

基于模糊综合评价与灰色关联分析的河流自然性评价

燕琳¹, 马岚¹, 潘成忠², 张栋³, 孙占薇¹, 张金阁¹, 刘京晶¹, 黎俊佑¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 3. 黄河流域水土保持生态环境监测中心, 陕西 西安 710021)

摘要: 【目的】永定河是海河水系五大河之一, 其自然性状况对北京地区居民饮水安全和海河流域水环境均有重要影响, 基于“近自然”理念的河流自然性评价是保护和恢复河流自然状态的基础。【方法】以永定河北京山峡段为研究对象, 从河流的水文要素、断面形态、水体理化性质、河岸带状况和社会生态价值 5 个方面, 选取了 25 个定性、定量指标, 构建了河流自然性评价指标体系。运用层次分析法与熵权法结合的组合赋权方式计算各指标在评价体系中的权重。用模糊综合评价法和灰色关联分析法分别对河流进行自然性评价和自然等级判定。【结果】模糊综合评价法和灰色关联分析法的评价结果总体一致, 划分的 21 个调查河段中处于自然状态、近自然状态、退化状态和人工状态的河段分别占总河长的 14.29%、28.57%、46.62% 和 9.52%, 长度分别约为 7.5、15.0、25.0 和 5.0 km。【结论】总体上, 调查河段大部分处于退化状态, 但仍具有潜在的近自然修复能力。采用的模糊综合评价法与灰色关联分析法均是可行的河流自然性评价方法。表 3 参 27

关键词: 水环境学; 河流生态系统; 组合赋权; 灰色关联分析; 模糊综合评价; 永定河

中图分类号: S714.7; X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)03-0480-09

Naturalness evaluation of rivers based on the fuzzy comprehensive evaluation and the grey correlation analysis

YAN Lin¹, MA Lan¹, PAN Chengzhong², ZHANG Dong³, SUN Zhanwei¹,
ZHANG Jing¹, LIU Jingjing¹, LI Junyou¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Ecological Environment Monitoring Center for Soil and Water Conservation in the Yellow River Basin, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] To restore and better protect the naturalness of Yongding River, one of the five major rivers in Haihe River Basin, the current study is aimed at the naturalness evaluation of it based on the close-to-nature concept, which is of great significance of the drinking water safety of residents in Beijing and the water environment of Haihe River Basin. [Method] Taking the Beijing gorge section of Yongding River as the study subject, the evaluation index system of river naturalness was constructed with 25 qualitative and quantitative indexes selected from five aspects, namely, hydrological elements, cross-sectional configuration, physical and chemical properties of water body, riparian zone conditions and social ecological value of river. Then, the weight of each index in the evaluation system was calculated with the weighting method of analytic hierarchy process integrated with the entropy weight method before the naturalness of the river is evaluated and the natural grade is determined employing the fuzzy comprehensive evaluation method and the grey correlation

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-11-27

基金项目: 国家水环境治理重大专项 (2018ZX07101005-04)

作者简介: 燕琳, 从事河流生态保护研究。E-mail: 18306890242@163.com。通信作者: 马岚, 副教授, 从事水文水资源与水土保持研究。E-mail: mlpcz@sina.com

analysis respectively. [Result] The naturalness of the river evaluated employing fuzzy comprehensive evaluation method is generally consistent with that using the grey correlation analysis, and among the 21 river segments, the natural, near-natural, degraded and artificial river segments accounted for 14.29%, 28.57%, 46.62% and 9.52% of the total river length, respectively, and the length is about 7.5, 15.0, 25.0 and 5.0 km. [Conclusion] In general, most of the investigated river segments are being degraded, but they all still display potential in restoring the naturalness and the fuzzy comprehensive evaluation method and grey correlation analysis are both feasible methods for river naturalness evaluation. [Ch, 3 tab. 27 ref.]

Key words: water environment science; river ecosystem; combination weighting; grey correlation analysis; fuzzy comprehensive evaluation; Yongding River

