

# 基于熵权与相对熵排序法的护坡植被系统优选

陈伟<sup>1</sup>, 陈毅<sup>2</sup>, 杨珊<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** [目的] 构建一个科学合理的护坡植被系统稳定性评价模型对备选护坡植被系统的稳定性进行评价, 为边坡生态重建方案的选取提供参考依据。[方法] 运用分层递阶的分析方法, 综合边坡和植被两方面主要因素, 选取岩石质量指标、岩体完整性系数、群落覆盖度、景观优美度等重要指标, 构建了护坡植被系统稳定性评价指标体系。然后, 运用信息熵法对各评价指标进行赋权并运用相对熵排序法计算备选方案相对贴适度, 从而构建了基于熵权与相对熵排序法的护坡植被系统优选模型。最后, 运用该模型对某山区高速公路边坡生态恢复建设中的 4 种备选用的护坡植被系统进行评价。[结果] 4 种备选用植被系统的优越度分别为 1.90%, 5.37%, 2.98% 和 99.99%, 第 4 种护坡植被系统[3 种植物混种, 其中白三叶: 狗牙根 = 1: 3, 且草本植物: 灌木植物(多花木兰) = 1: 5] 最优, 该优选结果与基于模糊物元法的优选结果以及工程实践结果相一致。[结论] 该模型有效可行, 可以用于指导工程实践。

**关键词:** 边坡稳定性; 植被系统; 评价指标; 熵权法; 相对熵排序法; 优选

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2018)02-0313-05

**中图分类号:** U418.9, S157.9

**文献参数:** 陈伟, 陈毅, 杨珊. 基于熵权与相对熵排序法的护坡植被系统优选[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 313-317. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.052. Chen Wei, Chen Yi, Yang Shan. Optimization of slope vegetation system based on entropy method and relative entropy evaluation method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 313-317.

## Optimization of Slope Vegetation System Based on Entropy Method and Relative Entropy Evaluation Method

CHEN Wei<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>2</sup>, YANG Shan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hu'nan 410083, China)

**Abstract:** [Objective] A scientific and reasonable stability evaluation model for slope protection vegetation system was established to evaluate the stability of alternative slope protection vegetation systems in order to provide reference for the selection of slope ecological reconstruction scheme. [Methods] Using hierarchical analysis method, we established a stability evaluation index system of slope vegetation system by synthetically analyzing the main factors from slope and vegetation. And the main indexes include rock quality index, integrity ratio, community coverage, vegetation landscape grace and so on. Then, entropy method was used to calculate the weights of evaluation indexes and relative entropy evaluation method was used to calculate the relative closeness values of alternative schemes. Then we established an optimization model of slope vegetation system based on entropy method and relative entropy evaluation method. Finally, the model was used to evaluate the stability of the four slope protection vegetation systems that could be used to restore the ecological system of a highway slope in mountain area. [Results] The superior degrees of the four slope protection vegetation systems were 1.90%, 5.37%, 2.98% and 99.99%. The fourth slope protection vegetation system [mixed planting 3 plants and the *Trifolium repens*: bermuda grass = 1: 3, the herb: bush plant (*Magnolia multiflora*) = 1: 5] was the optimal vegetation system. The optimum result was consistent with the

收稿日期: 2017-11-18

修回日期: 2018-01-03

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“基于人工智能的矿山技术经济指标动态优化”(51404305)

第一作者: 陈伟(1995—), 男(汉族), 四川省宜宾县人, 本科生, 研究方向为公路施工。E-mail: 1837628605@qq.com.

通讯作者: 杨珊(1983—), 男(汉族), 湖北省监利县人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事金属矿山开采与复垦研究。E-mail: 1652102421@qq.com.

optimum result based on fuzzy matter-element method and the result of engineering practice. [Conclusion] The model is effective and feasible, and can be used to guide engineering practice.

