

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.016

# 改进的综合水质标识指数法在上海市长宁区 水质评价中的应用

张龙玲<sup>1</sup>, 徐慧<sup>1</sup>, 管桂玲<sup>2</sup>, 周菘棋<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098;  
2. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏南京 210001)

**摘要:** 针对综合水质标识指数法在水质评价中无法客观考虑指标权重的情况, 将改进的主成分分析法与综合水质标识指数法相结合, 采用主成分分析法对单个指标权重赋值, 将各指标权重用于综合水质标识指数法。将改进的综合水质标识指数法应用于上海市长宁区水质评价, 并与其他水质评价方法进行比较。结果表明: 长宁区各等级河道水质时空差异明显; 评价结果与实际情况较为一致; 此方法可操作性强, 且能够直观地比较各个时间段每条河流的综合水质达标情况。

**关键词:** 综合水质标识指数; 主成分分析; 权重; 水质评价; 上海市长宁区

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)03-0081-04

## Application of improved comprehensive water quality identification index method to evaluation of water quality in Changning District, Shanghai City

ZHANG Longling<sup>1</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, GUAN Guiling<sup>2</sup>, ZHOU Liangqi<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China  
2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210001, China)

**Abstract:** As the comprehensive water quality identification index method fails to objectively take into account index weights in water quality evaluation, this study aims to combine the improved principal component analysis method and the improved comprehensive water quality identification index method, in which the former method is used for single-index weight assignment, and the weight of each index is used for the comprehensive water quality identification index method. The improved comprehensive water quality identification index method was used to evaluate the water quality of the Changning District in Shanghai City, and was compared with other water quality assessment methods. The evaluation results show that the water quality of rivers with different levels had significant spatial and temporal variations in the Changning District. The evaluation results agreed with actual situation. The method can be easily used and can compare the compliance status of comprehensive water quality for each river over various time periods.

**Key words:** comprehensive water quality identification index; principal component analysis; weight; water quality evaluation; Changning District of Shanghai City

目前,我国常用的水质评价方法较多,主要有单因子评价法、模糊综合评价法、综合水质标识指数法等。综合水质标识指数法由徐祖信<sup>[1-2]</sup>提出,是一种全新的综合水质评价方法,它不仅能完整表达出水质类别,还可定性、定量地评价综合水质状况,特别

对劣V类水质的污染程度能进行合理评价<sup>[3]</sup>。

但是传统的综合水质标识指数法仅采用单因子水质标识指数的算术平均值作为权重,这样并没有反映样本间离散程度所带来各指标数据信息量的不同,同时针对地区情况的不同,水质评价指标也存在

作者简介:张龙玲(1989—),女,硕士研究生,研究方向为生态水文与生态修复。E-mail:850059767@qq.com

通信作者:徐慧,副教授。E-mail:1114599309@qq.com

表1 综合水质级别判定标准

判断标准	综合水质级别
$1.0 \leq X_1, X_2 \leq 2.0$	I类
$2.0 < X_1, X_2 \leq 3.0$	II类
$3.0 < X_1, X_2 \leq 4.0$	III类
$4.0 < X_1, X_2 \leq 5.0$	IV类
$5.0 < X_1, X_2 \leq 6.0$	V类
$6.0 < X_1, X_2 \leq 7.0$	劣V类但不黑臭
$X_1, X_2 > 7.0$	劣V类并黑臭

表2 水质定性评价标准

判断标准		定性评价结论
$X_2$ 不为0	$X_2$ 为0	
$f - X_1 \geq 1$	$f - X_1 - 1 \geq 1$	优
$X_1 = f$	$X_1 - 1 = f$	良好
$X_1 - f = 1$	$X_1 - f - 1 = 1$	轻度污染
$X_1 - f = 2$	$X_1 - f - 1 = 2$	中度污染
$X_1 - f \geq 3$	$X_1 - f - 1 \geq 3$	重度污染

注:  $f$  为水环境功能区类别, 本文中  $f=5$ 。

指标信息权转化到各样本指标构成的特征向量矩阵中, 在计算主成分时才能体现。为了将指标特征向量所含的权重信息反映到具体权数上, 本文将特征向量相对0的离散程度视为评价指标信息权大小的依据, 即某一指标的特征向量越靠近0, 它对系统的影响越小; 反之, 则离散程度越大, 对系统的影响也越大, 从而信息权重也越大。

为了能真实反映特定地区水质评价中相对重要指标的影响, 本文在主成分分析中加入重要性权重, 采用文献[7]的方法, 用加权数据协方差求特征向量, 根据特征向量的离散程度并辅以贡献度对各指标进行赋权, 由于本文只需通过特征向量求指标权重, 所以不用考虑用加权或未加权数据求主成分, 这样避免了主成分分析计算时带来的二次加权或数理意义不明<sup>[8]</sup>的问题。

