

# 基于四元联系数原理的北京市郊安达木河生态评价

刘朋钢<sup>1</sup>, 杨海龙<sup>1</sup>, 高甲荣<sup>1</sup>, 冯泽深<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京木联能软件技术有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 以北京市郊安达木河为研究对象, 通过调查河流的生态特征、水文特征、地貌特征以及景观娱乐功能, 在综合指数分析法的基础上, 将集对分析的确定与不确定系统引入综合评价中, 从相同、偏同差异、偏反差异、相异 4 个方面进行了分析, 同时采用时间尺度和空间尺度相结合并着重从时间尺度上对评价结果进行分析。结果表明, 近年来, 安达木河局部河段生态环境遭到破坏, 加强河流生态环境的治理, 寻找农村垃圾合理有效的处理方式, 减少不必要的人类活动对河流生态的影响, 以及在发展旅游业和河流生态整治方面寻找平衡点, 将成为下一步河流生态整治的重点内容。

**关键词:** 四元联系数; 生态评价; 时间尺度

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)04-0242-04

中图分类号: X826, Q148

## Ecological Rank Evaluation of Andamu River in Suburban Beijing City Based on Principle of Four-element Connection Number

LIU Peng-gang<sup>1</sup>, YANG Hai-long<sup>1</sup>, GAO Jia-rong<sup>1</sup>, FENG Ze-shen<sup>2</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Millennium Engineering Software Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** With Andamu River of suburban Beijing City as the research object, representative indices including river ecological features, hydrological characteristics, morphological features and landscape entertainment functions were selected in this study. Based on the comprehensive index analysis method with incorporation of certainty and uncertainty of pair analysis, the ecological environment of the river was evaluated and classified into four categories: same, partially different, largely different and totally different. At the same time, the evaluation results were analyzed by adopting spatiotemporal analysis. The results show that the local ecological environment of the Andamu River was almost completely destructed in recent years. Urgent measures such as strengthening river management, treating rural wastes reasonably and effectively, reducing unnecessary human activities and balancing tourism development and ecological management should be employed the key contents of river ecological regulation in the next step.

**Keywords:** four-element connection number; ecological evaluation; time scale

近年来, 针对河流生态修复的研究越来越多, 进行河流生态修复首先应该明确河流所处生态等级<sup>[1-2]</sup>。国外针对河流的生态评价起源于 20 世纪 80 年代, 现已具备丰富的理论和实践基础; 国内针对河流生态评价的研究起步较晚, 目前针对大江大河的评估模型体系已经形成<sup>[2]</sup>。针对京郊河流生态评价的研究较少, 河流生态评价具有因地制宜性, 将已成型的河流评价模型用于京郊河流生态评价将影响到评价结果的准确性。采用的评价方法主要是综合指数法<sup>[3-4]</sup>, 综合指数法是通过观测点的一系列生物特

征指标与指标的标准值进行比较并计分, 累加得分进行生态评价。本研究在综合指数分析法的基础上, 将集对分析(set pair analysis, SPA)的确定与不确定系统引入综合评价中, 从相同、偏同差异、偏反差异、相异共 4 个方面进行分析, 从而更加准确地评价河段所处的生态等级。

## 1 研究区概况

安达木河位于北京市密云东北部, 发源于河北省滦平县涝洼村和承德乱石洞子, 经黑关进入密云境

收稿日期: 2011-12-10

修回日期: 2012-02-07

资助项目: 国际科技合作项目“土壤生物工程在北京市怀柔区河道生态治理中的应用”(2009DFA32490)

作者简介: 刘朋钢(1987—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: liupenggang111@163.com。

通信作者: 杨海龙(1965—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 副教授, 主要研究方向为流域管理、森林水文。E-mail: yang\_hlong@163.com。

