

改进的物元分析模型在河流健康评价中的应用

徐昕, 董壮

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对某省河流健康状况, 提出了一种新的河流健康评价方法, 即改进的物元分析模型。本模型克服了传统物元分析法主观性和指标间不相容的缺陷。根据流域特点选取了与河流健康密切相关的7个要素11个指标构建了某省骨干河流健康评价指标体系。通过对16条骨干河流综合关联度的计算分析, 得到某省骨干河流的健康状况。结果表明: 某省河流总体处于“亚健康”(Ⅲ等)及以上水平的骨干河流所占比例为75%, 总体健康状况良好, 但仍需加强河湖健康管理、维护河流健康生命。

关键词: 河流健康; 改进的物元分析模型; 评价指标; 亚健康

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0088-06

Application of improved matter element analysis model to assessment of river health

XU Xin, DONG Zhuang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the health state of a river in a province, the paper proposed a new assessment method of river health that is an improved matter element analysis model which overcome the subjectivity of traditional matter element analysis method and the incompatible defect between indicators. It selected eleven indicators of seven elements which is closely related to river health to establish an evaluation system of river health. By analyzing comprehensive correlation degree of sixteen backbone river, it obtained the health state of the backbone river in a province. The results show that the proportion of backbone rivers in the province which is overall in “sub-healthy” (Ⅲ grade level) or above Ⅲ grade level is 75 percent. The health state of rivers is overall good, so it is necessary to pay attention to the health management of river and lake, and the maintenance of river healthy life.

Key words: river health; improved matter element analysis model; assessment index; sub-healthy

1 研究背景

河流生态系统指河流水体的生态系统, 是陆地与海洋联系的纽带, 在生物圈的物质循环中起着重要作用。随着生态环境的破坏日益加剧, 河流健康已成为一个涉及内容较广、影响因素较多的跨领域研究热点, 当前我国关于河流健康评价的研究尚处于起步阶段, 研究方法还不够成熟, 众多研究人员提出制定评价准则和标准的迫切性, 以开展河流健康的评价工作, 遗憾的是至今还没有对评价标准有一个理想的、统一的共识。

当前河流健康评价模型大多采用层次分析法^[1], 随着方法的不断改进, 陆续研究出综合指标法^[2]、模糊数学理论^[3]、灰色系统评价法^[4]、网络层次分析法^[5-6]和人工神经网络法^[7]等算法。物元分析法多用于水质、环境以及土地利用等方面的评价, 在河流健康评价上的研究甚少, 樊引琴等^[8]将物元分析应用黄河水质评价, 取得了较好的效果, 于志慧等^[9]基于熵权物元法对湖州市区不同城市化水平下的河流健康进行了评价, 评价结论较为客观和准确。本文在基于物元分析模型^[10]的基础上, 对传统的物元分析模型进行了改进, 克服了传统物元分析法为主观性和指标间不相容而缺乏依存的缺陷,

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2015-08-28

作者简介: 徐昕(1991-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为水工、环境水力学

通讯作者: 董壮(1973-), 男, 天津人, 博士, 讲师, 研究方向为水力学及河流动力学。

并以某省为例,采用改进的物元分析模型对其境内骨干河流的健康进行评价,通过与实测值进行比对,改进的物元分析模型运行简便、计算准确,不失为河流健康评价的一种新方法。

2 研究方法

在参照前人研究的基础上,本文提出了一种新的评价模型——改进的物元分析模型,模型流程图如图 1 所示。

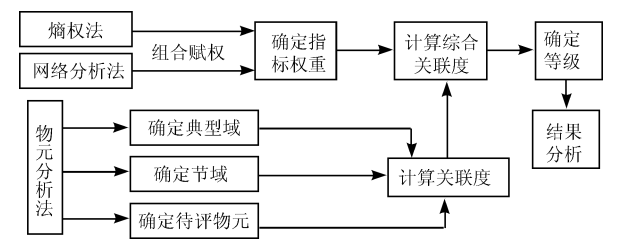


图 1 改进的物元分析模型流程图

2.1 确定待评物元

对于多目标科学决策问题——河流健康的基本单位可以称之为物元,物元的特性通过物元三元组 $H = (P, c, x)$ 进行描述,式中, P 表示事物;事物 P 通过 n 项特征 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 来表征,特征 c_i 对应的量值即为 x_i ,由于河流健康评价涉及内容较广、影响因素较多,必须选用 n 维物元表示,由此确定待评物元,即河流健康的待评物元:

$$H = \begin{bmatrix} P & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix}$$

