

# 基于未确知—集对耦合的生态护坡 工程质量评价体系及应用

万炳彤, 鲍学英, 李爱春

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 建立一个科学合理的生态护坡工程质量评价体系对生态护坡工程的质量等级进行评价, 为边坡生态恢复方案的选用提供理论依据。[方法] 结合系统工程学理论, 将生态护坡工程视为“边坡—基质—植物群落”的复合系统加以评价研究。考虑到生态护坡工程质量评价过程中信息的不确定性、未确知性, 建立一种新的未确知测度与集对分析耦合的评价模型。运用未确知测度理论, 计算出各生态护坡方案的多指标综合测度评价向量, 将生态护坡系统中的不确定性信息转化为相对确知的信息; 基于集对分析理论, 引入可以体现生态护坡系统确定性与不确定性的同异反联系度, 进一步提高了评价精度。最后, 将该模型运用于某地区铁路边坡生态恢复工程中的 3 种备选方案进行评价。[结果] 3 种备选方案的质量等级皆为 II 级, 其联系数分别为 0.384, 0.386 和 0.539, 第 3 种方案(TBS II 护坡工程区)最优。[结论] 优选结果与灰色评价模型的计算结果几乎一致且更符合工程实践结果, 是一种有效地针对生态护坡效果研究的新方法。

**关键词:** 生态护坡; 质量评价; 未确知测度; 集对分析

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2019)02-0108-07

**中图分类号:** U213.1<sup>+</sup>4

**文献参数:** 万炳彤, 鲍学英, 李爱春. 基于未确知—集对耦合的生态护坡工程质量评价体系及应用[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 108-114. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.017; Wan Bingtong, Bao Xueying, Li Aichun. Quality evaluation system and application of ecological slope protection project based on unascertained-set pair coupling[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 108-114.

## Quality Evaluation System and Application of Ecological Slope Protection Project Based on Unascertained-set Pair Coupling

Wan Bingtong, Bao Xueying, Li Aichun

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] A suitable quality evaluation system for ecological slope protection was established to evaluate the quality grade of ecological slope protection project, and to provide a theoretical basis for selecting the slope ecological restoration method. [Methods] In combination with the system engineering theory, the ecological slope protection engineering is regarded as a complex system of “slope-matrix-plant community”. A new evaluation model of unascertainty measure and set pair analysis were established to be used in the process of ecological slope protection project quality evaluation. Using unascertainty measure theory, the multi-index comprehensive measure evaluation vector of each ecological slope protection scheme was calculated, and the uncertainty information in the ecological slope protection system was transformed into relatively unascertainty information. The pair analysis reflects the degree of similarity, difference and inverse relation between the certainty and uncertainty of ecological slope protection system, and further improve the accuracy of evaluation. Finally, the model was applied to evaluate three alternative schemes of railway slope ecological restoration project. [Results] The quality standard of the three kinds of schemes are all level II. The correlation numbers index were : 0.384, 0.386 and 0.539, respectively. The results showed the third option (TBS II

收稿日期: 2018-08-18

修回日期: 2018-10-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“西北寒冷地区铁路绿色施工措施及效果评价”(51768034)

第一作者: 万炳彤(1992—), 女(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士研究生, 研究方向为生态护坡及工程管理。E-mail: 959375563@qq.com.

通讯作者: 鲍学英(1974—), 女(汉族), 宁夏回族自治区中卫市人, 博士, 教授, 主要从事绿色铁路及工程管理方面的研究。E-mail: 813257032@qq.com.

slope protection) was the best. [Conclusion] The result of optimization was almost consistent with the calculation result of grey evaluation model and reflected the result of engineering practice well. We concluded that the method adopted in this paper is an effective new method to study the effect of ecological slope protection.

