

# 岩石边坡生态护坡效果评价指标体系及应用

龙 凤<sup>1</sup>, 李绍才<sup>1,2</sup>, 孙海龙<sup>1,2</sup>, 杨立夏<sup>1</sup>, 毛 静<sup>1</sup>

(1. 四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064; 2. 四川省励自生态技术有限公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 基于国内外岩石边坡生态护坡的相关研究结果和基质-植被系统的结构与功能的稳定, 通过调查研究, 从系统工程学的角度出发, 以系统的基质、植被结构、防护功能、物质循环功能与景观文化功能为构建主体, 建立岩石边坡生态护坡工程效果评价的五大类指标; 并在五大类指标内又划分出各自的具有可操作性的亚类指标, 从而形成岩石边坡生态护坡的效果评价指标体系。该指标体系的评价标准将工程效果分为优、良、一般、差和极差 5 个等级, 这些指标较为合理地反映了系统结构与功能的特征与本质, 同时表现出结构与功能的相互制约相互依存且在一定条件下可以相互转化的关系。最后结合层次分析法与模糊综合评判方法, 将该指标体系用于渝黔高速公路岩石边坡生态护坡工程不同标段的 2 个工程边坡效果的应用评价中, 评价结果与实际观察情况相吻合, 说明该指标体系能比较客观地反映工程效果状况及系统功能的持续能力, 具有较强的适用性和可操作性。

**关键词:** 边坡工程; 生态护坡; 基质-植被系统; 效果评价; 指标体系

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)增 1-3095-07

## EVALUATION INDICATOR SYSTEM FOR EFFECT OF ECO-ENGINEERING FOR ROCK SLOPE PROTECTION AND ITS APPLICATION

LONG Feng<sup>1</sup>, LI Shaocai<sup>1,2</sup>, SUN Hailong<sup>1,2</sup>, YANG Lixia<sup>1</sup>, MAO Jing<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China; 2. Sichuan Lizi Bioenvironmental Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Substrate-vegetation system is the primary functional component of eco-engineering for rock slope protection(EERSP), its structure and function determine the stability and effectively of EERSP. Based on the results of research related to EERSP at home and abroad, and on stability of the structure and function of the substrate-vegetation system, an attempt has been made to establish five types of evaluating indicators including the substrate of system, the structure of vegetation, the protective function, the functions of matter cycling and the landscape cultural functions with a view of systematical engineering by investigations and studies. Further those five types of indicators were marked off the operable sub-indexes that formed the indicator system for evaluating the performance of EERSP. The appraisal standards of the indicator system were divided into five grades, such as excellent, well, general, poor and worse, which reflected rationally the characters and nature of the substrate-vegetation system, also exhibited mutual restriction and interdependent relationship between the structure and function. This relationship could transform each other under some special conditions. The indicators were used to evaluate the performance of two slope sections in EERSP of the Chongqing—Guizhou highway by combined

**收稿日期:** 2007-11-01; **修回日期:** 2008-01-12

**基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD39B04)

**作者简介:** 龙 凤(1983-), 女, 2006年毕业于四川农业大学园林专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石边坡生态防护方面的研究工作, E-mail: lizist@vip.sina.com

analytical hierarchy process(AHP) with fuzzy comprehensive evaluation method. The appraisal results coincided with the in-situ observation, which indicated that the indicator system could objectively reflect the performance and the lasting capacity of function of the substrate-vegetation system.

