

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0742

龚艳冰, 刘高峰, 张继国, 等. 2014. 基于分形维数权重的南水北调东线源头水质评价研究[J]. 环境科学学报, 34(12): 3194-3199

Gong Y B, Liu G F, Zhang J G, et al. 2014. Water quality assessment of the east route of south-to-north water diversion based on fractal dimension weight [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(12): 3194-3199

基于分形维数权重的南水北调东线源头水质评价研究

龚艳冰^{1,2,*}, 刘高峰², 张继国², 梁雪春³

1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072

2. 河海大学 水利信息统计与管理研究所, 常州 213022

3. 南京工业大学 系统工程研究所, 南京 211816

收稿日期: 2014-02-13

修回日期: 2014-04-13

录用日期: 2014-05-14

摘要: 水质评价问题的实质是对水质现状和各评价因素间的函数关系的逼近, 是一种复杂的非线性问题. 针对水质评价指标之间的非线性关系, 提出了基于分形维数权重的水质评价方法. 为有效地评估南水北调东线源头的水质现状, 首先选取影响水质评价的 7 个主要因素, 根据标准等级水体分类标准, 采用在等级标准中随机内插的方法, 得到 50 个标准等级样本, 并根据样本综合评估值与经验等级之间的关系建立分形插值评价模型; 最后, 以长江江都市芒稻河断面 2001—2008 年的年平均水质监测数据为例对模型进行验证. 结果表明, 该方法可以通过分段函数得到每个样本的具体得分值, 因而具有较高的分类精度, 为水质评价提供了一种较好的新方法.

关键词: 分形维数; 分形插值模型; 水质评价

文章编号: 0253-2468(2014)12-3194-06

中图分类号: X824

文献标识码: A

Water quality assessment of the east route of south-to-north water diversion based on fractal dimension weight

GONG Yanbing^{1,2,*}, LIU Gaofeng², ZHANG Jiguo², LIANG Xuechun³

1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072

2. Institute of Hydraulic Information Statistic and Management, Hohai University, Changzhou 213022

3. Institute of Systems Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816

Received 13 February 2014;

received in revised form 13 April 2014;

accepted 14 May 2014

Abstract: Water quality evaluation is essentially a function approximation problem between water quality status and various evaluation factors, therefore is a complex nonlinear problem. The water quality evaluation method based on fractal dimension weight is developed according to the nonlinear relationship of water quality evaluation index. In order to evaluate the water quality condition of the east route of South-to-North Water Diversion, seven key factors are chosen to construct the model. According to the classification standard of water quality, fifty standard samples are produced by the way of stochastic interpolation on the basis of classification standard. The fractal interpolation evaluation model is established according to the relationship between the value of comprehensive evaluation of the samples and the experience level. Finally, a case study using the method is implemented according to monitoring data of Mangdaohe section in Yangtze River from 2001 to 2008. The result shows that the method can be obtained through specific scores value of each sample by piecewise function, therefore it has high classification accuracy and provides a better method for water quality assessment.

Keywords: fractal dimension; fractal interpolation model; water quality evaluation

1 引言 (Introduction)

南水北调东线工程是利用江苏省已有的长江

水北调工程, 从长江下游的江苏省江都市抽引长江水, 利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送, 并连接起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖、

基金项目: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开发基金 (No.2013B107); 江苏省自然科学基金 (No.BK20130242); 国家自然科学基金 (No.71303074)

Supported by the Fund of the State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science (No.2013B107), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20130242) and the National Natural Science Foundation of China (No.71303074)

作者简介: 龚艳冰 (1979—), 男, 副教授 (博士); * 通讯作者 (责任作者), E-mail: yanbg79@163.com

Biography: GONG Yanbing (1979—), male, associate professor (Ph.D.); * Corresponding author, E-mail: yanbg79@163.com

东平湖.南水北调东线源头水质的好坏直接影响到水资源使用价值和沿线地区经济和社会的发展,决定着南水北调工程的实际效益,同时也将对输水沿线水环境产生重要影响.水质评价是以定量的方式直观表征水环境的质量状况,是根据国家相关的水质标准,运用有效的水质评价方法,给出被评价水体的当前水质状态,以及发展趋势.通过水质评价可以了解水环境质量的过去、现在和将来发展趋势及其变化规律,从而为水环境质量的科学管理和规划提供科学依据(Huang *et al.*, 2001).