内,至桑园村西入潮河。该河在北京境内全长 68 km,流域面积 364.31 km<sup>2</sup>,属典型的北方山区河流。研究区降雨主要分布在 6—9 月份,干湿冷暖变化强烈。全年盛行东北、西南风,冬季受西北内蒙古高原寒流影响,气候寒冷干燥。受大气、地貌、海拔等诸多因素影响,水热条件年际间、季节间和不同地域间具有明显的地域性特征。年平均气温 6~12℃,年平均降水量 470~850 mm,无霜期平均 150~200 d。岩石以花岗岩、碳酸岩、火山岩和碎屑沉积岩为主。土壤以棕壤和淋溶褐土为主。该区三面环山,一面低洼,形成了一个较为典型的集水区及其一级河流。

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标选取原则

河流生态评价选取的评价指标,应满足从不同的侧面反映河流生态系统自然生态属性的特点:(1)科学性。评价指标概念明确,能够定量或定性的表达河流生态系统的生态特性。(2)独立性。通过利用相关性检验减少评价指标的冗余,消除重复指标。(3)操作性。评价指标的获取具有可操作性,便于数据的收集与处理分析。(4)目标性。河流生态评价指标能够为河流管理部门开发、利用河流提供科学的指导。(5)系统性。河流生态系统作为一个整体,指标的选取要尽可能完整、全面、系统地反映被评价河溪系统的特征。

### 2.2 四元联系数原理简介

三元联系数方法的原理是将确定与不确定性问题看作一个系统,从相同、相异、相反这 3 个方面分析客观事物之间的关联性,并用联系数来表达系统的各种不确定性,从而将对不确定性问题的认识转换为定量分析的数学运算<sup>[5-6]</sup>。四元联系数是集对分析同、异、反三元联系数的一种推广,即将差异情况进一步细分为偏同差异和偏反差异两种情况,对于系统的不确定程度做出详细地分析,能够增加系统分析的准确性<sup>[6-7]</sup>。其表达为:

$$U = a + m_i + n_j + b_k \quad (1)$$

式中: $U$ ——不确定系统模糊四元联系数; $a$ ——同一度, $a \in [0, 1]$ ;  $m$ ——偏同差异度, $m \in [0, 1]$ ;  $i$ ——偏同差异度系数, $i \in [0, 1]$ ;  $n$ ——偏反差异度, $n \in [0, 1]$ ;  $j$ ——偏反差异度系数, $j \in [-1, 0]$ ;  $b$ ——对立度, $b \in [0, 1]$ ;  $k$ ——对立度系数, $k = -1$ ,且  $a, m, n, b$  满足  $a + m + n + b = 1$ 。

假定评价方法具有  $X$  个评价等级,将第  $x$  个标准等级的  $y$  个评价指标组成一个集合  $A_x = [v_{x,1}, v_{x,2}, \dots, v_{x,j}, \dots, v_{x,y}]$ ,将评价对象的  $y$  个评价指标组

成一个集合  $B = [h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_y]$ ,将这两个集合构成一个集对  $H(A_x, B)$ 。比较集对中各指标值  $h_{x,i}$  与等级值  $v_{x,j}$  的大小。

### 2.3 河流生态评价指标体系的建立

一个健康的河流生态系统具有稳定的生态功能,合理的营养结构,以及物质能量充分流动的特点,能够抵御一定的外界干扰并具有自我生态修复的能力。综合考虑北京郊区水环境的结构、功能和用途,本研究将河流的生态状况分为自然状态、近自然状态、退化状态、人工化状态 4 个等级。将评价标准建立集合  $A = \{\text{河流生态评价等级}\}$ ,将评价指标体系建立集合  $B = \{\text{河流健康评价指标}\}$ ,评价标准等级为  $x (1 \leq x \leq 4)$ ,将评价指标标准与评价指标体系建立河流生态评价的四元联系度  $U(A-B)$ ,并进一步分析河流生态评价系统分级标准与评价指标之间的数量关系<sup>[8]</sup>。

2.3.1 建立河流生态评价等级标准体系与评价指标体系 假设河流生态评价等级标准体系为:  $V = \{v_{p,j} | p = 1-P, j = 1-N\}$ ,评价样本指标体系为:  $X = \{x_{i,j} | i = 1-M, j = 1-N\}$ ,式中: $i, j, p$ ——样本序号、指标序号及等级序号;  $M, N, P$ ——样本总数、指标总数及等级总数。将河流生态评价各评价样本指标值  $x_{ij}$  和等级标准值  $v_{p,j}$  建立集对  $H(X, V)$ 。