**Keywords:** ecological slope protection; quality evaluation; unascertained measure; set pair analysis

近年来,我国交通建设日益增加,大量开挖产生的裸露边坡,不仅会对道路沿线的地表植被造成破坏,导致坡面植物种类骤减、坡体结构损坏,水土流失等一系列的生态问题,也是导致滑坡、泥石流等地质灾害的主要源由<sup>[1-3]</sup>。如何对裸露边坡实施有效的生态防护,减少水土流失,维持坡地生态系统健康,已经逐渐成为交通建设部门关注的重点<sup>[4-5]</sup>。生态护坡技术在交通建设领域发展迅速,对生态护坡工程进行效果评价是绿色通道建设的重要手段。影响生态护坡效果的因素复杂多变,具有不确定性,很难用简易的方法进行护坡效果的评判分析。目前,有学者尝试运用灰色评价法<sup>[6]</sup>、模糊综合评判法<sup>[3,7]</sup>、模糊神经网络法<sup>[2]</sup>、模糊物元法<sup>[8]</sup>等不确定性分析方法对边坡生态防护效果进行了相关研究,上述研究在生态护坡效果评价方面均发挥了重要作用,但是,这些研究所采用的方法侧重点各不相同,对解决这类问题均存在一定的局限性。例如灰色评价法,其原理依据灰色系统理论,适用于只有少量观测数据的项目,其研究对象具有“外延明确、内涵不明确”的特点。而边坡生态防护指标具有大量的观测值,且边坡生态防护中的植物抗逆性等指标用“很强”、“强”、“中等”等模糊概念度量,这些概念的外延是不明确的,所以仅根据灰色理论得出结论容易造成信息丢失,影响模型的有效性。生态护坡系统中的基质容重、毛管孔隙度、有机质含量、植被盖度、群落生物量等参量信息的不确定性多来源于实测资料不完全,测量值不精确等原因,这种给决策者带来的纯主观的、认识上不确定性信息称之为未确知性<sup>[9]</sup>。未确知测度模型是一种适用于大数据集的不确定性分析方法,主要处理研究对象的未确知信息,能够解决生态护坡质量评价中诸多因素的未确知性,还能对其进行定量分析。相较于灰色评价法其适用范围更贴合于生态护坡系统,同时刘开第<sup>[10]</sup>认为相比模糊综合评判、灰色聚类分析、神经网络等评价方法,未确知测度模型评价结果也更精细,合理。基于此,本文以系统工程学为基础,建立相对完整的生态护坡效果评价体系,并构建评价指标与生态护坡效果间的未确知测度模型,建立单指标测度矩阵,运用 AHP 法求得各指标的权重,从而得到多指标综合测度评价向量,并应用于集对系统中,对生态护坡工程评价结果进行更有深度的再评价,构建出基于未未知—集对耦合的生态护坡工程质量评价体系,并在某

工程实例中加以应用,得到验证。为快速有效地分析生态护坡工程质量提供了一个新方法。

## 1 生态护坡效果未确知测度评价模型

设优选对象  $O_1, O_2, \dots, O_n$  组成的论域  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$  称为对象空间,任意一个优选对象  $O_i \in O$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 都有  $m$  个可以评价的指标  $S_1, S_2, \dots, S_m$ , 令  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ , 则  $S$  称为评测空间,  $x_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 代表第  $i$  个优选对象  $O_i$  关于评测指标  $S_j$  的观测值。每个指标的观测值  $x_{ij}$  都划分为  $t$  个评价等级  $C_1, C_2, \dots, C_t$ , 记作  $E = \{C_1, C_2, \dots, C_t\}$ 。其中  $C_k$  是第  $k$  个评价等级,且  $k$  级效果比  $k+1$  级好,即  $C_k > C_{k+1}$ <sup>[11]</sup>。

### 1.1 单指标未确知测度

若  $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$  代表  $x_{ij}$  属于第  $k$  个等级  $C_k$  的范围,若满足:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in E) = 1 \quad (2)$$

$$\mu[x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l] = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l) \quad (3)$$

则称  $\mu$  为未确知测度<sup>[12-14]</sup>,  $(\mu_{ijk})_{m \times q}$  称作单指标测度评价矩阵,表示为:

$$(\mu_{ijk})_{m \times q} = \begin{pmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \mu_{i1q} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \mu_{i2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \mu_{imq} \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据生态护坡评价效果特征,选用直线型测度函数<sup>[15]</sup>,如公式(5)所示。从而计算单指标测度矩阵。

$$\begin{cases} \mu_{ijk} = \mu_{jk}(x_i) = \begin{cases} \frac{-x_i}{d_{k+1}-d_k} + \frac{d_{k+1}}{d_{k+1}-d_k}, d_k < x_i \leq d_{k+1} \\ 0, x_i > d_{k+1} \end{cases} \\ \mu_{ij(k+1)} = \mu_{j(k+1)}(x_i) = \begin{cases} 0, x_i \leq d_k \\ \frac{x_i}{d_{k+1}-d_k} - \frac{d_k}{d_{k+1}-d_k}, d_k < x_i \leq d_{k+1} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x_i$ ——优选对象  $O_i$  关于护坡效果指标的实测值;  $d_k$ ——优选对象实测值分布区间上的点,设  $k$  等级的取值区间为  $[d_{k-1}, d_k]$ , 实测值由  $d_k$  增加至  $d_{k+1}$  时,对于  $k$  等级的隶属度逐步降低,至  $d_{k+1}$  时,降为 0,相应的对  $k+1$  等级的隶属度从 0 升高至 1。