2.2 确定经典域和节域

河流健康物元的经典域为:

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

式中: N_j 为河流健康所划分的健康等级; C_i 为反映河流健康状况的评价指标体系; x_{ji} 为 N_j 基于 c_i 所规定的量值范围,也可认为关于河流健康等级所取的阈值范围——河流健康经典域 $<a_{ji}, b_{ji}>$

河流健康物元的节域:

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

式中: N_p 为河流健康等级的全体; x_{pi} 为物元 R_p 关于特征 c_i 所取的量值范围,即为节域 $<a_{pi}b_{pi}>$,显然满足 $x_{ji} \in x_{pi}$ 。

2.3 关联函数和关联度的确立

根据可拓集合理论,关联度的表达式(1)~(4)如下:

$$k_j(x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_i, x_{ji})}{[\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})]} & x_i \notin x_{ji} \\ \frac{-\rho(x_i, x_{ji})}{|x_{ji}|} & x_i \in x_{ji} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{(a_{pi} + b_{pi})}{2} \right| - \frac{(b_{pi} - a_{pi})}{2} \quad (3)$$

$$|x_{ji}| = |a_{ji} - b_{ji}| \quad (4)$$

式中: $\rho(x_i, x_{ji})$ 为点 x_i 与有限区间 $X_{ji}[a_{ji}, b_{ji}]$ 的距离; $\rho(x_i, x_{pi})$ 为点 x_i 到有限区间 $X_{pi}[a_{pi}, b_{pi}]$ 的距离; $k_j(x_i)$ 为第 i 项特征指标对应的第 j 级健康等级的关联度,关联度与各指标权重之积即为综合关联度。所以指标权重的确立显得尤为重要。

2.4 确定指标权重

传统的物元分析法中权重的确立采用的是成对比较法^[11],根据德尔菲法(Delphi)的专家咨询意见将各评价指标的重要性进行比对,运用 1-9 标度法或 0-4 标度法,得到指标权重,此方法虽然简单易行,但存在两个缺陷:

(1)过分依赖于专家的咨询意见,无可避免人的主观臆断性和能动性,即分析方法存在一定主观性;

(2)在确定比较性矩阵中,仅仅对准则层下的指标进行两两对比,无法反映各指标之间的相互依存关系。为克服这两个缺陷,本文引用两类指标确立方法,即客观的熵权法^[12]和网络层次分析法(ANP),对传统的计算方法进行了修正,再将这两

种方法得到的指标权重相结合,这样既融合了熵权法的客观性,又通过网络层次分析法充分考虑各指标之间的相互影响和依存关系,与系统工程和科学决策的问题特点相符。

2.4.1 熵权法确定指标权重 熵权法的计算步骤:

- (1)对指标进行正项化处理以消除量纲。
- (2)计算所占比重值 σ_{ij} 。 σ_{ij} 计算公式为:

$$\sigma_{ij} = 1 + \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + x_{ij})}$$

(5)

- (3) 计算指标的熵值 H_i 和权重 α_i

$$H_i = - \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \ln \sigma_{ij}}{\ln m}$$

(6)

$$\alpha_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}, \text{ 且 } \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

(7)

(6) ~ (7) 式中: m 为评价对象的数目; n 为评价指标的数目。

2.4.2 网络分析法确定指标权重 ANP 应用网络结构替代层次结构,在构建完河流健康评价指标体系后,需要将评价指标体系进行层次的划分,构造控制网络结构,通过超级决策软件(Super Decisions)建立网络层次模型,可以简洁表明元素组之间的相互关系,从而得到基于 ANP 方法的指标权重 β_i 。

