

文章编号 : 1004 - 7271( 2006 ) 04 - 0497 - 06  
· 研究简报 ·

## 灰色聚类法评价淀山湖水质状况

王旭晨, 王丽卿, 彭自然

(上海水产大学生命科学与技术学院, 上海 200090)

**摘 要** 2004 年逐月在淀山湖 6 个站点进行水质参数测定。水质参数在各站点的月平均变化范围为 DO 7.210 ~ 9.943 mg/L, BOD<sub>5</sub> 3.810 ~ 4.940 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 6.016 ~ 7.053 mg/L, TP 0.137 ~ 0.366 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 2.176 ~ 3.362 mg/L, Chl. a 29.814 ~ 56.02 mg/m<sup>3</sup>。对各站点 2004 年水质参数的月平均测定结果应用灰色聚类方法进行富营养化程度和水环境质量等级评价, 结果显示: 调查的六个站点全部处于富营养化水平, 六个站点的水质全部处于 V 类水等级。在灰色聚类法评价水质过程中, 权系数最大的是氮、磷及叶绿素 a。因此, 在淀山湖人工栽植水草进行脱氮除磷、放养滤食性鱼类抑制藻类大量繁殖是改善淀山湖水质的有效途径。

**关键词** 灰色聚类法; 水体富营养化; 水环境质量; 评价

中图分类号 S 912 文献标识码: A

## Eutrophic status and water quality grade evaluations of Lake Dianshan based on grey-clustering method

WANG Xu-chen, WANG Li-qing, PENG Zi-ran

(College of Aqua-life Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

**Abstract** Based on the data of water quality parameters sampled monthly from six stations of Lake Dianshan in 2004, the author aimed at evaluating eutrophic status and quality grades with the grey-clustering method. Water quality parameters of DO, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TP, NH<sub>3</sub>-N, Chl. a in Lake Dianshan monthly means ranged at 7.210 - 9.943 mg/L, 3.810 - 4.940 mg/L, 6.016 - 7.053 mg/L, 0.137 - 0.366 mg/L, 2.176 - 3.362 mg/L, 29.814 - 56.02 mg/m<sup>3</sup> respectively. The evaluating results showed that (1) Lake Dianshan was in the eutrophic status at six sampled stations; (2) the water quality of this lake was in V-grade level. In the process of evaluation by grey-clustering method, TP, NH<sub>3</sub>-N, Chl. a were found to be the most important water quality parameters which contributed to eutrophic status and quality grades. The article suggested the effective measures to improve the water quality of Lake Dianshan are to remove the surplus nitrogen and phosphorus by planting the aquatic grass, and to restrain the algae blooming by rearing the filter fish.

**Key words** grey clustering method; eutrophic status; water quality grade; evaluation

为了解湖泊水体受污染的程度以及水域环境保护、治理的需要, 人们通常对湖泊进行水体富营养以

收稿日期 2005-10-26

基金项目: 上海市教委青年基金项目(科 04 - 140)和上海市重点学科建设项目(Y1101)

作者简介: 王旭晨(1982 - ), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 专业方向为水域生态学。E-mail: xc-wang@stmail.shfu.edu.cn

通讯作者: 王丽卿, E-mail: lqwang@shfu.edu.cn

及水体环境质量(等级)评价。近年来,我国学者已提出许多相关的评价方法,如概率统计法<sup>[1]</sup>、营养指数法<sup>[2]</sup>、模糊神经网络<sup>[3]</sup>、模糊数学法<sup>[4]</sup>以及灰色聚类法<sup>[5-10]</sup>等。其中灰色聚类法是建立在模糊数学基础上的新的理论,对信息的利用更充分,是水质评价方法中一种简便客观而又可靠的方法<sup>[11-12]</sup>,已用于多个湖泊(博斯腾湖、巢湖、西湖、玄武湖等)的富营养化评价<sup>[5-7]</sup>以及水环境质量评价<sup>[8-10]</sup>。淀山湖作为上海市饮用水源之一,由于不合理开发造成水质的严重污染,直接影响到上海市民的健康用水,为了更好地维护和改善水质状况,必须进行水环境质量综合评价,确定评价区的水质现状分级情况,以便及时地制定相应区域的治理措施,以防止水质进一步恶化。本文以淀山湖 2004 年现场测定的理化、生物指标为基本数据,采用灰色聚类方法对淀山湖水体营养水平状况以及水环境质量等级进行评价。

