

# 南川河河流健康评价

康 焯, 高甲荣, 王 曦, 钱斌天, 顾 岚, 王 越

(北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 河流健康评价研究对河流环境的治理与保护具有重要的指导作用。运用模糊层次评价法确定了河流健康系统中各级指标的权重, 然后通过引入可变模糊集理论建立了河流健康评价的模糊层次与可变模糊集(FAHP-VFS)耦合模型。进而以西宁市南川河为例, 利用20个定量、定性指标组成的河流健康评价体系, 从地貌、生态、水文特征3个方面进行了健康评价。结果表明, 南川河总体上处于健康状态, 但有部分河段处于亚健康状态, 因此应进行分段整治。

**关键词:** 健康评价; 模糊层次分析法; 南川河; 可变模糊集; 相对隶属度

**中图分类号:** X321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0073-04

## Health Assessment of Urban River in Extremely Cold Area- A Case Study in Nanchuan River

KANG Ye, GAO Jiarong, WANG Xi, QIAN Birtian, GU Lan, WANG Yue

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** River health assessment plays an important role in guiding the control and protection of river environment. In this paper, fuzzy hierarchy analysis was used to determine the weight of each index in the river health system, and variable fuzzy set theory was introduced to establish an integrated model of fuzzy analytical hierarchy process and variable fuzzy set (FAHP-VFS). The model was applied in the Nanchuan River. Twenty quantitative and qualitative indexes were selected to develop the river health evaluation system, and river health was evaluated from three aspects including geomorphology, ecology, and hydrology. The results showed that the overall Nanchuan River is in a healthy state, but some segments are in a sub healthy state, which suggested that the Nanchuan River needs sectionalized regulations.

**Key words:** health evaluation; fuzzy analytical hierarchy; Nanchuan River; variable fuzzy set; relative membership grade

近些年, 高寒地区人类活动范围急剧扩张, 致使河流日趋枯萎, 河流功能日益衰退。因此, 对河流健康状况进行评价, 保证河流生态系统的健康尤为重要。目前, 国内外关于河流健康的评估办法有预测模型法和指标评价法。预测模型法是通过单一物种对河流健康状况进行比较评价, 此方法忽略了河流的社会功能; 指标评价方法是设置多个评价指标综合评价河流健康<sup>[1]</sup>, 在计算分析方法方面, 过去的研究中模糊综合评价方法<sup>[2]</sup>、系统熵指标分析方法、可拓评价方法等为河流健康评价体系提供了计算工具, 但河流系统作为一个复杂的非线性体系, 单一的评价方法由于自身的局限性很难全面反映河流的安全性态和健康特征, 将不同方法相互融合渗透是弥补单一方法自身缺陷解决河流健康

评价精度的合理思路。本文采用指标评价法, 利用模糊层次与可变模糊集耦合模型对青海省西宁市南川河进行健康评价分析。

## 1 研究区概况

南川河源出青海东境西喇苦特山, 向东北流至青海省西宁市市区内进入湟水河。南川河长49 km, 流域面积398 km<sup>2</sup>, 河宽30 m, 河床由沙砾石组成, 河道落差1176 m, 河道平均比降36‰<sup>[3]</sup>。作为湟水河的主要支流, 南川河对西宁市地表地下水的水源补给、流域内的农田灌溉和生态环境的调整起着至关重要的作用。湟水河流域属高原半干旱气候, 降雨量少而集中, 蒸发量大; 日温差大, 年温差小, 冬季漫长寒

收稿日期: 2013-11-20 修回日期: 2014-04-29 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.016.html>

基金项目: 国际科技合作项目(2009DFA32490)

作者简介: 康焯(1988), 女, 河北深州人, 硕士研究生, 主要从事河流生态研究。E-mail: 1274145046@qq.com

通讯作者: 高甲荣(1963), 男, 陕西韩城人, 教授, 博士生导师, 从事河流生态、水土保持、流域水文、山地灾害等方面研究。E-mail: jiarong\_gao@sohu.com

