

洪泽湖水质的因子分析

李 波^{1*}, 濮培民², 韩爱民³ (1.北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3.淮安市环境保护局, 江苏 淮安 223001)

摘要: 将水质监测数据与空间数据结合, 建立了具有时空特征的洪泽湖水水质数据库。通过对水质的相关性分析, 将参数的重要度进行排序, 作为数据选取的依据。在因子分析的基础上, 通过 Delphi 法, 结合空间数据, 研究了主要因子的内含及时空变化规律, 提出湖泊污染的“原初性”和“次生性”污染分量的概念, 并分析了各分量的净化差异, 建立了富营养化指数(F3)的模拟方程。

关键词: 因子分析; 水质; 洪泽湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2003)01-0069-05

Factor analysis of water quality in Hongze Lake. LI Bo¹, PU Pei-min², HAN Ai-min³ (1.Institute of Resource Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Environment Protection Bureau of Huaian City, Huaian 223001, China). *China Environmental Science*, 2003,23(1): 69~73

Abstract: Integrating the water quality monitoring data and the spatial data, the database of Hongze Lake water quality was established. Based on analyzing the correlation matrixes, the importance degree of parameters was arranged with their precedence order as a basis for selecting the data, and by using of Delphi technique combined with the spatial data, the implications of main factors and their spatial change rule were studied, and the concepts of original and secondary pollution component were suggested and their differences in purification were analyzed. The F3 (eutrophication index) simulation equation was established.

Key words: factor analysis; water quality; Hongze Lake

水质参数的空间分布特征是进行湖泊水质评价的重要前提^[1], 但空间与时间的变化往往是关联的, 即具有时空相关性^[2]。对湖泊水质各个因子的时空分布规律的研究, 是湖泊及其流域污染机理研究的重要基础。为避免一般水环境研究中容易出现的主观性误差, 作者把因子分析与相关矩阵分析等多种方法有机结合起来, 提取并反证了湖泊水质各个因子的科学内含, 力图在湖泊与其流域背景水污染的时空响应、表征与预测湖泊富营养化等方面, 做出创造性的探索。

淮河流域, 特别是其省界河流, 水污染事故不断, 为省际纠纷的热点地区^[3]。位于淮河中游的洪泽湖, 既是其上游污染之“汇”, 也是其下游地区和“南水北调”的污染之“源”。经过 20 世纪 90 年代的污染治理, 水质恶化的趋势已经基本得到遏止。但由于许多复杂因素的影响, 水质的波

动性大、稳定性差、时空分异性强^[2]。洪泽湖是我国五大淡水湖之一, 但目前对其研究远远落后于其他几个大湖。洪泽湖及其流域背景都属于生态交错带的范畴, 具有其作为生态交错带的生态实质与规律^[4]。

作者在水质数据与空间数据相结合的基础上, 对洪泽湖水水质因子进行了分析, 详细情况请参阅文献[2], 文献[4]。

1 基于相关性分析的因子重要度排序

从洪泽湖数据库^[2]中提取数据, 即: $X_{vimn} \cdot y = 1, 2, \dots, 10; i=1, 2, \dots, 6; m=1, 2, \dots, 10; n=1, 2, \dots, 40$ 。y 在

收稿日期: 2002-06-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018607); 江苏省环境保护厅项目(1999, 36-2)资助

* 通讯联系人

1~10 取值,分别形成各年的水质数据库.用 k 代替 m 和 i 变量,对应于 m 和 i 的如下排列(m, i):

(1,1),(1,2), $\cdots$ (1, i),(2,1),(2,2), $\cdots$ (2, i), $\cdots$ (m ,1), (m ,2), $\cdots$ (m, i), k 分别取值为: $k=1,2,\cdots 60$

建立各个年份的水质数据矩阵:

$$X_{kn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad k=1,2,\cdots 60; \quad (1)$$

对 1991~2000 年水质数据矩阵,分别求水质参数间的相关系数,得到洪泽湖水水质参数的相关系数矩阵.对计算得到的相关系数矩阵,进行如下统计分析,令 R_y 为第 y 年相关矩阵中所有参数的相关系数均值(含自相关),组成矩阵:

$$R_y = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_n] \quad (2)$$

其中: $r_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_{jk} \quad j=1,2,\cdots n; \quad k=1,2,\cdots n \quad (3)$

式中: r_{jk} 为第 j 个水质参数与第 k 个参数之间的相关系数; n 为当年参与分析的水质参数的个数.