近年来,水质评价一直是人们探讨的热点问题,国内外学者对水质评价方法进行了许多有益的研究,相继提出了模糊综合评价法、灰色关联法、主成分法、神经网络法、支持向量机法、遗传算法等多种水质评价方法(王群妹等, 2010; 翟俊等, 2007; 潘妮等, 2008; 余勋等, 2013; 李雪等, 2010; 马文涛, 2007; 周荣喜等, 2013; 尹海龙等, 2008; 郑巧仙等, 2011; 龚艳冰等, 2011), 这些方法都各有特点, 尹海龙等(2008)对上述典型的7种河流综合水质评价方法的优缺点进行了比较研究.事实上,水质评价的实质是如何确定各评价指标的权重问题,而水质状态与各评价指标间是一种非常复杂的非线性关系.南水北调东线源头的水质优劣情况对它的的评价对于整个工程项目的顺利进行有着非常重要的意义.同时,由于分形理论在处理复杂的非线性现象和规律上具有突出优势.因此,本文试图构建基于分形维数权重的水质评价模型,并以长江江都市芒稻河断面2001—2008年的年平均水质监测数据为例对模型进行验证,以期从新的角度探索东线源头的水质评价方法.

2 指标分形维数权重的确定 (Determination of the fractal dimension weight of index)

分形的概念最早是由美籍数学家曼德布罗特(Mandelbort, 1975)提出的,分形维数作为分形的定量表征和基本参数,是分形理论的重要原则.而分形理论是描述自然界中许多不规则事物的规律性科学,它使得人们能够以新的概念来处理非线性领域中的问题,揭示复杂现象背后的规律、局部和整体之间的本质的内在关联性.分形特征的度量通常用分形维数(Fractal dimension)来表示,本研究中分形维数权重的确定步骤如下(刘光萍等, 2005; 王威等, 2011).

假设江都市芒稻河断面水质评价影响因素中

第*i*个指标 X_i^* 的数据向量为:

$$X_i^* = (x_{i1}^*, x_{i2}^*, \dots, x_{in}^*), i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中, n 为待评价因素的样本个数; m 为待评价对象的指标个数.

1)对数据进行规范化处理,对于效益型指标和成本型指标分别按式(2)和(3)进行计算,之后将指标变换到 $[0, 1]$ 区间,即得到数据归一化后的指标数据向量如式(4)所示.

$$X_i = (X_i^* - \min X_i^*) / (\max X_i^* - \min X_i^*) \quad (2)$$

$$X_i = (\max X_i^* - X_i^*) / (\max X_i^* - \min X_i^*) \quad (3)$$

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (4)$$

2)建立1~7维相空间(需要时可多达9维或更大),形式如下:

$$\begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} \\ x_{i2} & x_{i3} \\ \dots & \dots \\ x_{i(n-1)} & x_{in} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{i7} \\ x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{i8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i(n-6)} & x_{i(n-5)} & \dots & x_{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$

一维 二维 ... 七维相空间
相空间 相空间

3)分别计算上述1~7维相空间两点之间的距离 $r_{pq}(s)$ 与平均距离 Δx_s ,计算公式为:

$$r_{pq}(s) = \sqrt{\sum_{l=1}^s (x_{pl} - x_{ql})^2} \quad (6)$$

$$\Delta x_s = \sum_{p=1}^{n-s+1} \sum_{q=1}^{n-s+1} \frac{r_{pq}(s)}{(n-s+1)^2} \quad (7)$$

式中, $p, q = 1, 2, \dots, n-s+1$ (不同相空间的点数); $s = 1, 2, \dots, \omega$ (相空间维数 $\omega = 7$).

