

文章编号:1004-8227(2005)04-0481-05

洪湖水环境现状及主导因子分析

杜 耘¹, 陈 萍¹, Kieko SA TO², Hajime AOE², 何报寅¹

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所湖北省环境与灾害监测评估重点实验室, 湖北 武汉 430077;

2. 日本大学文理学部, 日本 东京)

摘 要:利用 2003 年夏季在洪湖采集的 20 个水体样本的测定结果分析了洪湖目前的水体化学性质。根据分析洪湖夏季为 Ⅲ类水,则其他季节的水质等级很有可能在 Ⅳ类以下。洪湖水体的理化性质各方面状况有利于水生生物的生长和繁殖。运用模糊数学方法得到的结果表明 2003 年水质状况以 Ⅲ类水为主,表明洪湖近年来的水质呈现下降的趋势,这与人类对洪湖水生资源的过度开发有直接的联系;通过主成分分析方法,得到了目前洪湖水质的三个主要控制因素。洪湖水质主要受到氮盐营养元素和生物活动的控制,其次是悬浮物和水体的离子属性,第三是水体的磷化合物。尽管磷是大多数湖泊水体富营养化的关键物质,但它对洪湖湖水而言,并不是最重要的控制因素,所以洪湖富营养化不是水质变化的主要原因。

关键词:洪湖;水质;模糊数学;主成分分析

文献标识码:A

洪湖系长江和汉水支流东荆河之间的大型浅水洼地壅塞湖,是湖北省最大的淡水湖泊。洪湖是一个以调蓄为主,兼具灌溉、渔业、航运、饮水等多种功能的湖泊。随着本地区及其周边的经济发展以及对湖泊资源的不合理利用和开发,洪湖的生态环境发生了较大的变化,尤其是水环境状况。因此了解洪湖目前的水环境情况可以反映出人类活动的影响。本文分析了目前洪湖水体的化学性质,并通过 2003 (夏季)年采样的水质数据(采样点见图 1),用模糊数学方法评价了水质等级,并进行了主成分分析以找出水质变化的主导因素。

洪湖水体偏碱性,pH 值在 8.44~9.22 之间;电导率在 0.229~0.332 ms/cm 之间,在西部采样点的值显著高于其他点,其他点的电导率分布比较均匀;湖水的硬度范围为 5.4~9.7 德国度,多在接近底值区。溶解氧含量在 6.9~14 mg/L 之间,平均值为 11.78 mg/L,表明洪湖有较强的溶氧能力。全湖化学耗氧量分布均匀,范围在 3.4~6.1 mg/L,平均值为 4.5 mg/L。水体总盐含量在 220 mg/L 左右。水体中的阳离子以 Ca^{2+} 为主,其浓度达到了 27.6 mg/L,在阳离子毫克当量组成的百分比中,

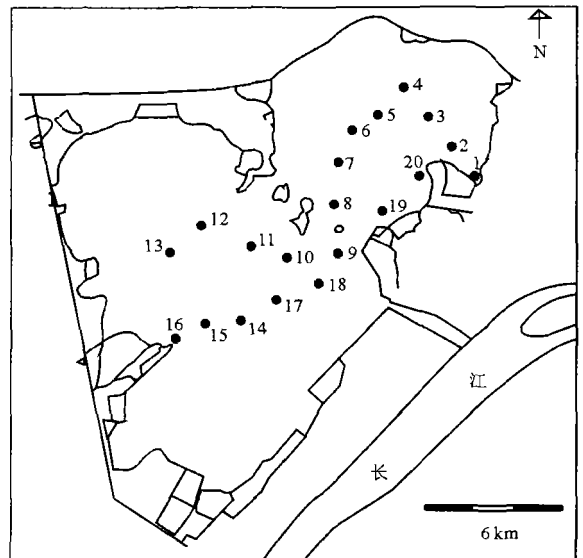


图 1 洪湖采样点位置

Fig. 1 Position of Collecting Sample

Ca^{2+} 占到了 55.3%,其次是 Mg^{2+} 和 Na^+ ;在阴离子中以 HCO_3^- 为主,它的浓度远远超过了其它的阴离子,达到 101.4 mg/L,占阴离子的 69.4%,说明湖水是呈 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 型水,湖水的化学稳定性在很大程度上受到了 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 化学行为的控制。湖水

