

# 高速公路边坡生态护坡效果定量评价研究

余海龙<sup>1,2</sup>, 顾卫<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 生态护坡是目前国内高速公路边坡防护常用的方法之一。但是, 目前对坡面植被恢复效果的评价却没有统一公认的标准。结合国内外已有研究成果, 通过调查研究, 建立了边坡生态护坡工程效果评价指标体系; 该指标体系以土壤—植被系统质量和景观质量为构建主体, 并在大类指标内又划分出各自的具有可操作性的亚类指标。评价标准将工程效果分为优、良、中、差 4 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。最后结合层次分析法与模糊综合评判方法, 将该指标体系用于赤峰—通辽高速公路岩石边坡生态护坡工程不同标段的 1 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:** 生态护坡; 定量评价; 指标体系

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0203-04

中图分类号: S151

## Quantitative Evaluation on Ecologically Protective Slope Engineering for Expressways

YU Hai-long<sup>1,2</sup>, GU Wei<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Ecological protection is a common method used for protecting expressway slopes. There was no unified and well-recognized standard to evaluate the protective effects of ecological slope engineering. Based on the domestic and international findings of the related studies, an attempt had been made to establish evaluating indicators accounting the quality of soil—vegetation system and the landscape functions with a view of systematical engineering. Further, the two types of indicators were divided into sub-indices for practical considerations. The appraisal standard incorporated with the indicator system categorized engineering projects into four grades, i. e., excellent, good, moderate, and poor, which reflect rationally the nature and characteristics of the structure and functions of the soil—vegetation system. The index system were used to evaluate the performance of isolated slope sections in a single ecological slope protection project of the Chifeng—Tongliao highway by combining analytical hierarchy process(AHP) with the fuzzy comprehensive evaluation. The appraisal results coincided well with field observations, implying that the indicator system could be used to objectively evaluate performance and sustainability of the soil—vegetation system.

**Keywords:** ecological slope protection; quantitative evaluation; index system

生态环境保护的需要和“绿色通道”建设的要求, 使道路工程创面生态防护的理论和实用技术研究得到较多的关注<sup>[1]</sup>。高速公路的建设, 尤其是山区高速公路的建设, 经常开挖大量的山体, 形成大面积的裸露边坡, 破坏原有的植被层, 造成了一系列生态环境问题, 如水土流失, 滑坡, 泥石流, 局部小气候的恶化及生物链破坏等<sup>[2-3]</sup>。近年我国政府大力倡导生态工程理念,

生态防护技术已被广泛应用于道路、水电、矿山开采等工程建设活动的边坡防护中。现存的各式生态工程对于边坡栖息地环境的维持和营造有利还是有负面反应, 仍欠缺一套科学的评估模式, 无法将各式工法对道路边坡的贡献程度予以量化。因此, 本研究针对道路边坡生态工程, 提出相关的评估指标参数及标准, 并通过问卷调查来推求各指标参数之间的关系及其

收稿日期: 2010-05-31

修回日期: 2010-07-12

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“我国北方地区岩质工程创面生态恢复机理与方法的实验研究”(30870467); 宁夏大学 211 重点学科建设项目“草业科学与生态工程子项目”

作者简介: 余海龙(1979—), 男(汉族), 甘肃省酒泉市人, 博士, 副教授, 研究方向为路域生态恢复与重建技术。E-mail: yhl2008@ires.cn.

权重,以构建道路边坡生态工程之评估模式,籍以评估各施工法对道路边坡生态环境的贡献程度,并确立道路边坡施工可运用的生态工程种类,为现有生态工程之改善以及未来道路边坡生态工程规划、设计、施工及评估提供参考。另外,随着生态工程护坡应用规模的扩大,遇到的问题将越来越复杂,仅依赖一些施工经验往往难以解决这些问题,为对比生态工程护坡前后的效果,有必要开展生态工程护坡系统功效定量评价。