2.4.3 组合赋权法 为充分克服主观性和指标之间缺乏依存响应的缺陷,本文将网络层次分析法和熵权法进行组合,选用拉格朗日组合公式来结合网络分析法和熵权法计算两者得到的权重,即组合赋权法。

组合赋权公式为:

$$w_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i \beta_i}}, i = 1, 2, 3, \cdots, n$$

(8)

由此确立参与综合关联度计算的最终权重 w_i 。

2.5 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。

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

(9)

式中: K_i 为待评物元的综合关联度。

3 研究区域概况

某省境内河流纵横,湖泊众多,其中重要河流 727 条,大于 0.5 km² 的湖泊共计 137 个,水域面积占

全省国土面积的 16.91%。得天独厚的江河湖泊资源,是该省最大的自然资源和发展优势。根据该省流域系特点,分别按淮河、长江和太湖三大流域选择 9 条流域性河流(指区域内干流、重要一级支流以及跨流域调水骨干河道)、7 条区域性河流(指区域性或跨流域的骨干供水河道、综合功能突出的调度性河道),共 16 条骨干河流开展河流健康状况评价。

4 改进物元模型的应用

4.1 河流健康物元经典域和节域

根据《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作)》、《环境影响评价技术导则与标准》等已有的国家、行业、地方或国际标准,首先应构建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,并结合某省河流的实际情况,本文选用 7 个要素 11 个详细指标反映河流健康状况,作为评价指标,如下表 1 所示。

表 1 某省河流健康评价指标体系

评价要素	详细指标	指标代码
自然及水文状况	河岸稳定性	c ₁
	流动性	c ₂
	生态流量满足程度	c ₃
水质状况	河流水质综合指数	c ₄
生态特性	岸坡植被结构完整性	c ₅
	河流生物多样性	c ₆
防洪工程状况	防洪工程达标率	c ₇
岸线利用管理状况	岸线利用管理	c ₈
公众满意状况	公众满意度	c ₉
供水保证率	供水水量保证率	c ₁₀
	水功能区水质达标率	c ₁₁

流域健康评价采用分级评分法,划分等级标准,河流健康初步分为 5 级,即:很健康、健康、亚健康、不健康及病态。河流健康等级如表 2。

表 2 河流健康评估分级表

等级	类型	赋分范围	释 义
I	很健康	80 ~ 100	接近理想状态
II	健康	60 ~ 80	接近参考状况或预期目标
III	亚健康	40 ~ 60	与参考状况或预期目标有中度差异
IV	不健康	40 ~ 20	与参考状况或预期目标有较大差异
V	病态	20 以下	与参考状况或预期目标有显著差异

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。经过归一化和标准化处理后的评价分级标准见表 3。归一化后的评价指标实测值,见表 4。

表 3 评价指标归一化后的分级标准

评价指标	很健康	健康	亚健康	不健康	病态
c ₁ 河岸稳定性	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
c ₂ 流动性	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
c ₃ 生态流量满足程度	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
c ₄ 河流水质综合指数	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
c ₅ 岸坡植被结构完整性	0.85~1.0	0.7~0.85	0.55~0.7	0.4~0.55	0.25~0.4
c ₆ 河流生物多样性	0.8333~1.0	0.6667~0.8333	0.5~0.6667	0.3333~0.5	0.1667~0.3333
c ₇ 防洪工程达标率	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.6~0.7	0~0.5
c ₈ 岸线利用管理	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.4~0.7	0.1~0.4
c ₉ 公众满意度	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.6~0.7	0~0.5
c ₁₀ 供水水量保证率	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.6~0.7	0~0.5
c ₁₁ 水功能区水质达标率	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2