### 1 灰色聚类方法步骤

灰色聚类法评价的主要步骤为确定各类白化函数、确定各类聚类权重、求聚类系数、确定各聚类对象所属质量级别。

(1) 记  $i = 1, 2, \dots, n$  作为聚类对象;  $j = 1, 2, \dots, m$  为聚类指标;  $k = 1, 2, \dots, K$  为灰类。  $x_{ij}$  为第  $i$  个聚类对象关于第  $j$  个聚类指标的样本实测值,  $X = (x_{ij})_{n \times m}$  为样本矩阵。

(2) 设  $f_{jk}$  为聚类指标  $j$  属于  $k$  灰类的白化函数,  $f_{jk} \in [0, 1]$

(3) 记  $\eta_{jk}$  为灰色聚类权, 它表示第  $j$  种指标属于第  $k$  灰类的权重。  $\eta_{jk}$  计算可分为以下两种情况:

① 当聚类指标的意义、量纲相同时:

$$\eta_{jk} = \frac{1/\lambda_{jk}}{\sum_{j=1}^m (1/\lambda_{jk})} \tag{1}$$

$\lambda_{jk}$ ——为灰类白化权函数的阈值

② 若聚类指标量纲不同, 且不同指标的样本值在数量上相差很大时, 可先进行无量纲处理:

$$\gamma_{jk} = \frac{S_{jk}}{S_j} \tag{2}$$

式中  $S_{jk}$  为第  $j$  种指标的第  $k$  个灰类的灰数,  $S_j$  为第  $j$  种指标的参照标准

$$\eta_{jk} = \frac{1/\gamma_{jk}}{\sum_{j=1}^m (1/\gamma_{jk})} \tag{3}$$

(4) 令  $\sigma_{ik}$  为灰色聚类系数, 它反映第  $i$  个聚类对象隶属于第  $k$  灰类的程度。

$$\sigma_{ik} = \sum_{j=1}^m f_{jk}(x_{ij}) \times \eta_{jk} \tag{4}$$

式中  $f_{jk}(x_{ij})$  系由样本值  $x_{ij}$  求得的白化函数值;  $\eta_{jk}$  为灰色聚类权值。

(5) 灰色聚类决策矩阵

$$\sigma_c = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_i \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1k} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{i1} & \sigma_{i2} & \cdots & \sigma_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n1} & \cdots & \sigma_{n1} \end{bmatrix}$$

若有  $\sigma_{ik}$  满足  $\sigma_{ik}^* = \max_{1 \leq k \leq K} \{\sigma_{ik}\} = \max_{1 \leq k \leq K} \{\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{ik}\}$  称聚类对象  $i$  属于灰类  $k^*$ 。在聚类行向量  $\sigma_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{ik})$  中, 找出最大聚类系数  $\sigma_{ik}^*$ , 该最大灰类系数所对应的灰类  $k^*$ , 即该聚类对象  $i$  所属灰类。

## 2 聚类指标

聚类样本选取淀山湖的 6 个采样点(1# 为淀峰出水口、2# 金家庄、3# 网箱养殖区、4# 湖心、5# 急水港、6# 马兰港),每个采样点测定溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、化学耗氧量(COD<sub>Mn</sub>)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、叶绿素(Chl.a) 6 项聚类指标。2004 年 1-12 月逐月进行监测,整个淀山湖 6 个采样点在 2004 年的月平均监测结果见表 1。

表 1 2004 年淀山湖水质参数和叶绿素 a 月平均值

Tab.1 Monthly average of water chemical parameters and chlorella in Lake Dianshan in 2004