收稿日期:2004-08-03;修回日期:2004-12-15

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-331、KZCX1-SW-12-1),973 项目 2003CB415201

作者简介:杜 耘(1967~),男,安徽省宿州人,博士,副研究员,主要从事环境演变与灾害研究。

中的营养物质主要是 SiO_2 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 以及 TN 和 TP, SiO_2 的含量 3.29 ~ 7.46 mg/L, 均值为 4.12 mg/L; TN 的含量为 0.984 mg/L, 其中无机氮主要来自 NH_4^+ ; TP 为 0.085 mg/L, 水体氮磷的比率大于 7, 则磷可能是湖泊富营养化限制性营养盐^[1]。

1 材料与方法

由于近年来洪湖围养面积迅速扩大, 南部和北部无法进入, 取样点布设自东北向西南, 依照洪湖的基本外形共布设样点 20 个, 能够代表全湖的水质状况。野外样点用 GPS 定位, 野外工作时间为 2003 年 9 月 6 日至 8 日。野外现场取样和测试由中日双方科研人员共同进行, 野外检测使用便携式水质检测仪(HORIBA W-23XD)对电导率(EC), pH 值, 浊度(TURB), 溶解氧(DO), 总溶固体物(TDS), 氧化还原电位(ORP)进行了计测, 用简易测量器(掘场的 Twin 系列)分别测量了 EC 和 pH。用 1 刻度的温度棒测定气温和水温。野外用 250 mL 瓶取水样带回实验室做进一步分析, 实验室分析在日本大学文理学部的理化实验室进行, 主要用津岛公司生产的 SHIMADZU LC-10 型高效液相色谱仪及 pH4.3 碱度法分析了主要正负离子, DrLange 公司生产的 LASA20 水质测定仪检测 TP, TN 和 SiO_2 , 共立理化学研究所的简易水质分析产品检测 COD, 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测微量金属成份。

2 洪湖水水质评价

对洪湖水水质进行综合等级的评价是反映洪湖水环境现状的重要组成部分。水质评价有很多种方法, 本文采用了模糊数学方法来评价。

2.1 模糊数学综合评判方法的原理

水体环境质量从“清洁”到“污染”的动态过程中, 差异往往要通过一个中间过渡的阶段, 而处于中间过渡阶段的差异, 便具有“亦此亦彼”的模糊性^[2]。

水体的评价体系共有 m 个等级, 则评价等级集合为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$$

设影响水体质量的污染因素有 n 个, 由这 n 个因素构成评价因素集合为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$$

由模糊关系确定的单因素评判矩阵为:

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

其中, r_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$) 表示第 i 项水质指标评价为第 j 级水质的可能性, 即 u_i 的 v_j 隶属度。由下面的隶属函数求得:

第一级水, 即 $j = 1$ 时, 隶属函数为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & 0 \leq x_i \leq S_{ij} \\ \frac{S_{ij+1} - x_i}{S_{ij+1} - S_{ij}}, & S_{ij} < x_i < S_{ij+1} \\ 0, & S_{ij+1} < x_i \end{cases}$$

第二级水至第 $m - 1$ 级水, 即 $j = 1, 2, \dots, m - 1$ 时, 隶属函数为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i = S_{ij} \\ \frac{x_i - S_{ij-1}}{S_{ij} - S_{ij-1}}, & S_{ij-1} < x_i < S_{ij} \\ \frac{x_i - S_{ij+1}}{S_{ij} - S_{ij+1}}, & S_{ij} < x_i < S_{ij+1} \\ 0, & x_i = S_{ij-1} \end{cases}$$

第末级水, 即 $j = m$ 时, 隶属函数为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i \leq S_{ij} \\ \frac{x_i - S_{ij-1}}{S_{ij} - S_{ij-1}}, & S_{ij-1} < x_i < S_{ij} \\ 0, & x_i > S_{ij-1} \end{cases}$$

由 n 个指标的权重组成权重集 A , $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 其中 $a_i = \frac{x_i / \bar{S}_i}{\sum_{i=1}^n (x_i / \bar{S}_i)}$, $\bar{S}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{ij}$; 于是得到