4)分别计算上述1~7维相空间两点之间距离小于 r_{sk} 的概率 $C_k(s)$,计算公式为:

$$C_k(s) = \frac{1}{(n-s+1)^2} \sum_p \sum_q H(r_{sk} - r_{pq}(s)) \quad (8)$$

式中, r_{sk} 为指定的距离上限, k 一般取相空间维数 ω 的2倍, H 为Heaviside函数,其值分别由下式确定:

$$r_{sk} = \frac{k}{10} \Delta x_s, k = 1, 2, \dots, 14 \quad (9)$$

$$H(r_{sk} - r_{pq}(s)) = \begin{cases} 1, & r_{sk} - r_{pq}(s) \geq 0 \\ 0, & r_{sk} - r_{pq}(s) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

5)如果存在分形,则每维相空间有:

$$C_k(s) \propto r_{sk}^D \quad (11)$$

根据上述1~7维相空间求出一组 $C_k(s)$ 值,在 $C_k(s)$ 和 r_{sk} 双对数图上若为直线,则分形存在,其斜率为分形维数,即:

$$D_s = \lim_{r_{sk} \rightarrow 0} \frac{\ln C_k(s)}{\ln r_{sk}} \quad (12)$$

6)若分形维数随着相空间维数的升高趋向极限,则此极限值为空间的分形维数.在实际应用中,若分形维数没有严格地趋向某一极限,则采取比较不同维数相空间的分形维数,选择其趋于稳定的最大者或相邻空间分形维数之差满足一定精度,作为该水质评价影响指标的分形维数.

3 分形插值评价模型的构建 (Development of the evaluation model of fractal interpolation)

依据上述方法求出每个水质评价影响指标的分形维数权重,可根据如下步骤建立水质评价分形插值评价模型.

1)对影响水质状况的各评价指标进行数据归一化预处理,从而消除指标的量纲并统一指标的变化方向.

2)在上述评价标准等级范围内,利用 Matlab 软件按均匀分布随机产生 l 个标准样本,对于每个指标采用同一组随机数值,若有 T 个评价标准等级,则可形成 $l \times T$ 个评价标准样本,每个评价样本对应的经验等级为 $y(j)$.

3)根据公式(6)~(12)计算各指标分形维数 D_i ,利用公式(13)可求得第 j 个样本的评价值.

$$z(j) = \sum_{i=1}^m D_i \times x_{ij} \quad (13)$$

4)对于 T 个评价等级,设第 t 个评价等级对应的评价值 $z(j) \in [S_t, S']$,其中, S_t, S' 是根据国家《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)确定的 5 类水质分类区间的上界和下界,根据第 j 个样本计算的评价值 $z(j)$ 与经验等级 $y(j)$ (式(14)),建立 $z(j) - y(j)$ 的散点图,根据散点图可建立相应的分形插值评价模型(阶梯函数).

$$y(j) = \begin{cases} 1, & z(j) \leq S^1 \\ 1 + \frac{z(j) - S^1}{S_2 - S^1}, & S^1 < z(j) < S_2 \\ 2, & S_2 \leq z(j) \leq S^2 \\ 2 + \frac{z(j) - S^2}{S_3 - S^2}, & S^2 < z(j) < S_3 \\ \dots & \dots \dots \\ T - 1 + \frac{z(j) - S^{t-1}}{S_t - S^{t-1}}, & S^{t-1} < z(j) < S_t \\ T, & S_t \leq z(j) \end{cases} \quad (14)$$

4 南水北调东线源头水质评价研究 (Water quality assessment of the east route of south-to-north water diversion)

4.1 水质评价指标体系

2002 年,国家环境保护总局、国家质量监督检验检疫总局共同发布了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),标准依据地表水水域环境功能和保护目标,按功能高低依次划分为 5 类,对应地表水 5 类水域功能.地表水环境质量标准基本项目标准分为 5 类,不同功能类别分别执行相应类别的标准值,水域功能类别高的标准值严于水域功能类别低的标准值(龚艳冰等,2011).

