最冷月(1月)平均气温 5.6℃,年平均降水量 1 146.5 mm。具体受评对象为研究区域内的人工边坡植物护坡工程,边坡用砖砌成,表面喷射混凝土厚度 5 cm 抹平,坡度 60°,坡向正南,坡高 4 m,总面积 300 m<sup>2</sup>。坡面采用高 35 cm 的 PVC 板分隔成坡宽 25 m 的 3 个等面积试验区域,坡顶设置截水沟,坡脚以 5 m 的间距设置径流收集装置。

人工边坡按照不同的工程措施分为:种子格栅护坡工程区、植生网护坡工程区与 TBS II 护坡工程区。种子格栅护坡工程先于坡面喷射 5 cm 厚度的人工基质,基质表面上依次设置底网、承载层,承载层内含种子腔,腔内上下分层填埋种子混合物和黏土,表面铺挂固定镀锌铁丝网后覆盖无纺布保护膜;植生网护坡工程将尼龙等高抗拉强度材料织成,上下两层网中包含缓释肥、种子、水稳定剂等混合物的植生网铺设固定于喷覆厚度为 5 cm 人工基质的坡面上;TBS II 护坡工程采用改良的厚层基材拌合物喷射(thick blend

spout)技术,厚层基材拌合物由生长调整物质、结构改良剂、消毒剂与植被种子等均匀混合形成(容重 1.07 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量 28.1 g/kg,饱和含水量 54.5%)。工程开工时间 2009 年 4 月,至 2009 年 6 月完成。

### 1.2 植物护坡工程质量评价指标体系构建

(1) 评价指标筛选。植物护坡工程是工程与生态效应统一的复杂系统,变量众多,涉及面广,影响程度难以精确定量<sup>[8]</sup>。评价指标需充分考虑植物护坡工程系统的完整性,以达成多角度,不同层次综合反映工程质量的目的。从系统工程角度来看,植物护坡工程是包括坡体—基质—植物的复合系统,通过与环境之间的一系列交互作用构成具有一定结构和功能的统一体系<sup>[9]</sup>。因此,评价指标体系构建须以工程系统的结构完整稳定为基础,功能持续协调为导向,才能确保质量评价体系的完整与科学可行。

从系统论与控制论结合的角度看,植物护坡工程系统不应是割裂的,其结构功能通过系统本身及其与外界环境的物质循环与能量交换联系在一起,健康系统不需要外来的投入维持其生产力,其开放性大,外部输入量小<sup>[10]</sup>。本文将植物护坡工程质量评价指标划分为力学防护质量、坡面群落质量、基质结构质量 3 大类,前者反映系统结构的稳定程度,坡面群落质量表征系统的服务功能与生产力,基质结构度量系统水分养分自主循环更新的恢复能力。

(2) 评价指标及权重排序。基于植物护坡工程系统框架,在国内外研究的基础上<sup>[7-14]</sup>,依据会内会外法初选评价指标,再以专家咨询表的定量和定性信息对其进行统计分析,如果有 1/3 以上的专家认为某项指标一般或不重要,该指标即被淘汰;对于权重很小的指标,并入相近指标中,最终结果经过岩土力学、土壤学及恢复生态学等相关学科专家咨询,直至 70% 以上的专家认同<sup>[15]</sup>。采用层次分析法<sup>[16]</sup>判断同层指标间的优劣程度,由上至下逐次确定判断矩阵,计算出植物护坡工程质量评价指标的权值及排序(见表 1)。

(3) 基于工程质量评价指标的递阶多层次模型。植物护坡工程结构功能相互依存、相互转化的特征,使其质量在不同角度、不同层次具有不同的评价指标,呈现出多目标、多层次结构。运用递阶层次结构理论,将工程质量各指标相互支配、隶属的关系列分成不同的层次。根据指标间相互关联的属性,分解、聚类成有序的植物护坡工程质量评价指标递阶层次结构模型(见图 1)。