用 S 表示重要度, S_{yj} 为第 y 年第 j 个水质参数的 S 值,即:

$$S_{yj} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} r_{yk} \quad (4)$$

式中: r_{yj} 为第 y 年第 j 个参数相关系数均值.

表 1 洪泽湖水水质参数的重要度及其排序

Table 1 Importance degrees and sorting order of water quality indexes in Hongze Lake

水质参数	S 值	排序	水质参数	S 值	排序
TP	0.22	4	DO	0.19	9
BOD ₅	0.26	1	硬度	0.17	16
SS	0.23	2	SD	0.21	7
TN	0.23	3	Chl- α	0.19	8
电导率	0.18	11	大肠菌群	0.17	19
总镉	0.18	14	COD _{Mn}	0.19	10
硝酸盐氮	0.21	5	亚硝酸盐氮	0.15	20
细菌总数	0.11	25	挥发性酚	0.14	22
总砷	0.18	13	总氟	0.14	23
氨氮	0.18	12	六价铬	0.14	24
总铅	0.17	17	总铜	0.15	21
pH 值	0.21	6	总锌	0.17	18
总汞	0.17	15			

根据 S 值将洪泽湖各水质参数进行排序,结果见表 1(25 名后省略).各水质参数重要度排名居前的,多为常规监测中较重视的项目,也是环境、社会生产、生活的常用项目.说明国家标准的项目选择合理,具有较高的科学性. BOD₅ 排名首位,说明有机污染是洪泽湖水污染的主要问题. 悬浮物(SS)在各个因子中排名第 2.洪泽湖是过水性的浅水湖泊,SS 对水质的影响大.潮流特别是风浪搅动底泥,增大 SS 浓度,可能造成水质的较大变化.特别是富营养化指数(F3)与 SS 的关联显著(表 2),应该引起重视.N、P 是洪泽湖污染的主要部分,分别排名第 3,第 4 位.

2 水质的因子分析

2.1 数据选取与整理

选取 1999 年各站各月水质数据,建立待分析的水质数据矩阵见表 2.

表 2 洪泽湖水水质主成份分析 Varimax 转轴后的因素载荷量

Table 2 Explained variances of factor analysis by varimax rotating for water quality in Hongze Lake

变量	主成份						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
氨氮	0.85				-0.14		
pH	0.82	-0.25	-0.11			-0.12	
SD	0.73	-0.20	-0.29				
COD _{Mn}	0.64	-0.18	0.11	-0.22		0.11	0.48
亚硝酸盐氮	0.10	0.80	-0.11		0.17		
硝酸盐氮	-0.31	0.79	0.16				0.10
TN	-0.30	0.78				0.14	
SS	-0.28	-0.20	0.76		-0.15		0.37
TP		0.17	0.75		-0.21	0.11	-0.13
Chl- α		-0.13	0.68	0.19	0.34		-0.26
总铜			0.31	0.46	-0.53	-0.29	-0.13
总汞	-0.15	0.18		0.68	-0.16	-0.16	
细菌总数				0.64	-0.20	0.14	-0.14
总砷					0.61	-0.16	0.20
总铅		0.35	0.32	-0.41		-0.10	-0.38
硬度	-0.13				0.83	-0.11	-0.15
电导率			-0.13	-0.22	0.78		0.15
DO				-0.17		0.88	
大肠菌群	-0.11	0.22			-0.22	0.84	
总镉		0.18			-0.12		0.77
BOD ₅	-0.15		0.12	-0.36	-0.35	0.18	-0.56

注: $|r| < 0.1$ 省略, $|r| > 0.5$ 作为主要关联因子

2.2 分析结果

利用 SPSS 软件,对上面选取的水质数据进行因子分析,采用 Varimax 直角转轴法,使具有较大因素载荷量的变量个数减到最低限度.抽取前 7 个因子作为分析对象,7 个主成份累计反映了原始数据总信息量的近 70%,分析结果见表 2.