根据江苏省江都市地区的水质实际情况,本文选取《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中部分指标体系,分别是 $BOD_5(x_1)$ 、溶解氧(x_2)、氨氮 $NH_3-N(x_3)$ 、高锰酸盐指数(x_4)、石油类(x_5)、粪大肠菌群(x_6)、挥发酚(x_7),其中,溶解氧是效益型指标,其他都为成本型指标.将水质等级划分为 5 个等级,各评价指标与水质等级的关系如表 1 所示.

表 1 不同水质等级的评价指标值

Table 1 Environmental quality standards for different evaluation indexes of surface water

水质等级	$BOD_5/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	溶解氧/ ($mg \cdot L^{-1}$)	氨氮/ ($mg \cdot L^{-1}$)	高锰酸盐指数/ ($mg \cdot L^{-1}$)	石油类/ ($mg \cdot L^{-1}$)	粪大肠菌群/ (个 $\cdot L^{-1}$)	挥发酚/ ($mg \cdot L^{-1}$)
I 类	0~3	7.5~10	0~0.15	0~2	0~0.05	0~200	0~0.002
II 类	0~3	6~7.5	0.15~0.5	2~4	0~0.05	200~2000	0~0.002
III 类	3~4	5~6	0.5~1.0	4~6	0~0.05	2000~10000	0.002~0.005
IV 类	4~6	3~5	1.0~1.5	6~10	0.05~0.5	10000~20000	0.005~0.01
V 类	6~10	2~3	1.5~2.0	10~15	0.5~1.0	20000~40000	0.01~0.1

4.2 长江芒稻河二水厂断面水质评价

4.2.1 数据规范化预处理 在上述各评价标准等

级范围内按均匀分布随机产生 10 个样本,对于每个指标采用同一组随机数值,共形成 50 个评价样本,

将 I ~ IV 类水体和 V 类水体分别赋予经验等级 1 ~ 5 共 5 个等级,结果如表 2 所示.

表 2 预处理后的标准样本
Table 2 Standard sample pretreatment

序号	BOD ₅	溶解氧	氨氮	高锰酸盐指数	石油类	粪大肠菌群	挥发酚	等级
1	0.1546	0.1288	0.0010	0.0087	0.0326	0.0000	0.0003	1
2	0.1142	0.0688	0.0435	0.0983	0.0396	0.0011	0.0056	1
...
11	0.1818	0.4756	0.1733	0.1969	0.0386	0.0253	0.0178	2
12	0.0993	0.4092	0.1916	0.2488	0.0224	0.0097	0.0045	2
...
21	0.3967	0.5932	0.3636	0.3978	0.0053	0.0891	0.0429	3
22	0.3504	0.5247	0.4192	0.3988	0.0262	0.0783	0.0473	3
...
31	0.5644	0.6742	0.7262	0.6460	0.0505	0.4468	0.0954	4
32	0.5129	0.7572	0.7356	0.5344	0.1272	0.3642	0.0504	4
...
49	0.9482	0.8806	0.8368	0.8055	0.6264	0.9164	0.5102	5
50	0.8624	0.9716	0.8582	0.7752	0.7287	0.6868	0.6264	5

4.2.2 评价指标分形维数权重的确定 根据公式 (6) ~ (12) 利用 Matlab 软件编程,计算水质评价指标 $X=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$ 的分形维数 $D=(1.4939, 1.4499, 1.1465, 1.3578, 0.3960, 0.7784, 0.3342)$. 图 1 为利用表 2 样本数据建立 7 维各指标的相空间,拟合出的影响指标 x_1 的对数 $\ln C_k(s) - \ln r_{sk}$ 曲线,曲线的斜率就是所要求的关联分形维数权重(限于篇幅,仅给出 1 维和 7 维相空间的拟合曲线),其他 6 个影响指标可以采用相同的方法求得.

