DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2016. 02. 23

基于投影寻踪 - 可拓集合理论的河流健康评价

王 蔚[1], 徐 昕[2a], 董 壮[2a], 胡 涛[3], 闫 峰[2b]

(1. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 a. 水利水电学院; b. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;3. 长江水利委员会 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘　要: 目前对河流健康的评价方法越来越繁多,其中较多方法过分依赖于专家咨询意见,无法客观和准确地反映河流健康的实际状况。为消除由于人为主观臆断性对评价结果造成的偏差,本文将投影寻踪法和可拓集合理论进行尝试性结合,提出了投影寻踪 - 可拓集合理论这一新的河流健康评价模型。并运用此模型对太湖流域湖州市区四个年份序列的河流健康状况进行了评价。结果表明:湖州市区河流在 1991 年处于"很健康"(Ⅰ 等)状态,2001 年处于"健康"(Ⅱ 等)状态,在 2006 年和 2010 年河流健康状况持续恶化,处于"病态"(Ⅴ 等)。通过与同样客观的评价方法熵权物元模型进行比对,评价结论完全一致。投影寻踪 - 可拓集合理论最大程度地克服了评价过程的主观性,深入地分析和挖掘数据信息中的贡献度大小,不失为平原河网甚至全国流域的河流健康评价提供了一种新的思路和方法。

关键词: 河流健康; 投影寻踪 - 可拓集合;河流健康评价; 浙江湖州市

中图分类号:X824　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672- 643X(2016)02- 0122- 06

Assessment of river health based on projection pursuit – extension set theory

WANG Wei[1], XU Xin[2a], DONG Zhuang[2a], HU Tao[3], YAN Feng[2b]

(1. *Jiangsu Provincial Bureau of Water Conservancy Construction*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *a. College of Water Conservancy and hydropower Engineering*; *b. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 3. *Yangtze River Scientific Research Institute*, *Wuhan* 430010, *China*)

Abstract: There are more and more methods for the assessment of river health at present, but many methods rely too much on expert advice, which can't reflect the situation of river health objectively and accurately. In order to eliminate the errors due to human subjective evaluation, This paper attempted to combine the projection pursuit cluster and extenics muster theory to propose a new model of river health evaluation which based on projection pursuit-extension set theory. The paper used this model to evaluate the health of Huzhou in Taihu River basin for sequence of four years. The results show that the river health of Huzhou city is at a "very healthy" (Class I) level in 1991, and "healthy" (Class Ⅱ) level in 2001, the river health continued to deteriorate in 2006 and 2010 which is at "sick" (Class Ⅴ) level. By comparing the same objective evaluation method of entropy weight matter – element model, The result is in fully consistent with evaluation findings. Projection pursuit-Extension set theory overcome the subjectivity of evaluation process to the greatest extent possible, deeply analyzed and unearthed contribution degree size among data and information. The method provides a new way of thinking and method for the assessment of river health even in plain river basin.

Key words: river health; projection pursuit – extension set; river health; assessment; Huzhou of Zhejiang Province

1 研究背景

河流水系是陆地最活跃、最重要的水循环路径,也是陆地和海洋进行物质和能量交换的主要通道。近年来大量水利工程的建设,严重影响着天然河流的水文地貌条件,造成河流生态系统退化,甚至出现

收稿日期:2015- 09- 29;　**修回日期**:2015- 12- 20

作者简介:王 蔚(1975-),男,江苏姜堰人,硕士,副调研员,主要从事水利工程建设管理方面的工作。
通讯作者:董 壮(1973-),男,天津人,博士,讲师,研究方向为计算流体力学、环境水力学。

断流,并对河流及其周边生态环境造成巨大影响。随着生活条件的不断改善和对河流健康重要性认识的提高,人们对河流综合功能的实现提出了越来越高的要求。1989 年,美国环保署(EPA)发表了快速生物评价协议,为用生物群落资料作为生态系统健康指标提供技术框架[1]。1990 年,环保署(USEPA)启动了环境检测相关的一系列评价计划(EMAP)[2],用于监测和评价河流和湖泊的状态和趋势。当前我国关于河流健康的研究还处于起步阶段,系统的研究方法还未形成,众多研究人员提出评价准则和标准制定以及实施的迫切性,以切实开展河流健康的评价工作[3]。