## 1.2 多指标加权综合测度

利用 AHP 法<sup>[16]</sup>构建边坡生态防护质量多层次评价模型层间的判断矩阵,从而得到各指标的权重向量  $W = \omega_j (j=1, 2, \dots, m)$ , 并且通过一致性检验。若  $\mu_k^i = \mu(O_i \in C_k)$  代表优选对象  $O_i$  属于第  $k$  个等级  $C_k$  的程度, 则:

$$\mu_k^i = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_{ijk} \quad (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, q) \quad (6)$$

此时  $\{\mu_1^i, \mu_2^i, \dots, \mu_q^i\}$  称作  $O_i$  的加权综合测度评价向量<sup>[17]</sup>。

## 2 集对分析(SPA)理论

### 2.1 SPA 原理

集对分析<sup>[18]</sup>(set pair analysis, SPA), 其理论核心是将研究问题的确定因子与不确定因子构建为含有一定联系度的集对。并对集对中的 2 个集合的关系从“同、异、反”3 个反面来进行不确定性分析, 并用联系度  $\mu$  进行定量表示。进而衍生至多个集合构成的系统。

基本原理为<sup>[19]</sup>: 设有集合  $A$  和集合  $B (A = (A_1, A_2, \dots, A_n), B = (B_1, B_2, \dots, B_n))$  且  $A \cap B \neq \emptyset$ , 集合  $A$  和集合  $B$  构成集对  $H(A, B)$ , 对集对  $H$  的特性进行研究分析, 共得到  $n$  个特性, 其中两个集合共有的特性有  $l$  个, 对立的特性有  $f$  个, 既不共有又不对立的特性有  $m$  个, 则:

$$\mu = \frac{l}{n} + \frac{f}{n}p + \frac{m}{n}q \quad (7)$$

$$\text{令 } a = \frac{l}{n}, b = \frac{f}{n}, c = \frac{m}{n}, \text{ 则:}$$

$$\mu = a + bp + cq \quad (8)$$

其中,  $\mu$  称作三元联系度,  $a, b, c$  为同一反隶属度, 且满足  $a + b + c = 1$ 。  $p (p \in [-1, 1])$  为差异度系数, 表示研究系统的不确定性,  $p$  越趋于 0 代表系统的不确定性越大,  $q$  为对立度系数, 规定  $q = 1$ 。

把公式(7)展开, 则可得到多元联系数:

$$\mu = \frac{1}{n} + \frac{f_1}{n}p_1 + \frac{f_2}{n}p_2 + \dots + \frac{f_{n-1}}{n}p_{n-2} + \frac{m}{n}q \quad (9)$$

可简化为:

$$\mu = a + b_1p_1 + b_2p_2 + \dots + b_{n-2}p_{n-2} + cq \quad (10)$$

### 2.2 生态护坡质量 SPA 评价模型

将集对分析运用于生态护坡的效果评价, 可以把生态护坡的评价指标和评价指标标准视为含有一定联系的两个集合, 构成一个集对。若评价等级有  $t$  个, 则  $t$  元联系度  $\mu$  为同异反隶属度矩阵  $[a, b_1, b_2, \dots, b_{t-2}, c]$  和所求得联系数分量  $E = [1, P_1, P_2, \dots, P_{t-2}, q]^T$  的乘积:

$$\mu = [a, b_1, b_2, \dots, b_{t-2}, c] \cdot E = a + b_1p_1 + \dots + b_{t-2}p_{t-2} + cq \quad (11)$$

将未确知综合测度识别子系统  $\mu_k^i$  视为优选对象  $O_i$  在护坡效果等级上的同异反隶属度矩阵, 得到  $O_i$  的总指标综合评价  $t$  元联系数  $\mu$ :

$$\mu = \mu_k^i \cdot E = \mu_k^i \cdot [1, p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{i(k-1)}, \dots, p_{i(t-2)}, q]^T \quad (12)$$