冷;海拔高,气压低,冻土期长,无霜期短,紫外线强。植被种类稀少,层次单一。本文研究区为南川河上游至湟水河入水口处,由于近年来世界银行贷款项目的实施,南川河污染严重的问题得到了有效的治理。

## 2 评价方法

### 2.1 评价体系建立

本文以西海南川河为研究对象,运用可变模糊集模型,采用模糊层次分析方法确定河流健康评价体系的二级评价体系(表 1)<sup>[45]</sup>,提出以二级隶属度特征值作为评价指标的河流健康模糊层次与可变模糊集耦合模型<sup>[6]</sup>,分别把河流从地貌特征、生态特征、水文特征三方面分别从定量、定性两方面进行评价<sup>[78]</sup>。定量评价主要是对一些可测定具体数据的指标进行评价;定性评价是针对无法测出具体数据的指标,根据现场打分结果进行评价。评价结果一方面可反映南川河流域生态系统状况,其评价指标体系可作为黄河流域城市河流自然性评价的参考;另一方面为青藏高原城市河流未来生态环境建设和可持续发展规划提供了依据。

表 1 河流评价体系

Table 1 River assessment system

一级	序号	二级
地貌特征	1	坡度
	2	弯曲度
	3	水深
	4	水宽
	5	河床材质透水性
	6	平面形态
	7	岸坡结构
生态特征	8	缓冲带植被宽度
	9	缓冲带植物多样性
	10	缓冲带结构的完整性
	11	底栖生物生境条件
	12	岸坡植被覆盖程度
水文特征	13	流速
	14	磷酸盐含量
	15	溶解氧含量
	16	总氮氨含量
	17	pH 值
	18	气味
	19	流速多样性
	20	清澈程度

### 2.2 评价指标调查

2012 年 7 月中旬到 7 月下旬,在南川河城南新区上游王斌堡桥到新安庄桥段进行河段生态健康调查与测定,测定总长度为 13.946 km。以“如遇到生态条件突变地区则加测一点”为原则每 1 km 布设一个点,每个点测定 20 项指标,共测定了 10 个点。测定项目与方法如下:采用卷尺测量河宽、水深、缓冲带植被宽;采用罗盘测量岸坡坡度;缓冲带结构完整性的测定是在典型断面河道两侧设置 1 个 5 m×5 m 的乔灌木样方,然后在其对角线上设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,记

录植物的种类、盖度等特征,随后与未受干扰的河段进行比较,得出其等级值;采用北京中西仪器出品 BD80 的系列野外便携式试剂盒,测溶解氧、氨、氮、磷酸盐含量;定性指标则当场观测记录,根据相关研究成果以及国内外适用标准得出的河流近自然评价标准,进行评价<sup>[9]</sup>。

### 2.3 评价标准与方法

结合专家意见和南川河的实际情况,对一级子系统及二级子系统评价指标两两进行重要性比较,建立模糊互补判断矩阵  $P = p_{ij}$ ,矩阵满足  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ ,  $p_i + p_j = 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n_q)$ 。然后对河流健康安全评价子系统及其评价指标模糊互补判断矩阵进行权重计算。分别得出定量、定性指标的权重。

通过可变模糊集模型建立河流健康的各级定量、定性指标标准值确立区域矩阵  $I_{ab}$ ,建立各评判等级的范围域矩阵  $I_{cd}$ 、点值矩阵  $M_i$  进而计算河流健康样本相对于评价等级的二级相对隶属度矩阵  $\mu_A(u)$ ;根据各级评价指标权重,可得二级、一级、总隶属向量  $v_{\%}(\mu)_h$ ;最后应用级别特征值  $H = (1, 2, \dots, n) v_{\%}(\mu)_h^T$  评价河流样本各级评价指标的健康级别<sup>[9]</sup>,从而建立河流健康评价的 4 级标准:当  $1 \leq H \leq 1.5$  时,河道指标很健康;当  $1.5 < H \leq 2.5$  时,河道指标属于健康;当  $2.5 < H \leq 3.5$  时,河道指标属于亚健康;当  $3.5 < H \leq 4$  时,河道指标属于不健康。最后根据定量、定性指标总体所占权重计算出总体的隶属向量,得出总体评价的应用级别特征值。得出总体评价结果。