河流健康评价方法种类繁多,各具优势,应注重方法的相互结合、互为补充以及综合应用,才能取得科学和准确的评价结果。同时,评价的准确还取决于资料数据的可靠性,在获取原始数据后,如何通过基于对河流的全面认识和深刻理解来合理运用原始数据进行客观评价、对生态环境特点及各要素之间内在联系进行详细调查,均是成功评价的关键。传统的层次分析法、模糊综合评判和灰色理论等均在一定程度上依赖于专家的咨询意见,投影寻踪 - 可拓集合理论完全摒弃了依赖专家打分咨询的传统方法,在计算过程中,先通过投影寻踪将高维原始数据转化为低维数据,探索数据信息中各指标的贡献度大小,从而确定指标权重;再将确立的权重融入到可拓集合理论,可拓集合理论在解决不相容的复杂问题有具大优势[4],适用于河流健康这一涉及内容较广、影响因素较多的跨领域研究。

本文将投影寻踪 - 可拓集合应用于太湖流域的湖州市区河流,并结合湖州河流的实际情况,选取 5 个要素 9 个详细指标建立了湖州市区河流健康评价体系,结果显示,湖州市区河流在 1991 年处于“很健康”(Ⅰ等)状态,2001 年处于“健康”(Ⅱ等)状态,在 2006 年和 2010 年河流健康状况持续恶化,处于“病态”(Ⅴ等),评价结论接近真实情况,说明投影寻踪 - 可拓集合理论准确而客观。

2　投影寻踪法

通过投影寻踪法[5]去分析和观察原始数据,以最大程度寻求和挖掘数据的信息和特征,每一组数据均反映了整体数据的一部分特征。本文运用投影寻踪法探索原始数据中各因子之间的贡献度大小,以此客观而准确的求得评价指标对应的计算权重。投影寻踪法的计算步骤如下:

2.1　数据归一化和标准化

为了将各种单位不同、数量级别差异的原始数据统一起来,首先应将原始数据进行归一化和标准化,计算公式为:

对于高优或者正向指标:

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{ij} - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \tag{1}$$

对于低优或者负向指标:

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{\max}(j) - x_{ij}}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \tag{2}$$

式中:x_{ij} 为评价因子的指标值;x_{ij}^{*} 为归一化和标准化后的数值;$x_{\max}(j)$ 和 $x_{\min}(j)$ 分别为数据集中第 j 个评价指标值的最大值和最小值;n 为评价指标数目。

2.2　数据综合特征值的确立

将处理后的数据按照一定的方向进行投影,使每个待评研究对象都只得到一个反映其数据信息和特征的值。假定沿着 $a = (a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n)$ 的方向进行投影,则存在:

$$z_i = \sum_{i=1}^{n} a_i x_{ij} \tag{3}$$

式中:x_{ij} 为评价因子的指标值;a_i 为投影方向;z_i 为投影方向的一维投影值,即数据向量。

2.3　构造投影目标函数

假定投影目标函数为 $Q(a)$,则:

$$Q(a) = \mathrm{dis}(a) * \mathrm{den}(a) \tag{4}$$

式中:$\mathrm{dis}(a)$ 表示类间距离,即投影值 z_i 的标准差;$\mathrm{den}(a)$ 表示类内密度,即投影值 z_i 的局部密度;$\mathrm{dis}(a)$ 和 $\mathrm{den}(a)$ 的计算公式如下:

$$\mathrm{dis}(a) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (z_i - \bar{z}_a)^2 / (n-1)} \tag{5}$$

$$\mathrm{den}(a) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} (R - r_{ik}) f(R - r_{ik}) \tag{6}$$

$$r_{ik} = | z_i - z_k | \tag{7}$$

式中:$\bar{z}_a$ 是 $z_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 的均值;R 为密度窗宽,由数据特征确定;r_{ik} 为样本投影特征值间的距离;$R = 2m = \max(r_{ik} + m/2$;$f$ 为单位阶跃函数,若 $R \geqslant r_{ik}$ 时,$f(R - r_{ik}) = 1$;若 $R < r_{ik}$,$f(R - r_{ik}) = 0$;m 为待评对象的数量;n 为评价指标数目。