表 1 植物护坡工程质量评价指标特征及权值排序

| 1 级指标 | 权重      | 2 级指标    | 指标特征                  | 权值      | 总排序     | 序值 |
|-------|---------|----------|-----------------------|---------|---------|----|
| 力学质量  | 0.327 5 | 基材抗剪强度   | 反映基材抵抗外力破坏的能力         | 0.195 8 | 0.064 1 | 7  |
|       |         | 根系抗拉力    | 反映植株对边坡锚固能力的大小        | 0.310 8 | 0.101 8 | 4  |
|       |         | 坡体—基材抗剪力 | 反映坡面—基材系统的稳定性         | 0.493 4 | 0.161 6 | 1  |
| 群落质量  | 0.259 9 | 植被盖度     | 反映坡面裸露程度              | 0.093 1 | 0.024 2 | 13 |
|       |         | 群落生物量    | 反映植物群落的生产力            | 0.250 9 | 0.065 2 | 6  |
|       |         | 多样性指数    | 植物个体密度、生境差异、群落类型、演替阶段 | 0.177 5 | 0.046 1 | 10 |
|       |         | 均匀度指数    | 反映一定面积的坡面生境内植物种类数目    | 0.053 9 | 0.014 0 | 15 |
|       |         | 灌草植物比例   | 坡面多年生植物种比例,反映群落稳定性    | 0.111 8 | 0.029 1 | 14 |
|       |         | 植物抗逆性    | 植物耐旱、耐瘠薄、抗病虫害等抗性表现    | 0.312 8 | 0.081 3 | 5  |
| 基材质量  | 0.412 6 | 基质容重     | 反映基质紧实程度              | 0.080 4 | 0.033 2 | 12 |
|       |         | 土壤毛管孔隙度  | 反映基质蓄水供水能力            | 0.130 1 | 0.053 7 | 8  |
|       |         | 有机质含量    | 反映基质养分蓄积能力            | 0.253 0 | 0.104 4 | 3  |
|       |         | 养分含量     | 可吸收氮、磷、钾组分总和,反映基质肥力   | 0.127 6 | 0.052 6 | 9  |
|       |         | 基材渗水率    | 反映基材复合体渗水能力           | 0.090 2 | 0.037 2 | 11 |
|       |         | 坡面产沙量    | 反映系统的固土抗侵蚀能力          | 0.318 7 | 0.131 5 | 2  |