2.3 主成份的含义

将因子分析结果(表 2)以及后面所做的主要因子的时空分布,提供给专家,对各个主成份所代表的含义,进行 Delphi 专家咨询,结论如下:F1 含义不太明显,未用于分析;F2,因子载荷量占到 12.062%,经过旋转之后,占到 11.472%.与之有关联的主要有亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、TN 等,代表了湖泊水质的氮素污染;F3,因子载荷量占 9.432%,旋转后占 10.432%.相关联的主要是 SS、TP、Chl-a 等,代表了湖泊的悬浮物及其与之密切相关的浮游植物(藻类)生长情况.该因子说明,洪泽湖的浮游植物生长及水华现象等与 SS 关系密切.F3 代表了水体富营养化状况,称为“富营养化指数”;F4,因子载荷量占 9.316%,旋转后占 9.605%.相关联的主要是总铜、总汞、总锌和总铅等重金属,代表重金属污染情况;F5,因子载荷量占到 7.873%,旋转后占 9.012%.相关联的主要是电导率和硬度等,代表湖泊水体的离子属性;F6,因子载荷量占到 7.266%,旋转后占 8.055%.相关联的主要是 D O 和大肠菌群等,与生活污水接纳和降解有关,代表湖泊生活类污染状况;F7,因子载荷量占 5.373 %,旋转后占 7.806%.与之相关联的主要是 BOD₅、总镉、COD_{Mn}、总铅、SS 等,代表湖泊工业类污染状况.

2.4 主成份模拟模型的建立与应用

根据主成份分析结果,建立如下水质主成份模拟模型:

F1

F2

F3

F4

F5

F6

F7

=

$A_{11} \cdot X_1 + A_{12} \cdot X_2 + \cdots + A_{1K} \cdot X_{21}$

$A_{21} \cdot X_1 + A_{22} \cdot X_2 + \cdots + A_{2K} \cdot X_{21}$

$A_{31} \cdot X_1 + A_{32} \cdot X_2 + \cdots + A_{3K} \cdot X_{21}$

$A_{41} \cdot X_1 + A_{42} \cdot X_2 + \cdots + A_{4K} \cdot X_{21}$

$A_{51} \cdot X_1 + A_{52} \cdot X_2 + \cdots + A_{5K} \cdot X_{21}$

$A_{61} \cdot X_1 + A_{62} \cdot X_2 + \cdots + A_{6K} \cdot X_{21}$

$A_{71} \cdot X_1 + A_{72} \cdot X_2 + \cdots + A_{7K} \cdot X_{21}$

K=1,2,\cdots 21

(5)

式(5)任意项 A_{FK} 系数为表 2 中相对应的数值,F 表示 7 个主成份; $K=1,2,\cdots 21$,分别表示 21 个水质参数.对富营养化指数 F3 的模拟方程为:

F3=

-0.11 pH

-0.29 SD

+0.11 COD_{Mn}⁻

0.11 亚硝酸盐氮

+0.16 硝酸盐氮

+0.76 SS

+0.75 TP

+0.68 Chl-a

+0.46 总铜

+0.32 总铅

-0.13 电导率

+0.12 BOD₅

(6)

据式(5)的模型,对洪泽湖水质不同时空状态下各个主成份进行模拟(代入各式的是原始数据标准化后的值),其中对 1999 年模拟结果见表 3.

表 3 对 1999 年水质因子的模拟结果

Table 3 Simulation result of water quality factor in Hongze Lake in 1999

监测点	时间(月)	主成份						
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1	0.77	1.90	-0.33	-1.16	-0.75	0.03	-1.50
...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	11	-0.51	-0.20	0.56	0.27	-0.71	-0.71	-0.64

3 结果与分析

3.1 空间变化

根据表 3,对各监测点^[2]求均值,再与空间数据结合,利用 GIS 和 Origin 等分析软件,通过栅格化、自动调整搜索半径与空间插值等技术处理,可以得到各个主成份年均值的一系列三维分布(图 1).同样,从表 3 中选取各个主成份的代表月,可以得到各个主成份代表月份的空间分布(图 2).

3.1.1 氮素污染(F2) 由表 3,图 1 可以看出,4 号淮河入湖口、1 号三河闸排水口附近 F2 最高.湖西 7 号和 3 号点最低.位于敞水区的 2 号和 5 号点也较低.总体为东南高、西北低,由入湖口向四周扩散.直接受主要污染源——淮河干流的控制,呈扩散形分布.将这类主成份称为“原初性污染分量”,反之,不直接受到污染源控制(特别是在空间分布上),而是经过湖泊内因的作用,由湖流、水情、湖泊形态、人为因素(如灌溉)等间接控制的主成份,称为“次生性污染分量”.5 月为农用水高峰,大量抽水灌溉,湖西几条河流河水倒流,高值中心略向西北移动,脊线向西延伸(图 2).

