

·研究报告·

# 洪泽湖富营养化与环境理化因子间的关系

杨广利<sup>1</sup>, 韩爱民<sup>2</sup>, 刘轶琨<sup>2</sup>, 刘斌<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学生命学院, 山东 青岛 266000; 2. 淮安市环境监测中心站, 江苏 淮安 223001)

**摘要:**利用淮安市环境监测中心站1998年—2000年洪泽湖水质监测资料,以洪泽湖水体最能表征营养化状态进程的叶绿素a为基准因子,分析了洪泽湖水质富营养化的原因。通过QBASIC多元逐步回归分析,得出洪泽湖水质富营养化的主控因子是悬浮物、透明度,总磷是富营养化的潜在限制性营养盐。

**关键词:**富营养化;基准因子;主控因子;限制性营养盐;多元逐步回归;洪泽湖

中图分类号:X820 文献标识码:A 文章编号:1006-2009(2003)02-0017-04

## The Relationship of Eutrophication of the Lake of Hongze and Environmental Physical-chemical Factors

YANG Guang-li<sup>1</sup>, HAN Ai-min<sup>2</sup>, LIU Yi-kun<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>

(1. Life Science College Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266000;

2. Huai'an Environmental Monitoring Center, Huai'an, Jiangsu 223001, China)

**Abstract:** From the monitoring materials of water quality of the Lake of Hongze from 1998 to 2000 analyzed by Huaian Environmental Monitoring Center, the reasons of eutrophication of the Lake of Hongze was studied, chlorophyll a as reference factor which can best reflect the state of eutrophication. After QBASIC multiple regression, the key factors of water's eutrophication of the Lake of Hongze was determined, they were suspended substance and transparency. The potential limiting nutrient salt of eutrophication was TP.

**Key words:** Eutrophication; Reference factor; Key factor; Limiting nutrient salt; Multiple regression; The Lake of Hongze

洪泽湖是我国第四大淡水湖泊,位于淮河干流中、下游,是我国最大的具有防洪、灌溉、调水、水产、水运、水电等综合利用功能的平原型水库。随着淮河上游工农业生产的发展及人口的增长,排入洪泽湖的生产及生活污水增加,致使洪泽湖水体总磷、总氮污染物的质量浓度增高,洪泽湖水质出现明显富营养化现象。为了有效地控制洪泽湖富营养化的进程,依据淮安市环境监测中心站1998年—2000年洪泽湖水质监测资料,研究了洪泽湖水体的特点,力图确定造成洪泽湖富营养化的主控因子和限制性营养盐,为制定治理洪泽湖富营养化的对策提供依据,达到保护和改善洪泽湖生态环境的目的。

### 1 研究方法

#### 1.1 监测点分布

洪泽湖的10个例行监测点分布见图1。

#### 1.2 分析项目和方法

分析项目有叶绿素a(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数(I<sub>Mn</sub>)、溶解氧(DO)、塞氏透明度(SD,以下简称透明度)、总硬度(HD)、悬浮物(SS)、pH、电导率(Cond)、水温(T<sub>w</sub>)、水深(h<sub>w</sub>)、总镉(TCd)、总铅(TPb)、总汞(THg)、总砷(TAs)等有效项目20项,共计110组。

分析方法为《水环境分析方法标准工作手册》和《环境监测技术规范》规定的方法。

#### 1.3 统计分析

收稿日期:2002-11-22;修订日期:2003-03-17

作者简介:杨广利(1967—),女,江苏沭阳人,高级工程师,在读硕士研究生。



1—蒋坝镇; 2—成河乡中; 3—临淮乡; 4—老山乡;  
5—高良涧; 6—龙集乡北; 7—滩河口; 8—成河乡东;  
9—成河乡西; 10—成河乡北

图 1 洪泽湖监测点的分布

### 1.3.1 统计程序

用 QBASIC 多元逐步回归统计程序, 计算相关系数矩阵、统计量  $F$  值, 根据  $F$  值逐步筛选各相关因子, 最后得到多元逐步回归方程和复相关系数等。