河流在水循环、能量循环、物质交换、气候调控和生态发展等方面都发挥着极其重要的作用^[1-2]。河流的自然性是指与相同类型的未受干扰的河流的相似程度^[3]，尤其是结构稳定性和生态功能等；即整个河流生态系统是完整的、稳定的、可持续的，对外界不利因素具有抵抗力^[4]。河流的自然性评价，就是对由自然因素和人为活动引起的河溪生态系统的破坏和退化程度进行诊断^[5]，对河流现状进行评价，为管理者、决策者提供目标依据，使之更好地利用和管理河流^[6]，且对于河流生态系统的自然恢复和保护有着重要的指导作用^[7]。目前，国内外的河流的自然性评价方法主要有生物监测法和综合指标评价法 2 种^[8]。前者由于指标单一、缺乏系统性，得出的评价结果科学性较差^[9]；后者评价指标综合，具有较好的解释性和说明性，使得评价结果更科学^[10]。模糊综合评价法和灰色关联分析法都属于综合指标评价法。其中，模糊综合评价法以其模型简单，适用性强，对复杂问题的评价效果好等优点得到广泛的应用，但模糊综合评价在计算过程中存在一定的经验性、模糊性和不确定性，导致评价结果与客观实际产生偏差^[6]；灰色关联分析法是一种量化比较分析的方法，根据数列的可比性和相似性，分析系统内部因素间的相关程度^[7]，计算思路明晰，对数据要求较低且工作量较少，但需要对各项指标最优值进行现行确认，主观性强，同时部分指标最优值难以确认。本研究以永定河北京山峡段为研究对象，从生态、地貌和水文 3 方面入手，定性定量分析了河流的结构与功能，构建河流自然性评价指标体系，利用层次分析法与熵权法对评价指标进行主客观组合赋权计算权重，再对各样本分别进行模糊综合评价与灰色关联分析，利用模糊综合评价法可以得出不同河段不同地貌、生态、水文类别之间的关系信息^[11-12]，利用运用基于点到区间距离的灰色关联分析^[13-14]，提高评价结果的客观性，二者结合，相互验证，对永定河作更全面、合理的评价。最终，评价结果一方面可反映永定河水生态水环境状况；另一方面为其他河流的自然性评价方法选择，提供科学合理的参考。

1 研究区概况

永定河起源于山西省宁武县管涔山，自官厅水库下游流入北京市境内，流经门头沟、石景山、丰台、房山和大兴共 5 个区，市境内主河道长约 189 km，流域面积约 3 200 km²。该流域属于暖温带大陆性季风气候，春季干旱多风，夏季炎热多雨，秋季凉爽湿润，冬季寒冷干燥，且地势西北高东南低，降水量整体呈现东南向西北递减分布趋势，降水多集中在 6-8 月，多年平均降水量 590 mm。调查河段为北京山峡段中的门头沟青白口村至三家店水库河段，全长约 53 km。

2 研究方法

2.1 评价指标的获取与体系的构建

在 2018 年 7 月进行野外调查，按照“每 500 m 布设 1 个调查点，如遇到生态条件突变地区，则加测 1 点”的原则^[12]，从上游至下游共布设调查点 105 个。采用分河段评价的方法，以每 5 个点为基准并结合特殊情况，将河流的地貌、生态、水文特征，将相邻、特征相似的调查点组成 1 个调查河段，研究区划分成 21 个河段，使得评价结果更加精准。具体评价标准参考文献^[15]。

河流生态系统是一个多方位、多层次、多功能的自然生态经济系统^[16-17]，河流自然性评价系统要求

每项指标都能从不同的方面反映河流生态系统的自然性程度。在科学性、目标性、系统性、独立性、操作性等指标选取原则的基础上^[15, 18-19], 从水文要素、河流形态、水体理化性质、河岸带特征和社会生态价值方面筛选 25 个定性、定量指标, 构建 3 个层次结构的综合评价指标体系(表 1)。

表 1 永定河自然性评价指标体系与指标权重

Table 1 Index system and index weight of naturalness evaluation of Yongding River

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)	指标获取方法
永定河山峡段 河流自然性评价	B ₁ 水文要素(0.194)	C ₁ 气味(0.442)	考察河水是否有腥臭味, 定性描述
		C ₂ 流速比(0.158)	河段水体流速最大值/河段水体流速最小值
		C ₃ 浊度(0.255)	2100Q便携式浊度仪
		C ₄ 底栖生物生境条件(0.146)	满足底栖生物生存的河床底质占比, 定性描述
		C ₅ 平面形态(0.136)	河流曲折蜿蜒程度, 急弯及河心岛个数
		C ₆ 纵向弯曲度(0.131)	河段弯曲长度与直线长度的比值
	B ₂ 河流形态(0.216)	C ₇ 岸坡坡度(0.135)	坡度仪测量
		C ₈ 岸坡结构(0.128)	考察岸坡材料, 定性描述
		C ₉ 岸坡植被覆盖情况(0.130)	岸坡植被覆盖度, 定性描述
		C ₁₀ 水宽与河宽比(0.129)	便携式测距仪测量
		C ₁₁ 河床动态变化(0.102)	河床底质的暴露程度
		C ₁₂ 有遮蔽水面占水宽比(0.110)	便携式测距仪测量
	B ₃ 水体理化性质(0.202)	C ₁₃ pH值(0.113)	pHscanIOS笔式pH计测量
		C ₁₄ 溶解氧(0.200)	Seven2Go Pro S9便携式溶氧仪测量
		C ₁₅ 化学需氧量(0.201)	便携式水质测定仪测量
		C ₁₆ 氨氮(0.203)	多参数水质分析仪测量
		C ₁₇ 磷酸盐(0.171)	多参数水质分析仪测量
		C ₁₈ 电导率(0.113)	手持式电导率测定仪测量
	B ₄ 河岸带状况(0.258)	C ₁₉ 缓冲带植被多样性(0.251)	Shannon-Wiener多样性指数计算
		C ₂₀ 河岸带植被宽度(0.147)	便携式测距仪测量
		C ₂₁ 河岸带通达性(0.204)	河岸带大于10 m的植被缺口个数
		C ₂₂ 两岸土地利用(0.133)	考察距离河道最近的土地利用方式
		C ₂₃ 水利工程个数(0.264)	对水流产生影响的人造工程措施
		C ₂₄ 景观多样性指数(0.499)	采用Romme的景观丰富度指数计算
	B ₅ 社会生态价值(0.130)	C ₂₅ 观赏休憩价值(0.501)	采用旅行费用法计算