2.3.2 根据公式(2)~(4)可以计算出评价样本隶属于各等级的单指标模糊四元联系数  $U_{j,p}$ 。在评价计算过程中,联系数中的  $a, m, n, b$  值的计算采用:若指标值处于评价等级中,则  $a = 1, m = n = b = 0$ ;若指标值处于相邻等级,则  $b = 0$ ,且指标值越靠近本等级则  $m$  越大,反之  $n$  越大;若指标值所处等级与本评价等级相隔 1 级,则  $a = 0$ ,且距本评价等级越远则  $b$  越大,反之  $m$  越大;若指标值所处等级与本评价等级相隔 2 或 2 个以上等级,则  $b = 1, m = n = a = 0$ 。

3.3.3 评价等级指标的计算 评价等级的指标中包括多种类型的指标,均可转换为效益型指标后再进行分析,公式(2)~(6)给出了河流健康目标层相对于 1 级标准的联系度计算方法<sup>[9-11]</sup>。

(1) 若  $x_j \in [v_{1,j}, +\infty]$ , 则:

$$U_{j,1} = 1 + 0_i + 0_j + 0_k = 1 \quad (2)$$

(2) 若  $x_j \in [v_{2,j}, v_{1,j}]$ , 则:  $U_{j,1} = \frac{v_{1,j}v_{2,i}}{(v_{1,j} + v_{2,j})x_j}$

$$+ \frac{(v_{1,j} - x_j)(x_j - v_{2,j})}{(v_{1,j} + x_{2,j})x_j} i + \frac{x_j}{v_{1,j} + v_{2,j}} j + 0k \quad (3)$$

(3) 若  $x_j \in [-\infty, v_{2,j}]$ , 则:

$$U_{j,1} = 0 + 0_i + 0_j + 1_k = k \quad (4)$$

式中: $v_{1,j}, v_{2,j}$ ——1, 2 级评价等级标准阈值;  $x_j$ ——评价样本指标值。

(4) 河流生态评价准则层的综合评价四元联系数为:

$$U_m = r_{m1} + r_{m2}i_1 + r_{m3}i_2 + r_{m4}j \quad (5)$$

式中:  $r_{ml} = \sum_{q=1}^{p_l} \omega_{mq} r_{mq1}$ , ( $1 \leq l \leq 4$ );  $q$ —— $m$  各准则层下第  $q$  个评价指标;  $p_l$ ——各个目标层下包含的指标层指标个数;  $\omega_{mq}$ ——指标层指标的权重值;  $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ ,  $r_{m4}$ ——各级指标的相关系数。

(5) 河流生态评价的总指标综合评价四元联系数为:

$$U = r_1 + r_2i_1 + r_3i_2 + r_4j$$

式中:  $r_l = \sum_{m=1}^4 \omega_m r_{ml}$ , ( $1 \leq l \leq 4$ );  $\omega_m$ ——准则层综合权重;  $r_1, r_2, r_3, r_4$ ——评价等级的联系度参数。

(6) 同理可以计算河流目标层相对于 2 级、3 级和 4 级标准的联系度参数。根据联系度的大小判别河段所属生态等级。

### 3 四元联系数原理在安达木河流生态评价中的应用

选取安达木河流上游雾灵山至遥桥峪水库段为研究对象,将评价河流分为 16 段,以雾灵山至化皮坊为 1 号段,化皮坊至黑关为 2 号段,具体分段情况如图 1 所示。以 2008 和 2011 年各河段生态调查各项指标数据为基础,对河流各段生态等级进行分析评价,现选取 4 号花园至蚂螂峪区段进行分析评价。