**Key words:** slope engineering; ecological slope protection; substrate-vegetation system; evaluation; indicator system

# 1 引言

边坡是自然或人工形成的斜坡，是人类工程活动中最基本的地质环境之一，也是工程建设中最常见的工程形式<sup>[1]</sup>。人工边坡的产生可引发滑坡、泥石流等地质灾害。地表植被的破坏常引起水土流失、生物多样性锐减等系列生态破坏问题<sup>[1, 2]</sup>。在人工形成的边坡中，岩石边坡占很大比重，且具有较强的异质性，如何对其有效实施生态防护，恢复破坏的植被，减少水土流失，已成为岩土和生态工程科研工作者所关心的热点问题<sup>[3, 4]</sup>。

岩石边坡生态护坡技术是指用活的植物与工程措施结合，以防止岩石坡面风化剥落的技术与手段，近年来发展迅速，现已逐步替代传统的单一工程护坡应用于公路、铁路、水电及矿山等工程岩石坡面的防护工程中<sup>[5, 6]</sup>。对岩石边坡生态护坡工程进行效果评价是工程管理与质量监督的重要手段，国内外岩石边坡生态护坡效果评价虽然从植物群落、环境绿化等方面建立了一些评价体系，但这些指标大多数只从植物群落的外观质量与景观美学方面进行，脱离了岩石边坡生态护坡工程的本质，均未考虑到系统的完整性<sup>[7]</sup>。为此，本文从岩石边坡生态护坡工程系统的结构与功能出发，构建其效果评价指标体系，并进行量化评价，为岩石边坡生态护坡工程的应用与后期监测管理提供必要的支持。

## 2 岩石边坡生态护坡工程效果评价指标体系构建

### 2.1 基于基质 - 植被系统的评价指标

岩石边坡生态护坡是涉及多学科、综合性的系统工程，因而要求工程效果评价的类别、指标本身具有不同的性质和特点，从不同层次说明问题，同时又要要求这些指标之间相互联系，以达到从多方面综合反映工程效果的目的。从系统工程学的角度出发，岩石边坡生态护坡建造的人工生态系统可视为“基质 - 植被”系统<sup>[6]</sup>，其与环境相互作用、相互交织、相互渗透而构成的具有一定结构和功能的统

一体，系统的结构和功能决定了岩石边坡生态护坡的稳定与效应发展(图 1)。因此，岩石边坡生态护坡工程效果评价指标体系的建立必须从“基质 - 植被”系统的结构与功能出发，才能保证指标的系统性、科学性与完整性。

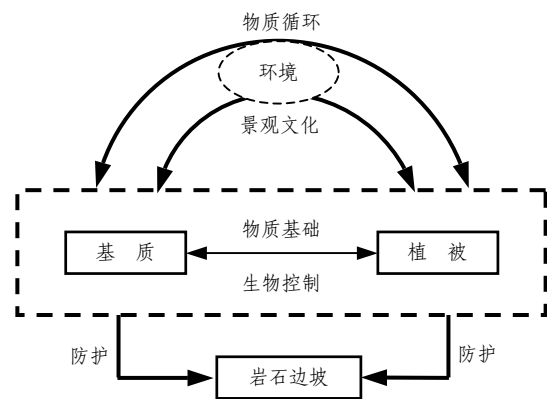


图 1 岩石边坡生态护坡基质 - 植被系统的结构与功能图解  
Fig.1 Graph of structure and functions of substrate-vegetation system on ecological protection for rock slope

从岩石边坡生态护坡工程“基质 - 植被”系统的结构与功能来看，系统的基本结构组成包括“植被”及“基质”2 个基本单元，其中“基质”指岩石边坡条件下人工提供的满足植被正常生长所需的基础物质(可以理解为人工土壤)，其既提供植被生长所需的合理物理结构，又是植被水分、养分转化利用的平台与载体<sup>[4]</sup>；而“植被”则是指坡面人工植物群落，是系统发展、变化的主要生物要素。从“基质 - 植被”系统的功能来看，其主要包括坡面防护功能(力学加固与侵蚀控制)、物质循环功能(保持系统的整体稳定性，降低人工辅助能量的输入)和景观文化功能 3 个方面(融入自然景观及美学价值)。

基于“基质 - 植被”系统的结构与功能，通过调查研究法<sup>[7]</sup>，结合国内外现有研究基础，通过相关专家咨询(土壤学、植物学、生态学及岩土工程学等)，建立了岩石边坡生态护坡工程的效果评价指标体系(表 1)，这些指标较为合理地反映了系统结构与功能的特征与本质，同时表现出结构与功能