说明: 括号内数值表示该项指标权重

2.2 评价指标权重的确定

指标权重的确定关系到评价结果的客观性和准确性。层次分析法(AHP)主要考虑专家的意见, 具有一定的主观随意性。熵权法从客观数据出发, 不考虑指标本身的差异, 可能导致得到的权重不符合实际指标的重要程度^[20]。AHP与熵权法相结合得到的组合赋权法不仅能够根据专家的知识 and 经验对评价指标打分, 又能够充分挖掘原始数据本身蕴含的信息, 具有较高的合理性^[21-22]。

2.2.1 层次分析法 本研究采用统一的河流自然性评价各级指标对比打分表^[15], 邀请从事河流生态保护研究、流域水沙过程研究等相关工作 8 a 以上的资深专家对河流自然性评价指标的相对重要程度进行对比打分。共发出打分表 10 份, 收回 8 份; 回收的有效反馈信息采用德尔菲法进行有效权衡^[23], 给出判断数值, 构造河流自然性评价体系各层的判断矩阵。① 确定判断矩阵。设因素 i 与因素 j 进行比较判断, 则因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 建立各准则下的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{\max}(i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, n)$; 其中 a_{ij} 的限制条件: $a_{ij}>0$, $a_{ij}=1/a_{ji}$, $a_{ii}=1$; 重要程度标度值及含义参照文献^[7]。② 权重计算: $A_g=\lambda_{\max}g$ 。其中: A_g 为权重; g 为主重向量; $\lambda_{\max}$ 为最大特征值。③ 一致性检验: $I_C=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$ 。其中: n 为判断矩阵的阶数; I_C 为一致性指标。为了严格定义一致性的评判标准, 引入

一致性比率 R_C 与平均随机一致性指标 I_R , I_R 的赋值参考文献 [16]。当 $R_C = I_C/I_R < 0.1$ 时, 认为构造的判断矩阵具有满意的一致性^[24], 否则认为排序结果不合理, 需要对 a_{ij} 重新调整。

2.2.2 熵权法 设有 m 个调查点, n 项指标, 构成原始数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。① 对 x_{ij} 归一化处理后计算第 j 项指标的熵值: $e_j = -\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}$, 其中: $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。② 计算第 j 项指标的权重: $U_j = 1/e_j$, 其中: $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。对 U_j 进行归一化处理, 得到第 j 项指标的权重:

$$W_j = \frac{U_j}{\sum_{j=1}^n U_j}。$$

2.2.3 组合赋权 应用 AHP 法确定指标主观权重向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, 并做一致性检验。应用熵权法确定指标的客观权重向量 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 。对主、客观赋权法确定的权重系数进行几何平均,

最后归一化处理求得组合权重 (表 1)。组合赋权公式^[21]为: $W_j = \frac{\sqrt{\alpha_j \beta_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}}$, 其中: $j=1, 2, \dots, n$ 。

2.3 自然性评价方法

2.3.1 模糊综合评价 模糊综合评价是以模糊数学为基础, 对受多种因素制约的不确定性问题进行量化描述的一种方法, 用不同的隶属函数值使模糊评判因子明晰化, 不同质的数据归一化^[25], 从而把定性分析与定量分析相结合。利用该方法进行河流自然性评价, 关键在于建立准确的隶属函数, 从而计算评价指标对各评价等级的隶属度。① 建立评价因子集 U : $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 其中: $u_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为评价因素, m 表示同一层次上单因素个数。② 建立权重集 w : $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, 其中: $c_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为评价因素 u_i 在评价因子集 U 的权重, $\sum_{i=1}^m c_i = 1$ 。③ 建立评价集 V : $V = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$, 其中: $v_j (j=1, 2, \dots, q)$ 为评价的等级, q 表示评价等级数。④ 建立模糊关系矩阵在 U 与 V 之间进行单因素评价, 建立模糊关系矩阵, 逐个对评价因子 u_i 进行归一化处理, 进而得到模糊关系矩阵 R ^[26]。

$$R = (r_{ij})_{mn} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{14} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{n4} \end{bmatrix}。$$