因为  $\mu$  是  $t$  元联系数, 对范围  $[-1, 1]$  按  $t-1$  等分, 将  $p_{i(t-2)}, p_{i(t-1)}, \dots, p_{i2}, p_{i1}$  在  $[-1, 1]$  上从左到右取  $t-1$  个均分数,  $q = -1$ , 此时:

$$E = [1, \frac{t-2}{t-1}, \frac{t-5}{t-1}, \dots, \frac{t+1-2k}{t-1}, \dots, \frac{5-2t}{t-1}, -1]^T \quad (13)$$

区间  $[-1, 1]$   $t$  等分后的  $t$  个区间分别对应护坡效果的  $t$  个评价等级, 联系数  $\mu$  处于的区间锁对应的的评价等级就是综合评价结果。

## 3 生态护坡工程质量评价指标体系的建立

### 3.1 基于“边坡—基质—植物群落”系统的评价指标

以系统工程学为基础, 生态护坡工程可视为“边坡—基质—植物群落”的复合系统(图 1), 其与外界环境相互融合构成含有一定结构和功能的统一体系<sup>[20]</sup>, 结构和功能是生态护坡系统的主要构件, 所以, 生态护坡工程质量评价指标体系的构建应以结构和功能为基础, 从而保障质量评价体系的完善性。生态护坡系统的结构由“基质”和“植物群落”构成, 基质在这里指边坡土壤, 植物群落是指种植在边坡的灌木、乔木或草等植物。系统的功能构件主要是对坡面的力学防护效果。

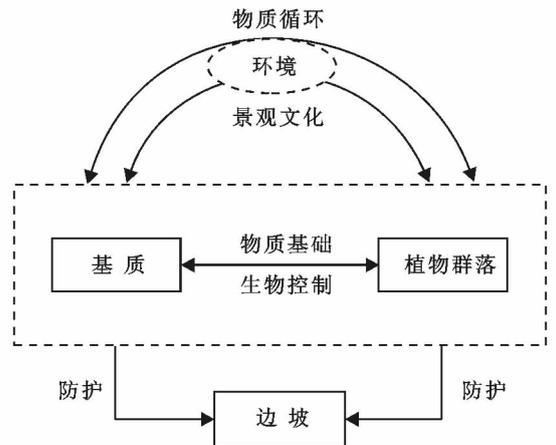


图 1 “边坡—基质—植物群落”系统的结构和功能图

基于生态护坡系统的结构与功能, 依据《铁路工程绿色通道建设指南》及参考文献<sup>[6]</sup>对其评价指标从基质, 植物群落, 力学防护 3 个评价准则出发, 并结

合 Delphi 法对指标进行筛选,最终确定出基质容量等 15 个细化指标,构建出边坡生态防护质量评价的

多层次指标体系如表 1 所示。并形成边坡生态防护质量评价指标的递阶层次结构模型如图 2 所示。

表 1 边坡生态防护质量评价的多层次指标体系

一级指标	二级指标	指标说明
基质	基质容重 $S_1/(g \cdot cm^{-3})$	单位体积内土体的重量,容重越大基质越密实
	毛管孔隙度 $S_2/\%$	体现土壤的储水给水能力
	有机质含量 $S_3/(g \cdot kg^{-1})$	单位体积土壤中含碳有机化合物数量,提高土壤的保肥性
	养分含量 $S_4/(g \cdot kg^{-1})$	土壤中全氮、速效磷、速效钾的含量,反映土壤的肥力
	渗透率 $S_5/(mm \cdot h^{-1})$	体现土壤的渗水能力
	坡面产沙量 $S_6/(g \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1})$	体现土壤的抗冲,抗蚀能力
植物群落	植被盖度 $S_7/\%$	植被地上部分的垂直投影面积与取土面积之比
	群落生物量 $S_8/(g \cdot cm^{-2})$	植物在单位体积土壤内地上部分与地下部分的干重
	多样性指数 $S_9$	植物群落中种类与个体数量的比值
	均匀度指数 $S_{10}$	体现单位面积内边坡植物种类个数
	灌草植物比例 $S_{11}/\%$	坡面灌木与草本植物比例,体现植物群落的稳定性
	植物抗逆性 $S_{12}$	包含植被的耐寒耐旱性、抗病虫性、耐瘠薄性
力学防护	基质抗剪强度 $S_{13}/ka$	体现基质对抗剪应力的能力
	根系抗拉力 $S_{14}/(N \cdot 株)$	体现植被对坡面的锚固能力
	边坡—基质抗剪力 $S_{15}/N$	体现边坡—基质系统的整体稳定性