权重计算步骤如下:

**步骤1** 构建原始水质数据信息矩阵  $X$ :

$$X = \{x_{ij}\}_{m \times n} \quad (3)$$

式中:  $m$  为样本数(本文为河道数);  $n$  为评价指标个数;  $x_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $i$  条河道的第  $j$  个指标的观测值。

**步骤2** 采用标准化方法(Z-score)对原始数据进行规格化:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - x_j) / S(x_j) \quad (4)$$

$$S^2(x_j) = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_j)^2 / (n - 1) \quad (5)$$

式中:  $Z_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ) 为规格化后的水质数据;  $x_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $j$  列水质数据的算术平均数;  $S(x_j)$  为水质数据的标准差。

**步骤3** 对标准化数据赋予主观权重:

主观重要性差异。目前, 对综合水质标识指数法的改进方法主要包括熵权赋值法<sup>[4]</sup>、内梅罗指数法<sup>[5]</sup>及基于聚类分析法<sup>[6]</sup>等, 这些方法一定程度上反映指标的信息量权重, 但是并未考虑主观权重影响。

传统主成分方法在评价指标时, 以样本间离散差异来反映指标的相对重要性, 并通过计算得到相互独立主成分, 计算维度大大降低, 可以较好地进行分析计算, 但是这种方法在确定水质评价指标权重上存在一些问题: 确定的指标信息权重反映在特征向量矩阵中, 并以求出的评价分数值来反映, 不能用来确定权重具体数值。

针对以上问题, 本文对主成分分析法进行了如下改进: 在主成分计算时, 将规格化数据赋主观权重后求协方差矩阵, 并以协方差矩阵的特征向量的离散程度作为评价指标信息权大小的依据, 再求出各指标权重。将改进的方法应用于上海市长宁区水质评价, 将评价结果与单因子指数法、传统的综合水质标识指数法及用熵权赋权的综合水质标识指数法结果进行对比, 检验方法的可行性。

## 1 方法介绍

### 1.1 综合水质标识指数法

综合水质标识指数由整数位、小数点后3位或4位小数位组成, 其标准公式为:

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 \quad (1)$$

式中:  $I_{wq}$  为综合水质标识指数;  $X_1$  为综合水质级别;  $X_2$  为综合水质在该级别水质变化区间中所处的位置, 根据公式按四舍五入的原则计算确定;  $X_3$  为参与综合水质评价的单项水质指标中劣于水环境功能区目标的指标个数;  $X_4$  为综合水质类别与水环境功能区类别的比较结果, 视水体的污染程度,  $X_4$  为一位或两位有效数字。  $X_1 \sim X_4$  具体计算参见文献[4-5]。

综合水质标识指数法中的  $X_1, X_2$  以单因子水质标识指数法为基础, 其计算公式如下:

$$X_1 \cdot X_2 = \sum_{g=1}^n \omega_g P_i \quad (2)$$

式中:  $X_1, X_2$  为综合水质指数;  $\omega_g$  为权重值(传统方法  $\omega_g = 1/n$ );  $P_i$  为单因子水质标识指数法的计算值。

通过表达式可以直观得到综合水质类别、水质情况及与水环境功能区类别的比较结果。具体水质级别及定性评价见表1和表2。

### 1.2 主成分分析赋权

传统主成分分析法能将原始数据转化为相互独立主成分, 并找出共享率相对较大的主成分用于指标的分析计算, 由于主成分分析法将原始数据中各

$$Z_{ij}^* = \omega Z_{ij} \quad (6)$$

其中  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ ,  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$

式中:  $Z_{ij}^*$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ) 为乘权规格化数据;  $\omega$  为主观权重;  $\omega_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $j$  项指标采用主观赋权法确定的重要性权重。

**步骤 4** 求协方差矩阵, 计算特征向量  $L_g$  及累积方差贡献率  $A_g$ , 具体过程参照文献[7], 确定主成分个数  $P$ 。主成分个数  $P$  由方差贡献率  $\sum_{g=1}^P A_g \geq 85\%$  决定。

**步骤 5** 取前  $P$  个特征向量, 绝对值变换后以方差贡献率为权重, 求各指标权重  $\omega_k$ :

$$\omega_k = \sum_{g=1}^P L_{gk} A_g \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

