

# 高速公路边坡生态防护物种选择的模糊多属性决策方法

程 晔, 庄毓琼, 黄林冲

(中山大学 工学院, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 高速公路边坡生态防护物种种类繁多, 影响因素复杂, 评价指标模糊性大, 需综合考虑各种因素及其相互关系。通过现场试验、专家评估、文献调研等方法, 基于模糊数学和多属性决策理论, 建立了边坡生态防护物种评价的二级模糊多属性决策模型。以抗逆性、功能特性、培育特性和生长特性 4 个指标构建模型, 并分别从 4 个指标出发详细划分第二层次指标, 采用模糊数学理论对指标及指标相互间关联性进行了综合评估, 以一级模糊多属性决策结果为基础再进行二级模糊多属性决策。该方法成功应用于粤北某高速公路边坡生态防护工程, 结果证明了模糊多属性决策方法的有效性和易操作性, 为高速公路边坡生态防护的物种决策提供一种新的思路与方法。

**关键词:** 边坡工程; 生态防护; 模糊多属性; 物种选择

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)03-0201-06

中图分类号: U416.14

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.040

## Fuzzy Multiple Attribute Decision-making Method for Ecological Protective Species on Expressway Side-slope

CHENG Ye, ZHUANG Yu-qiong, HUANG Lin-chong

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** In the engineering of side-slope ecological protection, there is a wide range of plants with different complex factors. It is difficult to take all the factors and their interrelations into account before determining the slope ecological protective species, due to big fuzziness of evaluation factors. Based on the fuzzy mathematics theory and multiple attribute decision-making method, the secondary fuzzy multiple attribute decision-making model for ecological protection species is constructed by means of field test, expert evaluation and a large amount of data. An attempt has been made to establish the model by the four evaluating indicators of stress resistance, functional performance, cultivate characteristics and growth characteristics in view of slope ecological protection effect. Further the four indicators are marked off sub-indexes. The fuzzy mathematics theory is used to evaluate indexes and their correlations for establishing one-level fuzzy multiple attribute decision-making model and then the secondary fuzzy multiple attribute decision making model. The decision-making model is employed to evaluate the slope ecological protection on an expressway in Northern Fujian Province which proves the proposed model effective and easy to operate. The analysis should be considered for the similar ecological protection engineering.

**Keywords:** side-slope engineering; ecological protective species; fuzzy multiple attribute

生态边坡防护是指单独利用植物或利用植物与土木工程措施一起, 在对边坡进行防护的同时对边坡生态环境进行修复或改善。生态防护不但能提高边坡抗冲刷能力, 增强边坡表层稳定性, 还能修复工程建设对生态环境的破坏, 协调生态平衡, 对高速公路

边坡防护意义重大<sup>[1-2]</sup>。发达国家对生态防护技术的研究起步较早。美国在 1936 年已将生态防护应用于公路边坡, 并最早使用液压喷播技术。日本在 20 世纪 50 年代采用单一铺设草皮植被, 但成功率较低; 80 年代开发 TC 绿化工法、采用三维土工网等新材料,

收稿日期: 2013-07-05

修回日期: 2013-08-04

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助“粤北红层岩溶发育机制及其对地基承载力的影响”(11lgpy04); 国家自然科学基金青年基金项目“多孔岩土材料固相变形与流体扩散耦合的多尺度自适应建模方法研究”(51108472)

作者简介: 程晔(1974—), 男(汉族), 湖南省湘阴市人, 博士后, 硕士生导师, 主要从事岩土工程方面科研和教学工作。E-mail: chengye0515@126.com。

通信作者: 黄林冲(1981—), 男(汉族), 湖北省咸宁市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程领域的科研与教学工作。E-mail: hlinch@mail.sysu.edu.cn。

生态防护技术开始得到广泛应用。目前,日本广泛使用客土喷播法,已开发 20 多种单项技术,并致力于研究乔、灌、藤、草等多物种混播立体绿化体系<sup>[3-4]</sup>。中国 90 年代开始引进国外技术,并在大量研究和工程实践上,高速公路边坡生态防护技术取得了快速发展,目前已开发多种边坡生态防护技术,如三维植被网<sup>[5]</sup>、TBS 技术<sup>[6]</sup>、厚层基材喷射植被技术<sup>[7]</sup>、植被混凝土护坡绿化<sup>[8]</sup>和喷混植草技术<sup>[9]</sup>等。

