

# 基于模糊层次—主成分分析法的城市河道生态护坡综合评价

柴纯纯<sup>1</sup>, 徐得潜<sup>1</sup>, 张浏<sup>2</sup>, 袁步先<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省环境科学研究院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** [目的] 探讨城市河道生态护坡综合评价方法, 为城市河道建设提供理论依据。[方法] 从护坡安全性、生态环境性、景观适宜性和社会经济效益 4 个方面构建城市河道生态护坡综合评价指标体系, 采用模糊层次—主成分分析综合评价方法。[结果] 合肥市四里河、南淝河和十五里河 3 种生态护坡综合评价结果分别为: 多孔生态砖护坡 1.57, 生态混凝土护坡 -2.39, 生态砌块直立挡墙为 0.82, 多孔生态砖护坡评价结果较好。影响生态护坡综合评价的主要因素有结构稳定性、生物多样性、水环境修复、亲水性和公众认可度; 评价结果与模糊层次分析法及主成分分析法评价结果一致。[结论] 模糊层次—主成分分析法具有较好的适用性和合理性, 易于确定影响生态护坡的主要因素, 可作为城市河道生态护坡综合评价方法。

**关键词:** 生态护坡; 评价指标体系; 模糊层次—主成分分析法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)05-0167-05

中图分类号: TV861

**文献参数:** 柴纯纯, 徐得潜, 张浏, 等. 基于模糊层次—主成分分析法的城市河道生态护坡综合评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 167-171. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.034

## Comprehensive Assessment on Ecological Revetment of Urban River Course Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Principal Component Analysis

CHAI Chunchun<sup>1</sup>, XU Deqian<sup>1</sup>, ZHANG Liu<sup>2</sup>, YUAN Buxian<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology,

Hefei, Anhui 230009, China; 2. Anhui Provincial Academy of Environmental Science, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to comprehensively assess the ecological revetment of urban river course in order to provide the theoretical basis for urban river construction. [Methods] Considering revetment safety, ecological environment, landscape suitability and socioeconomic benefits, we established an index system of comprehensive assessment on the ecological revetment of urban river course by using fuzzy analytic hierarchy process-principal component analysis(FAHP-PCA). [Results] The ecological brick slope was the optimal measure in Hefei City as it showed the highest assessment value of 1.57, which was higher than that of ecological concrete slope(-2.39) or erect retaining wall(0.82). The main factors that influenced the quality of ecological revetment included structural stability, biodiversity, water environmental remediation, hydrophilicity and public recognition. The result was consistent with the assessment result from FAHP and PCA. [Conclusion] Based on the excellent applicability and rationality, it is convenient to determine the main factors that affecting ecological revetment, therefore, FAHP-PCA can be used in the comprehensive assessment on ecological revetment of urban river course.

**Keywords:** ecological revetment; index system of assessment; fuzzy analytic hierarchy process-principal component analysis

收稿日期: 2015-09-13

修回日期: 2015-11-27

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“湿地型河道生态护坡中试方案设计及产品建造”(2012ZX07103-004)

第一作者: 柴纯纯(1992—), 女(汉族), 山东省巨野县人, 硕士研究生, 主要从事城市给水排水工程与技术研究。E-mail: 13637082796@163.com。

通讯作者: 徐得潜(1960—), 男(汉族), 安徽省青阳县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水资源利用与水环境保护, 给水排水工程优化规划与经济运行, 水利水电工程优化规划与经济运行研究。E-mail: 13505512990@163.com。

城市河道是城市中最重要绿色廊道,承载着防洪、排涝、供水、水土保持、生物栖息、景观娱乐等作用。城市河道建设不仅要使岸堤、护坡发挥出水利工程功效,而且还要融入城市景观、城市文化和城市生态等诸多内容,从而实现人与自然的协调发展。近年来,生态护坡技术与生态功能研究成为当前社会研究的热点,主要集中于生态护坡的概念、类型及材料、功能及成本的定性描述,对城市河道生态护坡综合评价的研究尚不多见,缺乏对已建生态护坡工程进行跟踪评价,对其演变过程和生态功能认识不足<sup>[1-8]</sup>。