## 2 实例研究

### 2.1 研究区概况

长宁区位于上海市中心城区西部, 是上海市的西大门。境域内河网密布、港汊交错, 属吴淞江水系。随着城市建设发展, 陆续填浜筑路, 2010 年有大小河汊 36 条, 集中于区境西部, 长度在 1.5 km 以上的有 8 条, 最短的姚家浜仅 68 m。吴淞江为区境干流, 一级支流有新泾港、纵泾港、朱家浜等, 二级支流有周家浜、野奴泾、新渔浦等。

### 2.2 标准和数据的选取

水质标准采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》。由于长宁区实际河流污染情况主要为有机污染和富营养化, 因此, 共选取 DO、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 TN 等 6 项评价指标。由于主成分分析确定指标权重时样本的完整性决定着评价特征向量信息权的数量, 从而决定指标权重的代表性, 所以在确定权重时选取长宁区内所有 28 条河道水质监测数据; 在确定水质评价样本时则选取长宁区境内的具有代表性的河道, 包括区管河道北夏家浜和陆家浜, 镇管河道南夏家浜和绥宁河及村级河道许渔河、广顺河和姚家浜, 共计 7 条河道, 这 7 条河道水环境功能区划目标均为 V 类。监测数据为 2011 年年均浓度值。

### 2.3 指标权重的确定

采用改进的主成分分析法对上海市长宁区 6 项水质指标进行赋权, 为了使指标权重的选取更具代表性, 选取了长宁区 28 条河道水质数据, 河道级别包括区级、镇级及村级。首先, 根据式(3)~(6)对原始指标数据进行标准化变化并赋主观权, 主观权重  $\omega = (0.163, 0.183, 0.186, 0.255, 0.126, 0.087)$ 。

用赋权标准化后的数据进行协方差计算, 求得

各特征值(表 3)及与其对应的特征向量(表 4), 为保证方差贡献率大于 85%, 主成分个数  $P=3$ , 这时累计方差贡献率为 90.0%, 满足评价要求。

表 3 水质评价样本矩阵的特征根及方差贡献率

特征根	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
$K_1$	9.467	50.8	50.8
$K_2$	5.065	27.2	78.0
$K_3$	2.240	12.0	90.0
$K_4$	1.187	06.4	96.4
$K_5$	0.548	02.9	99.3
$K_6$	0.131	00.7	100.0

表 4 水质评价样本矩阵各特征根对应的特征根向量

评价指标	特征根向量		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$
DO	-0.293	0.144	0.863
COD	0.261	0.667	-0.286
BOD <sub>5</sub>	0.383	0.565	0.319
NH <sub>3</sub> -N	0.768	-0.436	0.212
TP	0.252	0.067	0.032
TN	0.215	-0.142	0.162

将表 4 中特征向量进行绝对值变换, 通过式(6)以方差贡献率为权求出各指标权重  $\omega_j$ , 为了保证  $\sum_{j=1}^6 \omega_j = 1$ , 对指标权重进行  $\omega_j^* = \omega_j / \sum_{j=1}^6 \omega_j$  变换, 变化后  $\omega_k = (0.156, 0.186, 0.206, 0.284, 0.079, 0.089)$ 。

### 2.4 水质评价结果

根据式(1), 采用传统综合水质标识指数法计算出各河流单因子水质标识指数(表 5), 再结合改进的主成分分析法求出各污染物指标权重  $\omega_k$ , 从而对各断面水质进行综合评分, 通过评分结果并参照表 1 得出相应的水质类别, 评价结果见表 6。

表 5 上海市长宁区各河流单因子水质标识指数

河流名称	单因子水质标识指数					
	DO	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP	TN
北夏家浜	3.4	4.9	4.1	4.2	6.4	7.2
陆家浜	2.6	5.4	5.2	6.7	5.6	7.5
南夏家浜	2.8	4.6	3.8	4.4	3.6	4.3
绥宁河	3.2	3.5	3.6	4.1	5.3	6.1
许渔河	3.0	5.1	5.1	6.5	5.1	7.6
广顺河	4.3	5.1	5.6	6.7	4.4	5.3
姚家浜	8.6	6.9	5.8	7.3	5.8	8.0