表 1 岩石边坡生态护坡效果评价指标及说明  
Table 1 Effect evaluation indicators and illumination of slope eco engineering for rock protection

系统分类	一级指标	二级指标	特征说明
结构指标	基质	容重	单位容积基质的质量, 反映基质的紧实程度
		毛管孔隙率	指毛管水占据的基质孔隙, 反映其蓄水供水能力
		有机质含量	存在于基质中的所有含碳的有机物质含量, 反映基质的可持续利用能力
		稳定渗透率	指水压梯度等于 1 时, 单位时间内渗透过单位面积的水量, 反映基质渗水强弱
		水稳性团聚体含量	指 >0.25 mm 的基质团粒含量, 反映基质结构与抗蚀性
	植被	养分元素含量	包括基质全氮、速效磷、速效钾含量, 反映其肥力
		有效水最大含量	凋萎系数与田间持水量之间的基质含水量, 反映其水分有效性的高低
		植被盖度	植物地上部分垂直投影的面积占地面的比率, 反映其覆盖程度
		物种多样性	坡面人工植物群落物种数目和分配, 采用丰富度指数、多年生物种比例综合评价
		植被耐瘠薄性表现	植物在坡面无养分外源供给时的正常生长能力, 根据其外观表现划分
功能指标	防护功能	植被抗旱性表现	指植物干旱季节在坡面的外观表现, 反映其抗旱能力
		乡土物种比例	当地物种占评价区域所有物种数的比例, 反映其适应性
		泥沙侵蚀量	指坡面在降雨侵蚀过程的泥沙侵蚀量, 反映系统的抗侵蚀防护能力
		基质-根系复合体抗剪强度	指基质-根系复合体对剪应力增大所产生的阻力, 反映系统的抗外力能力
	物质循环	单位面积木本植物平均抗拔力	指木本植株的抗拔阻力, 反映了植株对边坡锚固能力的大小
		基质-复合体最大自由收缩率	指基质-根系复合体失水后的收缩特性, 反映系统的整体稳定性
	功能	系统养分平衡指数	指系统养分收支情况, 评判系统养分的自我维持能力
	景观文化	系统水分平衡指数	指系统水分收支情况, 评判系统水分的自我维持能力
	功能	景观协调性	指坡面人工景观与周围自然景观的协调性, 根据直观表现人为划分
	功能	景观美感度	指坡面人工景观美学精神享受程度, 根据直观表现人为划分

相互依存而且在一定条件下可以相互转化的关系。但这里需要说明的是, 生态护坡只是对边坡的表层防护起主导作用, 在指标构建过程中并未考虑边坡的深层稳定问题。

### 2.2 评价标准的建立

评价指标标准的制定参考了国内外相关研究的有关基础<sup>[3, 4, 7~14]</sup>以及岩石边坡生态护坡的结构与功能特征, 并结合相关专家的意见, 提出了一个实事求是的指标标准和努力目标, 将评价标准分为 5 级: I 级, 工程效果优; II 级, 工程效果良; III 级, 工程效果一般; IV 级, 工程效果差; V 级, 工程效果极差。各评价因子的分级标准见表 2。

## 3 基于 AHP - 模糊综合评价模型的评价方法与应用

### 3.1 评价模型的建立

岩石边坡生态护坡工程效果评价是针对多级评

价指标的综合分析, 因此本文采用 AHP - 模糊综合评价对各个评价指标进行层次分析, 经过对各因素的分解、聚积和分类, 形成一个具有递阶层次结构的评价系统, 评价结构模型见图 2。