### 1.3.2 关键因子

湖泊富营养化是指由于过量的营养物质进入湖泊水体, 引起藻类大量繁殖, 使其从生产力低的贫营养状态转变为生产力高的富营养状态的现象。影响湖泊富营养化进程的因子较多, 所起作用各不相同, 并且因子之间存在某种程度的相关关系。因此, 要从众多的因子中挑选出与营养状态关系密切的、有代表性的因子作为关键因子<sup>[1]</sup>是综合评价分析的基础。

洪泽湖是藻型湖泊, 叶绿素  $a$  是水体中浮游植物生物量的综合指标, 分析其含量与动态, 可以了解生物量状况、变化趋势及洪泽湖的营养状态。以叶绿素  $a$  作基准因子为因变量, 其他理化因子为自变量, 求得相互之间的相关系数, 可以确定各因子影响洪泽湖富营养化状态的关键参数。用  $t$  检验作统计, 当临界值在 95% 的显著水平时 ( $P < 0.05$ ,  $\mu_0 = 1.98$ ), 其因子即为显著因子; 再根据因子的生物学和物理学的重要性综合分析确定主要因子, 最后, 显著因子和主要因子共同组成综合评价的关键因子。

### 1.3.3 确定关键因子的权重

叶绿素  $a$  与关键因子之间存在着某种关系, 若用回归分析方法研究, 则有:

$$\{y_i\}_n = \{x_{ij}\}_{nm} \{b_j\}_m \quad (1)$$

式中:  $x_{ij}$ ——第  $j$  个因子  $i$  时刻的监测值;

$m$ ——因子数;

$n$ ——监测点数。

#### (1) 数据标准化处理

为了在无量纲影响下进行计算, 对所有的数据作标准化处理:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S_j; \quad y_i' = (y_i - \bar{y}) / S_y \quad (2)$$

$$\text{其中: } \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad S_j^2 = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad S_y^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

得到标准化数据矩阵:

$$\{y_i'\}_n = \{x_{ij}'\}_{nm} \{b_j'\}_m \quad (3)$$

#### (2) 求解标准化方程

对标准化数据矩阵作回归方程求解, 得到回归方程:

$$y' = \sum_{j=1}^m b_j' x_j' \quad (4)$$

(3) 确定关键因子的斜率绝对值之和与单项斜率之比的比重, 第  $k$  个因子在富营养化方面的贡献为:

$$P_k = |b_k'| / \sum_{j=1}^m |b_j'| \quad (5)$$

### 1.3.4 逐步回归分析

对关键因子组成的数据矩阵逐步回归求解, 选择临界值 99% 的显著水平 ( $F_{引\lambda} = F_{剔除} = 6.85$ ) 筛选自变量, 求回归方程和复相关系数, 再对回归方程作  $F$  检验。经回归方程引入的因子, 即为影响湖泊富营养化的主控因子。

## 2 结果和讨论

### 2.1 洪泽湖环境因子间的相关分析

洪泽湖理化因子相关系数见表 1。

表 1 反映了洪泽湖叶绿素  $a$  与各理化因子间的相关关系, 由于样本数较大, 叶绿素  $a$  与各因子间的相关系数都较小。  $t$  检验表明, 与叶绿素  $a$  相关性非常显著的因子分别为悬浮物、透明度, 其相关系数都为 0.31; 相关性比较显著的因子为总磷和硝酸盐氮, 相关系数分别为 0.19、0.15。结果表明, 影响洪泽湖富营养化状态的关键因子分别为悬浮物、透明度、总磷和硝酸盐氮。

