

# 五元联系数在黄河健康评价中的应用

王慧<sup>1</sup>, 毛晓敏<sup>1</sup>, 尚松浩<sup>2</sup>, 董锋<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 3. 中国水利水电建设集团公司, 北京 100044)

**摘要:** 河流健康系统是由众多不确定性和复杂性因素组成的, 五元联系数是集对分析中同异反联系数的推广, 它可更深入地分析系统中的各种不确定性。用层次分析法确定指标权重, 从主客观两方面定量计算河流健康程度, 将五元联系数应用于黄河健康系统的评价, 用联系度可描述评价对象与评价标准之间的关系, 其结果简便直观, 能清晰地反映评价对象和评价标准间的联系。得到河流健康评价等级为“亚健康”, 其结果与有序度熵的河流健康评价方法所得结果一致。

**关键词:** 河流健康; 集对分析; 五元联系数; 层次分析法; 黄河

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2010)01-0001-04

## Application of Five-element Connection Number to Health Evaluation of the Yellow River

WANG Hui<sup>1</sup>, MAO Xiao-min<sup>1</sup>, SHANG Song-hao<sup>2</sup>, DONG Feng<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
2. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
3. Sinohydro Corporation, Beijing 100044, China)

**Abstract:** River health assessment system consists lots of uncertainty and complexity. Five-element connection number is the improvement of the identical, discrepancy and contrary connection number in set pair analysis theory, which can be more thoroughly used for system uncertainty analysis. Analytic Hierarchy Process (AHP) is applied to determine the weights so that the health degree of river can be calculated from the objective and subjective evaluations. In this paper, the health condition of Yellow River is assessed using the five-element connection number, which can clearly describe the relationship between evaluated object and evaluation criterion. The results showed that the health degree of this river was Sub-health and consistent with the other methods such as system order degree entropy.

**Key words:** river health; set pair analysis; five-element connection number; hierarchy analytic process; Yellow River

## 0 引言

20世纪80年代后,人类对生存环境和资源问题的关注,推动了生态系统健康理念的形成和发展,对河流水生生物和生态系统的强调,促使了河流健康概念的产生<sup>[1-3]</sup>。

河流生态系统健康评价方法众多,但从原理上主要可分为两类<sup>[4,5]</sup>:一类是预测模型(Predictive

models)方法,如RIVPACS和AUSRIVAS等;另一类方法称为综合指标评价法,主要有IBI、REC、ISC、RHS、RHP等<sup>[6,7]</sup>。预测模型法是一种快速生物评价法,通过单一物种对河流健康状况进行比较评价具有一定的局限性。综合指标评价法较全面地反映了河流的各个方面,是河流健康评价指标的发展方向,同时综合指标评价法也存在评价过程复杂、资料不易收集等缺点。本文引用了五元联系数的集

收稿日期:2009-11-10; 修回日期:2009-12-20

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0059, NCET-07-0814);北京市重点学科“水文学及水资源”建设项目资助

作者简介:王慧(1987-),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。

通讯作者:毛晓敏(1971-),女,山东菏泽人,副教授,博士,主要从事水文水资源及水环境教学与研究工作。

对分析理论,增加了不确定性因素分析的准确性,将评价指标等级标准按区间划分更加合理,并结合层次分析法定量的计算出河流健康程度。

# 1 基于五元联系数的河流健康评价方法

## 1.1 五元联系数原理

五元联系数是集对分析中同异反联系数的一种推广<sup>[8]</sup>,将部分细分为偏同异和偏反异,增强了其完整性和有效性,能更准确地分析系统中的不确定信息<sup>[9]</sup>。其表达式可写为<sup>[8,10]</sup>:

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_4 + c_j \tag{1}$$

式中:同一度  $a \in [0, 1]$ ; 差异度  $b \in [0, 1]$ ; 对立度  $c \in [0, 1]$ ; 且满足  $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$ ;  $i \in [-1, 1]$ ;  $j \in [-1, 1]$ ; 有时  $i, j$  不取任何值,仅作一种标记。

设有  $n$  个评价指标,将第  $m$  级标准等级的  $n$  个指标组成一个集合  $A = [S_{m1}, \dots, S_{m2}, \dots, S_{mn}]$ ,将评价对象的  $n$  个指标组成一个集合  $B = [x_1, \dots, x_t, \dots, x_n]$ ,这两个集合构成一个集对  $(A_m, B)$ 。为简便又不失一般性,设  $B = [x_1, \dots, x_m, \dots, x_n]$  均为效益型指标,比较集对中各对应项  $S_{mt}$  和  $x_t$ 。