注:计算结果均通过一致性检验。

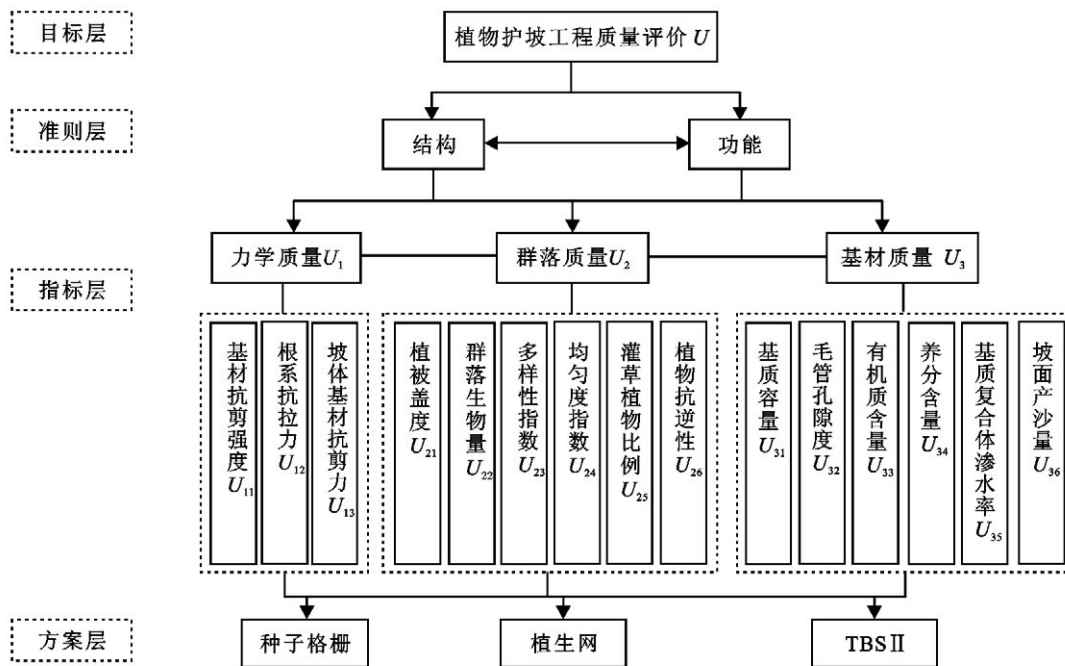


图 1 植物护坡工程质量评价指标递阶层次结构模型

(4) 评价标准建立。在指标体系构建的基础上,参考土壤侵蚀强度分级、中国第 2 次土壤普查有机质含量分级等资料<sup>[12-15,17]</sup>及相关专家意见,结合植物护坡工程特征,将评价指标划分为优、良、中、差、极差 5 个等级。各指标的分级量化标准见表 2。

1.3 数据来源及处理

结合相关研究,2 a 后对象边坡的植物群落与基质组分等结构达到相对稳定状态,力学防护功能亦持续发挥,此时进行质量评价能真实反映系统状况与特征<sup>[18]</sup>。指标原始数据(表 3)来源于 2011 年人工边坡 3 类不同工程措施研究区的现场调查和取样试验。

群落质量指标采用样地群落调查法测定<sup>[7]</sup>,多样性及均匀度指数选择香农—威纳与 Evenness 指数,植物抗逆性依据坡面植物群落稳定建成后各个季节的综合表现由专家直接打分。

力学质量类指标采用直剪仪、手持拉力器等直接测定<sup>[9]</sup>,基质质量下属容重、土壤孔隙度等指标采用环刀法测定,渗透率及有机质含量等采用双环法及重铬酸钾法测定<sup>[16]</sup>。

原始数据采集整理完成后,组织 25 位评价专家按评分等级标准赋值,使其无量纲化。数据处理分析软件为 Microsoft Excel。

表 2 植物护坡工程质量评价指标标准分级

| 类别 | 评分等级   | 基材抗剪强度/kPa<br>(饱和含水,<br>垂直压力 100 kPa) | 根系<br>抗拉力<br>(N/株) | 坡面—基材<br>抗剪力/N | 植被<br>盖度/<br>% | 群落<br>生物量/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 多样性<br>指数 | 均匀度<br>指数 | 灌草植物<br>比例/<br>% |
|----|--------|---------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|------------------------------------|-----------|-----------|------------------|
| 优  | 100    | >80                                   | >1000              | >400           | >90            | >1000                              | >1        | >1        | >60              |
| 良  | 80~100 | 70~80                                 | 700~1000           | 300~400        | 80~90          | 900~1000                           | 0.8~1     | 0.8~1     | 50~60            |
| 中  | 60~80  | 60~70                                 | 400~00             | 200~300        | 70~80          | 700~900                            | 0.6~0.8   | 0.6~0.8   | 40~50            |
| 差  | 40~60  | 50~0                                  | 100~400            | 100~200        | 50~70          | 400~700                            | 0.4~0.6   | 0.4~0.6   | 30~40            |
| 极差 | 20~40  | <50                                   | <100               | <100           | <50            | <400                               | <0.4      | <0.4      | <30              |

| 类别 | 评分等级   | 植物抗<br>逆性 | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 毛管孔<br>隙度/<br>% | 有机质<br>含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 养分元素含量                        |                                |                                | 基材渗<br>水率/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 坡面产<br>沙量/<br>(g·cm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|----|--------|-----------|------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
|    |        |           |                              |                 |                                     | 全 N/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效 P/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 速效 K/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |                                     |  |
| 优  | 100    | 极强        | <1.1                         | >40             | >20                                 | >3.0                          | >0.015                         | >0.1                           | >30                                 | <1   |
| 良  | 80~100 | 强         | 1.1~1.2                      | 35~40           | 10~20                               | 2.5~3.0                       | 0.01~0.015                     | 0.08~0.1                       | 20~30                               | 1~2  |
| 中  | 60~80  | 一般        | 1.2~1.3                      | 30~35           | 5~10                                | 2.0~2.5                       | 0.005~0.01                     | 0.06~0.08                      | 10~20                               | 2~5  |
| 差  | 40~60  | 差         | 1.3~1.4                      | 25~30           | 2~5                                 | 1.5~2.0                       | 0.002~0.005                    | 0.04~0.06                      | 5~10                                | 5~10   |
| 极差 | 20~40  | 极差        | >1.4                         | <25             | <2                                  | <1.5                          | <0.002                         | <0.04                          | <5                                  | >10  |