表 4 归一化后的指标实测值

河流代码	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈	c ₉	c ₁₀	c ₁₁
1	0.84	0.67	1	0.74	0.82	0.7133	0.76	0.95	0.80	0.99	1
2	0.71	0.84	1	0.80	0.64	0.7100	0.70	0.88	0.92	0.98	0.96
3	0.62	0.56	0.98	0.34	0.75	0.4467	0.8912	0.80	0.705	0.80	0
4	0.91	0.74	1	0.80	0.85	0.6167	0.94	0.97	0.95	1	0.83
5	0.74	0.20	1	0.40	0.80	0.7400	0.58	0.75	0.652	1	0
6	0.85	0.48	1	0.42	0.83	0.6867	0.54	0.85	0.72	1	0
7	0.80	0.45	1	0.40	0.70	0.6133	0.6038	0.90	0.565	1	0.25
8	0.95	1	1	0.72	0.50	0.8833	0.99	0.68	0.90	1	0.46
9	0.87	0.62	1	0.46	0.91	0.8133	0.94	0.85	0.80	1	0.44
10	0.91	0.21	1	0	0.32	0.7967	0.7052	0.95	0.52	1	0
11	0.90	0.35	1	0.40	0.65	0.7767	0.3298	0.9	0.51	0.92	0.33
12	0.73	0.22	1	0.60	0.73	0.7433	1	0.75	0.72	1	0.50
13	0.94	0.57	1	0.24	0.23	0.6467	1	0.85	0.47	1	0.133
14	0.83	0.73	1	0.50	0.57	0.7033	0.5	0.65	0.80	1	0.50
15	0.77	0.20	1	0.10	0.26	0.7567	0.9822	0.75	0.255	1	0
16	0.52	0.55	1	0.20	0.67	0.6933	1	0.90	0.462	1	0

根据表 3,可以得到各个河流健康等级对应的经典域和节域:

4.2 指标权重及综合关联度

根据熵权法原理和网络层次分析原理,分别求得各自的权重,通过组合赋权公式(8)得到组合权值,见表 5。

4.3 结论与分析

将某省 16 条骨干河流对应的评价指标实际值和表对应的组合权重带入公式(9),可求得每条骨干河流健康综合关联度,各骨干河流的综合关联度如表 6 所示。

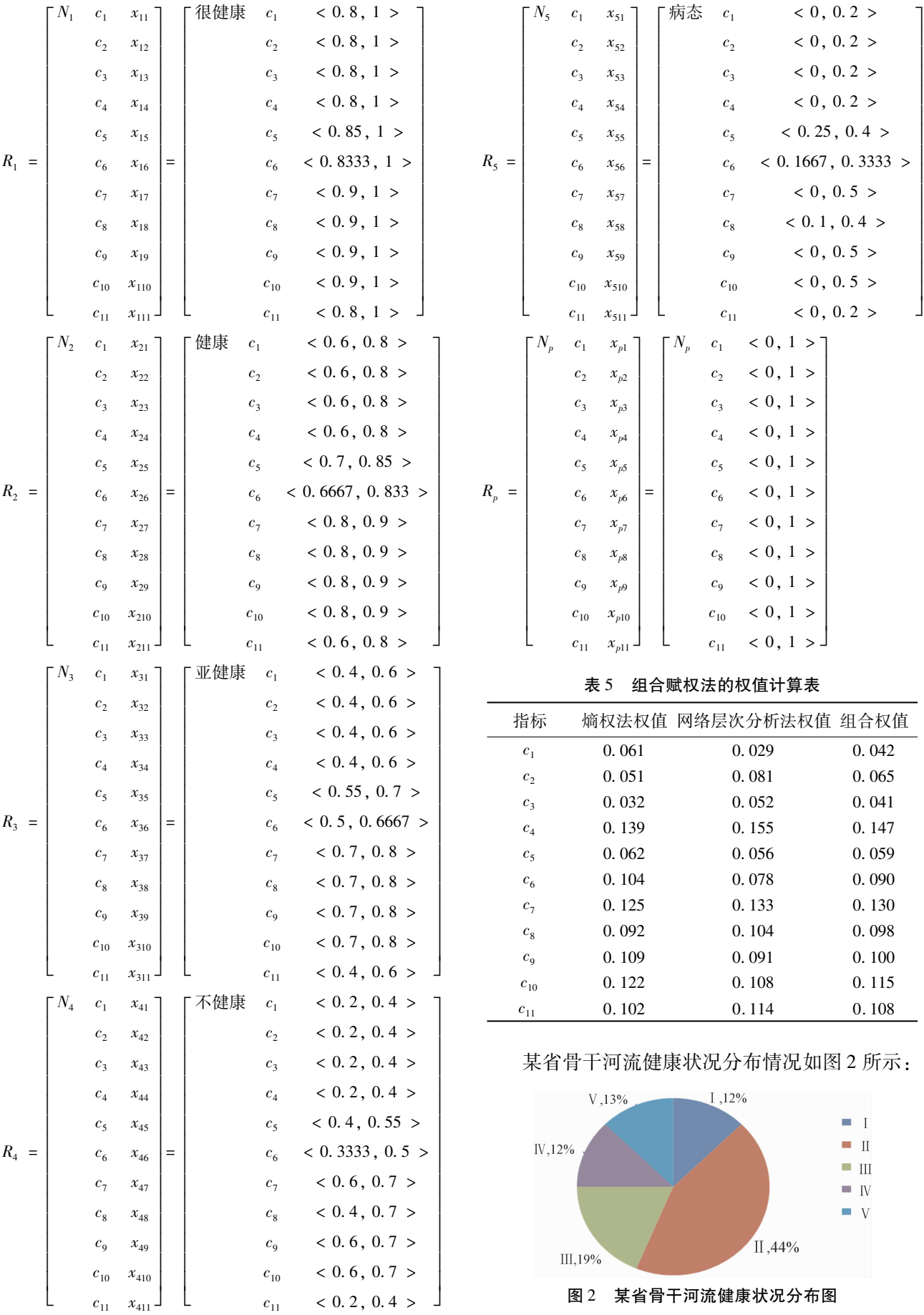


表 5 组合赋权法的权值计算表

指标	熵权法权值	网络层次分析法权值	组合权值
c_1	0.061	0.029	0.042
c_2	0.051	0.081	0.065
c_3	0.032	0.052	0.041
c_4	0.139	0.155	0.147
c_5	0.062	0.056	0.059
c_6	0.104	0.078	0.090
c_7	0.125	0.133	0.130
c_8	0.092	0.104	0.098
c_9	0.109	0.091	0.100
c_{10}	0.122	0.108	0.115
c_{11}	0.102	0.114	0.108