## 1.2 河流健康评价

通过专家咨询、各评价指标的“河流健康”等级标准分为 1 ~ 5 级,分别对应于“很健康”、“健康”、“亚健康”、“不健康”和“病态”5 个级别<sup>[6,11]</sup>。根据上文设定评价属性空间  $A = \{\text{河流健康评价等级}\}$ ,对象空间  $B = \{\text{河流健康评价指标}\}$ ,  $m(1 \leq m \leq 5)$  代表一级子系统<sup>[12]</sup>,从而建立一级、二级子系统及总指标的河流健康复杂系统评价的五元联系度  $\mu(A \sim B)$ ,进一步分析河流健康评价系统分级标准与评价指标之间的数量关系。具体步骤<sup>[12]</sup> 如下:

(1) 现采用如下方法确定联系度中的  $a, b_1, b_2, b_3, c$  的值。若指标值处于评价级别中,则  $a = 1, b_1 = b_2 = b_3 = c = 0$ ; 若指标值处于相邻的级别中,则  $c = 0$ , 指标值越靠近本评价等级则  $a$  越大,反之  $c$  越大; 若指标所处的评价等级与本评价等级相隔一个等级,则  $a = 0, c = 0$ , 距本评价等级越远则  $b_2$  越大,反之  $b_1$  越大; 若指标值所处的评价等级与本评价等级相隔 3 个或 3 个以上等级,则  $c = 1, a = b_1 = b_2 = b_3 = c = 0$ <sup>[9]</sup>。

评价等级的指标中包括多种类型的指标,可均转换为效益型指标后再进行分析,式(2)给出了河流健康二级子系统相对于 1 级标准的联系度计算方

法,分别计算各个指标相对于 1 级标准的联系度的参数  $a, b_1, b_2, b_3, c$ 。

$$\mu_m = \left\{ \begin{aligned} &1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, \quad x_t \in [S_{m1}, +] \\ &\frac{S_{m2} S_{m1}}{(S_{m2} + S_{m1}) x_t} + \frac{(S_{m1} - x_t)(x_t - S_{m2})}{(S_{m2} + S_{m1}) x_t} i_1 + \\ &\frac{x_t}{S_{m2} + S_{m1}} i_2 + 0i_3 + 0j, \quad x_t \in [S_{m2}, S_{m1}] \\ &0 + \frac{S_{m3} S_{m2}}{(S_{m3} + S_{m2}) x_t} i_1 + \frac{(S_{m2} - x_t)(x_t - S_{m3})}{(S_{m3} + S_{m2}) x_t} i_2 + \\ &\frac{x_t}{S_{m3} + S_{m2}} i_3 + 0j, \quad x_t \in [S_{m3}, S_{m2}] \\ &0 + 0i_1 + \frac{S_{m4} S_{m3}}{(S_{m4} + S_{m3}) x_t} i_2 + \frac{(S_{m3} - x_t)(x_t - S_{m4})}{(S_{m4} + S_{m3}) x_t} i_3 + \\ &\frac{x_t}{S_{m4} + S_{m3}} j, \quad x_t \in [S_{m4}, S_{m3}] \\ &0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j, \quad x_t \in [0, S_{m4}] \end{aligned} \right. \tag{2}$$

式中:  $S_m$  分别为评价标准各级的门限值;  $x_t$  为评价指标的特征值。

(2) 河流健康质量的一级子系统的综合评价五元联系数为:

$$\mu_m = r_{m1} + r_{m2} i + r_{m3} i_2 + r_{m4} i_3 + r_{m5} j \tag{3}$$

式中:  $r_{ml} = \sum_{q=1}^{p_l} w_{mq} r_{mql}, (1 \leq l \leq 5)$ ,  $q$  为  $m$  各子系统下第  $q$  个属性指标,  $p_l$  为各个一级系统下包含的二级指标个数,  $w_{mq}$  为二级子系统指标的权重,  $r_{m1}, r_{m2}, r_{m3}, r_{m4}, r_{m5}$  分别为各级指标的相关系数。

(3) 河流健康的总指标综合评价五元联系数为:

$$\mu = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + r_4 i_3 + r_5 j \tag{4}$$

式中:  $r_l = \sum_{m=1}^5 w_m r_{ml}, (1 \leq l \leq 5)$ ,  $w_m$  为一级系统综合权重,  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  代表评价等级的联系度参数。