陈凯等<sup>[1]</sup>运用模糊层次分析法对合肥市四里河典型生态护坡工程进行了评价分析,虽然给出了影响生态护坡质量的主要因素,但并没有考虑到个别指标间的相互关系对评价结果的影响。刘萌<sup>[2]</sup>运用层次分析法从经济性、生态性、景观性和安全性 4 个方面对护坡方案进行优化分析,主要侧重于定性的描述,未给出具体指标的等级标准,存在较强的主观性。王梅婷等<sup>[5]</sup>从生态护坡类型及材料、稳定性、功能和社会效益等 4 个方面建立了评价指标体系,运用层次分析法进行了实例分析,但有些Ⅲ级评价指标的选择不尽合理,如亲水性和公众互动性重合。汪洋<sup>[6]</sup>将层次分析法与综合评价指数法、灰色关联度法结合,对城镇河流 3 种护坡型式的生态系统进行了全面的综合评价,文中仅给出了评价结果,没有分析影响生态护坡综合评价结果的主要因素。吕晶等<sup>[7]</sup>采用综合评价方法,从护坡的工程效果、生态效果和社会经济效益 3 个方面,对京郊河溪生态护坡进行了全面、客观的综合评价,但选取的评价指标过于繁琐,不方便进行量化处理。许士国等<sup>[8]</sup>以平原河道生态护坡为研究对象,从成本、生态景观及施工工艺 3 个方面构建生态健康评价体系应用于沈阳市浑河生态护坡工程方案的优化筛选,其指标体系不够全面,忽略了生态护坡稳定性这一基本功能。目前,研究建立一套科学合理、应用性强的城市河道生态护坡评价指标体系及评价方法,对城市河道综合治理与生态护坡建设具有重要意义。本文拟采用模糊层次—主成分分析法,将模糊层次分析法的主观分析与主成分分析的客观分析相结合对生态护坡进行综合评价,既可以考虑到评价指标间的相互关系又可以避免权重的均一性而导致评价的非公正性,以期使评价结果更符合现实意义,易于被人们理解和接受。

## 1 评价内容与评价指标体系

生态护坡是指在边坡形态稳定的基础上生态系统能够自我运行并能可持续发展的统一体<sup>[7]</sup>,对其进

行综合评价的内容应包括以下 5 个方面:① 基本水利功能评价,通过防洪、排涝、供水、通航等指标描述;② 护坡安全性评价,包括结构稳定性、抗冲刷能力、对防洪排涝影响等评价指标;③ 生态环境性评价,通过系统群落结构、物种多样性、涵养地下水和水环境修复等指标表达;④ 景观适宜性评价,有亲水性、整体协调性、自然性等指标;⑤ 社会经济效益评价,包括工程年费用、管理维护、社会公众认可度等指标。

考虑到基本水利功能是各种生态护坡必须满足的前提,本文从护坡安全性、生态环境性、景观适宜性和社会经济效益等 4 个方面对生态护坡进行综合性评价。

生态护坡评价指标体系构建应满足科学性原则、系统性原则、层次性原则、定量与定性相结合原则、独立性原则、可操作性原则和可预测性原则<sup>[5]</sup>。遵循以上原则,构建城市河道生态护坡综合评价指标体系及量化方法(见表 1)。表 1 中的定量指标根据相关公式计算的指标值,并设分值与指标值呈线性关系确定其分值。定性指标采用德尔菲法确定打分值。德尔菲法作为一种主观、定性的方法,可以广泛应用于各种评价指标体系的建立和具体指标的确定过程<sup>[9]</sup>。具体步骤如下<sup>[10]</sup>:选定一组该领域的专家,利用专家的经验 and 直觉对指标进行打分;预测基于专家答卷的统计分布特征,将统计结果反馈给专家,影响部分专家修正他们偏离平均值较大的估计值,并进行下一轮打分;反复进行几轮,直到收敛性较好时为止;然后求平均值,确定最终的打分值。