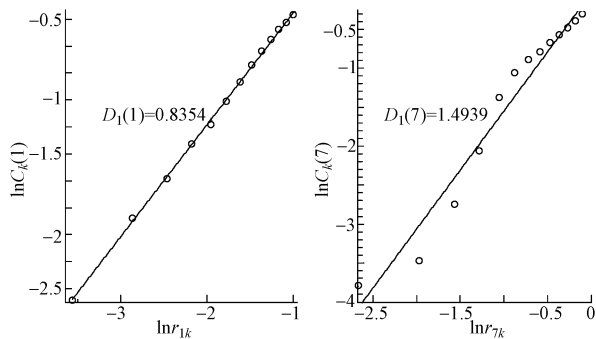


图 1 水质评价指标 x_1 的 $\ln C_k(s) - \ln r_{sk}$ 拟合直线

Fig.1 Line fitting ($\ln C_k(s) - \ln r_{sk}$) of water quality evaluation index x_1

4.2.3 等级分类模型的建立 根据公式(9)算出的上述 50 个样本的综合评价值分别如下:

$Z=(0.4437, 0.4721, 0.7569, 0.6954, 0.2250, 0.9448, 0.8740, 0.5866, 0.5365, 1.0344, 1.4681, 1.3171, 1.2308, 1.4475, 1.1993, 1.3969, 1.1829, 1.2192, 1.1585, 1.5860,$

$2.4955, 2.3935, 2.2600, 2.2456, 2.3016, 2.5209, 2.1947, 2.2821, 2.3476, 2.2400, 3.9301, 3.7838, 3.5599, 3.8728, 4.1429, 3.5163, 3.8244, 3.8156, 3.7654, 3.9055, 5.7117, 6.1689, 5.7918, 6.1047, 5.4304, 5.7808, 5.1906, 5.5801, 5.8783, 5.7661)$

以经验等级值为纵坐标,以综合评价值为横坐标,得到两者的散点图(图 2).从图 2 可以看出, $z(j)$ 和 $y(j)$ 的图形为阶梯形、上升曲线,根据公式 (13) 用 $a, b, c, d, e, f, g, h, k, l$ 分段线性插值,得到水质评价的分形插值等级模型(分段函数),具体见公式 (15).

$$y(j) = \begin{cases} 1, & z(j) \leq 1.0344 \\ 1 + \frac{z(j) - 1.0344}{1.1585 - 1.0344}, & 1.0344 < z(j) < 1.1585 \\ 2, & 1.1585 \leq z(j) \leq 1.5860 \\ 2 + \frac{z(j) - 1.5860}{2.1947 - 1.5860}, & 1.5860 < z(j) < 2.1947 \\ 3, & 2.1947 \leq z(j) \leq 2.5209 \\ 3 + \frac{z(j) - 2.5209}{3.5163 - 2.5209}, & 2.5209 < z(j) < 3.5163 \\ 4, & 3.5163 \leq z(j) \leq 4.1429 \\ 4 + \frac{z(j) - 4.1429}{5.1906 - 4.1429}, & 4.1429 < z(j) < 5.1906 \\ 5, & 5.1906 \leq z(j) \end{cases} \quad (15)$$

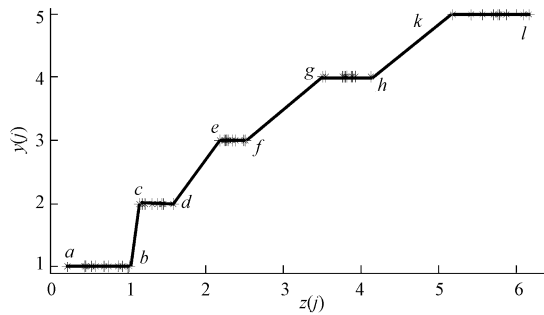


图2 综合评价值与经验等级值的散点图

Fig.2 Scatter plot of comprehensive evaluation and experience level value

4.2.4 水质现状等级分类评价 根据《地表水环境

质量标准》(GB3838—2002)和扬州市江都环境监测中心站的原始数据,本文收集了南水北调扬州江都芒稻河地区从2001—2008年比较完整的数据:长江芒稻河二水厂断面为BOD₅、挥发酚、溶解氧、石油类、氨氮、高锰酸盐指数、粪大肠菌群共7个水质指标的数据(梁雪春等,2010),具体如表3所示。