**Keywords:** slope stability; vegetation system; evaluation index; entropy method; relative entropy evaluation method; optimization

由于资源开采和道路交通建设,很多地区原有的生态环境和地形地貌遭到了严重破坏,形成了大量的裸露边坡。这种裸露边坡在雨水的冲刷作用下其土质质量会严重下降而且很容易失稳垮塌<sup>[1-2]</sup>,为了维护边坡的稳定性和恢复边坡的生态环境,必须对边坡进行植被覆盖。近年来,中国在植被护坡机理、边坡生态再造、植被护坡的水土保持效应、边坡生态防护机制和生态恢复效果评价等方面进行了诸多有益探索。如肖盛燮、周辉等<sup>[3]</sup>通过研究边坡植被根系对工程边坡的加固机制与力学特性提出了植物根系抗滑力和加固能力的一般表达式。夏振尧等<sup>[4-5]</sup>通过直剪试验对植物根系的护坡作用展开研究,发现植被根系对浅层岩土体的力学性质有显著影响。顾卫等<sup>[6]</sup>基于植被恢复的生境条件,针对不同岩质边坡类型提出了不同的生境再造技术。吴宏伟等<sup>[7]</sup>深入研究了大气、植被和土体间的相互作用,科学地阐述了植被护坡作用机理,为植物护坡的工程实践和“海绵城市”的建设提供了扎实的理论依据。潘声旺<sup>[8]</sup>借助物种配置试验揭示了乡土植物生活型、物种多样性和生态系统功能间的偶合关系。王凯等<sup>[9]</sup>运用调查统计的方法对边坡防护形式进行分析,结果表明因地制宜的使用边坡防护技术是维护边坡稳定和恢复边坡生态的关键。董方帅、徐礼根等<sup>[10]</sup>在大量工程实践的基础上,基于 5 个层次的生态指标建立了岩质边坡植被重建效果评价指标体系,这些研究大大促进了边坡生态系统重建技术的发展。但从总体上讲,由于中国在生态重建方面的研究起步较晚,研究范围还不够广。同时,中国在工程建设方面规模大、速度快,对环境的破坏成度和破坏面都比较大,且破坏区生态环境复杂多变。因此,国内对边坡生态修复的研究长期滞后于工程建设实践要求,从而限制了我国进行生态修复和建设生态型、绿色型工程的步伐<sup>[11]</sup>。因此,为了促进公路边坡的生态修复和推动生态型工程建设,本文针对护坡植被系统优选问题,从护坡植被系统的稳定性角度出发运用分层递阶的方法选择评价指标,建立护坡植被系统稳定性综合评价指标体系,运用基于熵权与相对熵排序法的评价模型对备选用的护坡植被系统稳定性进行评价并以评价结果作为工程实践的指导建议。该优选评价模型的思路如图 1 所示。

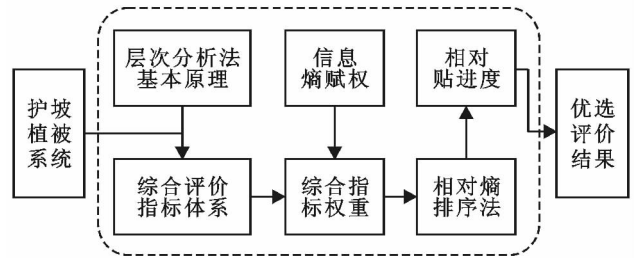


图 1 护坡植被系统优选评价思路

## 1 模型构建

### 1.1 建立评价指标体系

由于影响护坡植被系统稳定性的因素众多,本文基于分层递阶的思路,从边坡和植被两个方面出发,以维护边坡和植被系统的稳定性和景观协调为原则<sup>[12]</sup>。参考相关研究<sup>[13-16]</sup>,选取岩石质量指标、岩体完整性系数、湿抗压强度、地下水渗水量、结构面强度系数、群落垂直覆盖度、植被综合抗性和边坡植被景观优美度作为评价指标建立了护坡植被系统稳定性评价指标体系(图 2)。为了便于研究,需将各评价指标进行定量化处理。其中,地下水渗水量( $m^3/d$ )通过现场实验测量并统计相关数据后计算得出。结构面强度系数即边坡岩体抗剪强度。植被综合抗性则根据植被的直观表现,人为地划分为 5 个等级,专家采用 9 分制进行定量评价<sup>[17]</sup>(9~7 分,好;7~5 分,较好;5~3 分,一般;3~2 分,差;2~1 分,极差)。边坡植被景观优美度参考 SD 法原理分 7 级进行定量评价<sup>[18-19]</sup>(7—5 级,好;5—4 级,较好;4—3 级,一般;3—2 级,差;2—1 级,极差)。