表 3 植物护坡工程质量评价指标原始取值

| 基层指标   | 种子格栅<br>护坡工程 | 植生网护<br>坡工程 | TBS II<br>护坡工程 |
|--|--------------|-------------|----------------|
| 基材抗剪强度/ka                                    | 70.80        | 67.80       | 83.60          |
| 根系抗拉力(N/株)                                   | 639.30       | 557.70      | 794.30         |
| 坡体—基材抗剪力/N                                   | 291.50       | 273.40      | 352.00         |
| 植被盖度/%                                       | 88.00        | 77.00       | 85.00          |
| 群落生物量/(g·m <sup>-2</sup> )                   | 864.70       | 820.10      | 912.50         |
| 多样性指数  | 0.74         | 1.17        | 0.83           |
| 均匀度指数  | 0.77         | 0.71        | 0.82           |
| 灌草植物比例/%                                     | 75.00        | 63.00       | 73.00          |
| 植物抗逆性  | 强            | 强           | 强              |
| 容重/(g·cm <sup>-3</sup> )                     | 1.21         | 1.19        | 1.17           |
| 毛管孔隙度/%                                      | 35.70        | 34.90       | 35.40          |
| 有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )                  | 16.90        | 15.40       | 18.20          |
| 全 N/(g·kg <sup>-1</sup> )                    | 2.30         | 2.19        | 2.51           |
| 有效 P/(g·kg <sup>-1</sup> )                   | 0.04         | 0.04        | 0.04           |
| 速效 K/(g·kg <sup>-1</sup> )                   | 0.16         | 0.15        | 0.16           |
| 基材渗水率/(mm·h <sup>-1</sup> )                  | 20.30        | 23.80       | 23.40          |
| 坡面产沙量/(g·cm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) | 1.57         | 2.48        | 1.73           |

1.4 多层次灰色评价方法

植物护坡工程质量是定量与定性指标的综合表征,各指标间并不是相互独立的,它们之间的关系不明确,但的确存在,从本质上讲,就是一种灰色关系<sup>[19]</sup>。运用基于灰色系统理论的多层次灰色综合评价法评价植物护坡工程质量非常适合,步骤如下:

(1) 确定评价灰类、灰数与白化权函数。设定  $e$  ( $e=1,2,3,4,5$ ) 个评价灰类,分别对应“优”、“良”、“中”、“差”、“极差”5 个级别,具体的灰数  $\otimes_e$  与白化权函数  $fe(\delta_{ijl})$  形式见胡笙煌<sup>[20]</sup> 主观指标多层次灰色评价法。

(2) 计算灰色评价系数。基层指标  $u_{ij}$  的灰色评价系数的计算公式见(1),(2):

$$X_{ije} = \sum_{l=1}^p fe(\delta_{ijl}) \quad (1)$$

$$X_{ij} = \sum_{e=1}^k (X_{ije}) \quad (2)$$

式中: $X_{ije}$ ——基层指标  $u_{ij}$  属于第  $e$  个评价灰类的灰色评价系数; $X_{ij}$ ——基层指标  $u_{ij}$  属各评价灰类的总灰色评价数。

(3) 计算灰色评价权向量及权矩阵。指标  $u_{ij}$  属第  $e$  个灰类的灰色评价权  $r_{ije} = X_{ije}/X_{ij}$ ,灰色评价权向量  $r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \dots, r_{ije})$ 。综合指标  $u_{ij}$  对于评价灰类的灰色评价权向量  $r_{ij}$  得出灰色评价权矩阵  $R_i$ 。