表 1 洪泽湖理化因子相关系数

因子	Chla	TP	TN	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NH <sub>3</sub> -N	BOD <sub>5</sub>	I <sub>Mn</sub>	DO	SD	HD	SS	pH	Cond	h <sub>w</sub>	T <sub>w</sub>	TCd	TPb	THg	TAs
TAs	0.02	0.01	0.12	0.09	0.55 <sup>①</sup>	0.17	-0.19 <sup>②</sup>	-0.04	-0.19 <sup>②</sup>	0.01	-0.10	-0.02	0.00	-0.09	0.00	0.28 <sup>①</sup>	-0.06	-0.07	-0.12	1
THg	0.10	-0.01	0.27 <sup>①</sup>	0.27 <sup>①</sup>	-0.04	0.06	0.07	0.02	0.05	-0.10	-0.10	0.00	-0.11	-0.02	-0.07	-0.04	0.00	-0.25 <sup>①</sup>	1	
TPb	-0.06	0.15	-0.17	-0.12	-0.06	-0.05	-0.15	-0.17	-0.14	-0.03	-0.15	-0.16	-0.11	-0.31 <sup>①</sup>	0.20 <sup>②</sup>	0.12	0.15	1		
TCd	0.02	-0.03	0.05	0.16	0.02	-0.28 <sup>①</sup>	-0.22 <sup>②</sup>	0.04	-0.47 <sup>①</sup>	-0.14	-0.28 <sup>①</sup>	0.00	-0.09	-0.05	0.23 <sup>②</sup>	0.51 <sup>①</sup>	1			
T <sub>w</sub>	-0.02	0.00	-0.08	0.08	0.25 <sup>①</sup>	-0.30 <sup>①</sup>	-0.58 <sup>①</sup>	0.00	-0.74 <sup>①</sup>	0.12	-0.49 <sup>①</sup>	-0.10	0.03	-0.24	0.15	1				
h <sub>w</sub>	0.01	0.00	0.30 <sup>①</sup>	0.10	0.07	0.24 <sup>②</sup>	0.01	-0.02	-0.19 <sup>②</sup>	-0.10	-0.21	0.15	-0.37 <sup>①</sup>	-0.16	1					
Cond	0.07	-0.30 <sup>①</sup>	-0.06	-0.09	0.04	0.15	0.19 <sup>②</sup>	0.07	0.26 <sup>①</sup>	0.03	0.17	0.01	0.22 <sup>②</sup>	1						
pH	-0.02	-0.17	-0.31 <sup>①</sup>	-0.30 <sup>①</sup>	-0.08	-0.04	-0.04	-0.10	0.14	0.51 <sup>①</sup>	-0.03	-0.14	1							
SS	0.31 <sup>①</sup>	0.31 <sup>①</sup>	0.06	0.09	-0.06	-0.13	0.30	0.29 <sup>①</sup>	0.07	-0.26 <sup>①</sup>	0.37 <sup>①</sup>	1								
HD	0.02	0.01	-0.05	-0.16	-0.05	-0.14	0.44 <sup>①</sup>	0.23 <sup>②</sup>	0.11	-0.01	1									
SD	-0.31 <sup>①</sup>	-0.31 <sup>①</sup>	-0.33 <sup>①</sup>	-0.33 <sup>①</sup>	-0.02	0.04	-0.21 <sup>②</sup>	0.05	0.18	1										
DO	-0.03	-0.05	-0.01	-0.13	-0.19 <sup>②</sup>	0.45 <sup>①</sup>	0.41 <sup>①</sup>	-0.11	1											
I <sub>Mn</sub>	0.03	-0.03	-0.15	-0.13	0.02	0.00	0.05	1												
BOD <sub>5</sub>	0.04	-0.02	0.08	-0.08	-0.12	0.35 <sup>①</sup>	1													
NH <sub>3</sub> -N	-0.10	0.00	0.31 <sup>①</sup>	0.19 <sup>②</sup>	0.32 <sup>②</sup>	1														
NO <sub>2</sub> -N	0.03	-0.05	0.30 <sup>①</sup>	0.27 <sup>①</sup>	1															
NO <sub>3</sub> -N	0.15	0.28 <sup>①</sup>	0.78 <sup>①</sup>	1																
TN	0.05	0.24 <sup>②</sup>	1																	
TP	0.19 <sup>②</sup>	1																		
Chla	1																			

①显著相关( $P < 0.01$ ); ②较显著相关( $0.01 < P < 0.05$ ); ③ $r_{0.05} = 0.19, r_{0.01} = 0.25$ 。