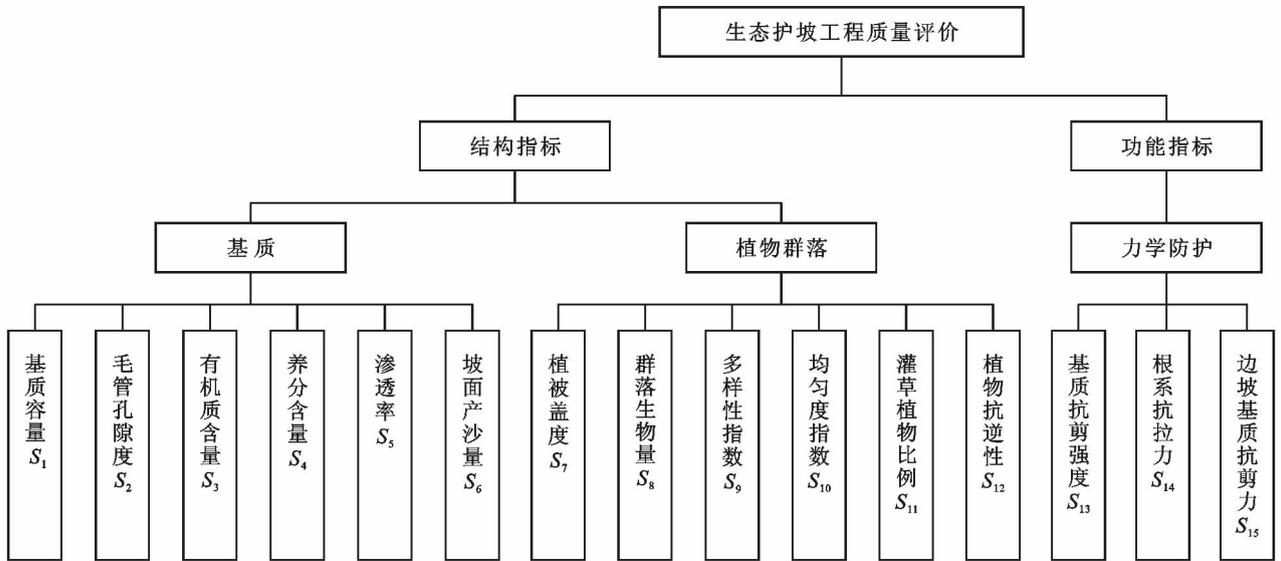


图 2 生态护坡工程质量评价模型

### 3.2 分级标准建立

根据土壤侵蚀强度分级、中国第 2 次土壤普查有机质含量分级资料及文献[6],将每个评价指标的观测值  $x_{ij}$  都划分成 5 个评价等级,即  $E = \{C_1, C_2, \dots, C_5\}$ ,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  分别对应:优(I)、良(II)、中(III)、差(IV)、极差(V)。具体划分标准详见表 2。

## 4 建立未确知—集对耦合的生态护坡工程质量评价体系

运用 AHP 法计算每个指标在生态护坡效果评价中的影响权重,将未确知测度理论求得的未确知综

合测度识别子系统视为集对分析的同异反隶属度矩阵,从而利用集对分析理论优化未确知测度理论评价结果,具体过程如图 3 所示。

## 5 实证研究

以四川省彭州市升平镇采取的 3 种不同的生态护坡工程为例[6]。该案例将铁路某段边坡等分为 3 个区域并按不同的工程措施处理,分别为:种子格栅护坡工程区( $O_1$ )、植生网护坡工程区( $O_2$ )和 TBS II 护坡工程区( $O_3$ )。每个区采取相同的养护措施。经过一段时间后按表 1 测得 3 种护坡措施的指标值详见表 3。

