

巢湖入湖河流分类及污染特征分析

王书航, 姜霞*, 金相灿

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:为识别巢湖入湖河流主要污染特征和来源,以 2008 年入湖河流水质监测参数和河流入湖区藻类生物量数据为基础,采用多元统计方法对入湖河流进行了聚类 and 污染等级分级,并判别了湖区藻类生物量与河流营养盐输入负荷的关系.结果表明,入湖河流可分为 3 组,其水质分别受城市污染、水土保持和面源污染影响,其中城市污染控制型河流输入到巢湖中高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷量分别占全部入湖河流污染负荷的 41.29%、89.49%、72.27% 和 60.14%;因子分析显示有机污染是入湖河流主要污染来源,9 条环湖河流污染分级排序为:南淝河 > 十五里河 > 派河 > 双桥河 > 柘皋河 > 裕溪河 > 白石山河 > 兆河 > 杭埠河;河流入湖区藻类生物量与入湖河流 NH_4^+ -N、TN、TP 的输入量呈正相关.

关键词:入湖河流; 聚类; 因子分析; 巢湖; 湖泊

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-2834-06

Classification and Pollution Characteristic Analysis for Inflow Rivers of Chaohu Lake

WANG Shu-hang, JIANG Xia, JIN Xiang-can

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on main pollution sources and characteristics of inflow rivers of Chaohu Lake, the inflow rivers are clustered and the pollution levels are classified by statistical methods. In addition, the correlation between algal biomass and the river nutrients input loads is derived according to the inflow river water quality monitoring parameters and the Chl-a concentrations in lake areas. Results show that the inflow rivers are classified into three groups. Urban pollution, soil and water conservation, and non-point source pollution are the major factors which influence water quality respectively. The input loads of permanganate index, NH_4^+ -N, TN, TP from urban pollution rivers to the whole lake are 41.29%, 89.49%, 72.27% and 60.14% to all inflow rivers respectively. Organic pollution is the main pollution source of inflow rivers by factor analysis. The pollution rank of nine inflow rivers are as follows: Nanfei River > Shiwuli River > Paihe River > Shuangqiao River > Zhagao River > Yuxi River > Baishishan River > Zhaohe River > Hangbu River. The algal biomass and the NH_4^+ -N, TN, TP inputs of inflow rivers are positively correlated.

Key words: inflow rivers; cluster analysis; factor analysis; Chaohu Lake; lake

湖泊富营养化已成为一个世界性问题,在经济快速发展的发展中国家尤为严重^[1,2]. 防治湖泊富营养化,首先要对入湖营养物质的来源做出分析,然后才能控制进入湖泊营养物质的负荷量^[3-5]. 河流是陆地生态系统和湖泊生态系统之间进行物质交换的通道,通过接纳大量的生活污水、工业废水和农业余水,已成为湖泊富营养化最大的驱动力^[6]. 研究表明,通过入湖河流进入巢湖的 TN、TP 分别占 TN、TP 输入量的 76.9% 和 68.5%^[7],而太湖 25 条主要入湖河流 2002 年 3 月~2003 年 2 月共向湖体输入 COD 19.28 万 t、总磷 1 769.7 t、总氮 3.03 万 t^[8].

针对湖泊富营养现状,近年来已经投入大量治理工程和科技研发,但局部区域的水污染问题依然严重,湖泊富营养化趋势仍未得到根本性改观^[9-11]. 2008 年 8 月,巢湖西半湖叶绿素 a (Chl-a) 平均值为 241.04 mg/m³,东半湖 Chl-a 为 51.74 mg/m³,藻类水华问题依然严重^[12]. 对入湖河流污

染方面的研究,一般集中在入湖河道污染物通量和水质评价方面^[13,14],而从流域层面对河道分类研究较少. 本研究参照孟伟等^[15]提出的“分类、分级、分期”治理湖泊水环境观点,运用聚类分析将巢湖的入湖河流划分为不同类型,采用因子分析对各入湖河流的水环境质量状况进行排序和分级,同时探讨了入湖区水体 Chl-a 含量与高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N、TN、TP 等主要污染因子可能存在的关系,旨在为巢湖入湖河流及湖体富营养化治理提出针对性方案.