## 2 评价方法

目前生态护坡评价方法主要有模糊综合评价法、层次分析法、主成分分析法以及灰色关联度法等。其中,模糊综合评价法应用模糊关系合成原理,从多个因素对被评价对象隶属度等级进行综合评价<sup>[10]</sup>。层次分析法将定性分析与定量分析相结合,进行多因素系统分析和评价。模糊层次分析法集成了两者的优点,但难以考虑指标间的相互关系,也不易指出影响评价结果的主要指标。主成分分析法<sup>[11]</sup>利用多元统计方法,依赖于评价指标的实际数据,将多维数据进行降维处理,可以指出影响评价结果的主要因素。但主成分分析法是通过特征向量法来确定各指标的权重,且对所有的评价对象采用相同的权重分配,其权重较难确定且常带有主观性。本文联合运用模糊层次分析法的主观分析与主成分分析法的客观分析对生态护坡进行综合评价,以考虑评价指标间的相互关系,避免权重的均一性而导致评价的非公正性。具体评价步骤如下<sup>[11-12]</sup>。

表 1 生态护坡综合评价指标体系与量化方法

I 级指标	II 级指标	指标量化方法	等级标准(分值)			
			优秀 (90~100)	良好 (70~89)	一般 (50~69)	差 (0~49)
护坡安全性 $B_1$	结构稳定性 $C_{11}$	稳定安全系数 $F_s$	$F_s \geq 1.2$	$1.1 \leq F_s < 1.2$	$1.0 \leq F_s < 1.1$	$F_s < 1.0$
	抗冲刷能力 $C_{12}$	抗冲刷程度	强	较强	一般	较差
	对防洪排涝影响 $C_{13}$	影响程度	小	较小	一般	较大
生态环境性 $B_2$	群落结构 $C_{21}$	配置是否合理	合理	较合理	一般	不合理
	物种多样性 $C_{22}$	多样性指数 $H$	$H > 1.2$	$0.8 < H \leq 1.2$	$0.4 < H \leq 0.8$	$H \leq 0.4$
	涵养地下水 $C_{23}$	透水性	好	较好	一般	差
	水环境修复 $C_{24}$	修复效果是否明显	明显	较明显	一般	不明显
景观适宜性 $B_3$	亲水性 $C_{31}$	靠近水面程度	亲水性高	亲水性较高	亲水性一般	亲水性较差
	整体协调性 $C_{32}$	是否协调合理	协调	较协调	基本协调	不协调
	自然性 $C_{33}$	植被覆盖度 $P$	$P > 0.7$	$0.5 < P \leq 0.7$	$0.2 < P \leq 0.5$	$P \leq 0.2$
社会经济效益 $B_4$	工程年费用 $C_{41}$	是否经济	经济	较经济	适中	不经济
	维护管理 $C_{42}$	是否方便	方便	较方便	一般	不方便
	公众认可度 $C_{43}$	公众满意程度 $S$	$S \leq 0.85$	$0.6 \leq S < 0.85$	$0.4 \leq S < 0.6$	$S < 0.4$

(1) 运用模糊层次分析法确定各指标主观权重。首先采用 Z-Score 法对数据进行标准化处理。建立模糊层次分析法的赋权模型,逐步为评价指标体系各层指标赋予主观权重。选用模糊层次分析法中的 0.1~0.9 标度法,并设定 0.2,0.4,0.6,0.8 为 0.1~0.9 标度中间状态对应的标度值。通过数学转换,可以把模糊互补判断矩阵转化为模糊一致矩阵,使一致性问题得到初步解决<sup>[13]</sup>。