(4) 多级综合评价计算。 $U_i$  综合评价结果记为  $B_i, B_i = A_i \cdot R_i, A_i$  为  $U_i$  下属指标权向量。对植物护坡工程质量  $U$  综合评价,评价结果  $B = A \cdot R = A \cdot (A_1 \cdot R_1, A_2 \cdot R_2, \dots, A_i \cdot R_i)^T$ ;将各评价灰类等级值向量按“灰水平”赋值,即  $C = \{100, 80, 60, 40, 20\}$ ,则受评系统的综合评价  $Z = B \cdot C^T$ 。

2 结果与分析

2.1 基于多层次灰色综合评价的植物护坡工程质量

植物护坡工程质量指标原始数据经专家打分并无量纲处理后,求得测度转换的样本信息构成评价矩阵,按照评价灰类设定划分优、良、中、差、极差 5 个等级。以种子格栅护坡工程为例,对其进行多层次灰色综合评价。

(1) 灰色评价系数、权向量计算及权矩阵。建立植物护坡工程质量评价影响因素集  $U$ ,包括力学质量、群落质量、基材质量 3 项 1 级指标,  $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ ,  $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}\}$ 。以基层评价指标植物抗逆性  $u_{26}$  为例,评价者主张其属于第 1 灰类的灰色评价权为  $r_{261}, r_{261} = X_{261}/X_{26}, r_{26} = (r_{261}, r_{262}, \dots, r_{265})$ 。同理得  $r_{21}, r_{22}, \dots, r_{25}$ 。综合指标  $u_{2j}$  的灰色评价权向量  $r_{2j}$ ,

构建指标  $U_2$  对于各评价灰类的灰色评价权矩阵:

$$R_2 = \begin{pmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{26} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.454 6 & 0.363 6 & 0 \\ 0.324 4 & 0.364 9 & 0 \\ 0.345 = 2 & 0.380 9 & 0 \end{pmatrix}$$

(2) 工程质量综合评价。综合评价  $U_2$ , 评价结果  $B_2 = A \cdot R_2 = (0.093 1 \quad 0.250 9 \quad 0.177 5 \quad 0.053 9 \quad 0.111 8 \quad 0.312 8) \cdot R_2 = (0.343 4$

$0.369 6 \quad 0.263 4 \quad 0.023 5 \quad 0)$ , 同理得  $B_1 = (0.336 0 \quad 0.374 9 \quad 0.269 0 \quad 0.020 1 \quad 0)$ ,  $B_3 = (0.401 2 \quad 0.370 1 \quad 0.222 4 \quad 0.006 3 \quad 0)$ ; 则  $B = A \cdot R = (0.327 5 \quad 0.259 9 \quad 0.412 6) \cdot R = (0.365 3 \quad 0.371 2 \quad 0.247 9 \quad 0.015 5 \quad 0)$ 。种子格栅护坡工程质量综合评价  $Z = B \cdot C^T = 81.7$ 。同理得植生网及 TBSII 护坡工程质量综合评价 (见表 4)。

表 4 各类护坡工程措施层次评价与综合评价

| 类别     | 层次指标 | 第 1 灰类  | 第 2 灰类  | 第 3 灰类  | 第 4 灰类  | 第 5 灰类 | 分值   |
|--------|------|---------|---------|---------|---------|--------|------|
| 种子格栅   | 力学质量 | 0.336 0 | 0.374 9 | 0.269 0 | 0.020 1 | 0      | 80.5 |
|        | 群落质量 | 0.343 5 | 0.369 7 | 0.263 3 | 0.023 5 | 0      | 80.7 |
|        | 基材质量 | 0.401 2 | 0.370 1 | 0.222 4 | 0.006 3 | 0      | 83.3 |
|        | 工程质量 | 0.365 3 | 0.371 2 | 0.247 9 | 0.015 5 | 0      | 81.7 |
| 植生网    | 力学质量 | 0.306 1 | 0.344 3 | 0.289 5 | 0.060 1 | 0      | 77.9 |
|        | 群落质量 | 0.368 3 | 0.366 1 | 0.238 4 | 0.027 2 | 0      | 81.4 |
|        | 基材质量 | 0.374 2 | 0.368 9 | 0.241 8 | 0.015 1 | 0      | 81.1 |
|        | 工程质量 | 0.354 5 | 0.361 6 | 0.253 1 | 0.030 8 | 0      | 80.7 |
| TBS II | 力学质量 | 0.424 8 | 0.369 4 | 0.205 8 | 0       | 0      | 84.4 |
|        | 群落质量 | 0.385 9 | 0.374 6 | 0.237 2 | 0.002 3 | 0      | 82.9 |
|        | 基材质量 | 0.408 3 | 0.374 8 | 0.216 9 | 0       | 0      | 83.9 |
|        | 工程质量 | 0.405 2 | 0.373 3 | 0.220 7 | 0.000 8 | 0      | 83.8 |