1 材料与方法

1.1 研究区域

巢湖流域位于安徽省中部,江淮丘陵之间,东经

收稿日期: 2010-11-04; 修订日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077097); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-010)

作者简介: 王书航(1985~),男,硕士,主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: shuhang125126@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangxia@craes.org.cn

116°23′59″~118°22′5″, 北纬 30°52′25″~32°7′53″, 属长江下游左岸水系, 其流域总面积13 350 km², 为我国五大淡水湖泊之一, 在流域社会经济发展中起到至关重要的作用. 湖面面积为 760 km², 正常水文

年平均水深 3 m 左右, 主要环湖河流有 9 条, 分为 7 条水系, 分别为南淝河(店埠河)、十五里河、杭埠河、派河、柘皋河、双桥河、兆河、白石山河、裕溪河, 各河流长度及汇水面积见表 1.

表 1 巢湖环湖河流特征及水质参数年均值
Table 1 Characteristics and annual average values of water quality parameters of Chaohu Lake inflow rivers

名称	<i>L</i> /km	<i>A</i> /km ²	<i>t</i> /℃	<i>Q</i> /m ³ ·s ⁻¹	pH	EC /mS·m ⁻¹	DO /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹
南淝河	70	1 446	19. 6	14. 27	7. 50	87. 94	4. 10	8. 94	3. 67	40. 64	4. 28	9. 27	0. 39
十五里河	27	112	20. 1	3. 49	7. 62	70. 5	3. 59	7. 18	19. 89	32. 00	22. 29	10. 65	1. 33
派河	60	584	19. 4	12. 7	7. 39	43. 90	6. 54	5. 17	7. 51	24. 44	2. 94	5. 78	0. 25
杭埠河	146	4 150	19. 5	47. 6	7. 2	19. 20	7. 13	1. 00	0. 19	9. 22	0. 78	4. 13	0. 12
白石山河	36	619	20. 3	8. 9	7. 29	24. 5	5. 42	1. 23	0. 30	21. 89	0. 95	4. 59	0. 10
兆河	34	1 138	19. 9	14. 0	7. 95	29. 81	8. 05	1. 33	0. 26	14. 78	0. 96	5. 17	0. 10
柘皋河	24	507	19. 1	11. 2	7. 78	34. 42	6. 85	1. 30	0. 15	11. 78	0. 90	4. 18	0. 09
裕溪河	118	2 080	19. 2	6. 3	7. 73	39. 3	7. 68	1. 00	0. 70	9. 00	1. 31	4. 38	0. 15
双桥河	4. 8	22	19. 5	1. 3	7. 58	54. 54	2. 49	3. 36	2. 49	17. 11	3. 32	5. 96	0. 23

1.2 数据来源

选取巢湖 9 条环湖河流, 于 2008 年开展每月 1 次的现场监测和水质分析(见图 1), 水质指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数、氨氮(NH₄⁺-N), 现场监测项目包括溶解氧(DO)、水温(*t*)、pH 值、流量(*Q*)、电导率(EC)等. Chl-a 数据来自河流入湖区采样点(见图 1). 水质参数分析测定方法见文献[16].