将表3的数据规范化后代入线性插值公式(15),得到芒稻河二水厂断面年平均水质的综合评价值,表4是将本文方法与全排列多边形图示法(龚艳冰等,2011)及LM-BP网络法(夏美娟等,2011)进行综合比较的结果,图3则反映了3种方法对该区域历年水质与I类水体和II类水体之间的关系,以及历年水质综合指数的总体趋势。

表3 芒稻河二水厂断面主要监测指标的年平均监测值

Table 3 Average annual monitoring values of Mangdaohu section in second water plant

年份	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	高锰酸盐指数/ (mg·L ⁻¹)	石油类/ (mg·L ⁻¹)	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)	挥发酚/ (mg·L ⁻¹)
2001	1.575	6.8	0.330	3.638	0.01775	1175	0.001
2002	1.125	6.7	0.451	3.242	0.055	2483	0.001
2003	1.675	7.2	0.441	3.375	0.020	1900	0.001
2004	1.700	7.9	0.284	3.050	0.033	1683	0.002
2005	1.575	7.8	0.374	2.900	0.050	2116	0.002
2006	1.930	7.3	0.420	3.383	0.050	1974	0.002
2007	2.067	6.9	0.468	3.633	0.083	1766	0.002
2008	2.067	7.7	0.394	3.325	0.100	2520	0.002

表4 芒稻河二水厂断面水质评价方法结果对照表

Table 4 Comparison of water quality evaluation results of Mangdaohu section in second water plant

年份	分形维数权重法		全排列多边形图示法		LM-BP网络法	
	综合指标值	水质评价等级	综合指标值	水质评价等级	综合指标值	水质评价等级
2001	1.0370	[II类, I类]	0.4294	I类	1.8599	II类
2002	1.3916	II类	0.2272	[II类, I类]	1.6665	II类
2003	1.3642	II类	0.3669	[II类, I类]	1.7055	II类
2004	1.1260	[II类, I类]	0.5046	I类	1.5799	II类
2005	1.1786	II类	0.2564	[II类, I类]	1.4408	II类
2006	1.3896	II类	0.1585	[II类, I类]	1.6842	II类
2007	1.5417	II类	0.0745	[II类, I类]	1.8529	II类
2008	1.3478	II类	0.0889	[II类, I类]	1.8235	II类

4.3 水质评价结果分析

由表4可以看出,全排列多边形图示法得到的水质评价等级过于乐观,LM-BP网络法的水质评价等级过于保守,分形维数权重法介于两者之间.这是因为全排列多边形图示法虽然简洁直观,能够反映系统的整合原理,评价结果也有较明确的几何意义,但这种方法没有考虑各影响因素之间的权重,

是一种等权的评价方法.LM-BP网络法虽然考虑了权重因素的影响,但由于在算法运行过程中需要一定数目的训练样本,如果训练样本的数目比较少,则水质评价结果会趋于保守.分形插值方法既考虑了指标间的非线性关系又考虑了指标间的权重关系,不会过分依赖于训练样本数,因此,评价结果更合理、客观.同时,从图3可以看出,分形维数权重法

得到的 I 类水体与 II 类水体分界线之间的距离要比另外两种方法小,这是因为水质达到优良的难度是呈非线性增大的,反映了达到 I 类水体目标的难度在不断增加,这与《地表水环境质量标准》的分类等级中 I 类水体与 II 类水体分界值是一致的。