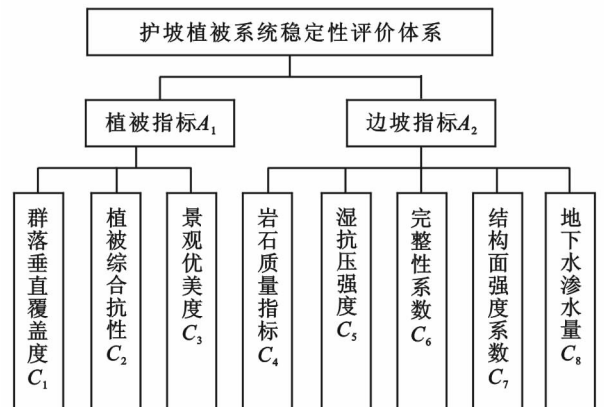


图 2 护坡植被系统稳定性评价指标体系

## 1.2 熵权法步骤

设评价指标矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ),  $a_{ij}$  表示影响方案  $j$  的指标  $i$ 。将指标划分为效益型指标和成本型指标进行规范化处理<sup>[20]</sup>, 得到规范化矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

对于效益型评价指标:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}} \quad (1)$$

对于成本型评价指标:

$$r_{ij} = \frac{1/a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (1/a_{ij})^2}} \quad (2)$$

式中:  $r_{ij}$ ——规范化指标;  $a_{ij}$ ——初始化指标;  $m$ ——参评指标数量;  $n$ ——参评方案数量。

1.2.1 指标信息熵 将矩阵  $R$  归一化得到矩阵  $\bar{R} = (\bar{r}_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\bar{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (3)$$

$$\beta_i = \frac{1}{\ln m_j} \sum_{j=1}^n \bar{r}_{ij} \ln \bar{r}_{ij} \quad (4)$$

当  $\bar{r}_{ij} = 0$  时, 规定  $\bar{r}_{ij} \ln \bar{r}_{ij} = 0$ 。

式中:  $\bar{r}_{ij}$ ——归一化指标;  $n$ ——参评方案数量;  $\beta_i$ ——指标  $i$  的信息熵。

1.2.2 指标权重向量 评价指标权重向量  $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$ 。

$$\varphi_i = \frac{1 - \beta_i}{\sum_{k=1}^m (1 - \beta_k)} \quad (5)$$

式中:  $m$ ——参评指标数量;  $\beta_i$ ——指标  $i$  的信息熵;  $\varphi_i$ ——评价指标  $i$  的权重。

## 1.3 相对熵排序法

根据信息论, 可用相对熵  $C$  去度量信息系统  $D$  与  $E$  各状态间的非对称性差异程度

$$C = \sum_{i=1}^k \left\{ d_i \lg \frac{d_i}{e_i} + (1 - d_i) \lg \frac{1 - d_i}{1 - e_i} \right\} \quad (6)$$

式中:  $C$ ——信息系统  $D$  与  $E$  各状态间的相对熵;  $d_i$ ——信息系统  $D$  的状态  $i$ ;  $e_i$ ——表示信息系统  $E$  的状态  $i$ 。

相对熵是对系统差异的非对称性度量, 赵萌等提出并证明了运用相对熵改进 TOPSIS, 以相对熵表示方案间的接近程度, 再通过相对熵计算方案贴进度, 从而确定方案优劣的方法, 即相对熵排序法, 可以很好的克服 TOPSIS 法存在的中线盲区问题<sup>[21]</sup>。因此, 运用相对熵排序法进行评价决策, 其结果会更加准确<sup>[22]</sup>。

1.3.1 构建决策矩阵并规范化 建立决策矩阵  $B = (b_{ij})_{m \times n}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ )。其中,  $b_{ij}$  为备选方案  $j$  的评价指标  $i$ 。把矩阵  $B$  按公式(1—2)规范化得到矩阵  $V = (v_{ij})_{m \times n}$ 。

1.3.2 计算加权决策矩阵 对矩阵  $V$  加权得到加权决策矩阵  $V^* = (v_{ij}^*)_{m \times n}$ ,  $v_{ij}^* = \varphi_i v_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