### 2.5 与其他方法的比较

同时, 运用单因子评价法、传统综合水质标识指数法、熵权赋权的综合水质标识指数法对 7 条河流水质进行评价(评价步骤略, 评价结果见表 6), 对比分析可知:

a. 改进的水质综合标识指数法评价结果表明, 长宁区各等级河道水质时空差异明显, 村管河道的

表6 上海市长宁区不同评价方法评价结果对比

河流名称	单因子评价法 评价结果	传统综合水质标识指数法		熵权赋权的综合水质标识指数法		改进的综合水质标识指数法	
		$I_{wq}$	水质级别	$I_{wq}$	水质级别	$I_{wq}$	水质级别
北夏家浜	劣V类	5.321	V类	5.310	V类	4.130	IV类
陆家浜	劣V类	5.522	V类	5.491	V类	5.520	V类
南夏家浜	IV类	3.900	III类	3.912	III类	4.130	IV类
绥宁河	劣V类	5.421	V类	5.360	V类	4.030	IV类
许渔河	劣V类	5.421	V类	5.391	V类	5.420	V类
广顺河	V类	4.110	IV类	4.100	IV类	5.313	V类
姚家浜	劣V类	6.340	劣V类不黑臭	6.121	劣V类不黑臭	7.161	劣V类并黑臭

水质情况较差,许渔河、广顺河为V类,姚家浜为劣V类并有黑臭,区管和镇管河道水质较好,北夏家浜、南夏家浜、绥宁河水质都达到了IV类,达到了水功能区目标。评价结果与实际情况较为一致,村管河道由于管理级别较低,一些河道存在工业废水与生活污水的污染,某些河道(如姚家浜)污染更为严重;镇管与区管河道管理级别较高,污染现象较少,一些区管河道(如北夏家浜)从苏州河引水,水体更新较快,水质情况总体较好。

**b.** 改进的水质综合标识指数法与传统方法相比,前者结果更符合实际水质情况。根据近年来水质监测数据,长宁区河道主要受到有机物的污染,且各监测断面数据差异较大,对断面总体影响评价也相对较高。传统方法将各水质评价指标对总体的影响视为一致,忽略了评价数据中信息权和主观权的作用,部分河道(北夏家浜、广顺河、姚家浜)评价结果与实际不符。改进的方法由于采用了主成分分析法,将数据赋主观权后进行协方差变换,求出的特征向量矩阵反映了长宁区各个河道不同污染物的信息量差别,同时,也能反映人为的主观作用,更符合实际。

**c.** 熵权赋权的综合水质标识指数法与传统方法相比,评价结果相似,主要原因是由于熵权法在确定指标权重时具有明确的数理意义,不能反映人为主观因素,且当评价样本差异不大时,不能完整反映样本的信息权重,导致熵权确定的指标权重差异不大。

**d.** 采用单因子评价法评价各河流,大部分河流水质评价结果均为劣V类,与实际河流水质情况不符,不能反映出多个污染因子对水体的综合影响,其评价结果缺乏综合性。而综合水质标识指数法能综合考虑多个评价因子的情况,且评价分值也能反映实际的位置,从而确定评价样本存在的差距,同时,综合标识法反映河道(姚家浜)的黑臭情况,这种方法更符合长宁区水质评价的需求。

### 3 结语

**a.** 本文对综合标识指数法进行改进:将主成分分析加入主观权重,并对特征向量进行离散程度的变化,变化后确定的指标权重用于综合水质标识指数法。改

进的方法可操作性强,能充分反映主、客观的影响。

**b.** 以上海市长宁区水质监测数据为基础,将改进方法与单因子评价法、传统综合水质标识指数法、熵权赋权的综合水标识指数法评价结果进行对比分析,结果表明改进方法能反映长宁区水质评价特点(有机物与氨氮影响较大),对劣V类水质也能进行黑臭的判别,评价结果基本准确、合理。

### 参考文献:

- [1] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(3):321-325. (XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(3):321-325. (in Chinese))
- [2] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(4):482-488. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(4):482-488. (in Chinese))
- [3] 梁增强,马民涛,杜改芳,等. 基于信息熵改进综合水质标识指数法及应用[J]. 四川环境,2013,32(3):38-42. (LIANG Zengqiang, MA Mintao, DU Gaifang, et al. Application of improved comprehensive water quality identification index method based on entropy weight[J]. Sichuan Environment,2013,32(3):38-42. (in Chinese))
- [4] 许剑辉,解新路,张菲菲,等. 结合熵权的综合水质标识指数法在水质评价中的应用[J]. 广东水利水电,2011(3):35-37. (XU Jianhui, XIE Xinlu, ZHANG Feifei, et al. Application of composite index method with entropy-weighted technique to water quality assessment [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2011(3):35-37. (in Chinese))
- [5] 曲直,房春生,王德龙,等. 改进综合水质标识指数法在长春河流水质评价中的应用[J]. 安徽农业科学,2012,40(17):9436-9438. (QU Zhi, FANG Chunsheng, WANG Delong, et al. Improving comprehensive water quality identification index for evaluation of water quality in Changchun District [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(17):9436-9438. (in Chinese))

(下转第94页)