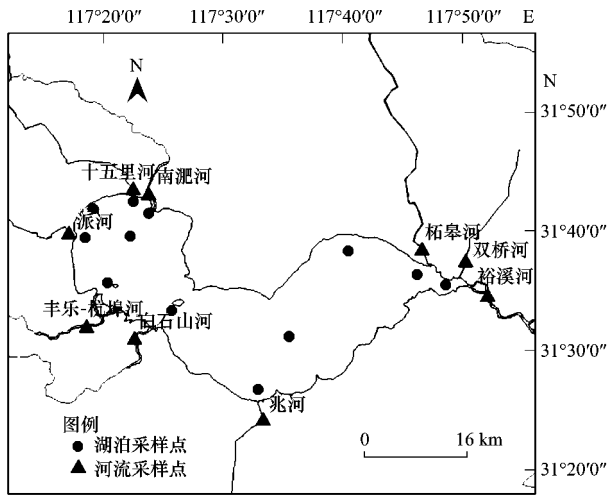


图 1 巢湖入湖河流及湖泊采样示意
Fig. 1 Map of Chaohu Lake showing the sampling stations with inflow rivers and lake

1.3 数据分析

数据处理与分析采用 Excel 2007、Origin 8.0 以

及 SPSS 16.0 软件. 采用多元统计分析法对环湖河流水质参数进行聚类分析、因子分析及多元逐步回归分析. 聚类分析和因子分析前需对各因子数据进行标准化, 以消除量纲影响, 本次计算使用标准正态变化:

$$x_{norm} = \frac{x - \bar{x}}{SD}$$

式中, *x* 为参数的实测值, $\bar{x}$ 为各参数的平均值, SD 为标准差, *x_{norm}* 为标准化后值.

聚类法(CA)采用系统聚类, 即先把 *N* 个变量看成 *n* 种分类, 然后把性质相近的 2 类逐步合并, 相似度计算采用欧式平方距离. 因子分析先计算变量方差和协方差矩阵的特征量, 将多个变量通过降维转化为少数几个综合变量, 使人们能够从众多水质指标中识别出对河流水质影响较大的成分, 因子提取方法为主成分法.

2 结果与分析

2.1 环湖河流在不同水期水质参数变化

巢湖环湖河流的水文特征主要受大气降水影响, 河流流量季节性变化很大, 同时不同水期(平水期、枯水期、丰水期)各个河流水质参数有所不同. 各环湖河流高锰酸盐指数为 2.4~19.10 mg/L, 平均值为 6.23 mg/L; NH₄⁺-N 浓度 0.03~35.70 mg/L, 平均值为 3.77 mg/L; TN 浓度 0.42~38.80 mg/L, 平均值为 4.63 mg/L; TP 浓度 0.03~2.24 mg/L, 平均值为 0.34 mg/L; 从地理位置上看, 位于湖体西部的十五里河、南淝河、派河污染较为严重.

将 2008 年巢湖环湖河流水质参数和水文参数相结合,以期找出不同河流在不同水期水质参数的变化.从图 2 可以看出,各河流在不同时期水质参数变化有所不同.南淝河高锰酸盐指数在平水期较大,枯水期较小, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 在各个水期变化不大.十五里河高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度在枯水期较大,平水期次之,丰水期最小.杭埠河、派河、白石山河、兆河等水质参数在不同时期变化不大,在

丰水期稍大,枯水期较小.同时可以看出,十五里河水质参数在各水期变化最大,主要是因为十五里河在枯水期的水源补给以生产、生活污水排放为主,而丰水期主要以雨水径流为主,导致河流污染浓度因雨水稀释而降低.杭埠河、白石山河、兆河等污染源主要以农业面源为主,在丰水期雨水侵蚀导致氮、磷浓度稍有升高,但其浓度相对较小,故其在总体上变化不大.