(3) 植物护坡工程质量等级分析。观察 3 类不同工程措施植物护坡工程的质量评价结果, 可以注意到, 种子格栅护坡工程下属一级指标仅基质质量属优类, 较植生网属优类的 2 个指标更少, 但因其基质质量指标属于优类上的灰色评价权值更大, 所以, 种子格栅护坡工程质量综合评价更高。原因在于基质质量指标相对力学质量及群落质量权重值更大, 对植物护坡工程质量贡献程度更大。一般而言, 片面追求单方面效益而忽视植物护坡工程的系统性, 工程综合效益会受到一定影响, 达不到边坡生态恢复的目的。因此, 应着重改进工程结构, 综合完善水土保持、群落恢复及力学防护功能, 才能进一步提高植物护坡工程质量等级。

## 2.2 种子格栅护坡工程质量

由表 4 可知, 种子格栅护坡工程质量属于第 2 灰类的灰色评价权值最大, 根据最大隶属原则, 其质量等级为良; 综合分值 81.7。工程质量下属力学质量、群落质量、基材质量的最大灰色评价权值分别属于第 2 灰类、第 2 灰类及第 1 灰类, 质量等级依次为良、良、优。人工边坡实测结果显示种子格栅工程整体稳定性较好, 坡面基材无滑移等现象; 群落恢复效果良好, 植被盖度达到 88%, 群落生物量、多样性指数等指标均处于较高水平; 坡面径流含沙量少, 水土涵养效应较为明显。可能的原因是, 种子格栅护坡工程基材设

计厚度较大, 且表面铺设铁丝网防护, 系统稳定性增加, 植物生长发育所需的环境更为适宜。

## 2.3 植生网护坡工程质量

评价结果显示, 植生网护坡工程质量等级为良, 综合分值 80.7, 力学质量、群落质量与基材质量等级分为良、优、优。实际情况显示, 植生网护坡工程坡面植被覆盖率达到 70% 以上, 群落结构合理, 总体生长状况良好, 且坡面径流含沙量较少, 毛管孔隙度及有机质含量等指标实测值显示基质的水分与养分蓄积效果明显。不足之处在于工程坡面存在局部坍塌现象, 后期需要较大的管理维护投入。因此, 植生网护坡工程总体效果较为理想, 坡面群落质量稳定, 水土保持与基材改良作用突出, 但力学防护功能相对薄弱。原因是植生网的特殊结构有利于营造种子萌发阶段微环境, 坡面群落更容易建成, 植物茎叶等地上部分及根系在降低坡面径流与加固基质等方面作用明显。但植生网护坡工程基质厚度最小, 且表面缺少工程防护措施, 力学结构不稳定, 工程系统的抗破坏能力较差, 从而对基质质量与坡面群落产生不利影响, 使其质量水平在 3 类不同工程措施植物护坡工程中最低。