其中: r_{ij} 是评价因子集 U 中的第 i 个因素 u_i 对应的评价集 V 中第 j 个等级 v_j 的隶属度, $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。隶属度 r_{ij} 的表达式如下。

$$\text{越大越优型: } r_{ik} = (X_{ik} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min});$$

$$\text{越小越优型: } r_{ik} = (X_{\max} - X_{ik}) / (X_{\max} - X_{\min})。$$

其中: $X_{\min}$ 是第 i 个指标的最小值; $X_{\max}$ 是第 i 个指标的最大值。⑤ 计算模糊评价结果将权向量 c 与模糊关系矩阵 R 合成运算得到模糊评价结果 B ^[23], 即: $B = wR$ 。

2.3.2 灰色关联分析 灰色关联分析法通过计算评价因子的实测值与各级评价指标标准的关联度来确定河段近自然等级^[27]。该方法应用点到区间距离法计算关联系数, 避免了传统的点到点计算方法的不足^[13], 同时又能反映处于不同等级的河段间的评价指标的显著差异和同一等级的河段内的评价指标的优劣, 评价结果较为直观、合理和可行。计算步骤如下: ① 确定比较数列和参考数列。设以评价指标的实测值为参考数列 $\{X'_i(k), (i=1, 2, 3, \dots, m; k=1, 2, 3, \dots, n)\}$, 其中 i 为调查点编号, k 为评价指标。设以河流自然性评价标准为比较数列。

$$\{\underline{X}_{oh}(k), \bar{X}_{oh}(k) (h=1, 2, 3, \dots, m; k=1, 2, 3, \dots, n)\}。$$

其中: h 为某一评价标准的编号, $\underline{X}_{oh}(k)$ 和 $\bar{X}_{oh}(k)$ 则分别表示评价标准的上下限。② 计算关联系数^[7]。

$$D_{i,oh} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[X'_i(k) - \underline{X}_{oh}(k)]^2 + [X'_i(k) - \bar{X}_{oh}(k)]^2}。$$

其中: $D_{i,oh}$ 为点到区间的距离。

$$\varepsilon \{X'_i(k), [\underline{X}_{oh}(k), \bar{X}_{oh}(k)]\} = \frac{D_{\min} + \rho D_{\max}}{D_{i,oh} + \rho D_{\max}}。$$

其中: ε 为关联系数; $D_{\min}$ 为点到区间距离的最小值, $D_{\max}$ 为点到区间距离的最大值, ρ 为分辨系数, 介于 0 与 1 之间, 一般取 0.5。③ 计算灰色关联度: 采用加权处理, 即

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \varepsilon \{X'_i(k), [\underline{X}_{oh}(k), \bar{X}_{oh}(k)]\}。$$

其中: $k=1, 2, 3, \dots, n$; r_i 为灰色关联度, w_k 为第 k 项评价指标的权重。

3 结果与分析

3.1 评价结果

根据模糊综合评价和灰色关联分析, 各河段不同自然性等级的模糊评价结果最大值对应的级别与关联度最大值对应的级别即为该河段所处的自然性等级状态。由表 2 可知: 永定河北京山峡段总体上处于“退化状态”, 但各个河段的自然性状况却不尽相同。模糊综合评价法中, 第 11、12、13 河段为“自然状态”, 第 3、4、6、8、19、20 河段为“近自然状态”, 第 2、5、7、9、14、15、16、17、18、21 河段为“退化状态”, 第 1、10 河段为“人工状态”; 灰色关联分析法中, 第 11、12、13 河段为“自然状态”, 第 4、6、8、17、19、20 河段为“近自然状态”, 第 2、3、5、7、9、14、15、16、18、21 河段为“退化状态”, 第 1、10 河段为“人工状态”。

评价结果显示: 研究河段处于自然状态的河段长 7.5 km, 约占全长的 14.29%; 处于近自然状态的河段长 15.0 km, 约占全长的 28.57%; 处于退化状态的河段长 25.0 km, 约占全长的 47.62%; 处于人工状态的河段长 5.0 km, 约占全长的 9.52%。

表 2 模糊综合评价法与灰色关联分析法对永定河各调查河段不同自然性等级的评价结果

Table 2 Evaluation of different naturalness classes for different reaches of Yongding River by fuzzy comprehensive evaluation and grey correlation analysis