### 3.2 基于层次分析法(AHP)确定指标权重

经专家征询, 由 1~9 比例标度法分别对每一层次的评价指标的相对重要性进行定性描述, 并量化表示, 确定两两比较判断矩阵, 最后计算出指标权重(表 3)。本次征询的专家为 20 人, 包括土壤学、植物学、生态学与岩土工程学等专家, 以及设计单位与监理单位的相关技术人员。

### 3.3 实例应用分析

#### 3.3.1 案例概况

评价对象位于渝黔高速公路(K12+800)~(K31+250)范围内, 海拔 345~403 m, 年平均气温 18.3 °C, 多年平均降水量 1 089.3 mm。边坡于 2001 年 3 月开始进行生态护坡防护, 整个工程于 2002 年 5 月

表 2 岩石边坡生态护坡效果评价指标标准分级

Table 2 Effect evaluation indicators and standard classification of slope eco engineering for rock protection

级别	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	毛管孔隙率 /%	有机质含量 $/(g \cdot kg^{-1})$	稳定渗透率 $/(mm \cdot h^{-1})$	水稳性团聚 体含量/%	全 N 含量 $/(g \cdot kg^{-1})$	速效 P 含量 $/(mg \cdot kg^{-1})$	速效 K 含量 $/(mg \cdot kg^{-1})$	有效水最大 含量 $/(g \cdot kg^{-1})$
I	<1.1	>40	>20	>30	>35	>3.0	>15	>100	>18
II	1.1~1.2	40~35	20~10	30~20	35~30	3.0~2.5	15~10	100~80	18~16
III	1.2~1.3	35~30	10~5	20~10	30~25	2.5~2.0	10~5	80~60	16~14
IV	1.3~1.4	30~25	5~2	10~5	25~20	2.0~1.5	5~2	60~40	14~12
V	>1.4	<25	<2	<5	<20	<1.5	<2	<40	<12

级别	植被盖度 /%	物种丰富 度指数	多年生物 种比例/%	植被耐瘠 薄性表现	植被抗旱性 表现	乡土物种 比例/%	泥沙侵 蚀量 $/(g \cdot cm^{-3} \cdot a^{-1})$	复合体抗剪强 度(kPa, 饱和含 水条件, 垂直压 力 75 kPa)	单位面积木本 植物平均抗拔 力 $/(N \cdot 株^{-1})$
I	>90	>10	>60	极耐	极抗旱	>60	<1	>60	>1000
II	80~90	10~8	60~50	耐	抗旱	60~50	1~2	60~50	1000~700
III	70~80	8~6	50~40	中等	中等	50~40	2~5	50~40	700~400
IV	50~70	6~4	40~30	不耐	不抗旱	40~30	5~10	40~30	400~100
V	<50	<4	<20	极不耐	极不抗旱	<20	>10	<30	<100

级别	复合体最大自 由收缩率/%	平衡指数(收入/支出)				景观协调性	景观美感度
		系统 N 元素	系统 P 元素	系统 K 元素	系统水分		
I	<5	>1.05	>1.05	>1.05	>1.05	很协调	很丰富
II	5~10	1.05~1.00	1.05~1.00	1.05~1.00	1.05~1.00	协调	丰富
III	10~15	1.00~0.95	1.00~0.95	1.00~0.95	1.00~0.95	一般	一般
IV	15~20	0.95~0.90	0.95~0.90	0.95~0.90	0.95~0.90	不协调	不丰富
V	>20	<0.90	<0.90	<0.90	<0.90	极不协调	极不丰富