2.4　寻求投影指标函数最大化

若类间距离 $\mathrm{dis}(a)$ 愈大,则数值指标的分布范围愈广泛;若类内密度 $\mathrm{den}(a)$ 愈大,则数据指标特征的差异性表现得愈强烈。由此可知,寻求最佳的投影方向归结为寻求投影指标函数最大化的过程:

$$\begin{cases} \max Q(a) \\ \| a \| = 1 \end{cases} \tag{8}$$

式中：$Q(a)$ 为投影目标函数；$\|a\| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_m^2}$。

2.5 贡献度（权重）的计算

由以上得到的投影值，可以计算出不同评价指标在评价体系中的贡献程度，即评价指标的权重：

$$w_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^{m} z_i \tag{9}$$

式中：z_{ij} 为第 i 待评对象的第 j 评价指标的投影值；w_{ij} 为评价指标的权重。

3 可拓集合理论

错综复杂的待评对象的基本单位称为物元[6]，物元理论包括物元分析理论和可拓集合理论。物元分析理论主要寻求研究对象的可变化性，以及造成这些变化所需的一些条件和基本规律；可拓集合理论主要是采用数学工具对物元进行分析，可拓集合的关联度即可表示对象符合标准的程度，综合关联度越大，符合程度越高。可拓集合理论实现了关联度的代数式表示，使多目标科学决策问题的研究更加定量化。可拓集合理论的计算步骤如下：

3.1 河流健康的经典域和节域

河流健康的基本单位称之为物元，物元的特性通过物元三元组表示。

将研究对象划分为 j 个评价等级，记作 $N_j(j = 1,2,\cdots,m)$；$x_{ji} = \langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$ 为 N_j 关于特征 c_i 的量值范围，即经典域物元记作 R_j：

$$R_j = (N_j, c_i, x_{ij}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & x_{j1} \\ & c_2 & x_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix}$$

将评价等级的全体记作 N_p，$x_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 为 N_p 关于特征 c_i 的量值范围，即节域，节域物元记作 R_p（显然满足 $x_{ji} \in x_{pi}$）：

$$R_p = (N_p, c_i, x_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & x_{p1} \\ & c_2 & x_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix}$$

3.2 关联函数和关联度计算

关联函数表示物元量值符合要求的程度，记作 $K_j(x_i)$

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \dfrac{-\rho(x_i, x_{ji})}{|x_{ji}|} & x_i \in x_{ji} \\ \dfrac{\rho(x_i, x_{ji})}{[\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})]} & x_i \notin x_{ji} \end{cases} \tag{10}$$

其中：

$$\rho(x_i, x_{ji}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) \tag{11}$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \tag{12}$$

$$|x_{ji}| = |a_{ji} - b_{ji}| \tag{13}$$

式中：$\rho(x_j, x_{pi})$ 为点 x_i 到有限区间 $x_{pi}[a_{pi}, b_{pi}]$ 的距离；$\rho(x_i, x_{ji})$ 表示为点 x_i 与有限区间 $x_{ji}[a_{ji}, b_{ji}]$ 的距离；$K_j(x_i)$ 表示第 i 项特征指标对应的第 j 级健康等级的关联度。

3.3 综合关联度

依据最大关联度原则，即最大关联度所对应的评价等级为物元对象实际的评价等级。

$$K_i = \max_{i=1,2,\cdots,n} \left[\sum_{i=1}^{n} w_i k_j(x_i) \right] \tag{14}$$

式中：K_i 为河流健康的综合关联度；w_i 为评价指标的权重。

4 湖州市区河流健康评价

4.1 研究区域简介

湖州市地处浙江省北部，东邻嘉兴，南接杭州，西依天目山，北濒太湖，与无锡、苏州隔湖相望，是环太湖地区唯一因湖而得名的城市。湖州境内主要河流有西苕溪、东苕溪、下游塘、双林塘、泗安塘等；境边南接东苕溪上游，北濒太湖，东联大运河及黄浦江。平原河网湖荡密布，山区建有山塘水库，库容 10×10^8 m^3 以上水库 149 座。域内 536 km^2，河道密度约 2.6 ~ 3.8 km/km^2，其中河流、湖泊面积 496 km^2。