## 1 研究对象及方法

### 1.1 研究对象

本研究针对高速公路边坡生态恢复所采用的工程方法的应用效果,拟从“土壤—植被”系统的结构与功能和边坡景观质量变化入手进行探讨。本研究以赤峰—通辽高速公路 K69—K72 标段边坡生态恢复工程作为评估案例。生态护坡工程类型主要为厚层基材喷附技术。依托工程为第 13 合同段,其地理位置为北纬  $41^{\circ}27'$ ,东经  $119^{\circ}39'$ ,海拔高度 575 m。气候为温带半干旱大陆性季风气候,年均气温  $6.6^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 370 mm,年蒸发量达 2 000~3 000 mm,年均风速在 3 m/s。春季升温快,干旱多大风;夏季较短,70%的降水集中于 6—8 月份,雨热同季;秋季气温下降快,霜冻早;冬季漫长寒冷,雪少风多。研究区地貌类型为丘陵,相对高差 50~100 m。自然植被为禾草、灌木草原,主要植物种类有本氏针茅(*Stipa capillata*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、山杏(*Pranus armenica*)、榆树(*Ulmus pumila*)等。土壤为黄绵土,含沙量较高。

### 1.2 研究方法

遵循系统性、科学性、简明性、可获取性、可测性、可比性、独立性及重要性等指标选取原则,征求多学科专家意见和参考其它文献资料,确定评价指标。根据各指标与植被功能之间的紧密程度构建层次分析模型,计算各指标的权重系数,分别计算各指标值,然后进行归一化处理。通过计算,得到边坡生态防护的最终质量评分。

## 2 评价指标和评价模型

### 2.1 评价时间选择

根据实际观测,坡面生态恢复形成的植被改善了坡面小气候和土壤微环境,为乡土植物的入侵创造了一个比较适应的生长环境。第 2~3 a 以后,边坡植物群落出现两种演替结果。一种是进展演替,植被个

体数量增加,群落结构复杂化,群落利用自然界的生产力不断增强,边坡生态单元系统稳定,趋于一个动态平衡,表现为植被恢复效果好,护坡功能稳定发挥。另一种是逆行演替,植物数量减少,群落结构单一化,群落不稳定,表现为坡面的次生裸地面积增加,土壤侵蚀严重,局部生态环境恶化,边坡植被恢复工程失败。因此,对于坡面植被质量评价的最佳时间是群落内种群密度和物种数量相对稳定的时期。一般来讲,人工植被在 2~3 个生长年以后的评价结果基本能反映对象的真实性<sup>[4]</sup>。因此,本研究拟以生态恢复工程实施后的第 3 a 作为评价年。

### 2.2 评价指标筛选

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。边坡生态护坡工程的主体是“土壤—植被”系统(soil—vegetation system, SVS)。从 SVS 的结构与功能来看,系统的基本结构组成包括“植被”及“土壤”2 个基本单元,其中“土壤”指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,它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和载体;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 SVS 的功能来看,它主要包括坡面防护功能、物质循环功能和景观文化功能 3 个方面<sup>[5-6]</sup>。基于 SVS 的结构与功能,通过调查研究法,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),建立了边坡生态护坡工程的效果评价指标体系<sup>[7-10]</sup>。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相互依存而且在一定条件下可以相互转化的关系。

本研究选择层次分析法构建评价模型,以边坡植被恢复效果为决策目标层,以 SVS 质量和景观组成要素变化为准则层,选择植被覆盖度、植被生物量、草本植物覆盖度、土层厚度、土壤紧实度、物种多样性、土壤养分、土壤结构、植物绿期、近自然程度等作为指标层<sup>[11]</sup>(见表 1)。

### 2.3 建立评价指标的隶属函数

本研究采用模糊隶属度法进行指标量化。在表 1 所列评价指标中,部分指标与生态护坡工程应用效果成“S”型曲线关系,在建立这些评价指标的隶属函数时,可将“S”型曲线近似为升半梯形分布,如植被覆盖度、绿期、植被生物量、物种数目、物种多样性、土层厚度、有机质和土壤养分含量、近自然程度等。部分指

标与生态护坡工程应用效果成反“S”型曲线关系,在建立这些评价指标的隶属函数时,可将反“S”型曲线近似为降半梯形分布,如草本覆盖度等。土壤 pH 值、土壤质地和土壤紧实度等指标因素与生态护坡工程应用效果成抛物线关系,在建立这些评价因素的隶属函数时,可将抛物线近似为梯形分布,可将其分解为一个升半梯形分布与一个降半梯形分布的组合。

表 1 生态护坡工程生态效果评价指标体系

评价目标(A)	评价准则层(B)	评价指标层(C)
边坡植被恢复效果	土壤—植被系统质量(B <sub>1</sub> )	植被生物量 C <sub>11</sub>
		草本植物覆盖度 C <sub>12</sub>
		物种多样性 C <sub>13</sub>
		土层厚度 C <sub>14</sub>
		土壤紧实度 C <sub>15</sub>
		土壤有机质含量 C <sub>16</sub>
		土壤质地 C <sub>17</sub>
		pH 值 C <sub>18</sub>
		景观质量变化(B <sub>2</sub> )
	近自然程度 C <sub>22</sub>	
	植被绿期 C <sub>23</sub>	