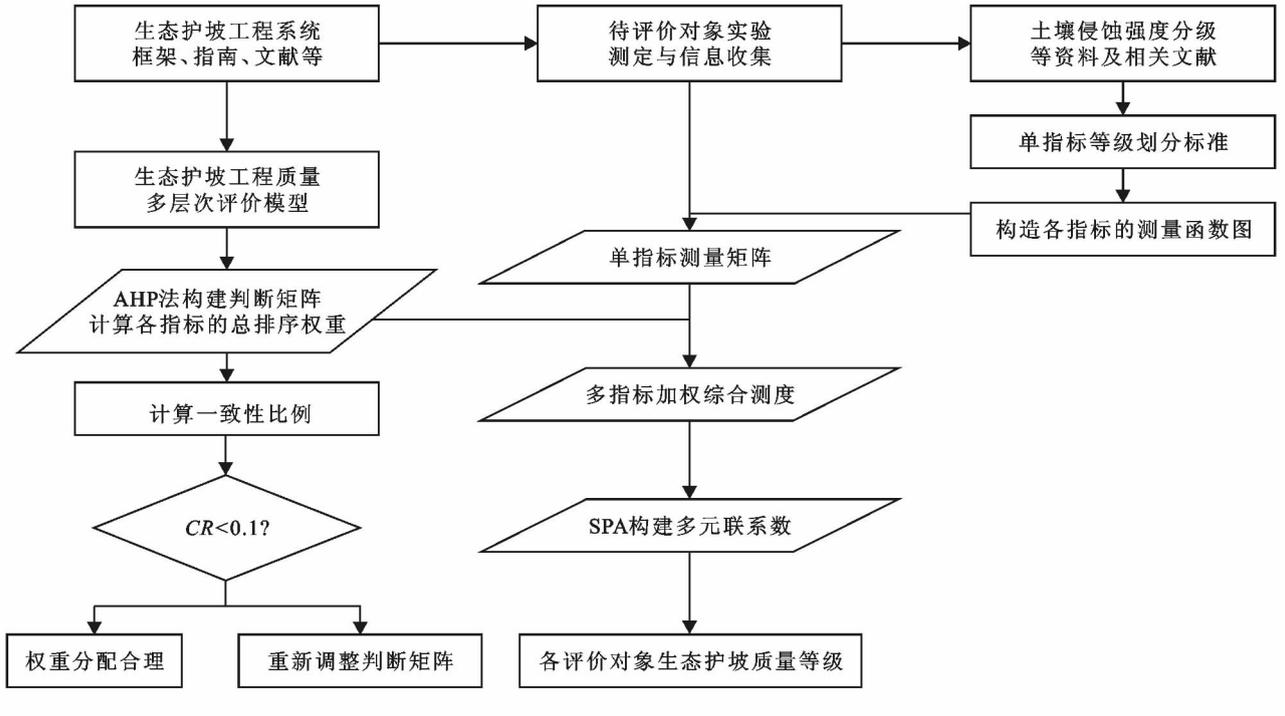


图 3 未确知测度—集对分析耦合的综合评价体系

5.1 未确知测度模型优选过程

依据公式(1)—(5)并结合 3 种护坡措施的评价指标取值(表 3),可以得到 3 个区域的单指标测度矩阵。

以种子格栅护坡工程区  $O_1$  为例,得到  $O_1$  单指标测度评价矩阵  $\mu_{ijk}$  如下(因为指标  $S_4$  中 P 和 K 在 3 个区域中的含量基本相同,且都处于 I 级,故可不做考虑,仅以 N 代表指标  $S_4$  作比较)。

表 2 指标等级划分标准

评价等级	$S_1 / (g \cdot cm^{-3})$	$S_2 / \%$	$S_3 / (g \cdot kg^{-1})$	$S_4 / (g \cdot kg^{-1})$			$S_5 / (mm \cdot h^{-1})$	$S_6 / (g \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1})$
				N	P	K		
I	<1.1	>40	>20	>3.0	>0.015	>0.1	>30	<1
II	1.1~1.2	35~40	10~20	2.5~3.0	0.01~0.015	0.08~0.1	20~30	1~2
III	1.2~1.3	30~35	5~10	2.0~2.5	0.005~0.01	0.06~0.08	10~20	2~5
IV	1.3~1.4	25~30	2~5	1.5~2.0	0.002~0.005	0.04~0.06	5~10	5~10
V	>1.4	<25	<2	<1.5	<0.002	<0.04	<5	>10

评价等级	$S_7 / \%$	$S_8 / (g \cdot cm^{-2})$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11} / \%$	$S_{12}$	$S_{13} / ka$	$S_{14} / (N \cdot 株)$	$S_{15} / N$
II	80~90	900~1 000	0.8~1	0.8~1	50~60	强	70~80	700~1 000	300~400
III	70~80	700~900	0.6~0.8	0.6~0.8	40~50	中等	60~70	400~700	200~300
IV	50~70	400~700	0.4~0.6	0.4~0.6	30~40	不强	50~60	100~400	100~200
V	<50	<400	<0.4	<0.4	<30	极不强	<50	<100	<100