4.2　评价模型的建立

依据《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》[7]、《环境影响评价技术导则与标准》[8]等已有的国家、行业、地方或国际标准构建湖州市区河流健康评价指标体系,鉴于河流健康评价的多样性与复杂性,并结合当地河流的实际情况,本文查阅大量资料报告并借鉴文献[9],选用 5 个要素 9 个详细指标反映湖州河流健康状况,以此作为评价指标,构建了湖州市区河流的健康评价体系和健康等级,如表 1 所示。

流域健康评价采用分级评分法[10],划分等级标准。将河流健康初步分为五级,即:很健康、健康、亚健康、不健康及病态。由于每个评价指标的阈值并不一致,甚至一些指标与河流健康存在负相关的关系,因此将评价指标以及对应的等级标准进行归一化和标准化是很有必要的,由此可以得到各河流健康等级对应的经典域和节域。

表 1　湖州市区河流健康评价指标体系

控制要素	评价要素	详细指标	指标代码
自然属性	自然形态	河流曲度	c_1
		河网发育系数变化率/%	c_2
	水量	水面率	c_3
	水质	水质	c_4
	河岸栖息	香农多样性	c_5
	地环境	生物第一潜在生产力	c_6
服务功能	水资源利用	植被覆盖率/%	c_7
		万元 GDP 用水量	c_8
		区域	c_9