河段	模糊综合评价法					灰色关联分析法				
	自然状态Ⅳ	近自然状态Ⅲ	退化状态Ⅱ	人工状态Ⅰ	等级	自然状态Ⅳ	近自然状态Ⅲ	退化状态Ⅱ	人工状态Ⅰ	等级
1	0.200	0.233	0.211	0.241	I	0.738	0.729	0.783	0.789	I
2	0.208	0.211	0.228	0.217	II	0.740	0.788	0.793	0.733	II
3	0.178	0.235	0.212	0.204	III	0.769	0.791	0.803	0.716	II
4	0.178	0.187	0.186	0.171	III	0.763	0.786	0.769	0.727	III
5	0.138	0.160	0.183	0.178	II	0.746	0.757	0.779	0.754	II
6	0.138	0.144	0.133	0.136	III	0.767	0.783	0.764	0.742	III
7	0.155	0.160	0.223	0.143	II	0.743	0.753	0.767	0.750	II
8	0.155	0.188	0.162	0.157	III	0.779	0.794	0.789	0.775	III
9	0.188	0.201	0.284	0.172	II	0.752	0.758	0.762	0.722	II
10	0.164	0.180	0.168	0.185	I	0.735	0.739	0.746	0.756	I
11	0.165	0.157	0.151	0.159	IV	0.758	0.724	0.713	0.749	IV
12	0.204	0.185	0.170	0.177	IV	0.781	0.763	0.775	0.738	IV
13	0.253	0.241	0.206	0.225	IV	0.800	0.772	0.768	0.716	IV
14	0.150	0.150	0.161	0.128	II	0.753	0.779	0.790	0.745	II
15	0.160	0.184	0.198	0.173	II	0.761	0.764	0.766	0.755	II
16	0.158	0.177	0.189	0.178	II	0.760	0.774	0.783	0.747	II
17	0.162	0.176	0.178	0.177	II	0.750	0.832	0.795	0.743	III
18	0.125	0.124	0.184	0.129	II	0.691	0.782	0.810	0.759	II
19	0.193	0.207	0.193	0.175	III	0.764	0.814	0.807	0.727	III
20	0.178	0.179	0.177	0.158	III	0.789	0.798	0.775	0.703	III
21	0.228	0.222	0.260	0.250	II	0.763	0.790	0.800	0.728	II

3.2 不同河段的自然性等级分析

结合河流实地调查来看,第 11、12、13 河段处于自然状态,第 4、6、8、19、20 河段为近自然状态。处于自然与近自然状态的调查河段远离村庄,人为干扰少,靠近山体水环境良好,河流水体清澈且浊度为 0.99~2.20,缓冲带植被多样性大于 1.00,高于平均值(表 3)。河道基本维持自然形态且具有充足的水量,水生物种生长状况较好,两岸乔灌木植被层次结构分明,植被覆盖度较高。针对自然状态与近自然状态的河段,应加大河流的管理力度,维护河流现状,防止河流自然性退化。

表 3 永定河北京山峡段主要定量指标数据

Table 3 Data of main quantitative indexes in Beijing Gorge Section of Yongding River