1.3.3 确定正负理想方案 设正理想解方案为:  $F^+ = (F_1^+, F_2^+, \dots, F_m^+)^T$ ; 负理想解方案为:  $F^- = (F_1^-, F_2^-, \dots, F_m^-)^T$ , 正负理想解确定方法为:

$$F_i^+ = \max_j v_{ij}^* \quad (7)$$

$$F_i^- = \min_j v_{ij}^* \quad (8)$$

式中:  $F_i^+$ ——正理想指标;  $F_i^-$ ——负理想指标;  $v_{ij}^*$ ——加权决策指标。

1.3.4 备选方案相对熵 设  $g_j^+$  和  $g_j^-$  分别表示备选方案 ( $F_j$ ) (即矩阵  $V^*$  的第  $j$  个列向量) 与正理想方案 ( $F^+$ ) 和负理想方案 ( $F^-$ ) 之间的相对熵:

$$g_j^+ = \sum_{i=1}^m \left\{ F_i^+ \lg \frac{F_i^+}{v_{ij}^*} + (1 - F_i^+) \lg \frac{1 - F_i^+}{1 - v_{ij}^*} \right\} \quad (9)$$

$$g_j^- = \sum_{i=1}^m \left\{ F_i^- \lg \frac{F_i^-}{v_{ij}^*} + (1 - F_i^-) \lg \frac{1 - F_i^-}{1 - v_{ij}^*} \right\} \quad (10)$$

式中:  $g_j^+$ ——备选方案与正理想方案的贴进度;  $g_j^-$ ——备选方案与负理想方案的贴进度;  $m$ ——参评指标数量;  $v_{ij}^*$ ——加权决策指标;  $F_i^+$ ——正理想指标;  $F_i^-$ ——负理想指标。

1.3.5 计算相对贴进度 备选方案 ( $F_j$ ) 的相对贴进度。

$$\gamma_j = \frac{g_j^-}{g_j^+ + g_j^-} \quad (11)$$

式中:  $\gamma_j$ ——备选方案的相对贴进度;  $g_j^+$ ——备选方案与正理想方案的贴进度;  $g_j^-$ ——备选方案与负理想方案的贴进度。

根据相对贴进度  $\gamma_j$  大小对备选方案排序,  $\gamma_j$  越大方案越好。

## 2 模型应用

根据文献[13]以及其他有关资料, 渝蓉高速公路 (G5013) 是沟通渝蓉两城的重要高速通道, 该公路于 2013 年 6 月全线贯通, 全长约 253 km。该公路重庆段长约 78 km, 其中有 1/2 的路线途经山岭区, 路堑段长, 边坡植被对生态环境影响较大。为了优化坡面绿化配置, 在 K61+35—K64+357 处左右两侧(两侧边坡地层岩性基本一致) 选择  $F_1, F_2, F_3$  和  $F_4$  四种方案进行试种。方案  $F_1$  是白三叶: 狗牙根 = 1: 1; 方案  $F_2$  是白三叶: 狗牙根 = 1: 3; 方案  $F_3$  是纯灌

木(多花木兰)种植;方案  $F_4$  是 3 种植物混种,其中白三叶:狗牙根=1:3,且草本植物:灌木植物(多花木兰)=1:5。经过一段时间后测量相关指标得出 4 种备选方案的评价指标值(表 1)。

表 1 备选方案评价指标体系

评价指标	拟选用方案	拟选用方案			
		方案 $F_1$	方案 $F_2$	方案 $F_3$	方案 $F_4$
植被 指标 $A_1$	$C_1/\%$	55	75	50	85
	$C_2/\text{分}$	5	6	7	8
	$C_3/\text{级}$	3.5	5.8	5.6	6.2
	$C_4/\%$	40	70	80	77
边坡 指标 $A_2$	$C_5/\text{MPa}$	45	90	86	88
	$C_6$	0.25	0.40	0.48	0.58
	$C_7/\text{MPa}$	0.40	0.35	0.38	0.45
	$C_8/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	20	20	30	5