综合的水质模糊评判集 B , $B = A \circ R$, 式中“ \circ ”是模糊矩阵的复合预算符号, B 是评价等级集合 V 上的一个模糊子集^[2]。

2.2 评价过程及结果

选择 2003 年夏季 20 个采样点的水质数据进行计算。根据测定的项目, 选取其中 6 个污染因素进行模糊数学评价。计算过程如下:

表 1 2003 年夏季的部分水质数据 (mg/L)

Tab. 1 Some Data of Water Quality in Summer in 2003

监测因素	DO	COD	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TN	TP	F^-
平均值	11.78	4.514	0.279	0.984	0.0845	0.270

则这 6 个因素构成的评价因素集合为:

$$U = \{u_1(\text{DO}), u_2(\text{COD}), u_3(\text{NH}_3 - \text{N}), u_4(\text{TN}), u_5(\text{TP}), u_6(\text{F}^-)\}$$

由于水环境质量标准是随着年代变化的,为了便于比较水质的变化趋势,所以用一个水质标准来评价各年的水质等级。根据 2002 年 6 月实施的地表水环境质量标准 GB3838-2002,将水质分为 5 个等级。则水质评价等级集合为:

$$V = \{ \text{类}, \text{类}, \text{类}, \text{类}, \text{类} \}$$

表 2 地表水环境质量标准基本项目标准限值 (GB3838-2002)

Tab.2 Standard Limitations of Basic Items of Surface Water Quality Criteria (mg/L)

	类	类	类	类	类
DO	7.5	6	5	3	2
COD	2	4	6	10	15
NH ₃ -N	0.15	0.5	1	1.5	2
TN	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
TP	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2
F ⁻	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5

根据上面的隶属函数分别求得了 6 个因素对 5 类水的隶属度,得到模糊关系矩阵 R,为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.743 & 0.257 & 0 & 0 \\ 0.631 & 0.369 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.032 & 0.968 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.31 & 0.69 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

各个因素的权数分配矩阵为: A = (0.112 0.172 0.076 0.267 0.309 0.064)。

将求得的权数分配矩阵 A 和模糊关系矩阵 R 进行复合运算,即得到水质的综合评判集 B:

$$B = \{0.224, 0.164, 0.398, 0.213, 0\}$$

该结果表明,在这 6 个因素的共同作用下,2003

年洪湖夏季的水质隶属于 类水的程度为 0.224,隶属于 类水的程度为 0.164,隶属于 类水的程度为 0.398,隶属于 类和 类水的程度为 0.213 和 0^[3]。根据最大隶属原则,2003 年的水质为 类水。在 20 世纪 90 年代的多次综合调查中洪湖水水质主要为 类水,从此评价结果来看洪湖的水质下降为 类水。

究其原因,这与近年来兴起的大规模围栏养鱼有直接的关系。洪湖的围栏养鱼始于 80 年代中后期,此后迅速发展,一直保持上升的势头^[4]。90 年代末开始了大规模养殖蟹、鳖等高回报率的水产品,到 2001 年洪湖的围栏面积已经达到了 70%。过量的水产品养殖使水体中的有机物和营养物质的含量上升,大规模的围栏使活水变成死水,降低了湖水的更新速度;其次,湖泊中的水草被鱼蟹等大量消耗和渔民过度打捞,资源枯竭,从而降低了水草对湖水的净化功能。洪湖水水质出现下降趋势。

3 洪湖水质的主导因子分析

由于湖泊的水环境状况是由多个水质指标组成的复杂的系统,各个水质指标间存在着紧密的联系,在分析过程中可能会因为指标间存在共线性问题而无法得到正确结论。主成分分析的目的就是通过线性变换,将原来的多个指标组合成相互独立的少数几个综合指标,以简化数据和提高分析结果的可靠性。本文通过统计软件 SPSS11.5 进行了主成分分析。