高速公路边坡生态防护技术体系主要由护坡技术、防护物种选配和基质基材技术构成。由于受到边坡地质条件、水文及气候特征、沿线环境等因素的影响,适宜的边坡防护植物各不相同,且不同防护物种对边坡生态防护效果的相差甚远。因此,边坡生态防护物种选配是高速公路边坡生态防护的关键技术之一。边坡生态防护物种选配技术分为单物种选择和多物种组配技术,单物种选择是边坡生态防护物种选配技术的基础,而实际应用则以多物种组配为主,本文研究范围为单物种的选择与决策。目前,国内外高速公路生态防护物种组配多采用草灌混播,并使用适应性强的乡土植物,以实现常绿的长期效果,在具体物种选择上则多依靠工程人员的经验,选择方法上多依据物种某一或几个单因素进行确定,易导致决策失误。不同植物物种本身特性不同,有些物种虽生长迅速,但耐旱性差,有些物种虽然景观优美,但对土质肥力要求较高,显然单一因素无法全面反映植物生态护坡功能,且这些因素本身具有模糊性,因此,本文采用模糊决策方法对物种进行优选。模糊决策方法最早于 20 世纪 70 年代由美国 Bellman R E 和模糊数学奠基人 Zadeh L A 提出<sup>[10]</sup>,经过几十年的发展,模糊集理论被广泛引入到各种经典决策模型中,并逐步形成模糊多属性决策(FMADM)和模糊多目标决策(FMODM)两个极其活跃的研究领域<sup>[11]</sup>。高速公路边坡生态防护物种的评价与选择问题,涉及的影响因素众多,且各因素相互关联,大多数因素的属性还存在明显的模糊性,因此,高速公路边坡生态防护物种选择的本质为模糊多属性决策。

本文在大量调查研究已有边坡生态防护物种选择与评价研究基础上,引入模糊多属性决策理论,建立高速公路边坡生态防护物种 II 级模糊多属性决策模型,通过对 46 种待选植物的抗逆性、功能特性、培育特性和生长特性进行试验分析和调查研究,根据现场试验数据和调研资料构造模糊属性集与模糊权集,建立起高速公路生态边坡防护物种评价的 II 级模糊多属性决策方法,并应用于粤北某高速公路边坡生态防护工程,旨在进一步丰富和完善中国边坡生态防护技术体系。

## 1 模糊多属性决策基本理论

多属性决策是指利用已有的决策信息,通过一定的方式对一组有限个备选方案进行排序或择优的过程。实际生活中由于客观事物的复杂性、不确定性和人类思维的模糊性,导致遇到的多属性决策问题大部分是不确定的、模糊的,称之为模糊多属性决策(fuzzy multiple attribute decision making, FMADM)。

### 1.1 模糊多属性决策基本模型

决策可供选择的方案也称为策略,表示为集合  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , 每个决策包含属性集  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ , 和表示属性相对重要性的权值  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 。属性集和权值可表示为模糊集,可用模糊指标值矩阵表示:

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} \tilde{f}_{11} & \tilde{f}_{12} & \dots & \tilde{f}_{1n} \\ \tilde{f}_{21} & \tilde{f}_{22} & \dots & \tilde{f}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{f}_{m1} & \tilde{f}_{m2} & \dots & \tilde{f}_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\tilde{F}$ ——模糊指标值矩阵; $\tilde{f}_{ij}$ ——第  $i$  个决策  $A_i$  相对于第  $j$  个属性  $C_j$  的评价模糊集。

采用广义模糊合成算子对模糊权重矢量  $\tilde{\omega}$  和模糊指标值矩阵  $\tilde{F}$  实行变换,得到模糊决策矢量  $\tilde{D}$ :

$$\tilde{D} = \tilde{\omega} \cdot \tilde{F} = (\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_n) \quad (2)$$