(4) 同理可以计算出各指标值相对于 2 级、3 级、4 级和 5 级标准的联系度参数。根据联系度的大小判别河流健康所属等级。

# 2 模糊五元联系度在黄河健康评价中的应用

## 2.1 指标体系的建立

健康的黄河应具有健康的干流与支流,拥有健康的河源、上游、中游、下游及河口段,还应具有健康的流域社会经济与自然生态系统,健康的干流、支流



与河段是其表征,健康的流域生态系统是保证其健康的基础,几方面共同构成黄河健康框架体系<sup>[13]</sup>。黄河水利委员会在指标设置方面基本限定在“河流、河道”的范围内,强调“维持其自身生态平衡的基本水量”,通过分析人类和河流生态系统的生存需求,认为连续的河川径流、通畅安全的水沙通道、良好的水质、良性运行的河流生态系统和一定的供水能力是现阶段健康黄河的标志<sup>[14]</sup>。本文将黄河健康系统分为河流形态、河流生态、河流环境、河流对

人类支撑、河流对洪水容纳五个方面共 15 个指标。各指标的等级标准一般根据各个指标的具体情况来确定。可以参照多目标规划中的功效系数法来确定<sup>[15]</sup>,或根据取值范围上下限的算术平均值(用于上下限差别不大的情况)或几何平均值(用于上下限差别较大的情况)来得到。根据文献<sup>[16]</sup>中的数据范围,运用几何平均法进行分级,黄河健康指标体系评价等级及分界点见表 1。

表 1 黄河健康系统评价指标体系及等级标准 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/s, 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>

一级指标	二级指标	各指标等级标准					评价指标现状值 <sup>[16]</sup>
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	
河流形态	黄河下游汛期输沙水量(利津断面)	> 130	130 ~ 70	70 ~ 35	35 ~ 20	< 20	17
	黄河下游平滩流量	> 4550	4550 ~ 3450	3450 ~ 2600	2600 ~ 2000	< 2000	2200
	宁蒙河段平滩流量	> 3600	3600 ~ 2600	2600 ~ 1900	1900 ~ 1400	< 1400	1000
河流生态	黄河上游非汛期最小流量(河口镇断面)	> 260	260 ~ 150	150 ~ 90	90 ~ 50	< 50	31
	黄河上游非汛期水量(河口镇断面)	> 210	210 ~ 145	145 ~ 100	100 ~ 70	< 70	94
	黄河下游非汛期最小流量(利津断面)	> 190	190 ~ 120	120 ~ 80	80 ~ 50	< 50	30
	黄河下游非汛期水量(利津断面)	> 110	110 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 40	< 40	31
	湿地面积(以河口自然保护区核心区淡水湿地为表征)	> 6	6 ~ 5	5 ~ 4	4 ~ 3	< 3	2.5
水环境	上游河段	~				劣	类
	中游河段	~				劣	类
	下游河段	~				劣	类
对人类支撑	流域国民经济耗用地表水量	> 400	400 ~ 355	355 ~ 315	315 ~ 280	< 280	290
	流域国民经济耗用地下水	> 140	140 ~ 125	125 ~ 115	115 ~ 110	< 110	130
对洪水容纳	宁蒙河段防洪能力	> 5900					5900
	下游防洪能力	> 22000					22000

### 2.2 指标权重的确定

根据各评价指标在最终评价结果所占比重的不同,本文利用层次分析法<sup>[15]</sup>确定指标的权重  $w_j$ 。黄河水患始终是中华民族的心腹之患,能否保证黄河具有足够大的排洪能力而使洪水不致灾,是人类对黄河的第一期望;良好的水质则是维持人类生命和健康安全的关键环节;水是人类生存和发展的基本条件,经济发展往往在很大程度上依赖于水量保障程度,但黄河的供水能力是有限的,人们不能期望它满足自己无限的要求<sup>[17]</sup>。

根据此顺序,两两比较法对一级评价指标建立判断矩阵见表 2。

判断矩阵最大特征值  $\lambda_{max} = 5.1965$ ,可用如下的一致性指标来衡量判断矩阵的不一致程度<sup>[15]</sup>:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) = 0.049125$$

查表得 5 阶平均随机一致性指标  $IR = 1.12$ ,所以判断矩阵的随机一致性比率  $CR = CI / RI =$

$0.04386 < 0.1$ ,通过一致性检验。最终将对应于  $\lambda_{max}$  的特征向量归一化后作为 5 个一级指标的权重,见表 3。

表 2 一级指标判断矩阵

指标	河流形态	河流水生生态	水环境	对人类的支撑	对洪水的容纳
河流形态	1	2	1	2	1/2
河流水生生态	1/2	1	1	1/2	1/2
水环境	1	1	1	2	1/2
对人类支撑	1/2	2	1/2	1	1/2
对洪水容纳	2	2	2	2	1