本分析采用 2003 年夏季从洪湖 20 个采样点采来的样本的数据,从中选取 9 个主要的水质指标进行主成分分析。

表 3 水质指标的相关矩阵

Tab.3 Correlation Matrix of Water Quality Items

	pH	COND	DO	COD	TDS	NH ₄ ⁺ -N	Inorg-N	TN	TP
pH	1.00								
COND	-0.192	1.000							
DO	0.617	0.158	1.000						
COD	-0.371	-0.639	-0.426	1.000					
TDS	-0.403	0.839	0.223	-0.439	1.000				
NH ₄ ⁺ -N	-0.629	-0.419	-0.701	0.737	-0.280	1.000			
Inorg-N	-0.657	-0.392	-0.713	0.728	-0.243	0.999	1.000		
TN	-0.300	-0.475	-0.576	0.550	-0.420	0.781	0.774	1.000	
TP	-0.033	-0.081	0.331	-0.120	0.255	-0.110	-0.097	-0.056	1.000

根据表 4 的结果,第 1、2、3 主成分的特征值大于 1,分别为 4.625、2.063、1.149;方差贡献率分别为 51.385%、22.919%和 12.768%。这 3 个主成分的累计方差率达到了 87.071%,说明它们基本包含了以上 9 个指标的所有信息。其中第一个主成分又是最重要的,包含的信息最多。

表 4 主成分分析统计结果
Tab. 4 Statistic Results of PCA

因子	特征根	方差 %	累计方差 %
1	4.625	51.385	51.385
2	2.063	22.919	74.303
3	1.149	12.768	87.071
4	0.526	5.850	92.921
5	0.351	3.899	96.821
6	0.152	1.688	98.509
...
9	0	0	100

表 5 因子负荷矩阵
Tab. 5 Component Matrix

	F1	F2	F3
pH	-0.537	-0.784	
EC	-0.575	0.737	-0.245
DO	-0.761	-0.304	0.331
COD	0.819	-0.169	0.119
TDS	-0.466	0.834	0.173
NH ₄ ⁺ -N	0.955	0.176	
Inorg-N	0.951	0.215	
TN	0.831		
TP	-0.179		0.953

表 5 中很小的因子负荷没有写出。根据因子负荷矩阵,可以写出这 3 个主成分的表达式:

$$PC1 = 0.955NH_4^+-N + 0.951Inorg-N + 0.831TN + 0.819COD - 0.761DO - 0.575EC - 0.537pH$$

$$PC2 = 0.834TDS - 0.784pH + 0.737EC$$

$$PC3 = 0.953TP + 0.331DO$$

从因子负荷大小来看,与第一主成分密切相关的是氨氮、无机氮、TN、COD 和溶解氧,它们与第一主成分的相关系数绝对值都超过了 0.75,则第一主成分反映的是洪湖水体氮盐和生物活动的特征。正负荷是氨氮、无机氮、TN、COD,负负荷因子是溶解氧,说明氮盐作为水生生物的营养来源,在水体中的

增加导致了水生生物量的增加,所以化学耗氧量上升。由于水中的生物会消耗大量的氧,溶解氧 DO 会随生物量的增加迅速下降。

与第二个主成分密切相关的是固体悬浮物 TDS、pH 和电导率 EC 等变量。固体悬浮物包括了由径流带入洪湖的粘土类悬浮物和藻类等固体物质,它的增加会导致湖水的透明度下降。pH 值反映了水体的酸碱度,它对水体中的氧化还原反应起着一定的控制作用;另外 pH 对湖水中钙离子的行为有很大的影响,从而决定了湖水系统的化学稳定性。电导率则代表了湖水中离子的活动程度。所以第二主成分反映的是湖水中的悬浮物、浮游植物的生长情况和水体的离子属性。

第三主成分主要是与 TP 有很高的相关系数,因子负荷达到了 0.953,反映了洪湖水体的磷盐和有机磷的特性。对于多数湖泊,磷可能是影响藻类异常繁殖的限制性营养元素,它是形成湖泊富营养化的关键因素^[1]。所以该主成分可能反映了水体的营养化程度^[5-7]。

从方差贡献率可以看到第一主成分为 51.385%,远远大于第二三主成分的贡献率 22.919%和 12.768%。所以洪湖水质主要是由第一主成分即由氮盐、COD 和 DO 控制,其次受控于水体中的固体悬浮物和酸碱度。而 TP 也是影响水质第三大因素。如果把 TP 作为湖泊富营养化的主要评价指标,则目前洪湖的富营养化还未成为洪湖水质的主导控制因素。