在上述 I 级模糊多属性决策的基础上,得到 II 级模糊指标值矩阵与 II 级模糊权重矢量,合成可得到最终模糊决策矢量。利用模糊集排序方法对模糊决策矢量的元素  $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_n$  进行比较,选出的最优方案即为模糊多层次多属性决策模型。

### 1.2 三角模糊数近似算法

广义模糊数运算可定义为:设  $\tilde{M}, \tilde{N}$  为两个模糊数,对任意二元运算  $(*)$ :  $R(*)R \rightarrow R$ , 模糊数  $\tilde{M} (*) \tilde{N}$  的隶属函数被给定为:

$$\mu_{\tilde{M} (*) \tilde{N}}(z) = \sup_{x, y, z=x*y} \min[\mu_{\tilde{M}}(x), \mu_{\tilde{N}}(y)] \quad (3)$$

式中: $\mu_{\tilde{M} (*) \tilde{N}}(z)$ ——模糊数  $z$  的隶属函数; $\mu_{\tilde{M}}(x)$ ,  $\mu_{\tilde{N}}(y)$ ——模糊数  $x, y$  的隶属函数。

本文采用参考文献<sup>[11]</sup>提出的三角模糊数的近似算法,化简三角模糊数运算,为后续模糊多属性决策提供简便的运算法则。

### 1.3 模糊集排序方法

根据模糊决策理论,模糊环境下决策对象被表示为一系列不同模糊集,决策者对决策对象的选择和评价就相应转化为对模糊集的比较和判别,根据模糊集的定义,模糊集之间的次序关系不是一般意义下的全序关系,而是格结构下的半序关系,这使得模糊集的

比较和排序成为模糊决策中困难的任务之一。

本文引用参考文献[12]定义的模糊效应函数。

设有  $n$  个实数域的正规模糊集  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$ ,

$$f(\tilde{A}_i) = \frac{c \cdot d_h(\tilde{A}_i, \min) + (1-c)[d_h(\max, \min) - d_h(\max, \tilde{A}_i)]}{d_h(\max, \min)} \quad (4)$$

式中:  $d_h$ ——Hamming 距离,其定义详见文献[12];  
 $c$ ——分配系数,  $c \in [0, 1]$ 。 $c=1$  时,表示只以模糊极小集作为标准; $c=0$  时,表示只以模糊极大集作为标准; $c \in (0, 1)$  表示同时考虑该模糊集与模糊极小集和模糊极大集之间的距离。本文综合考虑该模糊集与模糊极小集和模糊极大集的距离,取  $c=0.5$ 。

## 2 高速公路生态边坡防护物种选择的模糊多属性决策方法

### 2.1 模糊多属性决策模型的构造

高速公路生态边坡防护物种选择与很多因素相关<sup>[13-15]</sup>,将影响防护物种评价的各相关因素按照不同属性自上而下地分解成若干层次,同一层的诸因素从属于上一层的因素或对上层因素有影响,同时又支配下一层的因素或受到下层因素的作用。最上层为目标层,中间为准则或指标层。先按低层次的各个因素进行综合评价决策,然后再按上一层的各个因素进行评价决策。本文选取抗逆性、功能特性、培育特性和生长特性等 4 个因素为第二层因素,以耐旱性等 13 个因素作为最底层因素,建立高速公路生态边坡防护物种 II 级模糊多属性决策模型(如图 1 所示)。

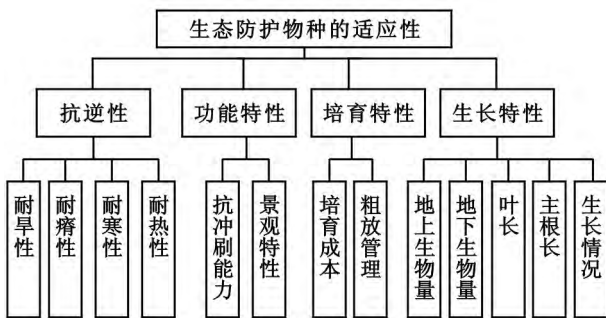


图 1 生态防护物种评价的 II 级模糊多属性决策模型

### 2.2 权重集的构造

II 级模糊多属性决策问题中,需要建立两类权重集:因素类权重集和因素权重集。根据各类因素的重要程度,对每个因素类赋予不同的权重,则因素类权重集为:  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。在每一类因素中,根据各个因素的重要程度,对每个因素设置相应的权重,则因素权重集为:  $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}\}$ ,显然,每个因素所占权重同样具有模糊性。