以一定程度地纠正和补充核算的不足,另一方面也有利于提高公众对资源和环境的关注度,培养和树立公民环境保护的公众参与意识。

### 参考文献:

- [1] 丁述军. 绿色 GDP 核算:障碍与对策[J]. 上海经济研究, 2009(9): 84-90. (DING Shujun. Green GDP: accounting obstacles and countemeasures [J]. Shanghai Journal of Economics, 2009(9): 84-90. (in Chinese))
- [2] 鲁勇兵, 商月平, 叶金国. 开展我国绿色 GDP 核算的思路[J]. 统计与决策, 2005(15): 49-50. (LU Yongbing, SHANG Yueping, YE Jinguo. Ideas of carrying out Green GDP [J]. Statistics and Decision, 2005(15): 49-50. (in Chinese))
- [3] 胡勤海, 管单蓉, 陈晓燕, 等. 杭州市绿色 GDP 核算的 GIS 表征系统的开发[J]. 水资源保护, 2008, 24(5): 70-72. (HU Qin Hai, GUAN Danrong, CHEN Xiaoyan, et al. Visualization of Green GDP of Hangzhou City with GIS [J]. Water Resource Protection, 2008, 24(5): 70-72. (in Chinese))
- [4] 郑易生, 阎林, 钱慧红. 90 年代中期中国环境污染经济损失估算 [J]. 管理世界, 1999(2): 189-197. (ZHENG Yisheng, YAN Lin, QIAN Yihong. Estimated economic losses of China's pollution in mid-1990s [J]. Management World, 1999(2): 189-197. (in Chinese))
- [5] 彭涛, 吴文良. 绿色 GDP 核算: 低碳发展背景下的再研究与再讨论 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010(12): 81-86. (PENG Tao, WU Wenliang. Green GDP accounting: further research and discussion in the context of low-carbon development [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2010(12): 81-86. (in Chinese))

- [6] 王永瑜, 郭立平. 绿色 GDP 核算理论与方法研究 [J]. 统计研究, 2010(11): 77-84. (WANG Yongyu, GUO Liping. Research of theory and method of Green GDP accounting. [J]. Statistical Research, 2010(11): 77-84. (in Chinese))
- [7] 石昶. 论绿色 GDP 的理论基础与核算困境 [J]. 生态经济, 2011(11): 24-26. (SHI Chang. The theoretical foundation of Green GDP and the problems of its accounting [J]. Ecological Economy, 2011(11): 24-26. (in Chinese))
- [8] 蒋志华, 李瑞娟. 论绿色 GDP 核算试点中存在的六大问题 [J]. 统计与决策, 2010(7): 4-6. (JIANG Zhihua, LI Ruijuan. Six majors issues existed in Green GDP accounting pilot [J]. Statistics and Decision, 2010(7): 4-6. (in Chinese))
- [9] DEAN J M. Does trade liberalization harm the environment? a new test [J]. Canadian Journal of Economics, 2002, 35(4): 819-842.
- [10] 颜夕生. 江苏省农业环境污染造成的经济损失估算 [J]. 农业环境保护, 1993, 12(4): 158-160. (YAN Xisheng. The estimation of agriculture economic losses caused by environmental pollution in Jiangsu Province [J]. Journal of Agro-environment Science, 1993, 12(4): 158-160. (in Chinese))
- [11] 李莹, 白墨, 杨开忠, 等. 居民为改善北京市大气环境质量的支付意愿研究 [J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(5): 6-8. (LI Ying, BAI Mo, YANG Kaizhong, et al. Study on residents' willingness to pay for improving air quality in Beijing [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2001, 14(5): 6-8. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-09-12 编辑: 彭桃英)

(上接第 84 页)

- [6] 张旋, 王启山, 于淼, 等. 基于聚类分析和水质标识指数的水质评价方法 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(2): 476-480. (ZHANG Xuan, WANG Qishan, YU Miao, et al. An approach for water quality assessment based on hierarchical cluster analysis and comprehensive water quality identification index [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(2): 476-480. (in Chinese))
- [7] 周忠明. 加权主成分分析在多指标综合评价中的运用 [J]. 数理统计与管理, 1985(5): 16-21. (ZHOU Zhongming. Weighted principal component analysis applied in multi index comprehensive evaluation [J]. Application of Statistics and Management, 1985(5): 16-21. (in Chinese))
- [8] 李靖华, 郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究: 主成分评价 [J]. 管理工程学报, 2002(5): 39-43. (LI

Jinghua, GUO Yaohuang. Principal component evaluation: a multivariate evaluate method expanded from principal component analysis [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2002(5): 39-43. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-02-28 编辑: 徐娟)