4 结论

(1) 采样点的各个指标值和最后的分析结果都代表了夏季洪湖的水化学特征。夏季水生植物生长繁茂,在其生长过程中会将湖泊水体中的营养盐类和污染物吸附、吸收和分解,对水体产生净化作用,有利于维持较好的水质^[8];另外夏季水位上升,进入洪湖的水量增加使湖区内的营养物质浓度下降,所以夏季的水质应能代表洪湖的最优水质。根据分析洪湖夏季为 Ⅲ类水,其他季节的水质等级很有可能在 Ⅲ类以下。洪湖的水质问题应引起注意。

(2) 从洪湖水体的理化性质来看,洪湖水体呈碱性,硬度比较低为软水,溶解氧含量高,而且营养物质含量适宜,有利于水生生物的生长和繁殖。

(3) 运用模糊数学方法和 2002 年实施的地表水环境质量标准分析了洪湖 2003 年夏季的水质,结果

表明 2003 年总体的水质状况以 III 类水为主。洪湖近些年来的水质呈现下降的趋势,这与人类对洪湖水生资源的过度开发有直接的联系。

(4) 通过主成分分析方法,得到了目前洪湖水质的三个主要控制因素。首先,洪湖的水质主要受到氮盐营养元素和生物活动的控制;其次,悬浮物和水体的离子属性是一个控制因素;第三个控制因素是水体的磷化合物。尽管磷是水体富营养化的关键物质,但它对洪湖湖水而言,并不是最重要的控制因素,所以洪湖富营养化不是水质变化的主要原因。

参考文献:

[1] 金相灿,章宗涉. 中国湖泊环境(第一册)[M]. 北京:海洋出版

社,1995.

- [2] 孙 瑛,陈广桐. 模糊数学方法在湖泊水质评价中的应用[J]. 山东工业大学学报,1994,24(2):154~158.
- [3] 陈启浩. 模糊值及其在模糊推理中的应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,1995.
- [4] 中国科学院水生生物研究所洪湖课题组. 洪湖水体生物生产力综合开发及湖泊生态环境优化研究[M]. 北京:海洋出版社,1991.
- [5] 吕唤春,陈英旭,方志发,等. 千岛湖水体营养物质的主导因子分析[J]. 农业环境保护,2002,21(4):318~321
- [6] 廖奇志,陆晓华. 山丹湖环境水化学特征的主因子分析[J]. 华中理工大学学报,1998,26(1):65~67
- [7] 李 波,濮培民,韩爱民. 洪泽湖水质的因子分析[J]. 中国环境科学,2003,23(1):69~73
- [8] 王学雷,刘兴土,吴宜进. 洪湖水环境特征与湖泊湿地净化能力研究[J]. 武汉大学学报(理学版),2003,49(2):217~220.

CURRENT WATER ENVIRONMENTAL STATUS AND DOMINANT FACTOR ANALYSIS IN HONGHU LAKE

DU Yun¹, CHEN Ping¹, Kieko SA TO², Hajime AOE², HE Bao-yin¹

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Monitoring-Estimate for Environment and Disaster, Wuhan 430077, China; 2. Department of Geosystem Sciences College of Humanities and Sciences, Nihon University, Tokyo, Japan)

Abstract: This paper analyzed water body's chemical property of Honghu Lake on the basis of 20 water samples collected in summer, 2003. In terms of water classification, the water was third in summer, but the water status was worse in other seasons. Physically and chemically, the water body was favourable for the growth and reproduction of aquatic lives. According to the results by fuzzy mathematics, it is demonstrated that water status in Honghu Lake is ranked to the third classification, which suggests that there is a decreasing trend of water quality due to excessive exploration to aquicolous resources. In application of principal components analysis, we acquired three leading control elements. The water quality is mainly under the control of nitride and biological activity, then, suspender, ionic attribute, and the last factor is phosphide. Although total phospher is a key eutrophication factor of the majority of lakes, it is not the dominating control factor for Honghu Lake.

Key words: Honghu Lake; water quality; fuzzy mathematics; principal components analysis