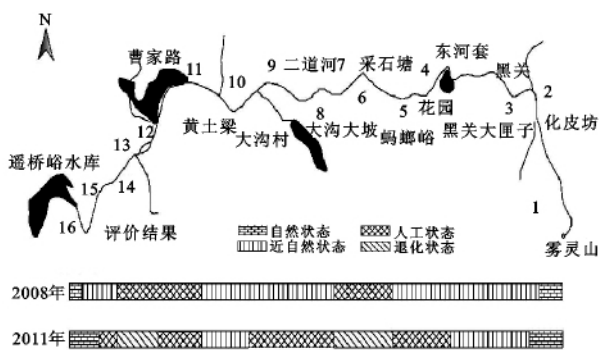


图 1 安达木河流生态评价结果示意图

#### 3.1 河流生态评价指标的选取

健康的河流生态系统应包括良好的水文特征、地貌特征、生态特征以及景观娱乐功能,各个要素的相互作用共同构成了健康的河流生态系统。因此,对河流生态系统进行生态评价,首先应该选取具有代表性的评价指标,评价指标的选取应该遵循科学性、目标性、系统性、独立性、可操作性的原则,根据选取的指标建立相应的河流生态评价指标体系。基于四元联

系数原理的京郊安达木河生态评价体系从水文特征、地貌特征、生态特征、景观娱乐功能共 4 个方面选取具有独立性的 23 个指标:水文特征指标选取水深、流速、pH 值、溶解氧、氨氮、磷酸盐、水质浑浊度共 7 项指标;生态特征选取河岸植被覆盖度、浮游藻类覆盖度、均匀度指数( $J$ )、多样性指数( $H$ )、植物个体尺度、生物量、丰富度( $d_{gl}$ )7 项指标。地貌特征选取河岸及河床完整度、弯曲度、宽/深比、河流断面形状、河床材料的透水性、河道冲刷/淤积情况、粗木体的来源和密度共 7 项指标;景观娱乐功能选取景观多样性指数( $S$ )和观赏游憩价值( $f$ )2 项指标<sup>[12-15]</sup>。

#### 3.2 指标权重的确定

采用层次分析法确定各评价指标在河流生态评价中的权重值<sup>[16]</sup>。将现场采集的数据进行整理分析,建立评价模型的层次结构,通过采用专家打分的方式构建河流生态评价指标的判断矩阵,分别进行层次单排序和层次总排序,并将计算结果进行一致性检验,得到河流生态评价指标体系准则层和指标层的权重值。各指标权重值详见表 1。

表 1 安达木河流生态评价各评价指标权重值

准则层(权重)	指标层	权重
生态特征 (0.331)	河岸植被覆盖度	0.363
	浮游藻类覆盖度	0.117
	底栖动物多样性 $H$	0.132
	均匀度指数 $J$	0.043
	丰富度 $d_m$	0.104
	生物量	0.072
	植物个体尺度	0.169
水文特征 (0.178)	水深	0.265
	流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	0.113
	pH 值	0.085
	溶解氧 DO	0.125
	氨氮	0.089
	磷酸盐	0.174
	水质浑浊度/%	0.149
地貌特征 (0.307)	河岸及河床形态	0.238
	弯曲度	0.106
	宽/深比	0.185
	河流断面形状	0.154
	河床材料的透水性	0.063
	河道冲刷/淤积	0.084
	粗木质残体的来源与密度	0.170
景观娱乐 特征(0.184)	景观多样性指数 $S$	0.630
	观赏游憩价值 $f/(10^8 \text{元} \cdot \text{a}^{-1})$	0.370

## 4 评价结果

以 2008 年 6—7 月对安达木河 4 号段的河流生

态调查评价指标为基础。根据公式(2)~(4)计算的河流生态评价准则层的综合评价四元系数如表2所示。用加权的方法将一级指标对应项进行计算,根据公式(5)计算目标层指标对1级标准的四元系数为: $U_1=0.2004+0.0293i_1+0.1601i_2+0.6134j$ ,同理,经过计算得到安达木河对于2级、3级、4级标准系数(略)。