3.1.2 富营养化指数(F3) 由图 1 可以看出,西部最低,西南低东北高,成子湖最高.7 号和 3 号所在的溧河洼附近,水草丰盛,是湿地自然保护区核心部分,F3 最低,体现了水生植物对控制湖泊富营养化的重要作用^[5].敞水区(2 号附近)受到湖流影响大,作为浅水湖泊,其 SS 相应较高, F3 也较大.成子湖水面围网养殖较多,湖区水草稀少,为相对封闭的湖湾,吞吐流弱,湖水交换慢, F3 最高

(6 号附近).据一般湖泊富营养化的季节变化规律^[6],3 月,7 月较强,又以 7 月最高.F3 的季节变化与一般湖泊一致(图 2), 3 月由东北向西南递减,成子湖一带为高值区,西南部溧河洼为低值区;7 月以湖心敞水区和东北部成子湖湖湾口与二河闸一带最高,湖西南部仍然是低值区.分布规律说明,F3 为次生性污染分量.

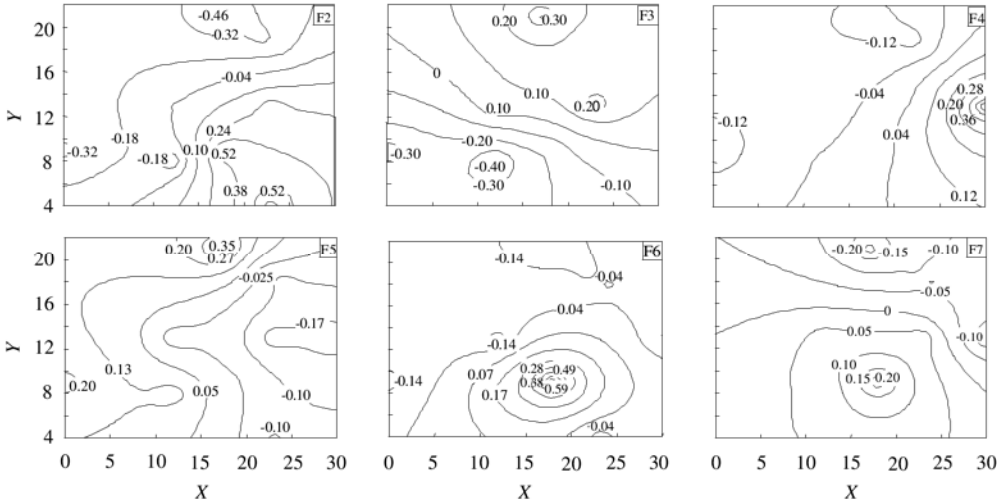


图 1 洪泽湖水水质各个主成份的年均值分布

Fig.1 Year mean value distribution of different factors for water quality in Hongze Lake

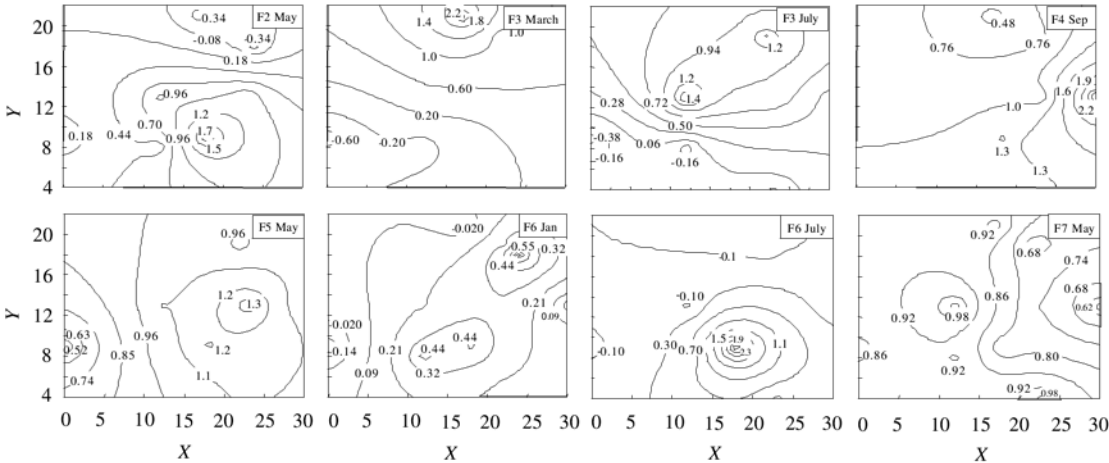


图 2 洪泽湖代表月各个主成份的分布

Fig.2 Distribution of different factors in delegate months for water quality in Hongze Lake