不同于模糊综合评判方法,在模糊决策中,权重

其模糊极大集记为  $\max$ ,模糊极小集记为  $\min$ ,对于任意模糊集  $\tilde{A}_i, i=1, 2, \dots, n$ ,模糊效应函数  $f(\tilde{A}_i)$  如下:

集仍为模糊集,本文均以三角模糊数构造。研究中采用会议咨询方式,咨询专家包括植物学专家 4 名,园林施工企业管理专家 4 名,技术专家 2 名,业主专家 3 名,岩土力学相关领域专家 2 名。将咨询结果直接以三角模糊数形式给出,统计后得到权重向量集(如表 1 所示)。

表 1 生态防护物种评价指标体系权重向量集

I 级指标	权重向量	II 级指标	权重向量
抗逆性	(0.3, 0.4, 0.5)	耐旱性	(0.1, 0.2, 0.3)
		耐瘠性	(0.3, 0.4, 0.5)
		耐寒性	(0.1, 0.2, 0.3)
		耐热性	(0.1, 0.2, 0.3)
功能特性	(0.2, 0.3, 0.4)	抗冲刷能力	(0.6, 0.7, 0.8)
		景观特性	(0.2, 0.3, 0.4)
培育特性	(0.2, 0.3, 0.4)	培育成本	(0.3, 0.4, 0.5)
		粗放管理	(0.5, 0.6, 0.7)
生长特性	(0.0, 0.1, 0.2)	地上生物量	(0.1, 0.2, 0.3)
		地下生物量	(0.2, 0.3, 0.4)
		叶长	(0.2, 0.3, 0.4)
		主根长	(0, 0.1, 0.2)
		生长情况	(0.0, 0.1, 0.2)

### 2.3 属性模糊集的构造

本文采用德尔菲专家咨询法<sup>[16]</sup>,构造备择集,即评价集。评价集是对因素可能作出的各种总的评判结果所组成的集合,且无论因素分为多少类,评价集都只有一个。依据耐旱性、耐瘠性、耐寒性、耐热性、抗冲刷、景观特性、培育成本、管理难易、地上生物量、地下生物量、主叶长、主根长、生长特性 13 个指标,建立高速公路边坡生态防护植物种类评价的综合指标体系,为克服不同因素量纲不同,难比较的困难,根据依托工程沿线的自然条件和实际情况,将所有指标因子的得分均按所属程度的强、中、弱或能力的大、中、小分别得分为 3, 2, 1, 建立植物种类的评分标准。

本文通过在苗圃样地进行植物适宜性对比试验、低温胁迫试验、水分胁迫试验、抗冲刷试验,得到防护物种属性集构造因素中的耐旱性、耐寒性、耐热性、抗冲刷能力、生长特性等指标的试验原始数据,根据评价体系,将原始数据进行评价并转化成模糊集,构造物种的模糊属性集。对景观特性、培育成本、粗放管理等无法通过试验得到数据的因素,采用专家咨询并

结合文献调研进行模糊属性集构造<sup>[17-19]</sup>。由得到的所有相关数据转化成评价体系,并利用图 2 所示的三角模糊数模型,构建各个因素的模糊属性集。

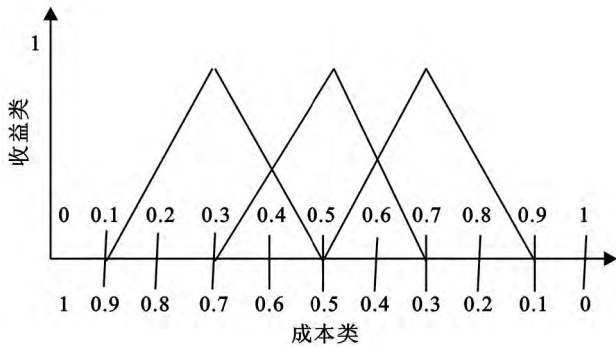


图 2 三角模糊数构造

### 2.4 决策模糊集排序与评价

将构造的待评价植物物种属性模糊集与权重模糊集放入评价模型,计算出决策模糊集,并采用本文建立的综合考虑模糊极大集与极小集的距离测度方法进行排序,最终优选出 3~4 个物种作为实际参考物种。