聚类指标 j	测 点 i					
	1 #	2 #	3 #	4 #	5 #	6 #
DO (mg/L)	9.245	9.943	9.298	9.392	7.210	9.699
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	6.738	7.053	6.884	6.480	6.016	6.118
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	4.480	4.712	4.525	3.810	4.940	4.108
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	2.176	2.696	2.834	2.196	3.362	2.588
Chl. a (mg/m <sup>3</sup> )	31.120	56.020	55.671	36.263	29.814	34.596
TP (mg/L)	0.174	0.190	0.137	0.164	0.366	0.196

## 3 水质富营养化评价

### 3.1 水质富营养化标准选择及灰类的划分

湖泊富营养化程度的聚类白化函数,要根据湖泊营养的标准来确定。采用金相灿等提出的评价标准<sup>[13]</sup>(表 2),将水环境质量分为四级,即四个灰类(k=1,2,3,4),1 级对应贫营养,2 级对应中营养,3 级对应富营养,4 级对应极富营养。

表 2 湖泊富营养化的评价标准

Tab.2 The evaluation standard of eutrophic levels on lakes

聚类指标	1 级	2 级	3 级	4 级
DO (mg/L)	15 ~ 8.5	8.5 ~ 5	5 ~ 2	2 ~ 0
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	0.960 ~ 2.964	2.964 ~ 6.285	6.285 ~ 13.325	13.325 ~ 28.254
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	0.44 ~ 1.41	1.41 ~ 3.26	3.26 ~ 6.64	6.64 ~ 14.42
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0.009 ~ 0.055	0.055 ~ 0.186	0.186 ~ 0.627	0.627 ~ 2.106
Chl. a (mg/m <sup>3</sup> )	0.10 ~ 1.59	1.59 ~ 10	10 ~ 64	64 ~ 400
TP (mg/L)	0.003 ~ 0.019	0.019 ~ 0.065	0.065 ~ 0.223	0.223 ~ 0.764

取表 2 中每一评价等级的均值作为各自的灰类值,4 个评价等级灰类值的平均值则用 S<sub>j</sub> 表示,结果如表 3 所示。

表 3 不同聚类指标的评价标准的灰类值

Tab.3 The grey-clustering values on evaluation standard of different clustering index

聚类指标	1 级	2 级	3 级	4 级	S <sub>j</sub>
DO (mg/L)	11.75	6.75	3.5	1.0	5.0
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	1.962	4.625	9.805	20.790	6.285
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	0.925	2.335	4.950	10.53	3.26
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0.032	0.121	0.407	1.367	0.185
Chl. a (mg/m <sup>3</sup> )	0.845	5.795	37	232	10
TP (mg/L)	0.011	0.042	0.144	0.494	0.065

### 3.2 无量纲化处理

对于聚类指标(污染指标)评价标准的无量纲化采用公式(2),计算结果见表4

表4 无量纲化后的灰类值  $\gamma_{jk}$

Tab.4 The grey-clustering values ( $\gamma_{jk}$ ) after no dimension

聚类指标	1级	2级	3级	4级
DO(mg/L)	2.35	1.35	0.7	0.2
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	0.312	0.736	1.560	3.308
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	0.284	0.716	1.518	3.230
NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	0.173	0.654	2.2	7.389
Chl. <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	0.085	0.580	3.7	23.2
TP(mg/L)	0.169	0.646	2.215	7.6

### 3.3 白化函数 $f_{jk}$ 的确定

根据白化函数的三种基本形式,构造白化函数如下:

$$f_{j1}(X) = \begin{cases} 1 & X \in [0, \lambda_{j1}] \\ \frac{\lambda_{j2} - X}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} & X \in [\lambda_{j1}, \lambda_{j2}] \\ 0 & X \in [\lambda_{j2}, \infty] \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{jk}(X) = \begin{cases} \frac{X - \lambda_{j,k-1}}{\lambda_{j,k} - \lambda_{j,k-1}} & X \in [\lambda_{j,k-1}, \lambda_{j,k}] \\ \frac{\lambda_{j,k+1} - x}{\lambda_{j,k+1} - \lambda_{j,k}} & X \in [\lambda_{j,k}, \lambda_{j,k+1}] \\ 0 & X \in [\lambda_{j,k-1}, \lambda_{j,k}] \end{cases} \quad (6)$$