### 2.3 评价结果

根据式(2)、(3)黄河健康评价一级指标的综合评价五元联系数见表 3。

将一级指标对应项加权相加,用式(4)计算总指标对 1 级标准的五元联系数

$$\mu_i = 0.3601 + 0.0950i_1 + 0.1213i_2 +$$

$$0.0957i_3 + 0.3280j$$

同理得到对于2级、3级、4级和5级标准的五元联系数分别为:

$$\mu_2 = 0.3297 + 0.0853i_1 + 0.2571i_2 + 0.1447i_3 + 0.1833j$$

$$\mu_3 = 0.3123 + 0.1624i_1 + 0.1807i_2 + 0.3447i_3 + 0j$$

$$\mu_4 = 0.2650 + 0.0981i_1 + 0.4396i_2 + 0.0360i_3 + 0.1614j$$

$$\mu_5 = 0.3293 + 0.0957i_1 + 0.1212i_2 + 0.0950i_3 + 0.3588j$$

表3 一级指标相对于1级的五元联系数

一级指标	一级指标的权重向量	对于1级标准的五元联系数
河流形态	0.2140	$\mu_{11} = 0.1713i_2 + 0.0026i_3 + 0.8261j$
河流水生态	0.1267	$\mu_{12} = 0.0876i_2 + 0.0018i_3 + 0.9106j$
河流水环境	0.1897	$\mu_{13} = 0.5i_1 + 0.5i_3$
河流对人类支撑	0.1469	$\mu_{14} = 0.2540 + 0.0007i_1 + 0.5009i_2 + 0.0007i_3 + 0.2437j$
对洪水容纳力	0.3228	$\mu_{15} = 1.00$

根据以上评价结果,评价年份相对于1级、5级的同一度均小于对立度,而相对于2、3、4级的同一度均大于对立度,且相对于3级标准(亚健康)的同一度与对立度之差最大。如果将偏同差异度、偏反差异度均视为差异度(三元联系数),则相对于3级标准的联系数最大,评价结果为3级,属于亚健康状态。按五元数来考虑,根据“均分原则”<sup>[14]</sup>,令  $i_1 = 0.5, i_2 = 0, i_3 = -0.5, j = -1$ , 得到黄河相对于很健康、健康、亚健康、不健康和病态的联系数分别为0.0318、0.1167、0.2212、0.1346、-0.0291, 则评价年份黄河健康状况仍属于3级,处于亚健康状态,与文献[16]中采用有序度熵法得到的河流健康评价结果基本一致。

### 3 结 语

(1) 本文在综合前人的研究基础上,利用改进的五元联系数法计算黄河健康评价中的不确定性因素,五元联系数把异分为偏同异和偏反异使得其比三元联系数更有准确、更合理,此方法适用于已知等级评价标准的其它综合评价问题<sup>[18]</sup>,并结合层次分析法将不同层次的信息综合处理,等级标准的区间

划分更加合理,得到较准确的结果。

(2) 从结果看黄河正出于亚健康状态,从子系统看,河流生态、形态和水环境处于严重阶段,亟待治理的地步,应结合各段实际情况进行治理解决。

### 参考文献:

- [1] Norris R H, Thoms M C. What is River Health[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 197 - 207.
- [2] Karr J R. Defining and Measuring River Health[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 221 - 234.
- [3] Boulton A J. An Overview of River Health Assessment: Philosophies, Practice, Problems and Prognosis [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 469 - 479.
- [4] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. *水利水电技术*, 2005, 36(11): 15 - 19.
- [5] 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.
- [6] 殷会娟, 冯耀龙. 河流生态环境健康评价方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2006, (4): 55 - 57.
- [7] 蔡守华, 胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2008, 28(1): 32 - 72.
- [8] 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.
- [9] 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 - 53.
- [10] 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.
- [11] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 等. 健康河流的评价指标和评价标准[J]. *水利学报*, 2006, 37(3): 253 - 258.
- [12] 赵彦伟, 杨志峰, 姚长青. 黄河健康评价与修复基本框架[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 131 - 134.
- [13] 刘晓燕, 张建中, 张原锋. 黄河健康生命的指标体系[J]. *地理学报*, 2006, 61(5): 451 - 460.
- [14] 胡晓雪, 杨晓华, 郦建强, 等. 河流健康系统评价的集对分析模型[M]. *系统工程理论与实践*, 2008, (5): 164 - 176.
- [15] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [16] 王煜. 黄河健康状况评判方法的探讨[C]// 第三届黄河国际论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2007: 39 - 44.
- [17] 刘晓燕, 张原锋. 健康黄河的内涵及其指标[J]. *水利学报*, 2006, 37(6): 649 - 661.
- [18] 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.