## 3 工程实例

某高速公路位于粤北红层地区,结合工程地质情况和边坡实际情况,对包括乔木、灌木、草本、藤本在内 46 种植物进行边坡现场试验、样地试验和室内模型试验,包括低温胁迫试验、水分胁迫试验和抗冲刷试验、样地生长性试验,得到耐旱性、耐寒性、耐贫瘠性、耐热性、抗冲刷、生长特性等指标的试验数据。

耐旱性指标采用植物水分胁迫试验即干旱试验获得,该试验是在遮雨条件下进行盆栽干旱试验。场

地设在南雄园林所珠玑苗圃基地,盆栽土壤为红砂岩原土,试验过程阳光照射均匀并设置遮雨设施,试验中定期记录植物植株叶片变化、枯萎和死亡情况。

耐寒性指标采用植物低温胁迫试验获得,该试验是指植物在冬季户外低温胁迫下,植物组织受损伤程度以及恢复情况。本文利用 2008 年冬季极端冰雪灾害天气,在雪灾期间和雪灾前后观察对比,记录植物植株叶片变化、枯萎和死亡情况。试验时间 2008 年 1—6 月。

采用抗冲刷模型试验测试植物在不同降雨强度下的抗冲刷能力,设计坡度为 1 : 1, 1 : 1.15, 1 : 0.75 的 3 种室内模型试验。试验土壤为混合营养土(红砂岩原土、木质纤维、有机肥,体积比 4 : 4 : 2),土层厚度 5 cm,播种后或扦插前用 CF 网覆盖,植物播种或扦插后常规水、肥管理,本文以较常用的 1 : 1 坡度试验数据为基础,换算抗冲刷能力指标,具体试验数据详见参考文献[20]。

耐贫瘠性和植物生长特性指标采用样地试验获得,定期详细记录植物苗高、地径、主根根长、叶长、发芽率、株叶片变化、枯萎和死亡等情况。各种试验类型较多,且每个试验的植物数量过多。本文只列出其中乔木、灌木、草本、藤本在内的 8 种植物用于模糊集构造说明。将试验得到的原始数据按评价指标进行评分,对无法通过试验得到的因素评介则结合调查研究法和专家咨询法得到植物其他因素指标的评价分值,再通过式(4)进行综合评价,得到植物的综合指数,植物评价分数如表 2 所示。根据图 2 的三角模糊数模型,对上述指标评价进行模糊处理,构造不同植物各个因素的模糊属性集。

表 2 植物评价指标

评价指标	乔木			灌木		草本		藤本
	杉木	台湾相思	银合欢	多花木兰	大叶猪屎豆	高羊茅	黑麦草	五爪金龙
耐旱性	1	3	3	3	3	3	3	2
耐瘠性	1	3	3	3	3	2	2	2
耐寒性	2	3	3	3	2	2	2	3
耐热性	1	2	2	2	1	1	1	1
抗冲刷	1	1	2	1	1	1	1	2
景观特性	1	2	3	2	3	2	2	3
培育成本	1	2	2	2	3	3	3	1
粗放管理	2	3	3	3	3	3	1	3
地上生物量	3	2	2	2	3	2	2	2
地下生物量	3	3	3	3	2	2	2	3
叶长	3	3	3	3	3	1	1	2
主根长	3	3	3	3	3	2	2	2
生长情况	2	2	2	2	1	1	1	1

根据图 1 所示的 II 级模糊多属性决策模型,分别构造抗逆性、功能特性、培育特性和生长特性 4 个因素作为 II 级模糊因素,4 个因素具体包含 13 个 I 级模糊因素。采用模糊决策可以得到 I 级模糊因素属