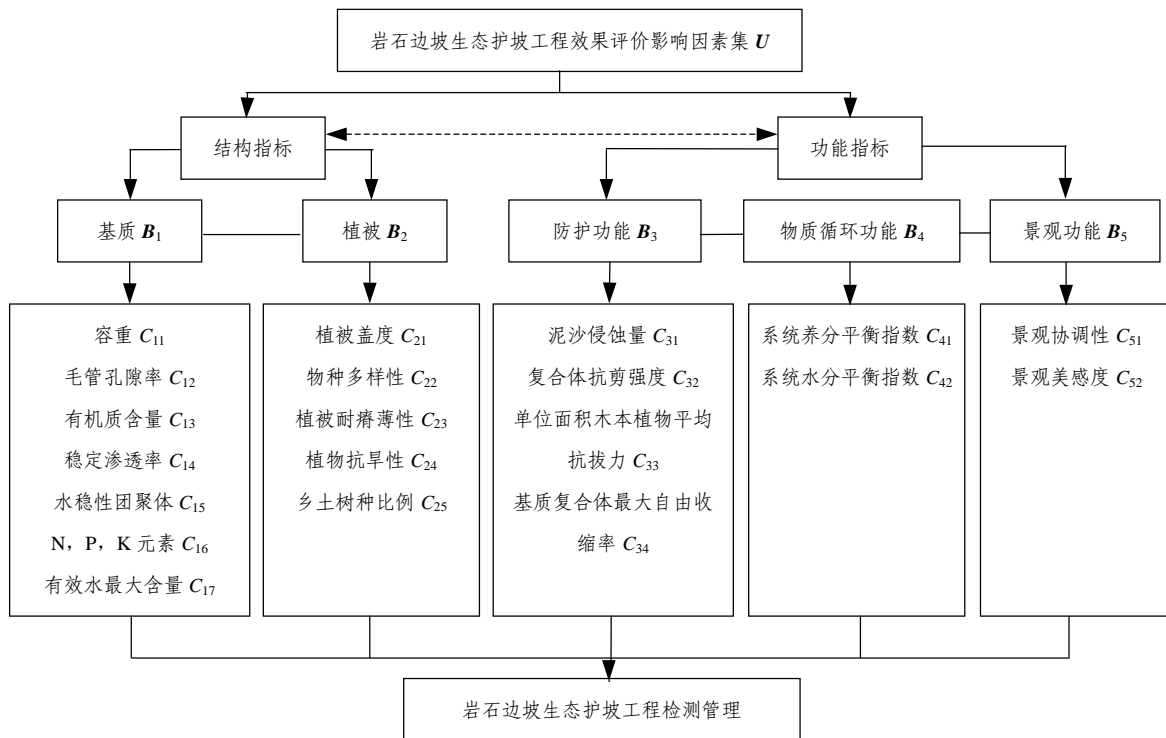


图 2 岩石边坡生态护坡效果评价模型

Fig.2 Evaluation model of slope eco engineering effect for rock slope protection

表 3 岩石边坡生态护坡效果评价指标总排序  
Table 3 General rank of effect evaluation indicator system of slope eco engineering for rock slope protection

一级指标	权重	二级指标	权重	C 层权重 总排序
基质	0.107	容重	0.082	0.009
		毛管孔隙率	0.143	0.015
		有机质含量	0.250	0.027
		稳定渗透率	0.050	0.005
		水稳性团聚体含量	0.250	0.027
		营养元素含量	0.082	0.009
		有效水最大含量	0.143	0.015
		植被盖度	0.172	0.024
		物种多样性	0.349	0.049
		植被	0.141	植被耐瘠薄性表现
植被抗旱性表现	0.082			0.012
乡土物种比例	0.315			0.044
泥沙侵蚀量	0.383			0.120
复合体抗剪强度	0.128			0.040
防护功能	0.314	单位面积木本植物平均抗拔力	0.347	0.109
		复合体最大自由收缩率	0.142	0.045
		系统养分平衡指数	0.250	0.095
物质循环功能	0.379	系统水分平衡指数	0.750	0.284
		景观协调性	0.667	0.039
景观文化功能	0.059	景观协调性	0.667	0.039
		景观美感度	0.333	0.020

注: 该计算结果均经过一致性检验。

结束。在研究区内选择了不同标段内的 2 个相同坡向(阴坡)与坡度(1:0.75)的砂岩边坡为评价对象(边坡 I 的表面积约为 5 000 m<sup>2</sup>, 边坡 II 的表面积约为 4 500 m<sup>2</sup>)。