2.2 洪泽湖藻类叶绿素 a 与关键因子的回归统计

将悬浮物、透明度、总磷和硝酸盐氮的 3 年监测资料,进行标准化处理,解标准化矩阵,得到标准化回归方程:

$$y'_{\text{叶绿素a}} = 0.241 8x'_{\text{悬浮物}} - 0.221 3x'_{\text{透明度}} + 0.044 6x'_{\text{总磷}} + 0.030 x'_{\text{硝酸盐氮}} \quad (6)$$

方程的复相关系数为 0.394 9,综合 F 值为 4.85。入选变量的次序分别为悬浮物、透明度、总磷和硝酸盐氮, F<sub>引入</sub> 值分别为 11.69、6.98、0.29、0.09。对藻类叶绿素 a 的贡献分别为 44.97%、44.16%、8.29% 和 5.58%。

使用逐步回归方法,选择临界值 99% 的显著水平 ( $F_{\text{引入}} = F_{\text{剔除}} = 6.85$ ) 筛选自变量,得到标准化回归方程:

$$y'_{\text{叶绿素a}} = 0.249 3x'_{\text{悬浮物}} - 0.223 5x'_{\text{透明度}} \quad (7)$$

原始回归方程为:

$$y_{\text{叶绿素a}} = 0.009 4x_{\text{悬浮物}} - 0.016 9x_{\text{透明度}} + 3.032 \quad (8)$$

方程的复相关系数为 0.391,综合 F 值为 4.74。在置信度  $\alpha = 0.01$  时,  $F_{0.01} = 3.95$ ,说明该方程是有意义的。但是,与叶绿素 a 相关性比较显著的总磷和硝酸盐氮却无法通过 F 检验,表明影响洪泽湖富营养化的主控因子是悬浮物和透明度。

2.3 原因

叶绿素 a 是浮游植物的生物量指标和参与光合作用的重要物质。从能量观点看,水环境变化的动力来自于太阳辐射,生物体通过太阳辐射能的光合作用形成自身有机物质。因此,水下光照是水体生态系统中的重要物理因素,它直接关系水体初级生产力的大小。水下光照与透明度有关,透明度的变化会导致水柱透光深度的变化,导致湖泊生产层深度的变化。透明度低时,生产层深度较小;透明度高时,生产层深度相应加深。因此,透明度对藻类的生长,水体的初级生产力有影响。

分析洪泽湖水体高悬浮物和低透明度原因,一是由于历史上黄河夺淮期间给湖区带来了大量泥沙沉积。二是上游带来很多泥沙。根据有关资料,洪泽湖出湖径流量平均为 342 亿 m<sup>3</sup>, 大约为正常蓄水库容量的 11 倍,与巨大的水流吞吐相对应的是,湖泊上下游之间存在着大量的泥沙输送。据计算,1960 年—1965 年平均年入湖沙量、出湖沙量和淤积量分别为 1 752 万 t、1 032 万 t 和 720 万 t。三是洪泽湖是一个水平方向的大型浅水湖泊,其宽度达 60 km,平均水深为 1.7 m<sup>[2]</sup>。据观测,当洪泽湖水面的波高超过 0.2 m 时,湖水混浊程度增加,湖区风力大于 5 级时就会出现较强的风浪,从而使湖底

沉积物很容易再悬浮进入水体,因此洪泽湖属于其他湖泊不多见的“泥沙型浊水状态”湖泊<sup>[3]</sup>。四是淮河上游来水的透明度很低。

根据淮安市环境监测中心站2000年的洪泽湖水质监测资料,上游淮河盱眙大桥断面、洪泽湖湖区和下游入江水道的漫水公路断面的悬浮物平均质量浓度分别是57.8 mg/L、83.0 mg/L、51.9 mg/L,平均透明度分别是11.0 cm、27.1 cm和66.9 cm,证明了洪泽湖的高泥沙和上游河流来水水质的低透明度。影响透明度的物质有3种,分别为悬浮物、黄质和浮游藻类<sup>[4]</sup>,其中黄质为水中形成颜色的可溶性物质。