性集(如表 3 所示)。在 I 级模糊多属性集的基础上,按照前文所述方法进行 II 级模糊多属性决策,并对其排序,可得到 II 级模糊属性集决策评价及排序(见表 4)。

表 3 植物物种 I 级模糊因素属性集

分类	植物种	抗逆性	功能特性	培育特性	功能特性	II级模糊决策	II级模糊决策排序
乔木	杉木	(0.08,0.34,0.76)	(0.08,0.3,0.6)	(0.18,0.42,0.74)	(0.25,0.63,1.17)	(0.05,0.37,1.07)	0.22
	台湾相思	(0.28,0.66,1.2)	(0.12,0.36,0.68)	(0.34,0.62,0.98)	(0.25,0.61,1.13)	(0.14,0.55,1.39)	0.61
	银合欢	(0.28,0.66,1.2)	(0.28,0.56,0.92)	(0.34,0.62,0.98)	(0.25,0.61,1.13)	(0.17,0.62,1.49)	0.81
灌木	多花木兰	(0.28,0.66,1.2)	(0.28,0.56,0.92)	(0.34,0.62,0.98)	(0.25,0.61,1.13)	(0.17,0.61,1.48)	0.79
	大叶猪屎豆	(0.24,0.58,1.08)	(0.32,0.58,0.92)	(0.4,0.7,1.08)	(0.21,0.57,1.09)	(0.17,0.6,1.45)	0.75
草本	高羊茅	(0.18,0.5,0.98)	(0.4,0.7,1.08)	(0.4,0.7,1.08)	(0.13,0.41,0.85)	(0.17,0.59,1.41)	0.70
	黑麦草	(0.18,0.5,0.98)	(0.28,0.56,0.92)	(0.34,0.62,0.98)	(0.13,0.43,0.89)	(0.14,0.53,1.33)	0.55
藤本	五爪金龙	(0.18,0.5,0.98)	(0.16,0.42,0.76)	(0.28,0.54,0.88)	(0.19,0.51,0.99)	(0.11,0.48,1.25)	0.36

表 4 植物物种 II 级模糊多属性决策评价集与排序值

评价指标	乔木			灌木		草本		藤本
	杉木	台湾相思	银合欢	多花木兰	大叶猪屎豆	高羊茅	黑麦草	五爪金龙
耐旱性	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)
耐瘠性	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)
耐寒性	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
耐热性	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)
抗冲刷能力	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)
景观特性	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
培育成本	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)
粗放管理	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
主叶长	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)
主根长	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)
地下生物量	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
地上生物量	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)
生长情况	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)

根据表 4 得到的高速公路生态边坡防护物种模糊评价的决策模糊集与排序指标,优选植物主要有银合欢、多花木兰、大叶猪屎豆和高羊茅等物种。依托工程采用这几种植种混播形式,结合椰纤维网进行高速公路边坡生态防护设计。该工程已经通车 2 a,工程后评价调研显示,该高速公路边坡植物生长良好,植物群落多样性好,未出现明显物种退化现象,边坡未出现明显冲刷,整个边坡生态防护效果高速公路边坡生态防护物种选择与评价是一项系统工程,影响因素众多。由于研究对象或略有差异、研究视角或不同,不同专家建立的模型可能略有差异;而模型中部分单因素的属性本身难以精确数量描述,只能采用模糊语言描述,这也是本文引入模糊多属性决策的依据之一,本文旨在抛砖引玉,从决策科学角度提出问题

解决的思路与方法,以期同行专家批评指正。另外本文研究中主要针对单物种选择,多物种组配的相关问题还须进一步深入探讨。

## 4 结论

(1) 建立高速公路边坡生态防护物种评价的模糊多层次多属性决策模型。在此基础上,解决了该决策模型中各因素属性模糊集构造、权重集构造、决策过程的模糊集运算以及模糊集排序等难题,建立了系统的高速公路边坡生态防护物种评价的模糊多层次多属性决策方法。