### 3.3.2 评价流程

#### (1) 建立模糊集合

建立工程效果评价影响因素集  $U$ , 分为基质、植被、防护功能、物质循环功能和景观文化功能 5 个方面。记作  $U = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\}$ ,  $B_1 = \{C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}\}$ ,  $B_2 = \{C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}\}$ ,  $B_3 = \{C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}\}$ ,  $B_4 = \{C_{41}, C_{42}\}$ ,  $B_5 = \{C_{51}, C_{52}\}$ 。评价集  $V = \{V_I(\text{优}), V_{II}(\text{良}), V_{III}(\text{一般}), V_{IV}(\text{差}), V_V(\text{极差})\}$ , 评价集的标准隶属度  $u = \{0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1\}$ , 各级权重值见表 3。

#### (2) 数据整理及分级计算

定量数据的获取为李绍才<sup>[15]</sup>在对象边坡的原

位监测数据, 其中泥沙侵蚀与物质循环指标为 2003 年 1~12 月的动态观测数据, 其他指标为 2003 年 6~7 月的观测数据。植物耐瘠薄性、抗旱性、景观协调性和景观美感度等定性指标, 由 2003 年管理期结束时验收专家评定意见(10 名验收专家)整理而来, 结果见表 4 和 5。

表 4 边坡 I 各二级指标评价统计表

Table 4 Evaluation statistical table of each secondary indicator of slope I

二级指标	隶属度				
	I	II	III	IV	V
容重	0.60	0.30	0.05	0.05	0.00
毛管孔隙率	0.70	0.10	0.20	0.00	0.00
有机质含量	0.85	0.10	0.00	0.05	0.00
稳定渗透率	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
水稳性团聚体含量	0.75	0.15	0.00	0.05	0.05
全 N 含量	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00
速效 P 含量	0.70	0.20	0.10	0.00	0.00
速效 K 含量	0.65	0.25	0.00	0.10	0.00
有效水最大含量	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00
植被盖度	0.90	0.10	0.00	0.00	0.00
物种多样性	0.50	0.20	0.20	0.10	0.00
植被耐瘠薄性表现	0.70	0.20	0.10	0.00	0.00
植被抗旱性表现	0.65	0.20	0.15	0.00	0.00
乡土物种比例	0.40	0.30	0.30	0.00	0.00
泥沙侵蚀量	0.75	0.15	0.10	0.00	0.00
复合体抗剪强度	0.60	0.40	0.00	0.00	0.00
单位面积木本植物平均抗拔力	0.50	0.45	0.05	0.00	0.00
复合体最大自由收缩率	0.50	0.40	0.05	0.05	0.00
系统 N 元素平衡指数(1 a)	0.70	0.15	0.10	0.05	0.00
系统 P 元素平衡指数(1 a)	0.60	0.25	0.15	0.00	0.00
系统 K 元素平衡指数(1 a)	0.55	0.25	0.10	0.10	0.00
系统水分平衡指数(1 a)	0.70	0.25	0.05	0.00	0.00
景观协调性	0.80	0.15	0.05	0.00	0.00
景观美感度	0.50	0.40	0.10	0.00	0.00

根据表 4, 5, 结合模糊数学理论将一级指标隶属度及综合评价结果列入表 6, 7。从表 6, 7 可见, 在 2003 年(工程结束后 1 a), 边坡 I 的生态护坡工程效果为良, 边坡 II 的生态护坡工程效果为差。笔者在 2007 年 7 月对以上 2 个边坡又进行了一次实地考察, 边坡 I 生态护坡工程的整体效果仍较为理想, 植被覆盖、组成与生长状况均比较令人满意, 且未