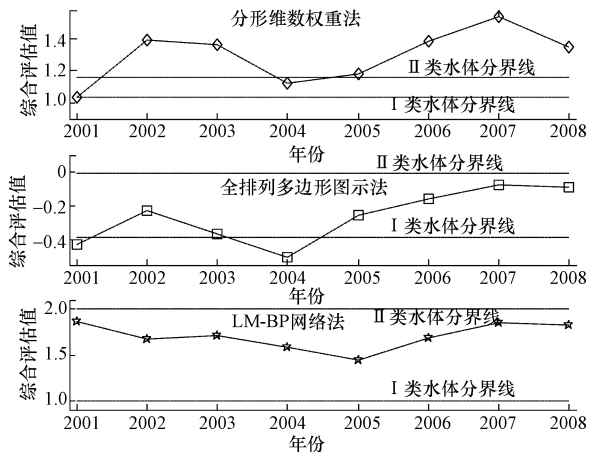


图3 芒稻河断面年平均水质分类及趋势(为了便于比较趋势,全排列多边形图示法的综合指标值取负号)

Fig.3 Average annual water quality classification and trends in Mangdaohe section

5 结论(Conclusions)

水质评价是一个复杂的非线性系统问题,本文利用分形理论较强的非线性数据处理能力,构建了基于分形维数权重的水质评价模型,该模型针对标准样本量少的问题,可以在每级标准之间随机内插构建标准样本集.此外,利用该模型可以得到一个具体的数值,不但能评价水质的等级,而且还能对同等级水质进行排序,因而具有较高的分类精度.从评价结果来看,南水北调东线源头地表水环境质量总体良好,江都段历年水质都保持在 II 类水体标准以上,基本达到可直接饮用的南水北调工程的要求.从 2001—2008 年长江芒稻河二水厂断面水质数据综合评估的结果可以发现,2007 年其水质最差,2001

年水质最好,而水质最差的 3 年也主要集中在 2005 年以后的年份.

责任作者简介:龚艳冰(1979—),男,副教授,硕士生导师,从事干旱灾害风险、水质评价与预测方面的研究.E-mail: yanbg79@163.com.

参考文献(References):

- 龚艳冰,张继国,梁雪春.2011.基于全排列多边形综合图示法的水质评价[J].中国人口·资源与环境,21(9):26-31
- Huang G H, Xia J.2001.Barriers to sustainable water quality management [J].Journal of Environment Management,61(1):1-23
- 李雪,刘长发,朱学慧,等.2010.基于 BP 神经网络的海水水质综合评价[J].海洋通报,29(2):225-230
- 梁雪春,李文祥,龚艳冰.2010.南水北调东线源头水污染预测预警系统研究报告[R].南京.1-120
- 刘光萍,杜萍,王琨.2005.分形理论在湖泊富营养化评价中的应用[J].江西农业大学学报,27(6):925-929
- 马文涛.2007.支持向量机回归方法在地表水水质评价中的应用[J].数学的实践与认识,37(9):45-50
- Mandelbrot B.1975. Fractals: Form, Chance, and Dimension[M]. New York:W.H.Freeman & Company
- 潘妮,梁川.2008.基于熵权的灰色关联模型在流域水质综合评价中的应用[J].中国农村水利水电,(4):1-3
- 王群妹,梁雪春.2010.基于主成分分析的水质评价研究[J].水资源与水工程学,21(6):140-142
- 王威,田杰,马东辉,等.2011.基于分形维数权重的泥石流危险度评价[J].山地学报,29(6):747-752
- 夏美娟,梁雪春.2011.基于 LM-BP 网络的南水北调东线源头水质综合评价[J].安徽农业科学,39(32):19954-19957
- 尹海龙,徐祖信.2008.河流综合水质评价方法比较研究[J].长江流域资源与环境,17(5):729-733
- 余勋,梁婕,曾光明,等.2013.基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型[J].环境科学学报,33(3):904-909
- 翟俊,何强,肖海文.2007.基于 GIS 的模糊综合水质评价模型[J].重庆大学学报(自然科学版),10(8):49-53
- 郑巧仙,刘金英,李明.2011.地表水水质评价模型及其遗传算法求解[J].湖北大学学报(自然科学版),33(4):475-478
- 周荣喜,单欣涛,杨杰,等.2013.基于熵权的区间型多属性决策方法在湖泊水质评价中的应用[J].环境科学学报,33(3):910-917