自然性等级	指标河段	浊度	溶解氧/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	化学需氧量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	流速比	岸坡坡度/ $^{\circ}$	弯曲度	水宽与河宽比	河岸带通达性	水利程/个	缓冲带植被多样性	景观多样性指数
自然状态	11	0.99	10.75	0.11	16	6.21	52.80	1.05	0.64	1	1	1.09	74.95
	12	1.04	10.48	0.09	14	1.53	48.50	1.04	0.82	0	1	1.22	87.42
	13	1.13	10.71	0.08	13	3.12	36.80	1.05	0.83	1	1	1.08	68.78
		(1.05)	(10.65)	(0.09)	(14)	(3.62)	(46.03)	(1.05)	0.7676	1	1	1.13	77.05
近自然状态	4	2.03	11.69	0.19	24	4.72	59.00	1.04	0.96	1	2	1.03	54.47
	6	1.93	10.44	0.21	33	2.68	29.80	1.02	0.63	1	1	1.04	82.26
	8	2.20	4.77	0.14	10	1.75	50.40	1.11	0.21	1	1	1.14	60.26
	19	1.85	9.83	0.10	22	3.49	16.60	1.04	0.89	2	3	1.18	80.18
	20	2.04	10.03	0.37	32	4.95	13.20	1.10	0.82	1	2	1.20	74.43
	平均值	2.01	9.35	0.20	24	3.52	33.80	1.06	0.70	1	2	1.12	70.32
过渡带	3	2.34	10.25	0.16	28	4.96	44.20	1.02	0.69	1	4	1.16	77.36
	17	2.48	9.76	0.04	18	3.42	20.80	1.11	0.90	1	2	0.89	81.18
	平均值	2.41	10.01	0.10	23	4.19	32.50	1.07	0.80	1	3	1.03	79.27
	2	3.17	10.13	0.25	25	5.72	20.40	1.02	0.95	2	3	0.86	73.67
退化状态	5	2.22	11.26	0.27	27	4.24	43.80	1.00	0.89	1	2	1.19	81.34
	7	2.43	10.50	0.10	16	6.27	41.20	1.03	0.63	1	2	1.15	80.44
	9	1.85	9.45	0.11	20	9.59	57.60	1.03	0.35	1	1	1.22	76.79
	14	3.35	10.09	0.20	17	1.59	28.40	1.01	0.85	1	2	0.91	67.80
	15	3.14	10.18	0.24	11	2.56	10.60	1.05	0.90	1	2	0.81	65.88
	16	3.27	10.31	0.13	13	3.50	25.40	1.06	0.85	1	2	0.54	89.62
	18	3.10	9.63	0.15	12	4.50	22.80	1.13	0.91	1	3	0.94	61.16
	21	2.57	10.18	0.09	25	1.00	22.70	1.04	0.77	3	1	1.16	81.98
	平均值	2.79	10.19	0.17	18	4.33	30.32	1.03	0.79	1	2	0.98	75.41
人工状态	1	3.35	10.77	0.12	39	6.60	30.20	1.00	0.96	2	3	0.74	83.26
	10	4.66	10.62	0.15	16	6.52	31.00	1.01	0.45	1	5	0.61	75.04
	平均值	4.01	10.70	0.14	28	6.59	30.60	1.01	0.71	2	4	0.68	79.15
总平均值		2.44	10.09	0.16	20.52	4.23	32.54	1.05	0.76	1.19	2.10	1.01	75.00

说明:过渡带是指用2种评价方法对同一河段评价结果不同的河段,即河段的评价结果是处于不同的自然等级。括号内数字为平均值

第 3 河段与第 17 河段处于近自然状态与退化状态的过渡带。第 3 河段受灌溉引水、雍水坝、发电厂、拦水坝等工程的干扰较大,河流渠道化工程使得河流平面形态为直线,断面形态为梯形,岸坡坡度 44.20° ,两岸土地多被道路和建筑利用;水域生态系统的结构和功能受到影响,河流两岸生物的多样性降低,鱼类、底栖类生物的生存环境受到威胁。根据河溪近自然评价标准,本河段定量评价指标中 41.67% 处于近自然状态,58.33% 处于退化状态。第 17 河段靠近村庄,受当地农家乐旅游发展影响,沿河景观较多,景观多样性指数 81.18%,水的浊度为 2.48,大于平均值。该河段定量评价指标中 66.67% 处于近自然状态,33.33% 处于退化状态。根据评价结果,结合实地调查情况与河流自然性评价标准,最终确定第 3 河段与第 17 河段处于退化状态。应尽量改雍水坝和拦水坝为生态措施,增加鱼类

回游产卵通道,保护水生动物多样性和改善底栖生物生境条件,加强对农家乐旅游和政府监管,加大绿色可持续发展理念的宣传。

第2、5、7、9、14、15、16、18、21河段为退化状态。调查发现:这些河段建有大量度假村和农家乐,景观多样性指数和观赏游憩价值较高,但对生态系统干扰较大,负面影响较大。如第5河段的妙峰山旅游景区、第16河段的京西十八潭景区和第21河段的青白口旅游度假村,景观多样性指数分别为81.34%、89.62%和81.98%;因鱼塘、烧烤店和农家乐等产生的生活垃圾乱堆乱放现象严重,环境污染较大,河流水质恶化,河流底栖生物生境遭到破坏。第2河段沿途农家乐餐厅、便利店、渔具店等产生的大量生活垃圾,使得河流两岸缓冲带植被多样性指数(0.86)低于调查河段的平均值,河水浊度与氨氮质量浓度较大。针对具有景观功能的河段对河流造成的破坏,应加强垃圾处理,规范民俗旅游管理,督促经营过程中产生的污染物达标排放;重点监管河流周边化肥使用量,以减少水体污染。

第1、10河段处于人工状态。灰色关联分析结果发现:第1河段关联度是0.789,大于其他3个状态,相关程度最密切。该河段紧邻三家店水库,防洪功能突出但生态功能弱化;河道两岸均为浆砌石护岸,河滨湿地和缓冲带消失,河流两岸的植被遭到大量破坏。第10河段自然性等级最大值为0.759,属于人工状态。该河段周围村庄众多,土地利用类型多为居住和建设用地;河流岸坡结构多为干砌石结构,弯曲度接近于1;水利工程较多,河岸缓冲带受到挤占几乎消失,多用于农业生产,不利于行洪。针对防洪功能的浆砌石干砌石河岸,改善河段的自然性等级难度较大;应在该处河段上、下游做好防洪安全,保护河堤,并且在有条件的河岸创造多样化生境,以提高生物多样性。