表5 边坡II各二级指标评价统计表

Table 5 Evaluation statistical table of each secondary indicator of slope II

二级指标	隶属度				
	I	II	III	IV	V
容重	0.00	0.25	0.35	0.30	0.10
毛管孔隙率	0.05	0.00	0.50	0.45	0.00
有机质含量	0.10	0.20	0.40	0.20	0.10
稳定渗透率	0.00	0.35	0.40	0.00	0.25
水稳性团聚体含量	0.00	0.50	0.30	0.20	0.00
全N含量	0.20	0.35	0.15	0.20	0.10
速效P含量	0.30	0.25	0.40	0.05	0.00
速效K含量	0.15	0.30	0.45	0.10	0.00
有效水最大含量	0.20	0.15	0.15	0.40	0.10
植被盖度	0.00	0.15	0.35	0.30	0.20
物种多样性	0.05	0.15	0.20	0.30	0.30
植被耐瘠薄性表现	0.00	0.00	0.50	0.5	0.00
植被抗旱性表现	0.00	0.10	0.40	0.45	0.05
乡土物种比例	0.00	0.25	0.30	0.35	0.10
泥沙侵蚀量	0.20	0.30	0.35	0.10	0.05
复合体抗剪强度	0.10	0.20	0.40	0.20	0.10
单位面积木本植物平均抗拔力	0.10	0.00	0.50	0.30	0.10
复合体最大自由收缩率	0.00	0.20	0.35	0.30	0.15
系统N元素平衡指数(I a)	0.00	0.20	0.30	0.30	0.20
系统P元素平衡指数(I a)	0.00	0.25	0.30	0.45	0.00
系统K元素平衡指数(I a)	0.00	0.20	0.20	0.40	0.20
系统水分平衡指数(I a)	0.10	0.10	0.30	0.30	0.20
景观协调性	0.00	0.00	0.30	0.45	0.25
景观美感度	0.00	0.00	0.40	0.4	0.20

表6 边坡I一级指标的隶属度及评价结果

Table 6 Degrees of membership and evaluated results of each first-grade indicator of slope I

一级指标	隶属度				
	I	II	III	IV	V
基质	0.773	0.145	0.038	0.031	0.013
植被	0.566	0.214	0.185	0.035	0.000
防护功能	0.608	0.322	0.063	0.007	0.000
物质循环功能	0.679	0.242	0.066	0.013	0.000
景观文化功能	0.700	0.233	0.067	0.000	0.000
综合评价	0.652	0.252	0.080	0.015	0.001

表7 边坡II一级指标的隶属度及评价结果

Table 7 Degrees of membership and evaluated results of each first-grade indicator of slope II

一级指标	隶属度				
	I	II	III	IV	V
基质	0.078	0.259	0.344	0.256	0.063
植被	0.017	0.165	0.298	0.345	0.175
防护功能	0.124	0.169	0.408	0.211	0.088
物质循环功能	0.075	0.129	0.292	0.321	0.183
景观文化功能	0.000	0.000	0.333	0.433	0.234
综合评价	0.076	0.153	0.338	0.291	0.142

出现后期构造维护的现象(图 3(a)), 而边坡 II 的植被覆盖度不足 50%, 坡面沟蚀与垮塌现象明显(图 3(b)), 表明当时数据的评价结果比较符合现状, 说明了本文评价指标体系的建立与评价方法在岩石边坡生态护坡工程效果评价上是较为合理的。研究同时也表明, 由于岩石边坡生态护坡具有较强的生物发展属性, 对其效果的评价应至少在工程结束 1 a 后开展, 才能有较好的评价结果。



(a) 边坡 I



(b) 边坡 II

图3 边坡I, II现状(2007年7月)

Fig.3 Present situations of slopes I, II(July, 2007)

## 4 结 论

- (1) 基质 - 植被系统是岩石边坡生态护坡工程的主要功能构件, 因而其评价指标体系的构建也是一个复杂体系, 必须从系统的基本结构与功能出发。
- (2) 基质 - 植被系统的结构与功能, 主要体现