## 2.1 计算评价指标权重

构建决策矩阵  $A$ 。根据已有研究,  $C_8$  为成本型指标,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$  为效益型指标。根据公式(1),(2)将矩阵  $A$  进行规范化处理得到矩阵  $R$ 。根据公式(3),(5)可得各评价指标的信息熵  $\beta_i$  和权重  $\varphi_i$ , 结果详见表 2。

$$A = \begin{bmatrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ C_1 & 55 & 75 & 50 & 85 \\ C_2 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ C_3 & 3.5 & 5.8 & 5.6 & 6.2 \\ C_4 & 40 & 70 & 80 & 77 \\ C_5 & 45 & 90 & 86 & 88 \\ C_6 & 0.25 & 0.40 & 0.48 & 0.58 \\ C_7 & 0.40 & 0.35 & 0.38 & 0.45 \\ C_8 & 20 & 20 & 30 & 5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R = \begin{bmatrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ C_1 & 0.4057 & 0.5533 & 0.3689 & 0.6271 \\ C_2 & 0.3790 & 0.4549 & 0.5307 & 0.6065 \\ C_3 & 0.3254 & 0.5392 & 0.5206 & 0.5764 \\ C_4 & 0.2915 & 0.5101 & 0.5830 & 0.5611 \\ C_5 & 0.2831 & 0.5662 & 0.5411 & 0.5536 \\ C_6 & 0.2814 & 0.4502 & 0.5404 & 0.6528 \\ C_7 & 0.5042 & 0.4412 & 0.4790 & 0.5672 \\ C_8 & 0.2328 & 0.2328 & 0.1552 & 0.9314 \end{bmatrix} \quad (13)$$

## 2.2 计算方案贴进度并排序

对矩阵  $V$  加权得到加权规决策矩阵  $V^*$  :

$$V^* = \begin{bmatrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ C_1 & 0.0210 & 0.0287 & 0.0191 & 0.0325 \\ C_2 & 0.0126 & 0.0151 & 0.0176 & 0.0201 \\ C_3 & 0.0155 & 0.0256 & 0.0247 & 0.0274 \\ C_4 & 0.0202 & 0.0354 & 0.0404 & 0.0389 \\ C_5 & 0.0206 & 0.0412 & 0.0394 & 0.0403 \\ C_6 & 0.0263 & 0.0420 & 0.0504 & 0.0609 \\ C_7 & 0.0047 & 0.0041 & 0.0045 & 0.0053 \\ C_8 & 0.1450 & 0.1450 & 0.0967 & 0.5801 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据公式(7—8)得出加权决策矩阵  $V^*$ , 从而构建出正负理想方案。备选方案和理想方案详见表 3。根据公式(9)(11)计算备选方案与正负理想方案间的相对熵以及各备选方案的相对贴进度, 结果详见表 4。根据各备选方案相对贴进度大小排序可知方案 4 [3 种植物混种, 其中白三叶:狗牙根=1:3, 且草本植物:灌木植物(多花木兰)=1:5] 相比于方案 1、方案 2 和方案 3 优越性显著。根据参考文献[13], 将模糊物元法对方案的评价结果、现场简易评价结果与本文结果对比可知, 3 种方法的优选结果一致。但是运用本文方法进行评价相比于模糊物元法, 计算更加简单, 且基于方案的优越度, 最优方案的选择简便易行。

表 2 各评价指标信息熵值及权重

评价指标 $C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
信息熵 $\beta_i$	0.9832	0.9892	0.9846	0.9775	0.9764	0.9697	0.9970	0.7977
权重 $\varphi_i$	0.0518	0.0331	0.0475	0.0693	0.0728	0.0933	0.0093	0.6228

表 3 备选方案和理想方案

评价指标	$C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
方备 案选	$F_1$	0.0210	0.0126	0.0155	0.0202	0.0206	0.0263	0.0047	0.1450
	$F_2$	0.0287	0.0151	0.0256	0.0354	0.0412	0.0420	0.0041	0.1450
	$F_3$	0.0191	0.0176	0.0247	0.0404	0.0394	0.0504	0.0045	0.0967
	$F_4$	0.0325	0.0201	0.0274	0.0389	0.0403	0.0609	0.0053	0.5801
方理 案想	$F^+$	0.0325	0.0201	0.0274	0.0404	0.0412	0.0609	0.0053	0.5801
	$F^-$	0.0191	0.0126	0.0155	0.0202	0.0206	0.0263	0.0041	0.0967