$$R_1=\begin{bmatrix} N_1 & c_1 & x_{11} \\ & c_2 & x_{12} \\ & c_3 & x_{13} \\ & c_4 & x_{14} \\ & c_5 & x_{15} \\ & c_6 & x_{16} \\ & c_7 & x_{17} \\ & c_8 & x_{18} \\ & c_9 & x_{19} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{很健康} & c_1 & \langle 0.6667,1\rangle \\ & c_2 & \langle 0,0.08333\rangle \\ & c_3 & \langle 0.15,1\rangle \\ & c_4 & \langle 0,0.2\rangle \\ & c_5 & \langle 0.8,1\rangle \\ & c_6 & \langle 0.5,1\rangle \\ & c_7 & \langle 0.8333,1\rangle \\ & c_8 & \langle 0,0.2\rangle \\ & c_9 & \langle 0.85,1\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_2=\begin{bmatrix} N_2 & c_2 & x_{21} \\ & c_2 & x_{22} \\ & c_3 & x_{23} \\ & c_4 & x_{24} \\ & c_5 & x_{25} \\ & c_6 & x_{26} \\ & c_7 & x_{27} \\ & c_8 & x_{28} \\ & c_9 & x_{29} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{健康} & c_1 & \langle 0.5,0.6667\rangle \\ & c_2 & \langle 0.08333,0.1667\rangle \\ & c_3 & \langle 0.12,0.15\rangle \\ & c_4 & \langle 0.2,0.4\rangle \\ & c_5 & \langle 0.7,0.8\rangle \\ & c_6 & \langle 0.4,0.5\rangle \\ & c_7 & \langle 0.75,0.8333\rangle \\ & c_8 & \langle 0.2,0.4\rangle \\ & c_9 & \langle 0.6,0.85\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_3=\begin{bmatrix} N_3 & c_1 & x_{31} \\ & c_2 & x_{32} \\ & c_3 & x_{33} \\ & c_4 & x_{34} \\ & c_5 & x_{35} \\ & c_6 & x_{36} \\ & c_7 & x_{37} \\ & c_8 & x_{38} \\ & c_9 & x_{39} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{亚健康} & c_1 & \langle 0.4333,0.5\rangle \\ & c_2 & \langle 0.1667,0.4167\rangle \\ & c_3 & \langle 0.08,0.12\rangle \\ & c_4 & \langle 0.4,0.6\rangle \\ & c_5 & \langle 0.6,0.7\rangle \\ & c_6 & \langle 0.3,0.4\rangle \\ & c_7 & \langle 0.5,0.75\rangle \\ & c_8 & \langle 0.4,0.6\rangle \\ & c_9 & \langle 0.4,0.6\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_4=\begin{bmatrix} N_4 & c_1 & x_{41} \\ & c_2 & x_{42} \\ & c_3 & x_{43} \\ & c_4 & x_{44} \\ & c_5 & x_{45} \\ & c_6 & x_{46} \\ & c_7 & x_{47} \\ & c_8 & x_{48} \\ & c_9 & x_{49} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{不健康} & c_1 & \langle 0.3333,0.4333\rangle \\ & c_2 & \langle 0.4167,0.6667\rangle \\ & c_3 & \langle 0.06,0.08\rangle \\ & c_4 & \langle 0.6,0.8\rangle \\ & c_5 & \langle 0.5,0.6\rangle \\ & c_6 & \langle 0.2,0.3\rangle \\ & c_7 & \langle 0.3333,0.5\rangle \\ & c_8 & \langle 0.6,0.8\rangle \\ & c_9 & \langle 0.2,0.4\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_5=\begin{bmatrix} N_5 & c_1 & x_{51} \\ & c_2 & x_{52} \\ & c_3 & x_{53} \\ & c_4 & x_{54} \\ & c_5 & x_{55} \\ & c_6 & x_{56} \\ & c_7 & x_{57} \\ & c_8 & x_{58} \\ & c_9 & x_{59} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{病态} & c_1 & \langle 0,0.3333\rangle \\ & c_2 & \langle 0.6667,1\rangle \\ & c_3 & \langle 0,0.06\rangle \\ & c_4 & \langle 0.8,1\rangle \\ & c_5 & \langle 0,0.5\rangle \\ & c_6 & \langle 0,0.2\rangle \\ & c_7 & \langle 0.1667,0.3333\rangle \\ & c_8 & \langle 0.8,1\rangle \\ & c_9 & \langle 0,0.2\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_p=\begin{bmatrix} N_p & c_1 & x_{p1} \\ & c_2 & x_{p2} \\ & c_3 & x_{p3} \\ & c_4 & x_{p4} \\ & c_5 & x_{p5} \\ & c_6 & x_{p6} \\ & c_7 & x_{p7} \\ & c_8 & x_{p8} \\ & c_9 & x_{p9} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle 0,1\rangle \\ & c_2 & \langle 0,1\rangle \\ & c_3 & \langle 0,1\rangle \\ & c_4 & \langle 0,1\rangle \\ & c_5 & \langle 0,1\rangle \\ & c_6 & \langle 0,1\rangle \\ & c_7 & \langle 0.1667,1\rangle \\ & c_8 & \langle 0,1\rangle \\ & c_9 & \langle 0,1\rangle \end{bmatrix}$$

湖州市区河流在四个典型年序列的各指标原始数据值如表 2：

表 2 评价指标原始数据表

年份	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
1991	1.10	20.10	10.30	0.272	0.61	1771.98	50.27	341.70	1.91
2001	1.11	29.34	9.50	0.270	1.26	1706.88	47.40	134.10	1.66
2006	1.09	50.10	9.80	0.272	0.80	1499.01	42.24	88.90	0.17
2010	1.34	59.40	9.60	0.346	1.13	1987.42	50.48	62.33	0.29

通过投影寻踪，将实际数值代入公式（1）~（9），即可计算出各评价指标在河流健康评价中的贡献度大小（图 1），与传统的层次分析法、模糊综合评价等方法相比，完全消除了依赖于专家咨询意见所产生的主观臆断性；评价指标 c_4（水质综合指数）的权重值最大，这与湖州河流的实际情况以及前人研究的结论相符，但是水质指标无序而杂乱，本文尝试性探索在水质恶化和水质良好的变化前提下，探求水质指数的权重变化规律。增加部分新的水质序列，即水质恶化序列 c_4^1 =（0.2，0.3，0.5，0.7）和水质渐好序列 c_4^3 =（0.7，0.5，0.3，0.2），通过投影寻踪，计算各水质序列对应的水质指标权重，并通过图 1 表征不同水质变化状况对应的水质指标贡献度大小。由此说明投影寻踪计算得到的权重值与客观事实相符程度高，不失为平网河流健康评价的一类新方法。