(  $k = 2, \dots, K-1$  )

$$f_{jK}(X) = \begin{cases} 0 & X \in [0, \lambda_{j,K-1}] \\ \frac{X - \lambda_{j,K-1}}{\lambda_{j,K} - \lambda_{j,K-1}} & X \in [\lambda_{j,K-1}, \lambda_{j,K}] \\ 1 & X \in [\lambda_{j,K}, \infty] \end{cases} \quad (7)$$

(  $k = K$  )

其中 DO 与其它污染物作用不同,DO 值越大说明水质越好,其白化函数式应作相应变动,如第 1 级可变为下式,其他的依此类推。

$$f_{j1}(X) = \begin{cases} 1 & X \in [\lambda_{j1}, \infty] \\ \frac{\lambda_{j2} - X}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} & X \in [\lambda_{j2}, \lambda_{j1}] \\ 0 & X \in [-\infty, \lambda_{j2}] \end{cases}$$

### 3.4 计算灰色聚类权

将表 4 中无量纲化后的数据代入式(3)可求得聚类权重值。

### 3.5 求聚类系数及聚类结果

按照式(4)求得的聚类系数及聚类结果见表 6。结果表明,淀山湖各测点的水质均为富营养型,全湖水质呈现富营养化。

表 6 聚类系数及聚类结果  
Tab.6 Grey-clustering coefficient and results

采样点	灰类 k				最大元对应的灰类
	1 级	2 级	3 级	4 级	
1#	0.007	0.211	0.367	0.025	3 级富营养
2#	0.009	0.134	0.393	0.027	3 级富营养
3#	0.007	0.176	0.383	0.024	3 级富营养
4#	0.007	0.225	0.330	0.024	3 级富营养
5#	0.001	0.256	0.307	0.037	3 级富营养
6#	0.008	0.223	0.324	0.026	3 级富营养

## 4 水环境质量等级评价

### 4.1 地表水水质评价标准选择及灰类的划分

评价标准采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),将水环境质量分为五个等级( $k = I, II, III, IV, V$ ),见表 7。

表 7 国家地表水环境质量分级标准(GB3838-2002)  
Tab.7 The grade criteria of water quality based on GB3838-2002

聚类指标	I	II	III	IV	V
DO(mg/L)	7.5	6	5	3	2
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	2	4	6	10	15
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	3	3	4	6	10
NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	0.15	0.5	1	1.5	2
Chl. a(mg/m <sup>3</sup> )	1	4	10	30	65
TP(mg/L)	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2

### 4.2 数据无量纲化、白化函数确定及灰色聚类权计算

参考富营养化评价步骤。

### 4.3 聚类系数及聚类结果

求得聚类系数及聚类结果见表 8。

表 8 聚类系数及聚类结果  
Tab.8 Grey-clustering coefficient and results

采样点	灰类 k					最大元对应结果
	I	II	III	IV	V	
1#	0.01	0	0.164	0.257	0.267	V
2#	0.01	0	0.144	0.131	0.354	V
3#	0.01	0	0.157	0.252	0.269	V
4#	0.01	0.014	0.176	0.224	0.263	V
5#	0.008	0.007	0.162	0.206	0.305	V
6#	0.01	0	0.198	0.148	0.310	V

## 5 讨论

淀山湖曾是一个多功能湖泊,不仅是当地居民及上海市居民的重要生活饮用水地表水源之一,也是重要的旅游和渔业区。但由于近几十年不合理开发和工业污染,淀山湖已丧失其部分基本功能,逐渐演