某省骨干河流健康状况分布情况如图 2 所示：

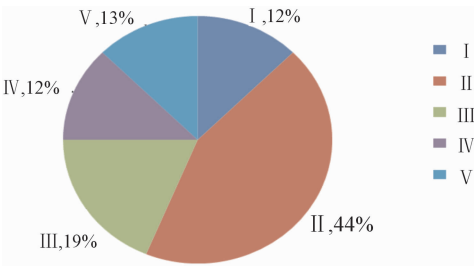


图 2 某省骨干河流健康状况分布图

表 6 某省骨干河流健康综合关联度及健康等级表

评价河流	综合关联度 K					等级
	I	II	III	IV	V	
1	-0.1393	-0.066	-0.1372	-0.1768	-0.2963	II (健康)
2	-0.2334	-0.0764	-0.0952	-0.1487	-0.2869	II (健康)
3	-0.2888	-0.0067	-0.0112	-0.0442	-0.1563	II (健康)
4	0.015	-0.1172	-0.1223	-0.1671	-0.2996	I (很健康)
5	-0.4143	-0.1008	-0.1463	-0.1828	-0.25	II (健康)
6	-0.3881	-0.1369	-0.1304	-0.1838	-0.2473	III (亚健康)
7	-0.4102	-0.1667	-0.0924	-0.1469	-0.2231	III (亚健康)
8	-0.0963	-0.0919	-0.2148	-0.2476	-0.2864	II (健康)
9	-0.06	-0.1539	-0.1656	-0.2274	-0.2748	I (很健康)
10	-0.3043	-0.2661	-0.3136	-0.319	-0.1528	V (病态)
11	-0.0666	-0.0406	-0.0807	-0.1391	-0.1728	II (健康)
12	-0.1973	-0.0611	-0.1334	-0.2232	-0.1946	II (健康)
13	-0.2838	-0.2394	-0.1945	-0.1289	-0.1538	IV (不健康)
14	-0.2126	-0.1323	-0.0771	-0.1708	-0.1735	III (亚健康)
15	-0.2979	-0.225	-0.2725	-0.2472	-0.1616	V (病态)
16	-0.2661	-0.2012	-0.1816	-0.1573	-0.1819	IV (不健康)

所得结果显示,某省骨干河流健康状况达到“很健康”级别的河流占 12%,达到“健康”级别的河流占 44% ,“亚健康”级别的河流占 19% ,“不健康”级别的河流占 13% ,“病态”级别的河流占 12% ,其中“亚健康”级别以上的河流占 75% ,所以总体上某省河流处于“亚健康”(Ⅲ等)及以上状态,“亚健康”状态属于“健康”和“不健康”的过渡状态,过渡状况下的河流的健康变化显著、转变敏感,在此时期,应该尤为注意河湖的管理和保护。在 16 条骨干河流中,河流 10 和河流 15 处于“病态”水平,枝源派本,河流 10 大部分在省市境内,是该市最大的地区性河流,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;河流 15 的主要河流功能为排涝、供水以及航运,存在的主要问题为水功能区水质达标率和岸坡硬化化程度高。但总体而言,某省骨干河流的健康状况较为良好。

5 结 语

传统的物元分析法权重的确立采用成对比较法,不能客观地强调对影响因子的分析和研究,本文融合了熵权法和网络层次法的各自优势,对传统的物元分析进行了改进,克服了传统物元分析模型的

主观性和指标间缺乏依存和不相容性这两类缺陷,这样就能够对影响河流健康的影响因素进行深度地剖析,从而使评价结论具有更高的可信度,河流健康评价因“河”而异,因“时”而异,改进的物元模型不失为河流健康评价的一种新方法。

某省骨干河流健康状况总体上处于“亚健康”水平及以上,尽管比在全国其他省市河流健康状况较为良好,但“亚健康”状态属于“健康”和“不健康”的过渡状态,过渡状况下的河流的健康变化显著、转变敏感,故仍需加强河湖健康管理、维护河流健康生命。

本研究作为一种研究方法的探讨,取得了较为准确的结论。鉴于研究区域的限制和研究数据的部分缺失,本文仅对部分年份的河流健康状况进行评价,不能详尽地和全面地对某省河流长序列年份的健康状况和发展趋势进行研究,在今后的理论研究中应将此作为重点。

参考文献:

[1] 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.
[2]王 琳,宫兆国,张 炯,等. 综合指标法评价城市河流生态系统的健康状况[J],中国给水排水,2007,23(10):97-100.
[3]张晶,董哲仁,孙东亚,等. 河流健康全指标体系的模糊数学评价方法[J],水利水电技术,2010,41(10):16-21.