表 3 各护坡措施的指标实测值

二级指标	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$			$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$
				N	P	K											
$O_1$	1.21	35.7	16.9	2.30	0.04	0.16	20.3	1.57	88.0	864.7	0.74	0.77	75.0	强	70.8	639.3	291.5
$O_1$	1.19	34.9	15.4	2.19	0.04	0.15	23.8	2.48	77.0	820.1	1.17	0.71	63.0	强	67.8	557.7	273.4
$O_1$	1.17	35.4	18.2	2.51	0.04	0.16	23.4	1.73	85.0	912.5	0.83	0.82	73.0	强	83.6	794.3	352.0

$$\mu_{jk}^1 = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.64 & 0.36 & 0.00 & 0.00 \\ 0.38 & 0.62 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.10 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.53 & 0.47 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.97 & 0.03 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.43 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.20 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.35 & 0.65 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.58 & 0.42 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.30 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.42 & 0.58 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

结合生态护坡工程质量评价模型(图 2),运用 AHP 法构建出边坡生态防护质量多层次评价模型层间的判断矩阵,从而得到各指标的总排序权重  $W^{[6]}$ :

$$W = [0.064, 0.102, 0.162, 0.024, 0.065, 0.046, 0.014, 0.029, 0.081, 0.033, 0.054, 0.104, 0.053, 0.037, 0.132]$$

依据公式(6),用指标权重  $W$  乘以矩阵  $\mu_{jk}^1$  可得区域  $O_1$  的加权综合测度识别子系统  $\mu_k^1 = [0.124, 0.520, 0.356, 0, 0]$ 。同理,可求出其他区域的加权综合测度识别子系统。如表 5 所示。

### 5.2 基于未确知测度的 SPA 评价模型优选过程

生态护坡质量评价指标的观测值有 5 个评价等级,即  $t=5$ 。5 元联系数  $\mu$  可在区间  $[-1, 1]$  上等分成 5 个区间:  $[-1.0, -0.6]$ ,  $[-0.6, -0.2]$ ,  $[-0.2, 0.2]$ ,  $[0.2, 0.6]$ ,  $[0.6, 1.0]$  且分别对应 5 个评价等级,如表 4 所示。

表 4 联系数和护坡等级对应关系

评价结果	联系数 $\mu$				
	$[0.6, 1.0]$	$[0.2, 0.6]$	$[-0.2, 0.2]$	$[-0.6, -0.2]$	$[-1.0, -0.6]$
等级	I	II	III	IV	V
护坡效果	优	良	中	差	极差

表 5 生态护坡质量评价结果

样本区域	多指标加权综合测度识别子系统					灰色评价法		本文方法	
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	综合评价值	所属灰类	联系数	评价结果
$O_1$	0.124	0.520	0.356	0	0	81.7	第二灰类(良)	0.384	II 级(良)
$O_2$	0.148	0.476	0.372	0	0	80.7	第二灰类(良)	0.386	II 级(良)
$O_3$	0.216	0.645	0.139	0	0	83.8	第二灰类(良)	0.539	II 级(良)

因为  $\mu$  是 5 元联系数,依据公式(14)得出联系数分量  $E = [1.0, 0.5, 0, -0.5, 1.0]^T$ 。依据公式(13)可求得区域  $O_1$  的总指标综合评价 5 元联系数  $\mu$ :

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_k^1 \cdot E = 0.124P_1 + 0.520P_2 + 0.356P_3 \\ &= 0.384 \in [0.2, 0.6] \end{aligned}$$

由表 4 可知区域  $O_1$  护坡等级为 II 级,同理可得其他区域的护坡等级,并将计算结果与文献<sup>[6]</sup>采用的灰色评价法进行比较,如表 5 所示。由表 5 可以得出基于 SPA 的多层次未确知测度理论其计算结果同灰色评价法基本相同,且符合实际情况,说明本文采用的方法适用于生态护坡质量研究,是一种有效地针对生态护坡效果研究的新方法。

## 6 结论

(1) 本文以系统工程学为基础,将生态护坡工程视为“边坡—基质—植物群落”的复合系统,以基质,植物群落的结构类指标和力学防护的功能类指标为出发点来评价生态护坡工程质量。

(2) 将未确知测度理论得到的多指标综合测度评价向量应用于集对系统中进行再评价。评价结果与灰色评价模型的计算结果基本相同,说明本文为快速有效的分析生态护坡工程质量提供了一个新方法。