变成了一个富营养化的藻型湖泊。然而,随着社会经济的增长和人们生活水平的提高,对淀山湖的水环境质量和生态修复越来越受关注。上海青浦环境监测部门以及太湖环境流域监测部门分别对淀山湖水质进行长期监测,但是对其富营养化和环境质量运用数学模型进行综合评价少见报道。

影响湖泊水质的因素很多,评价因素与富营养化等级之间的关系也很模糊,所以至今仍没有一种统一的确定的评价模式。环境是一个多因素多层次的复杂系统,由于环境系统质量评价是存在着一些不甚明确的灰色信息,仅从评价因素的监测数据难以建立确定的数学模型,事实上,环境系统是一个具有模糊性的灰色系统<sup>[7]</sup>。灰色聚类法考虑了系统的灰色性和白化程度以及各个污染因子的综合影响而进行聚类加权,其权重的确定方法也比其他方法更合理、客观,同时,方法本身也考虑了水体污染程度的一个重要特性,即系统的灰色性,因此它比较符合实际情况<sup>[5]</sup>。本文应用灰色聚类方法基于 2004 年逐月的水质指标 DO、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TP、NH<sub>3</sub>-N 和叶绿素 a 等对淀山湖进行水体富营养化和水环境质量等级评价,结果显示淀山湖作为一个淡水湖泊,全湖已处于富营养化状态,作为地表水源,全湖水质处于国家地表水环境质量 V 级标准,根据水域功能和标准分类,V 类“主要适用于农业用水区及一般景观要求水域”,已丧失水源的基本功能。评价结果同时也显示了不同的 6 个采样点,富营养化程度和水质等级均相同,说明整个湖泊不存在富营养化程度和水质等级的区域差别。另外,在评价过程中发现权重系数最大的参数是叶绿素 a、总磷和氨氮,说明氮和磷已成为水体污染的主要影响因素,氮和磷的累积造成浮游植物的大量增加,浮游植物的大量繁殖直接影响浮游动物、水生动植物和底栖生物的生长,造成生物链的破坏。因此,控制淀山湖氮、磷的输入,对已进入淀山湖的氮、磷通过种植水草等生物措施进行脱氮除磷处理,在淀山湖进行以放养滤食性鱼类为主的渔业生产活动,将是改善淀山湖水质的有效措施。

#### 参考文献:

- [1] 黄辉金. 概率法评价邕江河段水质的尝试[J]. 广西水利水电, 2001 (2): 68-71.
- [2] 张思冲, 张雪萍, 廖永丰. 营养度指数法在寒地湖泊富营养化评价中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(4): 416-419.
- [3] 胡明星, 郭达志. 湖泊水质富营养化评价的模糊神经网络方法[J]. 环境科学研究, 1998 (4): 42-44.
- [4] 贺北方, 于章林, 刘正才. 多级模糊层次综合评价的数学模型及应用[J]. 系统工程理论与实践, 1989 (6): 1-6.
- [5] 谢 骏. 灰色系统理论在我国湖泊富营养化程度评价中的应用[J]. 水利渔业, 1997, 16: 9-12.
- [6] 朱庆锋, 廖秀丽, 陈新庚, 等. 用灰色聚类法对荔枝湾湖水水质富营养化程度的评价[J]. 中国环境监测, 2004, 20(2): 47-50.
- [7] 杨 红. 灰色聚类法在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 渔业机械仪器, 1995 (6): 36-39.
- [8] 贺北方, 王效宇, 贺晓菊, 等. 基于灰色聚类决策的水质评价方法[J]. 郑州大学学报, 2002, 23(1): 10-13.
- [9] 朱长军. 灰色聚类方法在滏阳河水环境质量评价中的应用[J]. 河北建筑科技学院学报, 2003, 20(4): 11-14.
- [10] 叶巧文, 张新政. 基于灰色聚类的水质评价方法[J]. 五邑大学学报, 2003, 17(4): 4-7.
- [11] 刘思峰. 灰色系统理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [12] 陈新军. 灰色系统理论在渔业科学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [13] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.