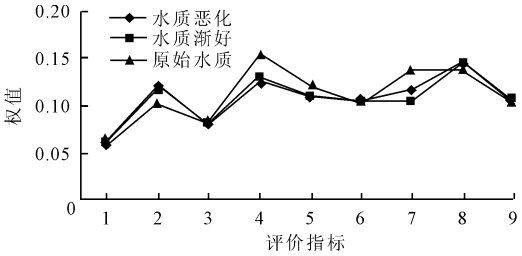

图 1 不同水质综合状况下的权重数值

由图 1 可知，在水质逐渐恶化的状况下，评价指标 c_4（水质综合指数）权重值为 0.1289，在整体权重数值中排序第 2 位；在水质逐渐转好的状况，评价指标 c_4（水质综合指数）权重值为 0.1312，仍在整体权重数值中名列前序，可见水质是河流健康生命的直观体现，良好的水质状况为水生动植物和河网的发育提供了良好的生存和演变环境，是河流健康的决定性因素。在今后的河湖健康管理中，尤其应重视水质的变化趋势和影响因素的研究。

为通过可拓集合理论评价湖州河流的健康状况，首先应建立湖州河流经典域和节域，由于每个评价指标所表示的阈值不一致，甚至一些指标和河流健康状况存在负相关的关系，所以将评价指标和评价标准进行归一化和标准化是很有必要的。本文将表中的原始数据通过归一化和标准化后并代入公式（10）~（14），将通过投影寻踪确立的评价指标权重融入可拓集合理论，即可求得湖州市区河流健康的综合关联度，由于时间序列和相关数据的限制，前人的参考文献并未对最近年份（2010）的湖州市区河流健康进行评价，本文通过多方面统计和实测数据，生物第一潜在生产力选用迈阿密（Miami）模型计算获取，其他部分指标的寻求通过各经典评价年的变化特征值根据神经网络算法进行预测，各年份河流的综合关联度如表 3 所示。

在同一年份中，综合关联度数值越大的健康级别，越接近河流的实际健康状况。

表 3 不同评价年的综合关联度及健康等级表

年份	综合关联度					等级
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
1991	-0.2295	-0.2905	-0.3174	-0.5042	-0.2969	Ⅰ（很健康）
2001	-0.2478	-0.0324	-0.2498	-0.3915	-0.5396	Ⅱ（健康）
2006	-0.2360	-0.2828	-0.3471	-0.4477	-0.2296	Ⅴ（病态）
2010	-0.1948	-0.3586	-0.4270	-0.5042	-0.1946	Ⅴ（病态）

4.3 计算结果分析

由表 4 可知，湖州市区河流在 1991 年处于“很健康”（Ⅰ等）状态，2001 年处于“健康”（Ⅱ等）状态，在 2006 和 2010 年河流健康状况持续恶化，处于“病态”（Ⅴ等）。随着时间的推移，湖州市区河流总体健康水平不断恶化，逐步向病态演变和发展，究其

原因,主要是随着城市规模和逐步扩大,人类活动严重影响着天然河流的水文地貌条件,并对河流及其周边生态环境造成巨大影响,水域面积和城市周边绿地覆盖率逐年减少,导致河流健康水平严重恶化。

综合关联度的比较存在结果大小的比较和变化趋势的比较,通过对熵权物元分析模型结果的综合关联度的数值以及健康程度进行比对,在熵权物元模型计算与本文投影寻踪 - 可拓集合的评价指标和指标阈值相同,较传统的综合评价法,熵权物元模型更加注重影响因子的分析,能够对影响河流健康状况的评价因子进行深度探索和精确剖析,而本文的投影寻踪 - 可拓集合模型更加注重评价指标对应的原始数据的贡献度分析。本文将投影寻踪 - 可拓集合理论与熵权物元模型所计算出的综合关联度变化趋势进行比较,如图 2、图 3 所示。

由图 2、3 可知,熵权物元模型与本文的投影寻踪——可拓集合评价模型的综合关联度的变化趋势大致吻合,尽管 2006 年的综合关联度的起始值存在细微偏差,但并不影响本文的评价模型的客观性和科学性,说明投影寻踪——可拓集合评价模型具有相当重要的理论和现实意义,并可为以后的河流健康评价提供一种新的思路。