4 结论与讨论

河流自然性评价系统是一个典型的、具有模糊性的灰色系统。模糊综合评价和灰色关联分析的结果基本相同,且与河流的实际情况相符合,因此利用这2种方法对永定河北京山峡段河流自然性评价是可行的。2种方法对第3与第17河段评价结果不同,主要原因是模糊综合评价中隶属度矩阵是主观赋值,一定条件下会引起同样的指标体系由于主观意志的不同造成权重不同,最终影响评价结果。在今后的研究中,应根据河流的实际情况和评价目的慎重确定。

本研究较全面地考虑了调查河段的特性,建立了自然性评价指标体系,在评价其自然性的基础上,调查了永定河北京山峡段河流的河床动态变化、岸坡结构、缓冲带植被多样性等25个指标,并确定了其权重系数,这样能科学、合理地控制评价方向,反映出不同河道的保护利用方式下河流自然性受到的影响,达到调查河段的评价状态能尽量客观地反映实际河流状况,但各个河段评价结果与人为对各项指标赋予不同权重或其他因素(气候、土壤等)有关,可能引起结果略有偏差,还有待进一步深入研究。

本研究运用的评价体系是以永定河北京山峡段为背景,在一定程度上拓宽了河流自然性评价研究的思路和方法,但仍有不足。如没有考虑河流评价指标受时间动态的影响;评价指标选取主观性太强,受条件和资料的限制未考虑浮游动植物等。因此,对于不同空间尺度和地域差异的河流来说,河流自然性评价指标、体系构建应根据河流的实际情况进一步筛选、判断。

5 参考文献

- [1] 朱晓博. 城市河流生态修复效果评价:以北京永定河为例[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
ZHU Xiaobo. *Effect Assessment of Urban River Ecological Restoration: Take Beijing Yongding River as A Case*[D]. Beijing: Beijing Forest University, 2015.
- [2] ESTEVEZ E, RODRÍGUEZ-CASTILLO T, ÁLVAREZ-CABRIA M, et al. Analysis of structural and functional indicators for assessing the health state of mountain streams [J]. *Ecol Indic*, 2017, 72: 553 – 564.
- [3] 刘宗平, 刘进琪. 内陆河流健康评价探讨[J]. *水资源保护*, 2007, 23(3): 24 – 26.
LIU Zongping, LIU Jinqi. Assessment on inland river health [J]. *Water Resour Prot*, 2007, 23(3): 24 – 26.
- [4] 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.
FENG Zeshen, GAO Jiarong. Quantitative naturality assessment of the Yanqi River in rural areas of Beijing [J]. *China Rural Water Hydropower*, 2008(10): 14 – 17.