对于植被覆盖度、绿期、植被生物量、物种数目、物种多样性、土层厚度、有机质含量、近自然程度等采用升半梯形分布的隶属函数,如式(1)所示:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq b) \\ (x-a)/(b-a) & (a < x < b) \\ 0 & (x \leq a) \end{cases} \quad (1)$$

对草本植物覆盖度则采用降半梯形分布的隶属函数,如式(2)所示:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq b) \\ (x-a)/(b-a) & (b < x < a) \\ 0 & (x \geq a) \end{cases} \quad (2)$$

对土壤 pH 值、土壤紧实度和土壤质地采用梯形分布的隶属函数,如式(3)所示:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & (b_2 \geq x \geq b_1) \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1} & (a_1 < x < b_1) \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2} & (a_2 > x > b_2) \\ 0 & (x \leq a_1; x \geq a_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mu(x)$ ——评价因素指标值的隶属函数; $a, a_1, a_2, b, b_1, b_2$ ——各评价因素的临界值即鉴定指标。具体到每种评价因素,因其各自的特点,评价模型又有不同的表示方式。

选择不受人为干扰或受较少干扰的同区域的植被、土壤、景观质量指标实测值作为临界上限值,而选择受人为干扰严重的边坡生境的植被、土壤和景观指

标实测值作为临界下限值。然后,依据指标变化对于边坡植被恢复效果的影响,确定合适的隶属函数。最后,依据各指标实测值,计算出各指标相应的隶属度值。

利用评价模型计算出的评价因素隶属度是介于 0~1 之间的数值。当评价指标隶属度等于 1 时,表明该指标对生态护坡工程应用效果无限制作用;而随着偏离 1 程度的增加,对工程的应用效果的限制性逐渐增强,直至等于 0。

### 2.4 评价指标权重值确定

采用专家咨询和层次分析法相结合的方法确定各级评价要素的指标的权重。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,并定量化表示,确定两两比较判断矩阵,最后计算出指标权重。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,以及道路使用者(司机及乘客)。

### 2.5 评价模型及标准的确定

评价中需要对这些指标进行综合评判。假设  $M$  代表生态护坡工程生态效果综合评价指数,依据层次分析法,可表示为:

$$M = \sum_{i=1}^2 W_i F_i \quad (4)$$

式中: $M$ ——生态护坡工程生态效果综合评价指数; $W_i F_i$ ——某评价指标的评价分数值; $W_i$ ——第  $i$  大类指标的权重; $F_i$ ——第  $i$  大类指标的评价分值。

评价指标标准的制定参考了国内外相关研究的有关基础以及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 4 级:“优”级,工程效果优,综合分值在[0.8, 1]区间;“良”级,工程效果良,综合分值在[0.6, 0.8]区间;“中”级,工程效果一般,综合分值在[0.4, 0.6]区间;“差”级,工程效果差,综合分值在[0, 0.4]区间。植被护坡工程生态效果综合评价指标分值是由分指数叠加得出,具有适宜研究多属性、多因子评价体系结构的特点,根据其综合评价指数  $M$  划分为不同的等级。

## 3 评价实施及分析

### 3.1 评价实施

评价的实施是根据评判对象路域植被护坡工程生态效果的各种实际调查数据、实验数据、工程基础数据,采用模糊数学对各个评价指标进行定量估算,然后由判断专家小组的每一个成员根据已确定的评价等级一次对各个指标进行评价。具体计算过程如表 2—4 所示。

表 2 生态护坡工程效果评价指标权重赋值

评价目标	准则层 $F_i$	权重 $W_i$	评价指标层 $F_{ij}$	权重 $W_{ij}$
边坡植被恢复效果	系土统壤质与量植 ( $F_1$ ) 被	0.80	植被生物量 $F_{11}$	0.15
			草本植物覆盖度 $F_{12}$	0.15
			物种多样性 $F_{13}$	0.15
			土层厚度 $F_{14}$	0.14
			土壤紧实度 $F_{15}$	0.08
			土壤有机质含量 $F_{16}$	0.15
			土壤质地 $F_{17}$	0.10
			pH 值 $F_{18}$	0.08
			景观质量变化 ( $F_2$ )	0.20
	近自然程度 $F_{22}$	0.30		
	植被绿期 $F_{23}$	0.30		