(2) 运用主成分分析法进行综合评价。① 建立主成分分析的样本数据并计算相关矩阵  $R$  及特征值  $\lambda$ 。② 根据协方差矩阵解特征方程  $|R - \lambda I| = 0$  得到  $p$  个非负特征值,设其特定值从大到小排列为: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ 。③ 计算累积方差贡献率并提取主成分。前  $i$  个成分累积方差贡献率为  $\lambda_1 / \sum_{j=1}^p \lambda_j$ 。当累积贡献率  $\geq 85\%$  时,选前  $i$  个成分。运用对应于特征值  $\lambda_1$  的特征向量计算出载荷  $e_{ij}$  并提取主成分。

(3) 计算综合评价分值。将主成分荷载矩阵中的数据除以主成分相对应的特征值开平方根便得到每个主成分各自指标所对应的系数,即求出特征向量,再将求出的特征向量与标准化后的数据相乘,可得到主成分表达式。以每个主成分所对应的的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重建立主成分综合模型,以计算综合评价分值。

综合评价分值的计算公式如下:

$$F_i = \sum_{j=1}^n l_{ij} ZX_j \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

式中:  $m$  ——提取的主成分个数;  $n$  ——评价指标的个数;  $l_{ij}$  ——第  $i$  个主成分每个指标的所对应的特

征向量,  $l_{ij} = \sqrt{\lambda_i} e_{ij}$ , 其中  $\lambda_i$  为第  $i$  个主成分的特征值;  $e_{ij}$  ——载荷;  $ZX_j$  ——样本标准化后的数据。下同。

### 3 应用实例

#### 3.1 合肥市城市河道生态护坡基本概况

以合肥市南淝河、四里河以及十五里河为例,运用模糊层次—主成分分析法对 3 种典型生态护坡进行综合性评价。南淝河中游护坡于 2008 年进行改造且建成透气、保水和固土的生态混凝土护坡,河道生态系统恢复良好,实现了生态平衡和景观美化<sup>[14]</sup>。生态混凝土护坡将植被、混凝土、坡面融为一体,增加了护坡的抗冲刷能力和稳定性,但其施工工艺较复杂,造价为 210 元/m<sup>2</sup>。四里河是南淝河的重要支流,河道护坡水下部分采用多孔生态砖挡墙,水上部分为植物护坡,南淝河入口处则为硬化护岸(石块+水泥勾缝),而其它河段护坡生态砖空隙中植被及水生植物生长良好。多孔生态砖护坡具有多孔透水性,适合植物生长发育,根系通过砖块空隙扎根到土体中,能够提高土体整体稳定性,且具有较好的景观性,其造价为 150 元/m<sup>2</sup>。

十五里河河道全长 27.2 km,部分河段已进行改造成为生态砌块直立挡墙加植物护坡,部分河段为硬化护岸,其他河段护坡均为自然护坡。生态砌块直立挡墙中所有砌块连接成一个整体,增加了挡墙的稳定性和抗冲刷能力,砌块孔洞中生长的植物能够吸收河水中的氮磷等营养物质,有利于河流水质的改善,其造价为 170 元/m<sup>2</sup>。

### 3.2 河道生态护坡稳定性评价

针对四里河多孔生态砖挡墙、南淝河生态混凝土护坡和十五里河生态砌块直立挡墙 3 种生态护坡,运用模糊层次—主成分分析法进行生态护坡综合评价。

(1) 运用模糊层次分析法确定各指标主观权重。

通过相关公式计算和德尔菲专家调查法分别确定定量指标和定性分值,以获取评价数据。根据评价数据与标准值,应用模糊计算模型计算各指标隶属于不同等级的隶属度值,确定模糊关系矩阵,求出各指标综合权重。将打分值与权重进行复合计算,求出各指标的评价值,结果见表 2。

表 2 综合权重及加权后样本数据(评价值)