## 3 数据分析与评价结果

### 3.1 指标权重计算

结合专家意见和南川河的实际情况,一级子系统的模糊互补判断矩阵为:

$$p = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

二级子系统的模糊互补判断矩阵分别为:

$$p_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.3 \\ 0.6 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix} \quad p_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \quad p_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.5 \\ 0.6 & 0.5 & 0.6 \\ 0.5 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_5 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.5 \\ 0.7 & 0.5 & 0.7 \\ 0.5 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \quad p_6 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据文献[11]推导出的求解公式,对河流健康安全评价子系统及其评价指标模糊互补判断矩阵进行权重计算:

$$\omega_i = \left[ \sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right] / [n(n-1)] \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

得出各指标权重见表 2 和表 3。

表 2 河流健康评价定量指标权重

Table 2 Weights of quantitative indexes in the river health evaluation system

一级评价指标	一级权重	二级评价指标序号	二级权重
地貌特征	0.2833	1	0.250
		2	0.217
		3	0.283
		4	0.250
生态特征	0.3333	8	0.550
		9	0.450
		13	0.165
		14	0.190
		15	0.215
水文特征	0.3833	16	0.215
		17	0.215

表 3 河流健康评价定性指标权重

Table 3 Weights of qualitative indexes in the river health evaluation system

一级评价指标	一级权重	二级评价指标序号	二级权重
地貌特征	0.2833	5	0.317
		6	0.367
		7	0.317
生态特征	0.3333	10	0.300
		11	0.400
		12	0.300
		18	0.383
水文特征	0.3833	19	0.283
		20	0.333

### 3.2 相对隶属度计算

#### 3.2.1 南川河定量评价

这里以评价指标地貌特征的相对隶属度为例,对计算过程予以说明。根据表 1 地貌特征指标的二级评价指标及评价等级,建立指标标准值区域矩阵  $I_{ab}$ ,进而建立各评判等级的范围域矩阵  $I_{c,d}$ 、点值矩阵  $M$ :

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [0, 15] & [15, 30] & [30, 45] & [45, 50] \\ [2, 5, 3] & [2, 2, 5] & [1.2, 1] & [0, 1.2] \\ [3, 10] & [2, 5, 3] & [1.2, 2, 5] & [0, 1.2] \\ [4, 12] & [2, 8, 4] & [1.5, 2, 8] & [0, 15] \end{bmatrix} = [a_{ih}, b_{ih}]$$

$$I_{c,d} = \begin{bmatrix} [0, 30] & [0, 45] & [15, 50] & [30, 50] \\ [2, 3] & [1.2, 3] & [0, 2.5] & [0, 2] \\ [2.5, 10] & [1.2, 10] & [0, 3] & [0, 2.5] \\ [2.8, 12] & [1.5, 12] & [0, 4] & [0, 2.8] \end{bmatrix} = [c_{ih}, d_{ih}]$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 22.5 & 37.5 & 50 \\ 3 & 2.25 & 1.6 & 0 \\ 10 & 2.75 & 1.85 & 0 \\ 12 & 3.4 & 2.15 & 0 \end{bmatrix} = [M_{ih}]$$

根据表中地貌特征指标的各样本现状值,利用公式

$$\mu_{\%}^A(x_i)_n = 0.5(1 + \frac{x_i - a_{ih}}{M_{ih} - a_{ih}}); x_i \in [a_{ih}, M_{ih}] \quad (2)$$

$$\mu_{\%}^A(x_i)_n = 0.5(1 + \frac{x_i - a_{ih}}{c_{ih} - a_{ih}}); x_i \in [c_{ih}, a_{ih}] \quad (3)$$

$$\mu_{\%}^A(x_i)_n = 0.5(1 + \frac{x_i - b_{ih}}{M_{ih} - b_{ih}}); x_i \in [M_{ih}, b_{ih}] \quad (4)$$

$$\mu_{\%}^A(x_i)_n = 0.5(1 + \frac{x_i - b_{ih}}{c_{ih} - b_{ih}}); x_i \in [b_{ih}, d_{ih}] \quad (5)$$