在系统的基质、植被结构, 以及防护功能、物质循环功能与景观文化功能方面, 是工程效果评价体系构建的主体。

(3) 根据岩石边坡生态护坡工程的特点, 建立了工程效果评价指标的评价标准, 将工程效果分为优、良、一般、差和极差 5 个等级, 能比较客观反映工程效果状况及其持续能力。

(4) 结合层次分析法与模糊综合评判方法, 将评价指标体系应用到工程实际中, 评价结果与实际观察情况吻合, 说明该体系具有较强的适用性和可操作性。

(5) 生态护坡工程效果评价指标体系的研究是一项综合性、系统性的工作, 存在一些不确定影响因素, 还需要在未来实践中不断加以修正和完善。

### 参考文献(References):

- [1] 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.(YANG Tao, LI Shaocai, SUN Hailong. Key issues in research of ecoengineering for rock slope protection[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 15 - 17.(in Chinese))
- [2] 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.(ZHAO Hua, HUANG Runqiu. Characters of biological protection of rock slopes and analysis of its key problems[J]. Hydrology Geology and Engineering Geology, 2004, (1): 87 - 90.(in Chinese))
- [3] 孙海龙, 李绍才, 杨志荣, 等. 岩石边坡 - 基质 - 植被系统的水分循环[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 818 - 823.(SUN Hailong, LI Shaocai, YANG Zhirong, et al. Water circulation in substrate-vegetation systems of rock slopes[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 818 - 823.(in Chinese))
- [4] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 岩石边坡基质 - 植被系统的养分循环[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 85 - 89.(LI Shaocai, SUN Hailong, YANG Zhirong, et al. Nutrient cycling in substrate-vegetation systems of rock slopes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 85 - 89.(in Chinese))
- [5] LI S C, SUN H L, YANG Z R, et al. Root anchorage of *Vitex negundo* L. on rocky slopes under different weathering degrees[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(6): 27 - 33.
- [6] 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): 2 074 - 2 081.(LI Shaocai, SUN Hailong, YANG Zhirong, et al. Mechanical characteristics of the interaction between root system of plants for rock slope protection and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 074 - 2 081.(in Chinese))
- [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, 18(2): 189 - 191.(XU Xiaogang, YANG Dongsheng, HU Tingxing, et al. Discussion on building evaluation system of quality of slope vegetation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 189 - 191.(in Chinese))
- [8] 陈 红, 魏凤虎. 公路生态系统评价指标体系构建方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 89 - 92.(CHEN Hong, WEI Fenghu. Study of the way on indicator set of ecological assessment of highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 89 - 92.(in Chinese))
- [9] 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, 24(3): 483 - 498.
- [10] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 秸秆纤维、聚丙烯酰胺及高吸水树脂在岩石边坡植被护坡中的效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 257 - 267.(LI Shaocai, SUN Hailong, YANG Zhirong, et al. Effect of straw fiber, polyacrylamide and super absorbent polymer eco engineering on rock slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 257 - 267.(in Chinese))
- [11] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 203 - 1 208.(ZHANG Junyun, ZHOU Depei. Study on shrinkage and recovery of thick layer base material spraying for bio-slope-engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 203 - 1 208.(in Chinese))
- [12] 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): 1 533 - 1 537.(ZHANG Jiru, ZHU Ruigeng, XIA Yinfei, et al. Testing study on strength of the ZZLS material for erosion control of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 533 - 1 537.(in Chinese))
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.(HUANG Changyong. Soil science[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.(in Chinese))
- [14] 任 海, 彭少麟. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 19 - 20.(REN Hai, PENG Shaolin. Introduction of restoration ecology[M]. Beijing: Science Press, 2001: 19 - 20.(in Chinese))
- [15] 李绍才. 坡面岩体 - 基质 - 植被互作的效应及调控[博士学位论文][D]. 成都: 四川大学, 2006.(LI Shaocai. Interactive effect and regulation of slope rock mass-substrate-vegetation[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.(in Chinese))