(3) 未确知—集对耦合的评价模型充分考虑了生态护坡工程质量评价体系的不确定因素,计算出了各边坡区域的隶属等级;引入集对分析理论,建立了联系数函数模型,进一步细化了评价结果,并充分考虑了生态护坡工程质量评价指标在各等级都具有同异反联系这一事实,对生态护坡质量研究具有实践参考意义。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 季贵斌,梁力,赵颖.高速公路边坡混播植被群落生态适应性综合评价[J].安全与环境学报,2016,16(6):360-365.  
 [2] 张大勇,王冬,王建军.基于模糊神经网络的护坡植被优选[J].东北林业大学学报,2011,39(7):116-119.  
 [3] 龙凤,李绍才,孙海龙,等.岩石边坡生态护坡效果评价指标体系及应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28

- (S1):3095-3101.
- [4] 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(1):87-90.
- [5] 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):14-16.
- [6] 胡兴,陈璋,李成俊,等. 植物护坡工程质量的等级评价研究[J]. 水土保持通报,2013,33(3):180-185.
- [7] 余海龙,顾卫. 高速公路边坡生态护坡效果定量评价研究[J]. 水土保持通报,2011,31(1):203-206.
- [8] 冯晓,秦浪朝,王熙博. 山区高速公路边坡植被系统稳定性评价[J]. 中外公路,2016,36(3):12-17.
- [9] 杨志民. 未确知信息的数学处理方法[J]. 中国管理科学,2000,11(8):182-196.
- [10] 刘开第,庞彦军,孙光勇,等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践,1999,12(12):52-58.
- [11] 张水,曹庆贵,俞凯. 基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J]. 矿业安全与环保,2016,28(5):32-35.
- [12] 刘志祥,郭永乐,周士霖. 隧道下穿桥梁的桥墩稳定性未确知测度评价研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(4):91-97.
- [13] 陈顺满,许梦国,王平,等. 基于未确知测度理论的地下金属矿山合理产能优选[J]. 武汉科技大学学报,2013,36(6):461-464.
- [14] 曾佳龙,黄锐,关燕鹤,等. 熵权—未确知测度理论在尾矿库安全标准化中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(2):160-166.
- [15] 栾婷婷,谢振华,吴宗之,等. 基于未确知测度理论的排土场滑坡风险评价模型[J]. 中南大学学报:自然科学版,2014,45(5):242-247.
- [16] 梁力,季贵斌,赵颖. 高速公路边坡暖季型草本植物生态适应性评价[J]. 东北大学学报:自然科学版,2018,39(1):128-132.
- [17] 穆成林,黄润秋,裴向军,等. 基于组合赋权—未确知测度理论的围岩稳定性评价[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1057-1063.
- [18] 胡晓雪,杨晓华,郗建强,等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2008,5(5):164-170,176.
- [19] 张旭,周绍武,林鹏,等. 基于熵权—集对的边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3400-3410.
- [20] 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.

(上接第 107 页)

- [9] 孟岩,赵庚星. 基于卫星遥感数据的河口区生态环境状况评价:以黄河三角洲垦利县为例[J]. 中国环境科学,2009,29(2):163-167.
- [10] 叶有华,梁永贤,沈一青,等. 《生态环境状况评价技术规范(试行)》中若干值得商榷的问题[J]. 热带地理,2009,29(4):404-406.
- [11] 张媛. 关于生态环境状况评价指标计算的问题与探讨[J]. 河北工业科技,2008,25(6):363-365.
- [12] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [13] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报,2013,29(7):91-97.
- [14] 李粉玲,常庆瑞,申健,等. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J]. 应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.
- [15] 罗春,刘辉,戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估:以常宁市为例[J]. 国土资源遥感,2014,26(4):145-150.
- [16] 刘智才,徐涵秋,李乐,等. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(4):728-739.
- [17] 宋慧敏,薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. 应用生态学报,2016,27(12):3913-3919.
- [18] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5):9.
- [19] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2):225-242.
- [20] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5):613-622.
- [21] Xu Hanqiu. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14):8.
- [22] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [23] 刘英,侯恩科,岳辉. 基于 MODIS 的神东矿区植被动态监测与趋势分析[J]. 国土资源遥感,2017,29(2):132-137.
- [24] 王安. 神东矿区生态环境综合防治体系构建及其效果[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):83-87.
- [25] 刘英,吴立新,岳辉. 基于梯度结构相似度的矿区土壤湿度空间分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2018,43(1):87-93.