表2 准则层相对于一级标准的四元系数

准则层	权重	对于一级标准的四元系数
生态特征	0.331	$U_{11}=0.088i_1+0.002i_2+0.911j$
水文特征	0.178	$U_{12}=0.172+0.003i_2+0.825j$
地貌特征	0.307	$U_{13}=0.254+0.001i_1+0.501i_2+0.244j$
景观娱乐特征	0.184	$U_{14}=0.5+0.5j$

同理,以2011年6—7月安达木河4号段的河流生态调查数据为基础,经计算得到4号段河流目标层相对于1级、2级、3级、4级标准的四元系数(略)。

根据2008和2011年安达木河4号花园至蚂蚱峪区段相对于各级标准的四元系数计算结果得知,安达木河4号段在2008和2011年相对于1级、4级的同一度均小于对立度,而相对于2、3级的同一度均大于对立度,2008年安达木河4号段四元系数计算结果中,相对于2级标准(近自然)的偏同差异度与偏反差异度差距最大。如果将偏同差异度、偏反差异度均视为差异度(三元系数),则相对于2级标准的系数最大,评价结果为2级。因此,2008年4号段河流生态等级属于近自然状态;2011年安达木河4号段四元系数计算结果中,相对于3级标准(退化状态)的偏同差异度与偏反差异度差距最大,因此,2011年安达木河4号段河流生态等级属于退化状态。将同样的方法用于安达木河其他河段的生态评价,评价结果如图1所示。

## 5 结果分析

从2008和2011年的河流生态评价结果示意图可以看出:河流总体生态评价等级下降,除2号区段和15号区段河流生态等级上升,3号、10号、11号河段生态等级维持不变以外,其余河段生态等级均呈现下降趋势。2号和15号河段生态等级由近自然状态提升为自然状态,主要原因是雾灵山自然保护区和遥桥峪水库自然保护区近年来采取生态治理措施,减少人为干扰,河流两岸生态环境得到极大的改善;4号、5号、8号、9号、14号河段河流生态等级由近自然状态下降为退化状态。这些区段流经村庄,人工干扰现象明显,河流两岸土地利用类型以农田和居民点为

主,农村生产生活垃圾大幅增加,而垃圾的主要处理方式是随意倾倒,河流成为主要的倾倒场所,农村垃圾不合理的处理方式成为河流生态等级下降的主要原因之一。此外,农业耕作中农药化肥的使用也影响到河流生态等级评价的结果;6号、7号河段河流生态等级由退化状态转变为人工状态。这两个河段以度假村为主,近年来京郊旅游业的发展,依附于河流岸边的度假村数量逐年增加,加大了对河流的开发力度,使得河流呈现出的人工干预迹象越来越显著,河流生态干扰破坏现象比较严重。人工挖沙、河滩取石以及不恰当的工程治理方式等加剧了河流生态等级的下降。

## 6 结论

(1) 利用四元系数评价河流生态等级各评价指标之间的优劣差异状况,通过AHP方法计算评价系统各指标的权重,在综合指数法的基础上运用四元系数方法,进而在安达木河评价过程中验证了该方法的合理性和有效性。应用结果表明,该方法能从不同方面分析不确定系统的差异特征,计算过程简便快捷,结果合理可靠,能够为京郊其他河流的生态评价提供技术支持。

(2) 利用四元系数评价方法,把时间尺度和空间尺度相结合,并着重从时间尺度出发,将不同年份的河流评价结果进行相互比较,分析不同河段的河流生态等级标准,并对此进行比较分析,研究总结河流生态等级发生变化的原因,为下一步的河流生态治理提供技术性指导。

(3) 近年来,各种人为活动的干扰强度增加,使得安达木河局部河段生态环境遭到破坏,加强河流生态环境的治理,寻找农村垃圾合理有效的处理方式,减少不必要的人类活动对河流生态造成的影响,以及在旅游业的发展和河流生态环境的整治方面需找一个平衡点,将成为下一步河流生态整治的重点内容。

### [参考文献]

- [1] 高甲荣. 近自然治理:以景观生态学为基础的治理过程[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(1): 78-82.
- [2] 高阳, 高甲荣, 李付杰, 等. 基于河道—湿地—缓冲带复合指标的京郊河溪近自然评价体系[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5149-5157.
- [3] 冯泽深, 高甲荣. 北京郊区雁栖河自然性定量评价[J]. 中国农村水利水电, 2008(10): 14-17.