可得到指标的二级隶属度矩阵:

$$\mu_{\%}^A(x_i)_n = \begin{bmatrix} 0.25 & 1 & 0.76 & 0 \\ 0 & 0.9375 & 0.625 & 0.4583 \\ 0.7518 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9269 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

运用公式计算地貌特征评价指标的非归一化综合相对隶属度向量:

$$\mu_{\%}^A(\mu)_h = \left\{ 1 + \left[ \frac{\sum_{i=1}^n [\omega_i (1 - \mu_{\%}^A(x_i)_h)]^p}{\sum_{i=1}^n [\omega_i \mu_{\%}^A(x_i)_h]^p} \right]^{\frac{1}{p}} \right\}^{-1} \quad (6)$$

通过计算发现公式(6)中可变模型参数  $a$  和  $r$  的选取对河流健康的评价结果没有影响,因此本文仅以  $a=1, r=1$  为例,计算地貌特征评价指标的非归一化综合相对隶属度向量为(0.5070, 0.4534, 0.3231, 0.0995),进行归一化后一级隶属度向量为(0.3666, 0.3279, 0.2336, 0.0719)。

同理可求出其他 2 个一级评价指标的各级隶属度向量,限于篇幅不再赘述。经计算,一级评价指标的归一化相对隶属度向量为:

$$v_{\%}^A(\mu)_h = (0.2326, 0.3202, 0.2527, 0.1943)$$

根据上文提到的应用级别特征值  $H$  计算方法,得出南川河 10 个河段各指标的健康定量评价结果(如图 1)。

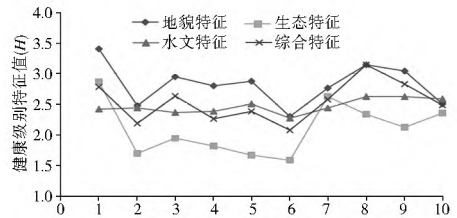


图 1 定量评价对比

Fig. 1 Comparison of quantitative evaluation

#### 3.2.2 南川河定性评价

依据定性评价标准及定量评价的方法,采用专家打分法,可得到定性评价的归一化隶属度,进而根据定性评价标准(很健康 6~8 分;健康 4~6 分;亚健康 2~4 分;不健康 0~2 分),得到 10 个河段不同指标的定性评价健康级别特征值 ( $H$ ) (图 2)。

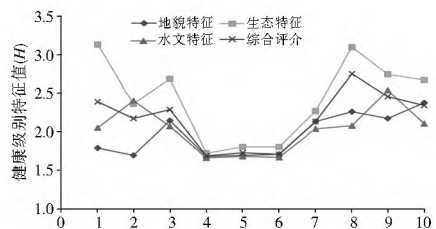


图 2 定性评价对比

Fig. 2 Comparison of qualitative evaluation

### 3.2.3 南川河总体评价

根据专家打分法,及实际情况,南川河定量、定性指标综合所占权重分别为 0.5。结合上述方法,计算出总体的隶属向量,得出总体评价的应用级别特征值( $H$ ),南川河总体评

价结果见表 4。

### 3.3 南川河评价结果分析

根据监测数据、实地调查结果并结合上述评价方法,计算出 10 个调查河段及总体的健康度,结果显示,南川河 10 个

表 4 河流健康综合隶属度\指标特征值及评价等级

Table 4 Comprehensive membership\characteristic value and evaluation grade for river health evaluation

一级评价指标	归一化相对隶属度				一级评价指标特征值	评价等级
	很健康	健康	亚健康	不健康		
地貌特征	0.210 2	0.321 4	0.280 0	0.176 1	2.397 5	健康
生态特征	0.241 5	0.363 0	0.283 1	0.112 3	2.266 3	健康
水文特征	0.293 7	0.320 8	0.228 2	0.157 3	2.249 0	健康
综合评价	0.235 0	0.338 7	0.264 7	0.161 6	2.352 9	健康