## 2.4 TBS II 护坡工程质量

据表 4 所示, TBS II 植物护坡工程质量等级为优, 综合分值 83.8。力学质量、群落质量与基材质量

在3类不同工程措施植物护坡工程中均为最优。样地调查结果显示,TBSⅡ护坡工程坡面植物在原位拉拔试验及直剪试验中表现突出,说明工程系统抗外力破坏能力及坡面稳定性较强;植物盖度达到80%以上,物种多样性比较丰富,坡面群落健康稳定;坡面产流量及径流含沙量处于比较低的水平,基质表面无明显面蚀、沟蚀及冲蚀痕迹,侵蚀控制效果明显,容重、矿质元素含量等指标实验室分析值显示基材物理结构利于水分养分涵养功能的有效发挥。分析其原因,可能在于厚层基质的结构适宜混合植被种子萌发,利于坡面群落的快速建成,通过植物根系对坡面及基材的加筋锚固作用及地上部分的水文效应,显著增强了坡面系统稳定及基质抗侵蚀能力;同时,TBSⅡ护坡工程基质厚度最大,且结合了可靠的工程防护措施,又为坡面群落的稳定建成与自主更新提供了良好条件。

### 3 结论

(1) 评价结果显示种子格栅、植生网、TBSⅡ这3类不同工程措施的植物护坡工程质量等级分别为良、良、优,质量排序为TBSⅡ>种子格栅>植生网,工程质量综合分值分为83.8,81.7,80.7。据2012年8月对人工边坡实地观测的结果显示,3类护坡工程效果均比较理想,运营状况稳定;TBSⅡ护坡工程质量及综合效果最佳,种子格栅较植生网更优,但差距不大。评价结果符合实际情况表明评价指标体系及方法可以比较准确客观地定量植物护坡工程质量等级,具有较强的实用价值。

(2) 植物护坡工程涉及面宽、综合性强,不确定因素较多。运用灰色系统综合评价理论可快速准确地评价其质量状况及等级,获得可量化的工程综合效益优劣次序,解决了单项指标无法准确反应工程质量的问题,相对其他评价方法较为客观实际,适用性更广。

(3) 本文以植物护坡工程质量为研究对象,结合系统工程理论,提出力学、群落、基材3大类结构功能指标来评价植物护坡工程质量,具有一定的现实意义,但随着边坡生态恢复研究的深入,评价指标选择和模型构建还需要不断优化。同时,需要深入探索工程质量本质特征与变化机制,实现对植物护坡工程效果动态变化趋势的科学分析和预测,以利于工程综合管理与宏观调控,为植物护坡工程有效开展及推广提供科学依据。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 赵华,黄润秋. 岩石边坡生态护坡特点及其关键技术问题探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004(1): 87-90.
- [2] 赵明阶,何光春,王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 1-2.
- [3] 杨涛,李绍才,孙海龙. 岩石边坡植被护坡研究中的关键问题[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 15-17.
- [4] Li Shaocai, Sun Hailong, Yang Zhirong, et al. Root anchorage of *Vitex negundo* L. on rocky slopes under different weathering degrees[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(6): 27-33.
- [5] 张玉芳,王春生,张从明. 边坡病害及治理工程效果评价[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-3.
- [6] 张霞,刘晓清,王亚萍,等. 秦岭生态功能区水土保持治理效益评价[J]. 水土保持研究, 2012, 2(4): 86-91.
- [7] 胥晓刚,杨冬生,胡庭兴,等. 建立坡面植被恢复群落质量评价体系的探讨[J]. 水土保持学报, 2004, 2(4): 189-191.
- [8] 张季如,朱瑞庚,夏银飞,等. ZZLS绿色生态护坡材料的强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1533-1537.
- [9] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2074-2081.
- [10] 肖风劲,欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 2(3): 203-209.
- [11] Mickovsk S B, Van Beek L P H. A decision support system for the evaluation of eco-engineering strategies for slope protection [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 4(3): 483-498.
- [12] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 岩石边坡喷播植草护坡工程的抗侵蚀效应[J]. 北京林业大学学报, 2006, 1(1): 43-47.
- [13] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 10(10): 2051-2057.
- [14] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 雷孝章,王金锡,彭沛好. 中国生态林业工程效益评价指标体系[J]. 自然资源学报, 1999, 2(4): 175-182.
- [16] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.
- [17] 中国标准出版社第一编辑室. 水土保持国家标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] 戴泉玉,顾卫,张化平,等. 内蒙古自治区公路边坡生态恢复与重建技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [19] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] 胡笙煌. 主观指标评价的多层次灰色评价法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 1(1): 12-21.