(下转第250页)

- 方面的进展[J]. 植物学通报, 1998, 15(1): 17-26.
- [4] Fridman J, Walheim M. Amount, structure, and dynamics of dead wood on managed forestland in Sweden[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131(1/3): 23-26.
- [5] Currie W, Nadelhoffer K. The imprint of land use history: Patterns of carbon and nitrogen in downed woody debris at the Harvard forest[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(5): 446-460.
- [6] Romero L, Smith T, Fourqurean J W. Changes in mass and nutrient content of wood during decomposition in a south Florida mangrove forest[J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(3): 618-631.
- [7] Christopher M, Christoph S, Clare K, et al. Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 244(1/3): 60-67.
- [8] Bigler C, Veblen T. Changes in litter and dead wood loads following tree death beneath subalpine conifer species in northern Colorado[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(2): 331-340.
- [9] 张树斌, 郑征. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林枯立木数量及分配规律[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(2): 3-5.
- [10] Kennedy R, Spies T, Gregory M. Relationships of dead wood patterns with biophysical characteristics and ownership according to scale in Coastal Oregon, USA[J]. *Landscape Ecology*, 2008, 23(1): 55-68.
- [11] Fensham R. Monitoring standing dead wood for carbon accounting in tropical savanna[J]. *Australian Journal of Botany*, 2005, 53(7): 631-638.
- [12] 何东进, 何小娟, 洪伟, 等. 森林生态系统粗死木质残体的研究进展[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(5): 715-721.
- [13] 林淑伟, 柴文毅, 陈炳容, 等. 武夷山风景名胜区森林生态系统枯立木空间特征研究[J]. *北华大学学报: 自然科学版*, 2008, 9(4): 356-361.
- [14] 鲁少波, 徐成立, 李春强, 等. 孟滦林管局森林生态系统服务功能价值研究[J]. *林业经济*, 2009(4): 65-66.
- [15] 农林部. 立木材积表[M]. 北京: 技术标准出版社, 1978.
- [16] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [17] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [18] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述[J]. *林业科学*, 2002, 38(3): 140-146.
- [19] 惠刚盈, Gadow K, 胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(6): 687-692.
- [20] Graves A, Fajvan M, Miller G. The effects of thinning intensity in snag and cavity tree abundance in a Appalachian hard wood stand[J]. *Canadian Journal of Forestry Research*, 2000(30): 1214-1220.

(上接第 245 页)

- [4] 冯泽深, 高甲荣, 姜会品, 等. 京郊河溪岸边带生态恢复适宜性评价[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 46-50.
- [5] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [6] 邓朝贤, 金菊良, 王宗志, 等. 基于模糊四元联系数的防洪工程体系安全综合评价模型[J]. *灾害学*, 2008, 23(3): 41-43, 53.
- [7] 景林艳. 区域水资源承载力的量化计算和综合评价研究[D]. 安徽 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [8] 赵彦伟, 杨志峰, 姚长青. 黄河健康评价与修复基本架[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 131-134.
- [9] 叶义城, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 胡晓雪, 杨晓华, 郦建强, 等. 河流健康系统评价的集对分析型[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 5(5): 164-176.
- [11] 金菊良, 魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] Anthony R L, Lindsay J W, Jane A D, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia[J]. *Fresh water Biology*, 1999, 41(5): 453-468.
- [13] Daniel H, Otto M, Leonard S, et al. Overview and application of the AQEM assessment system[J]. *Hydrobiology*, 2004, 516(3): 1-20.
- [14] Boulton A J. An overview of river health assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(6): 469-479.
- [15] 刘晓燕, 张原峰. 健康黄河的内涵及其指标[J]. *水利学报*, 2006, 37(6): 649-653.
- [16] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. *水科学进展*, 2005, 16(4): 602-608.