- [5] 高甲荣, 王芳, 朱继鹏, 等. 河溪生态系统自然性评价指标体系[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(5): 66 – 70.
GAO Jiarong, WANG Fang, ZHU Jipeng, *et al.* Assessment indexes of naturalness of stream ecosystem [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, 4(5): 66 – 70.
- [6] 王舒, 高甲荣, 马岚, 等. 湟水河西宁段河流综合自然状况评价[J]. *中国农村水利水电*, 2014(10): 8 – 12.
WANG Shu, GAO Jiarong, MA Lan, *et al.* A comprehensive naturalness assessment of Xining section of Huangshui River [J]. *China Rural Water Hydropower*, 2014(10): 8 – 12.
- [7] 张栋, 张洪江, 马岚, 等. 基于层次-灰色关联分析的河流自然性评价: 以潮河为例[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(3): 95 – 102.
ZHANG Dong, ZHANG Hongjiang, MA Lan, *et al.* Assessment of river naturalness based on grey relational analysis and analytic hierarchy process: a case study of Chaohe River [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2018, 16(3): 95 – 102.
- [8] 王冰洁, 刘朋钢, 杨海龙, 等. 北京山区河流自然性评价系统及其应用[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(4): 67 – 73.
WANG Bingjie, LIU Penggang, YANG Hailong, *et al.* Naturalness evaluation system of rivers in Beijing mountainous areas and its application [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2015, 13(4): 67 – 73.
- [9] TOWNSEND C R, RILEY R H. Assessment of river health: accounting for perturbation pathways in physical and ecological space [J]. *Freshwater Biol*, 1999, 41(2): 393 – 405.
- [10] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 993 – 1001.
DENG Xiaojun, XU Youpeng, ZHAI Luxin, *et al.* Establishment and application of the index system for urban river health assessment [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(4): 993 – 1001.
- [11] 高宇婷, 高甲荣, 顾岚, 等. 基于模糊矩阵法的河流健康评价体系[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 196 – 199, 211.
GAO Yuting, GAO Jiarong, GU Lan, *et al.* An introduction to river health assessment based on fuzzy matrix [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2012, 19(4): 196 – 199, 211.
- [12] 李君. 基于模糊矩阵的河流近自然评价及治理研究: 以怀柔白河为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
LI Jun. *Near-natural Assessment and Control System of Stream Ecosystems Based on the Fuzzy Matrix Assessment: Taking An Example of Bai River*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [13] 汪万芬, 钱东升, 谭绿贵. 改进灰色关联分析法在渭河水环境质量评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(2): 57 – 59.
WANG Wanfen, QIAN Dongsheng, TAN Lügüi. Application of improved grey correlation analysis on water environmental quality assessment of Pihe River [J]. *J Water Res Water Eng*, 2009, 20(2): 57 – 59.
- [14] 王佩, 张定华, 陈冰, 等. 基于模糊综合评价与灰色关联分析法的多工艺方案评价[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(9): 2075 – 2085.
WANG Pei, ZHANG Dinghua, CHEN Bing, *et al.* Evaluation of multi-process plans based on fuzzy comprehensive evaluation and grey relational analysis [J]. *J Aerospace Power*, 2012, 27(9): 2075 – 2085.
- [15] 高甲荣, 冯泽深, 高阳, 等. 河溪近自然评价: 方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [16] KUEMMERLEN M, REICHERT P, SIBER R, *et al.* Ecological assessment of river networks: from reach to catchment scale [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 650: 1613 – 1627.
- [17] 顾斌杰. 永定河(北京段)生态修复及其效果评价[D]. 北京: 清华大学, 2016.
GU Binjie. *Analysis and Effect Evaluation of the Yongding River (Beijing Section) Ecosystem Restoration*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [18] EVERALL N C, JOHNSON M F, WOOD P, *et al.* Comparability of macroinvertebrate biomonitoring indices of river health derived from semi-quantitative and quantitative methodologies [J]. *Ecol Indic*, 2017, 78: 437 – 448.
- [19] GENTILI R, ARMIRAGLIO S, ROSSI G, *et al.* Floristic patterns, ecological gradients and biodiversity in the composite channels (Central Alps, Italy) [J]. *Flora Morph Distrib Funct Ecol Plant*, 2010, 205(6): 388 – 398.
- [20] 郑志宏. 河流健康评价与生态环境需水理论及应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [21] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 622 – 628.
SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, *et al.* Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation [J]. *J Hohai Univ Nat Sci*, 2012, 40(6): 622 – 628.

- [22] 王道平, 王煦. 基于 AHP/熵值法的钢铁企业绿色供应商选择指标权重研究[J]. *软科学*, 2010, **24**(8): 117 – 122.
WANG Daoping, WANG Xu. Research on the green vendor selection index weight of iron and steel enterprises based on AHP and entropy method [J]. *Soft Sci*, 2010, **24**(8): 117 – 122.
- [23] 刘莹昕, 刘飒, 王威尧, 等. 层次分析法的权重计算及其应用[J]. *沈阳大学学报 (自然科学版)*, 2014, **26**(5): 372 – 375.
LIU Yingxin, LIU Sa, WANG Weiyao, *et al.* Computation of weight in AHP and its application [J]. *J Shenyang Univ Nat Sci*, 2014, **26**(5): 372 – 375.
- [24] 王志刚. 北京北部山区河流健康评价及其诊断研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
WANG Zhigang. *The Evaluation and Diagnosis of River Health in Beijing Northern Mountainous Region* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [25] 曹冷然, 李品良, 李深奇, 等. 模糊综合评判与灰色聚类分析在河流健康评价的应用[J]. *环境工程*, 2018, **36**(8): 194 – 197.
CAO Lingran, LI Pinliang, LI Shenqi, *et al.* Application of fuzzy comprehensive evaluation and grey cluster analysis in river healthy evaluation [J]. *Environ Eng*, 2018, **36**(8): 194 – 197.
- [26] 白庆芹, 汪妮, 解建仓, 等. 基于模糊综合评价法的城市河流脆弱性研究[J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(1): 244 – 247.
BAI Qingqin, WANG Ni, XIE Jiancang, *et al.* A study on vulnerability of urban rivers based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2012, **32**(1): 244 – 247.
- [27] 于洪涛, 吴泽宁. 灰色关联分析在南水北调中线澧河水质评价中的应用[J]. *节水灌溉*, 2010(3): 39 – 41.
YU Hongtao, WU Zening. Application of grey relation analysis method in water quality evaluation of Li River for south-to-north water diversion project [J]. *Water Saving Irrig*, 2010(3): 39 – 41.