3.1.3 重金属污染(F4) 由图 1 可以看出,F4 呈西南向东北增高的趋势,全湖都较低,只有位于淮

安市附近的水域(5 号高良涧附近)特别高.这与淮安市几个重工业企业未能达标排放有关.代表

月(9月)的情况与此类似(图2)。

3.1.4 离子属性(F5) 主要与电导率、硬度有关。年均值分布与水情关系明显。湖流主流向及敞水区较低,湖水交换慢的成子湖及湖西较高(图1)。而5月受灌溉影响,空间变化规律与年均值的状况完全相反(图2),敞水区最高,由东向西递减。

3.1.5 生活污染(F6) F6主要反映了流域来水的生活类污染情况,以入湖口附近最高,向四周降低,总体上北低南高(图1)。值得注意的是,除了距离淮河口较近的4号和3号监测点的F6远远高出其他区域外,其他区域都较低。说明生活污水主要来自淮河干流,入湖后向四周扩散。因此,F6属于原初性污染分量。同时说明了洪泽湖水质决定于“客水”(特别是干流)。大部分湖面的F6远低于淮河入湖口,湖体对其净化能力较强(与F7迥异)。由图2可看出,7月的这种规律更加明显(梯度变化集中在入湖口附近)。1月入湖水量小,分散为入湖口和淮安市附近的两个高值中心。

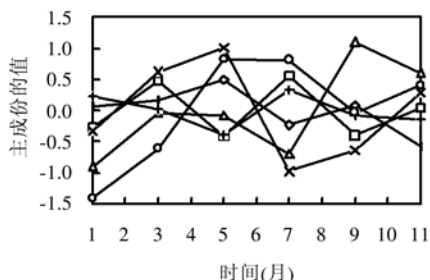


图3 洪泽湖水质各个主成份的季节变化

Fig.3 Seasonal change of different water quality factor in Hongze Lake

—◇— F2 —□— F3 —△— F4 —×— F5 —+— F6 —○— F7

3.1.6 工业污染(F7) 在湖泊内的降解较缓慢,体现在空间变化梯度小,递减趋势缓和。高值中心在入湖口,向北递减,表现为原初性污染分量(图1)。代表月7月的分布情况受到西部各个入湖河流大流量的影响,呈现为西高东低(图2)。F7由河口向四周递减的梯度远远没有F6大,说明湖体对工业污染的降解速度慢,比生活污水更难分解。

3.2 季节变化

对表3中各月份求均值,可以得到各个主成

份的年内变化(图3)。F2最严重的是5月。但此时农业用水大量抽取,湖水倒流,湖水交换强,F3反而不高(这与藻类类群的季节演替也有关系)。库容大的7月F2不高,而F3却是全年最高的。3月气温回升,也是富营养化容易发生的季节,F3较高。F3的时空变化规律与一般湖泊富营养化的变化规律吻合,再次说明了F3对于湖泊富营养化的代表意义,值得重视和进一步探讨。

4 结论

4.1 基于相关矩阵分析等多方法结合的湖泊水质因子分析,能有效避免主观误差。

4.2 湖泊湿地净化作用明显,但对不同因子的净化能力不同,F6最强,其次为F2及F7。水生植物能有效控制湖泊富营养化。围湖严重、水草稀少的成子湖,富营养化最严重,F3最大。水草丰盛的湿地自然保护区,F3最小。7月敞水区F3也较高。

4.3 F2、F6、F7属于“原初性”污染分量。F3属于“次生性”分量,在时空变化上与一般浅水湖泊的富营养化变化规律一致。F3富营养化指数的建立与模拟,较好地反映了湖泊富营养化特征,展示了用湖泊常规水质参数表征和预测湖泊富营养化的前景,具有重要的理论与实践意义。

参考文献:

- [1] 刘瑞民,王学军.湖泊水质参数空间优化估算的原理与方法[J]. 中国环境科学,2001,21(2):177-179.
- [2] 李 波,濮培民,韩爱民.洪泽湖水质的时空相关性分析[J]. 湖泊科学,2002,14(3):259-266.
- [3] 林 巍,郭京菲,傅国伟.淮河流域省界水质标准的确定—以淮河流域为例[J]. 中国环境科学,1997,17(2):10-14.
- [4] 李 波,濮培民.淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析[J]. 长江流域资源与环境,2003,12(1):67-73.
- [5] 李文朝.富营养化水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学,1997,17(1):53-57.
- [6] 陈宇炜,秦伯强,高锡云.太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和藻类水华的初步预测[J]. 湖泊科学,2001,13(1):63-71.

作者简介: 李波(1965-),男,四川乐至县人,北京师范大学资源科学研究所站博士后,副教授,主要从事优化生态—生产范式、湖泊流域生态环境系统工程、区域资源开发与规划等方面的研究与教学工作。发表论文30余篇。