河段定量评价中 5 个地段处于亚健康状态,5 个地段处于健康状态。定性评价中有 1 个地段处于亚健康状态,有 9 个地段处于健康状态,其中有 3 个地段接近亚健康状态。南川河的健康总体得分为 2.3529 分,属于健康状态,表明流域治理卓有成效,但是考虑到仍有部分地段处于亚健康状态,需要采取针对性的保护措施。

实地观测得知,处于健康状态的河段位于河流中游,生态措施运用较多,工程措施较少的河段,应当继续保持。处于亚健康状态的河段位于上游河流治理工程的初始段和下游居民活动地段,由于社区居民丢弃垃圾,排放生活污水,导致河段生态系统遭到一定程度的破坏;裸露的浆砌石护岸河段破坏了生态,也影响了美观。

## 4 结语

根据西宁市南川河特点,本文用模糊层次评价法确定河流健康系统各级指标的权重,引入可变模糊集理论建立河流健康评价的模糊层次与可变模糊集(FAHP VFS)耦合模型,建成了高寒地带城市河流健康评价体系。

通过对定性评价指标和定量评价指标两种评价指标实地调查,运用模糊层次与可变模糊集耦合模型,对南川河健康状态做出了评价,结果认为南川河总体处于健康状态,但仍有部分地段处于亚健康状态,需要进一步整治。评价结果可为南川河生态整治提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 王宏伟,张伟,杨丽坤,等. 中国河流健康评价体系[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2011, 31(6): 668-672. (WANG Hong wei, ZHANG Wei, YANG Li kun, et al. Outline of Research on Rivers Health Evaluation System[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 2011, 31(6): 668-672. (in Chinese))
- [2] Gregor S. An Integrated geographic information system approach for modeling the sustainability of conifer habit in an alpine environment[J]. Geomorphology, 1998, 3/4: 265-280.
- [3] 刁玉美. 南川河水质评价及污染防治对策[J]. 青海科技, 2009, (4): 115-118. (DIAO Yu mei. Water Quality Assessment and Pollution Control Measures of River in Nanchuan[J]. Science and Technology of Qinghai, 2009, (4): 115-118. (in Chinese))
- [4] 顾岚,高甲荣,刘瑛,等. 北京郊区河流自然性评价——以汤河为例[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 165-170. (GU Lan, GAO Jia rong, LIU Ying, et al. Assessment of River Naturalness in Beijing Suburb—Taking Tanghe River as an Example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 165-170. (in Chinese))
- [5] 高甲荣,冯泽深,高阳,等. 河溪近自然评价方法与应用[M]. 中国水利水电出版社, 2010: 70-74. (GAO Jia rong, FENG Ze shen, GAO Yang, et al. Near Natural Stream Assessment and its Application[M]. China Water Power Press, 2010: 70-74. (in chinese))
- [6] 秦鹏,王英华,王维汉,等. 河流健康评价的模糊层次与可变模糊集耦合模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(12): 2169-2175. (QIN Peng, WANG Ying-hua, WANG Wei han, et al. Intergrated Model of Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Variable Fuzzy Set Model on Evaluating River Health System[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(12): 2169-2175. (in Chinese))
- [7] 盖永伟,黄昌硕. 河流功能评价指标体系及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 3(11): 42-47. (GAI Yong-wei, HU ANG Chang shuo. River Function Evaluation Index System and Its Application[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 3(11): 42-47. (in Chinese))
- [8] 高阳,高甲荣,陈子珊,等. 河溪近自然治理评价指标体系探讨以及应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 404-407. (GAO Yang, GAO Jia rong, CHEN Zi shan, LIU Ying. Dissussion of Near Natural Stream Control Assessment System and Its Application[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 404-407. (in Chinese))
- [9] 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 Yu ting, GAO Jia rong, GU Lan, et al. An Introduction to River Health Assessment Based on Fuzzy Matrix[J]. Research of soil and Water Conservation, 2012, 19(4): 196-199, 211. (in Chinese))
- [10] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005. (CHEN Shouyu. Variable Fuzzy Set Theory and Method of Water Resources and Flood Control System[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [11] 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): 311-314. (XU Ze shui. Algorithm for Priority of Fuzzy Complementary Judgement Matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4): 311-314. (in Chinese))