#### 2.4 氮、磷比值与限制性营养盐

根据藻体内所含的碳、氮、磷相对原子质量比为106:16:1,与之相对应的碳、氮、磷质量浓度比为41:7.2:1,分别用总氮、总磷质量浓度代表水中可被植物吸收的氮、磷数量。因此,当湖泊中可被植物吸收的氮、磷质量浓度比小于7.2:1时,则氮是可能的限制性营养盐;反之,其质量浓度比大于7.2:1时,则磷是可能的限制性营养盐。这一比值在理论上和实际中都被认为是藻类生长最适宜的氮、磷比<sup>[5]</sup>。据1998年—2000年洪泽湖水质监测结果,氮、磷质量浓度比为12.7~17.8:1,说明洪泽湖的氮营养元素充足,磷是湖泊的潜在限制性营养盐。

#### 2.5 与其他湖泊比较

我国1986年—1989年第1次开展的有关湖泊富营养化调查资料,与洪泽湖调查资料比较见表2。

表2 洪泽湖和其他湖泊中叶绿素a与各指标相关系数比较

水质指标	24个湖泊的相关系数 <sup>[1]</sup>	洪泽湖的相关系数
Chla-TP	0.84	0.19
Chla-SS	—	0.31
Chla-SD	-0.83 <sup>①</sup>	-0.31
Chla-TN	0.82	0.05
Chla-I <sub>Mn</sub>	0.83	0.03
Chla-BOD <sub>5</sub>	0.79	0.04

①原著误为0.83。

从表2可以看出,洪泽湖与其他湖泊有明显不同的特点。在其他湖泊,叶绿素a与透明度、总氮、总磷、高锰酸盐指数、生化需氧量呈显著的相关关系。但是,在洪泽湖水体中,叶绿素a与悬浮物和透明度呈非常显著的相关关系,与总磷呈显著的

相关关系,与总氮、高锰酸盐指数、生化需氧量相关关系不明显。

表3给出了洪泽湖和其周边湖泊中与叶绿素a相关的主要指标。显而易见,周边湖泊中的叶绿素a与营养盐质量浓度、化学需氧量、溶解氧、电导率有关;而洪泽湖水体中的叶绿素a却首先是与影响水下光照度的透明度、悬浮物有关,其次才与营养盐总磷有关。

表3 洪泽湖和其周边湖泊中与叶绿素a相关的主要指标

湖泊名称	主要指标		
淀山湖 <sup>[1]</sup>	TP	DO	
南四湖 <sup>[1]</sup>	DO	COD	
巢湖 <sup>[1]</sup>	TP	TN	
太湖(梅梁湾) <sup>[6]</sup>	pH	COD	Cond
洪泽湖	SS	SD	TP

#### 2.6 结论

通过对最能表征洪泽湖水质富营养化状态的叶绿素a质量浓度与悬浮物、透明度、总磷和硝酸盐氮等关键因子的相关性分析,得出洪泽湖富营养化的主控因子分别为悬浮物、透明度,主控因素是透明度低影响了水体的水柱光深;通过对氮、磷比值与限制性营养盐的分析,得知总磷为洪泽湖富营养化的潜在限制性营养盐。

洪泽湖属于“泥沙型浊水状态”湖泊,透明度低,致使水下光照度低,进而影响湖水中叶绿素a的数量,影响湖泊初级生产力、浮游植物以及微生物等,是主导洪泽湖水体富营养化的主要因素。

#### [参考文献]

- [1] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛.中国湖泊富营养化[M].北京:中国环境科学出版社,1990.19-121.
- [2] 韩爱民.用数字地图计算出洪泽湖库容等特征参数的方法初探[J].水文,2001,21(5):35-37.
- [3] 李文朝.浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用[J].湖泊科学,1997,9(2):97-104.
- [4] 俞宏.太湖水体中的光照传输及水体初级生产力的计算[A].蔡启铭.太湖环境生态研究[C].北京:气象出版社,1998.178-184.
- [5] 高锡芸.梅梁湾及大太湖富营养化限制性营养盐研究[A].蔡启铭.太湖环境生态研究[C].北京:气象出版社,1998.51.
- [6] 陈宇炜.太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J].湖泊科学,2001,13(1):63-65.

本栏目责任编辑 张启萍