表 3 植被护坡工程生态效果评价指标实测值和隶属度值

评价指标层 $F_{ij}$	实测值 $X_i$	$b$	$a$	隶属度
植被生物量 $F_{11}$	200	400	0	0.50
草本植物覆盖度 $F_{12}$	70	80	30	0.80
物种多样性 $F_{13}$	13	16	3	0.77
土层厚度 $F_{14}$	20	10	60	0.80
土壤紧实度 $F_{15}$	18	13	30	0.71
土壤有机质含量 $F_{16}$	1.5	2.2	0.5	0.57
土壤质地 $F_{17}$	30	15	50	0.57
pH 值 $F_{18}$	7.4	7.8	7.0	0.55
植被覆盖度 $F_{21}$	75	95	30	0.69
近自然程度 $F_{22}$	6	10	0	0.60
植被绿期 $F_{23}$	150	170	0	0.88

注:工程所处地土壤偏碱性,并且多为机械压实,故采用降半梯形分布的隶属函数。 $b, a$  为指标临界值。

表 4 植被护坡工程生态效果评价指标分值

总分值	准则层 $F_i$	分值	评价指标层 $F_{ij}$	分值
0.68	系土统壤质与量植 ( $F_1$ ) 被	0.531	植被生物量 $F_{11}$	0.075
			草本植物覆盖度 $F_{12}$	0.120
			物种多样性 $F_{13}$	0.115
			土层厚度 $F_{14}$	0.112
			土壤紧实度 $F_{15}$	0.056
			土壤有机质含量 $F_{16}$	0.085
			土壤质地 $F_{17}$	0.057
			pH 值 $F_{18}$	0.044
			景观质量变化 ( $F_2$ )	0.144
	近自然程度 $F_{22}$	0.180		
	植被绿期 $F_{23}$	0.265		

### 3.2 评价结果分析

从表 4 可以看出,调查路段植被护坡工程生态效果良好。 $M=0.68$ ,处于“良”等级。在调查路段植被

覆盖度达到 75%,绿期为 150 d。生态工程类型主要包括:客土喷播、厚层基材喷附和保育块技术等。各类技术的合理综合实施,草本覆盖度不至于过高而导致灌木死亡。尤其是保育块技术使得灌木处于一个相对较好的生境,可促进其生长。因而,物种多样性趋于合理。由于人为客土的加入使得表层土壤质地、有机质含量和 pH 值等发生改变,土壤质量得以改善,当地植物入侵增多。当地物种的增多,使得坡面从景观美学角度上逐步接近自然。

## 4 结论

利用模糊数学方法评价生态护坡工程生态效果是科学的,可行的。因为,一是充分利用了生态护坡工程生态效果评价中所存在的模糊性特点;二是充分考虑了评价因素指标值、评价因素权重和评价因素间交互作用对生态护坡工程生态效果的共同影响。

利用模糊数学方法评价生态护坡工程生态效果,其结果提供了较多,较准确的信息。一是从单因素评价结果可获得评价因素优劣的准确信息;二是从生态护坡工程生态效果综合评价结果可获取生态护坡工程生态效果优劣的准确信息。

### [参 考 文 献]

- [1] 张俊云,周德培. 红层泥岩边坡生态防护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(2):250-256.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 贾致荣,张玮. 公路边坡植被恢复质量评价指标及方法研究[J]. 水土保持通报,2008,28(1):115-118.
- [5] 胥晓刚. 高速公路路域生态恢复研究[D]. 成都:四川农业大学,2004.
- [6] 李绍才. 坡面岩体—基质—植被互作的效应及调控[D]. 成都:四川大学,2006.
- [7] 白史且,胥晓刚. 高速公路绿化工程与技术[M]. 1 版. 北京:中国农业出版社,2005.
- [8] 邓辅唐,吕小玲,邓辅商. 高速公路边坡生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持,2005(11):48-50.
- [9] 穆彬,谢阳,江楠,等. 道路生态影响评价方法研究:以兰海高速公路为例[J]. 环境科学,2007,28(12):2889-2895.
- [10] 李庆旭,刘光媛,邵麟惠. 层析分析法在高速公路生态环境影响评价中的应用[J]. 冰川冻土,2007,29(4):653-658.
- [11] 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.