I 级指标	综合权重	四里河		南淝河		十五里河	
		打分值	加权后得分	打分值	加权后得分	打分值	加权后得分
B <sub>1</sub> (0.227 4)	C <sub>11</sub> (0.101 3)	84	8.509 2	72	7.293 6	82	8.306 6
	C <sub>12</sub> (0.066 1)	87	5.750 7	79	5.221 9	89	5.882 9
	C <sub>13</sub> (0.060 1)	86	5.168 6	89	5.348 9	85	5.108 5
	小计		19.428 5		17.864 4		19.298 0
B <sub>2</sub> (0.507 6)	C <sub>21</sub> (0.044 2)	77	3.403 4	84	3.712 8	71	3.138 2
	C <sub>22</sub> (0.150 5)	85	12.792 5	63	9.481 5	81	12.190 5
	C <sub>23</sub> (0.102 2)	78	7.971 6	70	7.154 0	87	8.891 4
	C <sub>24</sub> (0.210 7)	66	13.906 2	64	13.484 8	72	15.170 4
	小计		38.073 7		33.833 1		39.390 5
B <sub>3</sub> (0.142 9)	C <sub>31</sub> (0.070 5)	66	4.653 0	50	3.525 0	61	4.300 5
	C <sub>32</sub> (0.027 9)	75	2.092 5	68	1.897 2	76	2.120 4
	C <sub>33</sub> (0.044 4)	88	3.907 2	92	4.173 6	71	3.152 4
	小计		10.652 7		9.507 0		9.573 3
B <sub>4</sub> (0.122 1)	C <sub>41</sub> (0.072 5)	85	6.162 5	74	5.365 0	82	5.945 0
	C <sub>42</sub> (0.030 4)	76	2.310 4	78	2.371 2	73	2.219 2
	C <sub>43</sub> (0.019 2)	89	1.708 8	73	1.401 6	88	1.689 6
	小计		10.181 7		9.137 8		9.853 8
总分		78.336 6		70.342 3		78.115 6	

从表 2 中 3 种护坡形式的 I 级指标 4 个层次的得分小计可以看出,多孔生态砖挡墙表现出了较好的安全性、生态环境性以及景观性,且建造成本和维护成本相对较低。生态混凝土护坡由于生产工艺不太完善,护坡成本比较高。生态砌块直立挡墙的生态环境性优

于其他 2 种护坡,但其安全性和景观美感受有待提高。

(2) 运用主成分分析法提取主成分。以表 2 数据为基础,采用 SPSS 19.0 软件对加权后的样本数据标准化,并计算特征值的累积方差贡献率,得出主成分提取分析表(见表 3)。

表 3 方差分解主成分提取分析

成分	初始特征值			提取平方和载入			成分	初始特征值		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%		合计	方差的%	累积%
1	8.677	66.746	66.746	8.677	66.746	66.746	8	4.377E-17	3.367E-16	100
2	4.323	33.254	100	4.323	33.254	100	9	-4.413E-17	-3.394E-16	100
3	6.427E-16	4.944E-15	100	—	—	—	10	-1.251E-16	-9.621E-16	100
4	3.270E-16	2.516E-15	100	—	—	—	11	-2.253E-16	-1.733E-15	100
5	2.163E-16	1.664E-15	100	—	—	—	12	-3.551E-16	-2.731E-15	100
6	1.949E-16	1.499E-15	100	—	—	—	13	-6.787E-16	-5.221E-15	100
7	1.129E-16	8.686E-16	100	—	—	—	—	—	—	—

注:成分 8—13 的平方和载入项同 3—7,为节省篇幅,在此省略。

第1项特征值为8.677,方差贡献率为66.746%。第2项特征值为4.323,方差贡献率为33.254%,前2项特征值的累计方差贡献率大于85%。因此,选用第1主成分和第2主成分作为评价的综合指标。提取前2个主成分,其荷载矩阵见表4。

表4 主成分初始因子荷载矩阵

综合指标	成分		综合指标	成分	
	1	2		1	2
结构稳定性	0.933	0.360	亲水性	0.941	0.338
抗冲刷能力	0.830	0.458	整体协调性	0.866	0.499
防洪排涝影响	-0.687	0.661	自然性	0.504	-0.665
群落结构	0.836	0.548	建造成本	-0.895	0.397
生物多样性	0.965	0.264	维护成本	-0.627	0.575
涵养地下水	0.711	-0.513	公众认可度	0.995	0.097
水环境修复	0.927	-0.375	—	—	—