表 4 备选方案评价结果与对比

备选方案	$g_j^+$	$g_j^-$	本文方法评价结果		模糊物元法 评价结果	现场简易 评价结果
			$\gamma_j$	排序		
$F_1$	1.120 2	1.155 1	0.019 0	4	一般	一般
$F_2$	1.830 7	1.904 6	0.053 7	2	次稳定	较好
$F_3$	1.962 2	1.934 1	0.029 8	3	次稳定	较好
$F_4$	2.486 9	3.377 3	0.999 9	1	稳定	好

注: $g_j^+$  和  $g_j^-$  分别表示备选方案( $F_j$ )(即矩阵  $V^*$  的第  $j$  个列向量)与正理想方案( $F^+$ )和负理想方案( $F^-$ )之间的相对熵。

### 3 结论

(1) 影响护坡植被系统稳定性的因素较多,本文基于层次分析法原理,从植被和边坡两个方面选取对护坡植被系统稳定性影响最大的 8 个因素构建了护坡植被系统稳定性评价指标体系。选用熵权法(典型的客观赋权法)进行指标赋权,可以确保指标权重客观合理。

(2) 相对熵排序法是运用相对熵来衡量方案间的非线性差异,从理论上克服了传统逼近理想解排序法运用几何距离衡量方案间差异度而造成的线盲区问题。因此,本文运用相对熵排序法进行方案评价,所得结果会更加合理。

(3) 运用模糊物源法对该 4 种植被系统稳定性进行评价,其结果为方案 4 最优,该工程实践结果也证明方案 4 最有利于边坡的稳定和边坡生态的重建,说明本模型科学合理、简单实用。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 余海龙,顾卫,殷秀琴,等.高速公路路域边坡人工植被下土壤质量的变化[J].水土保持通报,2008,28(6):32-36.
- [2] 王晓亮,李光范,胡伟,等.浅析吊罗山滑坡诱发因素及影响机理[J].自然灾害学报,2014,23(1):144-148.
- [3] 肖盛燮,周辉,凌天清.边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2670-2674.
- [4] 夏振尧,周正军,黄晓乐,等.植被边坡根系浅层固土与分形特征关系初步研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3641-3647.
- [5] 王涵,周成,刘伟,李红梅.植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究[J].工程科学与技术,2017,49(S1):81-88.
- [6] 顾卫,邵琪,戴泉玉,等.基于坡面植被恢复的岩质边坡分类及生境再造技术研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(5):745-758.
- [7] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
- [8] 潘声旺,袁馨,雷志华,等.乡土植物生活型构成对川渝地区边坡植被水土保持效益的影响[J].生态学报,2016,36(15):4654-4663.
- [9] 王凯,高照良.高速公路边坡生态防护技术的分析:以十天线鄂陕界至安康段高速公路为例[J].生态经济,2015,31(5):155-159.
- [10] 董方帅,徐礼根.岩质边坡植被重建后的生态评价指标体系构建[J].科技通报,2009,25(4):503-509.
- [11] 刘春霞,韩烈保.高速公路边坡植被恢复研究进展[J].生态学报,2007,27(5):2090-2098.
- [12] 史玲.保龙高速公路边坡植被恢复效果评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [13] 冯晓,秦浪朝,王熙博.山区高速公路护坡植被系统稳定性评价[J].中外公路,2016,36(3):12-17.
- [14] 李西.应用于植被护坡两种岩生植物土壤植被系统(SVS)研究[D].四川成都:四川农业大学,2004.
- [15] 杨晓军.采石场岩质边坡植被生态恢复效果的调查评价[D].江苏南京:南京农业大学,2012.
- [16] 陈昌彦,王思敬,沈小克.边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J].岩土工程学报,2001,23(2):157-161.
- [17] 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.
- [18] 陈世斌,黄斐.SD法在城市社区绿色休闲质量评价中的运用:以杭州市为例[J].地域研究与开发,2014,33(6):23-26.
- [19] 章俊华.规划设计学中的调查分析法 16:SD法[J].中国园林,2004(10):57-61.
- [20] 王望珍,陈翼飞,李素芹,等.基于博弈论和相对熵的基坑支护方案优选[J].数学的实践与认识,2015,45(6):165-171.
- [21] 赵萌,邱苑华,刘北上.基于相对熵的多属性决策排序方法[J].控制与决策,2010,25(7):1098-1100.
- [22] 何亚伯,夏杰,王忠文.相对熵排序在水利工程投标决策中的应用[J].数学的实践与认识,2015,45(11):61-67.