- 述[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 151 - 161.
- [18] Zhang Tong, Jin Hongjun, Zhu Huailan. Qualify criteria of acrylonitrile for the protection of aquatic life in China [J]. *Chemosphere*, 1996, 32(10): 2083 - 2093.
- [19] Hu Guocheng, Luo Xiaojun, Li Fengchao, et al. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: Concentrations, sources profiles and potential risk [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(2): 176 - 183.
- [20] Li Wenhui, Shi Yali, Gao Lihong, et al. Occurrence of antibiotics in water, sediments, aquatic plants, and animals from Baiyangdian Lake in North China [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1307 - 1315.
- [21] 沈嘉瑞, 张崇洲. 河北省白洋淀的枝角类[J]. 动物性杂志, 1964, 6(3): 128 - 132.
- [22] 沈嘉瑞, 宋大祥. 河北省白洋淀的桡足类[J]. 动物学报, 1965, 17(2): 168 - 183.
- [23] 王新华, 纪炳纯, 罗 阳, 等. 引滦工程上游浮游动物及其水质评价[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 243 - 245.
- [24] Saksena D N. Rotifers as indicators of water quality [J]. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 1987, 15(5): 481 - 485.
- [25] Branco C W C, Rocha M I A, Pinto G F S, et al. Limnological features of Funil Reservoir (Brazil RJ) and indicator properties of rotifers and cladocerans of the zooplankton community [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2002, 7(2): 87 - 92.
- [26] 孟 伟, 杨荣金, 舒俭民, 等. 突发环境污染事件对湖泊浮游动物的影响[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 87 - 91.
- [27] 何志辉. 中国湖泊和水库的营养分类. 大连水产学院学报, 1987(1): 1 - 10.
- [28] 天津市环境保护科学研究所. 于桥水库富营养化及防治研究[R]. 天津: 天津市环境保护科学研究所, 1991.
- [29] 武国正, 李畅游, 周龙伟. 乌梁素海浮游动物与底栖动物调查及水质评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 76 - 81.
- [30] 潘双叶, 陈 元, 翁燕波, 等. 东钱湖浮游生物调查以及水质生态学评价[J]. 中国环境监测, 2008, 24(6): 96 - 100.
- [31] 王凤娟, 胡子全, 汤 洁, 等. 用浮游动物评价巢湖东湖区的水质和营养类型[J]. 生态科学, 2006, 25(6): 550 - 553.
- [32] Zhang Xiong, Geng Hong. Effect of *Microcystis aeruginosa* on the rotifer *Brachionus calyciflorus* at different temperatures [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 88(1): 20 - 24.
- [33] Weithoff G, Walz N. Influence of the filamentous cyanobacterium *Planktothrix agardhii* on population growth and reproductive pattern of the rotifer *Brachionus calyciflorus* [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 313 - 314(1): 381 - 386.
- [34] Viayeh R M, Špoljar M. Structure of rotifer assemblages in shallow waterbodies of semi - arid northwest Iran differing in salinity and vegetation cover [J]. *Hydrobiologia*, 2012, 686(1): 73 - 89.
- [35] Tasevska O, Jersabek C D, Kostoski G, et al. Differences in rotifer communities in two freshwater bodies of different trophic degree (Lake Ohrid and Lake Dojran, Macedonia) [J]. *Biologia*, 2012, 67(3): 565 - 572.
- [36] Kulikova T P, Syarki MT. Effect of Anthropogenic Eutrophication on Zooplankton Distribution in Kondopoga Bay of Lake Onega [J]. *Water Resources*, 2004, 31(1): 85 - 91.

(上接第 93 页)

- [4] 吴阿娜, 车 越, 徐启新, 等. 上海地区河流健康评价方法探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 90 - 94.
- [5] Satty T L. Fundamentals of decision marking and priority theory with the analytic hierarchy process [M]. Princeton: RWS Publications, 1994: 35 - 127.
- [6] 周振民, 刘海滢, 张 青. 基于 ANP 的河流健康评估指标体系研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 57 - 60.
- [7] 崔东文. RBF 与 GRNN 神经网络模型在河流健康评价中的应用——以文山州区域中小河流健康评价为例[J]. 中国农村水利水电, 2012(3): 56 - 61.
- [8] 樊引琴, 刘婷婷, 李 娜, 等. 物元分析法在黄河水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 166 - 169.
- [9] 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.
- [10] 蔡 文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社 1994.
- [11] 傅新平, 胡伶俐. 基于物元分析法的综合交通系统服务水平评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(4): 580 - 583.
- [12] 张先起, 梁 川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057 - 1061.