从初始因子荷载矩阵中可以看出,第1主成分中结构稳定性、生物多样性、水环境修复、亲水性和公众认可度占有较高的荷载。由此可见,影响生态护坡综合评价的主要因素有结构稳定性、生物多样性、水环境修复、亲水性和公众认可度。

(3) 计算综合评价分值。写出2个主成分的表达式。根据2个主成分所对应的的特征值占的比例建立主成分综合模型,即  $F = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) F_1 + \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) F_2 = 0.66746 F_1 + 0.33254 F_2$ 。代入数据计算可得3种生态护坡综合评价值,对其进行排序(见表5)。

表5 三种河道生态护坡综合评价值

护坡形式	F值	排序
多孔生态砖挡墙	1.57	1
生态混凝土护坡	-2.39	3
生态砌块直立挡墙	0.82	2

由表5可知,四里河多孔生态砖挡墙综合评价结果最好,十五里河生态砌块直立挡墙次之,南淝河生态混凝土护坡相对较差。评价结果充分说明多孔生态砖挡墙不仅具有传统河道护坡的行洪、排涝以及减少水土流失等功能,而且能融入城镇景观、城镇文化和城镇生态等诸多方面,可以实现人与自然的和谐相处,取得较为显著的社会经济效益和生态效益。

为了验证上述方法的适用性,分别与模糊层次分析法和主成分分析法进行比较。按照表1评价指标体系,采用模糊层次分析法对以上3种生态护坡进行综合评价,评价得分为:四里河多孔生态砖挡墙为78.34,南淝河生态混凝土护坡为70.34,十五里河生态砌块直立挡墙为78.12,四里河生态护坡综合评价

结果较好。与模糊层次—主成分分析法评价结果一致。采用主成分分析法对生态护坡进行综合评价,评价得分为:四里河多孔生态砖挡墙为1.28,南淝河生态混凝土护坡为-2.29,十五里河生态砌块直立挡墙为1.01,评价结果排序与本文所述方法评价结果一致。

## 4 讨论与结论

(1) 在实际评价中,应结合城市生态护坡主要功能、河道类型、地理位置与周边环境、水文水质、土壤等具体情况,合理构建评价指标体系。由于主成分分析法和模糊层次分析法在对指标数量要求方面存在差异:前者要求评价指标达到一定数量,后者在指标数量过多时不易进行赋权,因此对指标的选取要尤为慎重,以免对后续评价带来不利影响。

(2) 根据各种指标的特性,选择合适的量化方法计算指标权重。模糊层次—主成分分析城市河道生态护坡综合评价法在建立评价数据时,首先利用模糊层次分析法,根据各评价指标的重要程度,分别赋予相应的权重,在此基础上进行主成分分析,从而克服了主成分分析法对评价指标采取相同的权重这一缺陷。

(3) 考虑到每种生态护坡评价方法都有各自特点,可采用多种方法进行评价并作比较分析,使评价结果更为合理。

基于模糊层次—主成分分析法的城市河道生态护坡综合评价法将模糊层次分析法的主观分析与主成分分析法的客观分析相结合<sup>[15]</sup>,克服了模糊层次法和主成分分析法存在的问题,既考虑到指标间的相互关系及差异性,又可以避免权重的均一性而导致的评价非公正性,使评价结果更符合实际。同时,还能对多指标进行降维处理,降低了评价复杂性,削弱了指标间的多重相关性,易于发现影响生态护坡的关键指标,其评价结果可用于改善和提高城市河道生态护坡建设水平。

### [参 考 文 献]

- [1] 陈凯,徐得潜,王梅婷.城市河道生态护坡模糊层次综合评价研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2011(6):877-881
- [2] 刘萌.城镇河道生态护坡材料筛选及其生态健康评价研究[D].济南:山东师范大学,2013.
- [3] 汪洋,周明耀,赵瑞龙,等.城镇河道生态护坡技术的研究现状与展望[J].中国水土保持科学,2005,3(1):88-92.