(2) 结合粤北高速公路边坡工程实际,对初步筛选的 46 种边坡生态防护物种进行了模糊多属性决策评价。评价结果表明对于该实际工程,银合欢、多花

木兰、大叶猪屎豆、高羊茅等物种在粤北地区具有明显优势。

(3) 本文所用研究方法与研究成果在粤北某高速公路边坡生态防护设计中得到了成功应用,固坡效果良好,生态防护作用突出,为中国其他地区的各类边坡生态防护技术,特别是防护物种选择与评价提供了新的思路与方法。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 卓慕宁,李定强,郑煜基. 高速公路生态护坡技术的水土保持效应研究[J]. 水土保持学报,2006,20(1):164-167.
- [2] 叶建军. 边坡生态防护工程中的若干问题探讨[J]. 水土保持研究,2007,14(5):333-335.
- [3] Turzin P S. Methodological approaches to a problem concerning specification and improvement of means protecting against ecological hazards[M]// Gendenko B, Ushakov I A. Probabilistic Reliability Engineering. Wiley-Interscience. 1998:13-16.
- [4] 谭少华,汪益敏. 高速公路边坡生态防护技术研究进展与思考[J]. 水土保持研究,2004,11(3):81-84.
- [5] 顾小华,丁国栋,刘胜,等. 一种新型的高速公路边坡生态防护技术[J]. 水土保持研究,2006,13(1):106-107.
- [6] 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.
- [7] 张俊云,周德培,李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究[J]. 水土保持通报,2001,21(4):44-46.
- [8] 许文年,叶建军,周明涛,等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术,2004,35(10):50-52.
- [9] 周颖,曹映泓,廖晓瑾,等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[J]. 岩土力学,2001,22(3):353-356.
- [10] Bellman R E, Zadeh L A. Decision-making in a fuzzy environment[J]. Management Science, 1970, 17(4): 141-164.
- [11] Ribeiro R A. Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques[J] Fuzzy Sets and Systems, 1996,78(2):155-181.
- [12] 程晔,赵明华,曹文贵. 路基下岩溶稳定性评价的模糊多层次多属性决策方法研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1914-1918.
- [13] 陈红,魏风虎. 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):92-95.
- [14] 张敏,陈红,蒋鹏. 高速公路建设区域生态功能区划方法[J]. 公路交通科技,2010,27(4):137-143.
- [15] 徐宪立,耿红,张科利,等. 西部地区高速公路发展规划生态环境影响评价:指标体系构建及评价方法探讨[J]. 公路交通科技,2006,23(7):154-157.
- [16] 李斌. 层次分析法和特尔菲法的赋权精度与定权[J]. 系统工程理论与实践,1998(12):75-80.
- [17] 武文婷,田密密,赵衡宇,等. 植物景观评价技术创新的障碍与对策研究[J]. 浙江工业大学学报,2011,39(5):586-590.
- [18] 徐锦海. 肇庆市区道路绿化带植物景观评价研究[J]. 生态科学,2007,26(6):513-518.
- [19] 汪益敏,王秉纲. 公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J]. 中国公路学报,2005,18(1):28-33.
- [20] 程晔,方靓,赵俊锋,等. 高速公路边坡 CF 网防护抗冲刷室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2935-2942.

(上接第 180 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郜永贵,林庆功. 高立式移动沙障应用技术试验研究[J]. 中国沙漠,2005,25(5):790-794.
- [2] 王礼先,朱金兆. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,1995:360-368.
- [3] 马玉明. 内蒙古资源大辞典[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1997.
- [4] 赵国平,左合君,徐连秀,等. 沙柳沙障防风阻沙效益的研究[J]. 水土保持学报,2008,22(2):39-43.
- [5] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京:中国林业出版社,2000:144-148.
- [6] 高永,邱国玉,丁国栋,等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠,2004,24(3):365-370.
- [7] 屈建军,凌裕泉,俎瑞平,等. 半隐蔽式格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. 中国沙漠,2005(3):329-335.
- [8] 凌裕泉,屈建军,樊锦诗,等. 莫高窟崖顶防沙工程的效益分析[J]. 中国沙漠,1996,16(1):13-18.
- [9] 曹子龙,赵廷宁,郑翠玲,等. 带状高立式沙障防治草地沙化机理的研究[J]. 水土保持通报,2005,25(4):15-19.
- [10] 马世威,马玉明,王林和,等. 沙漠学[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1998:22-23.