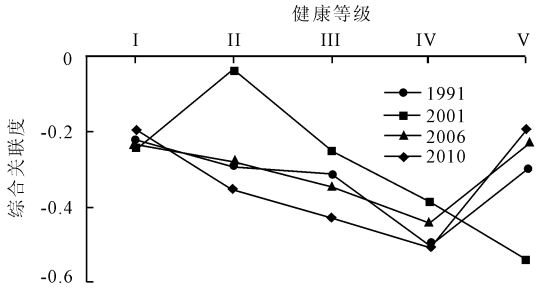

图 2　投影寻踪 - 可拓集合综合关联度变化趋势

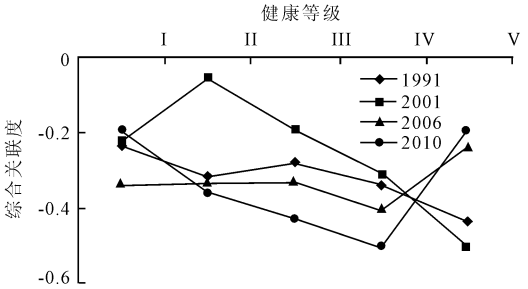

图 3　熵权物元模型综合关联度变化趋势

5　结　论

(1)本研究作为一种研究方法的探讨,取得了较为可靠的结论。河流健康评价应当同时考虑地方经济发展水平的差异、流域自然环境的特点以及季节气候的变换,因地制宜地选取河流生态修复评价的标准以及权重,即河流生态修复评价应因“河”而异、因“时”而异。

(2)投影寻踪——可拓集合理论站在客观立场,从数据本身解译出各评价因子的贡献度大小,并充分运用可拓集合理论在解决不相容的复杂问题的强大优势,力求全面客观和细致深刻地对河流健康做出可靠评价。

(3)鉴于研究区域的限制和部分研究数据的缺失,不能详尽地和全面地对湖州市区河流长序列年份的健康状况和发展趋势进行研究,仅对部分年份的河流健康状况进行评价,也是本文存在的不足之处,今后应加强此方面的研究。

参考文献:

[1] Hughes R M, Paulsen S G, Stoddard J L. EMAP - surface water: a multi - assemblage probability survey of ecological integrity in the USA[J]. Hydrobiologia,2000,422(4):429 - 443.

[2] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers[J]. Hydrobiologia,2000,442 - 423(4):1 - 14.

[3] 高学平,赵世新,张 晨,等. 河流系统健康状况评价体系及评价方法[J]. 水利学报,2009,40(8):962 - 968.

[4] 蔡 文,杨春燕,何 斌. 可拓学基础理论研究的新进展[J]. 中国工程科学,2003,5(2):80 - 87.

[5] 蔡 文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报,1983(1):83 - 97.

[6] 蔡 文. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,1997:68 - 80.

[7] 中华人民共和国水利部. 河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)[S]. 北京:科学出版社,2010

[8] 环境保护部环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准[M]. 北京:中国环境科学出版社,2014.

[9] 苗敬毅, 闫绪娴. 基于投影寻踪聚类模型的区域经济可持续发展评价——以 30 个省 1998 - 2011 年数据为例[J]. 工业技术经济,2013(10):77 - 82.

[10] 谷复光,王 清,张 晨. 基于投影寻踪与可拓学方法的泥石流危险度评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版)2010,40(2):373 - 377.

[11] 于志慧,许有鹏,张 媛,等. 基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析——以湖州市区不同城市化水平下的河流为例[J]. 环境科学学报,2014,34(12):3188 - 3193.

[12] 单媛媛,李 瑞,张骏芳,等. 平原河网地区河流健康评价指标体系构建[J]. 水科学工程与技术,2010(4):17 - 19.

[13] 卞锦宇,耿雷华,方 瑞. 河流健康评价体系研究[J]. 中国农村水利水电,2010(9):39 - 42.

[14] 孙雪岚,胡春宏. 关于河流健康内涵与评价方法的综合评述[J]. 泥沙研究,2007(5):74 - 80.