(下转第177页)

由于研究受到流域气象、土壤等数据时空精度的限制,导致研究存在一定的局限性,在将来的研究中仍需进一步改进与探讨。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王刚,贾冰.石羊河流域气候变化历史及其对水文水资源的影响[J].甘肃水利水电技术,2008(3):172-173.
- [2] 周俊菊,石培基,师玮.1960—2009年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征[J].自然资源学报,2012,27(1):143-153.
- [3] 范泽华,戚蓝,黄津辉.气候变化对石羊河流域水资源影响分析[J].水利水电技术,2012,43(1):7-11.
- [4] 王文行,段争虎,王建伟.气候变化对祁连山石羊河出山口径流的影响研究[J].冰川冻土,2012,34(2):469-477.
- [5] 李洋,魏晓妹,孙艳伟.石羊河流域水文要素变化特征分析[J].水文,2007,27(3):85-88.
- [6] 丁贞玉,马金珠,张宝军,等.近50a来石羊河流域气候变化趋势分析[J].干旱区研究,2007,24(6):6779-6784.
- [7] 王兴梅,张勃,张凯,等.石羊河流域极端干旱事件的时空变化特征[J].地理科学进展,2011,30(3):299-305.
- [8] 王贵忠.近50a来石羊河流域出山径流变化趋势分析[J].人民黄河,2010,32(8):45-46.
- [9] 张若琳.石羊河流域水资源分布特征及其转化规律[D].北京:中国地质大学,2006.
- [10] 王书功,康尔泗,李新.分布式水文模型的进展及展望[J].冰川冻土,2004,26(1):61-62.
- [11] 朱发昇.石羊河流域水资源开发与生态环境综合治理探讨[J].水资源与水工程学报,2004,15(3):45-48.
- [12] 刘明春,李玲萍,史志娟,等.石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应:以西营河为例[J].干旱地区农业研究,2013(1):193-198.
- [13] 费生云.石羊河流域综合治理战略性措施与对策研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [14] 袁军营,苏保林,李卉,等.基于SWAT模型的柴河水库流域径流模拟研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):361-365.
- [15] 孙瑞,张雪芹.基于SWAT模型的流域径流模拟研究进展[J].水文,2010,30(3):28-32.
- [16] Abbaspour K C. SWAT-CUP4: A User Manual[S]. Dübendorf: Eawag, 2011.
- [17] Abbaspour K C, Johnson A M, Van Genuchten T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone Journal, 2004,3(1):1340-1352.

(上接第171页)

- [4] Li Minghan, Eddleman K E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2002,60(4):225-242.
- [5] 王梅婷,徐得潜,陈凯.城市河道生态护坡综合评价指标体系研究[J].水土保持通报,2011,31(1):198-202.
- [6] 汪洋.城镇河流生态护坡系统的建立及评价研究[D].江苏扬州:扬州大学,2005.
- [7] 吕晶,高甲荣,张金瑞,等.京郊河溪生态护坡系统评价研究[J].安徽农业科学,2010,38(3):1623-1626.
- [8] 许士国,石瑞花,黄保国,等.平原河道生态护坡工程评价和方案决策方法[J].水利学报,2008,39(3):325-331.
- [9] 刘学毅.德尔菲法在交叉学科研究评价中的运用[J].西南交通大学学报:社会科学版,2007,8(2):21-25.
- [10] 徐联舫.用德尔菲专家调查法对超导量子干涉仪的技术预测[J].科学学研究,1989,7(1):68-86.
- [11] 梁保松,曹殿立.模糊数学及其应用[M].北京:科学出版社,2007:105-120.
- [12] 张鹏.基于主成分分析的综合评价研究[D].南京:南京理工大学,2004.
- [13] 徐泽水.模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J].系统工程学报,2001,16(4):311-315.
- [14] 束波峰.生态混凝土护坡在河堤加固中的应用[J].水利水电技术,2009,40(12):12-13.
- [15] 万阳.基于模糊层次—主成分分析法的供应链质量综合评价[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.