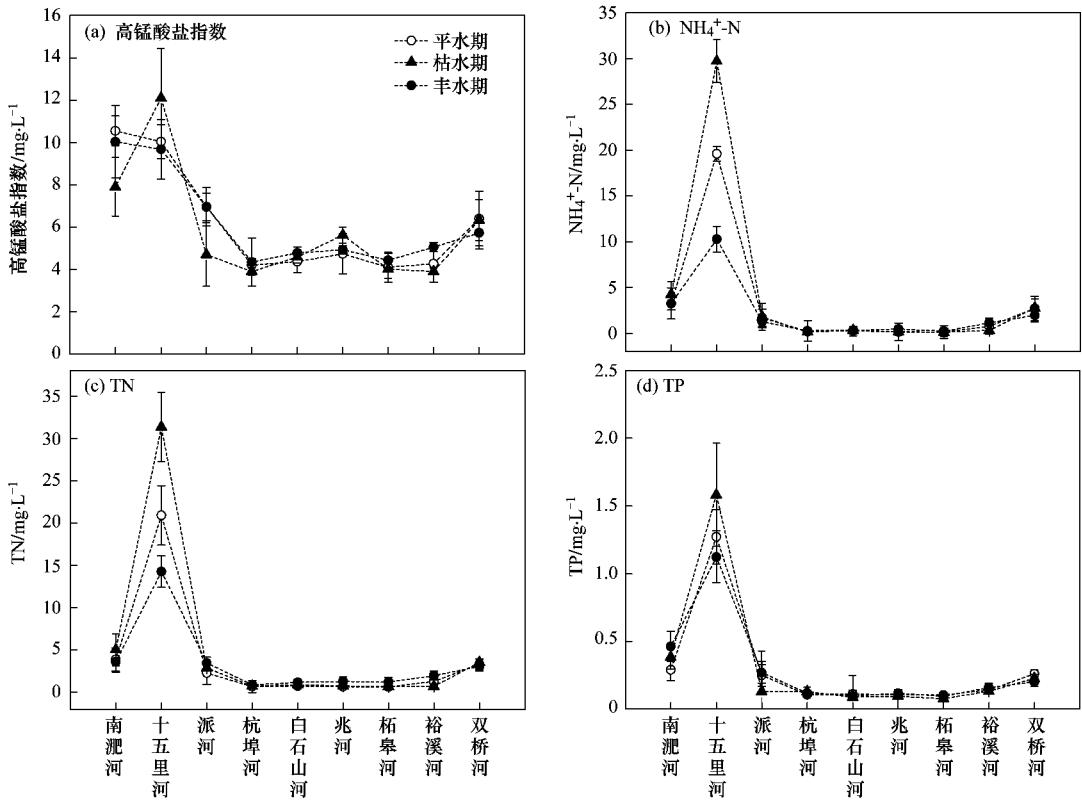


图 2 巢湖环湖河流不同水期水质参数变化

Fig. 2 Variations of water quality parameters of inflow rivers in different water periods of Chaohu Lake

2.2 环湖入湖河流聚类分析

河流是陆地生态系统和湖泊生态系统之间进行物质交换的通道,入湖河道水质和水量直接影响到湖泊富营养化程度,而河流汇水区面积及土地使用类型直接影响到河流的水质和水量.对比各个河道水质参数并使用系统聚类法将其划分为不同类型,可以在现有条件下更有针对性地治理入湖河流及湖泊富营养化.

从聚类结果(图 3)可以看出,巢湖入湖河流可分为 3 类,第一类包括 4 条河流,即南淝河、十五里河、双桥河和派河,是巢湖入湖河流中污染较为严重的河流,其水质主要受城市污染控制;第二类包括杭埠河和白石山河,位于西南山区,水质主要受水土

保持控制,第三类包括柘皋河和兆河,位于巢湖东部,水质尚好,水质主要受面源污染控制.

2.3 环湖河流水质因子分析

巢湖环湖河流水质参数较多且错综复杂,找出对河流水质起主要作用的因子至关重要.因子分析方法以多个变量之间的相互关系为基础,可用较少具有代表性的水质参数来概括多变量所提供的信息,找出影响环湖河流水质的主要因素^[17-19].

从表 2 可以看出,第 1 主成分贡献率为 58.30%,其中电导率、DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅ 因子负荷绝对值较大,主要反映有机污染对环湖河流水质的影响,有机污染矿化分解消耗水体溶解氧,水体营养盐升高,导致水质下降.第 2 主成

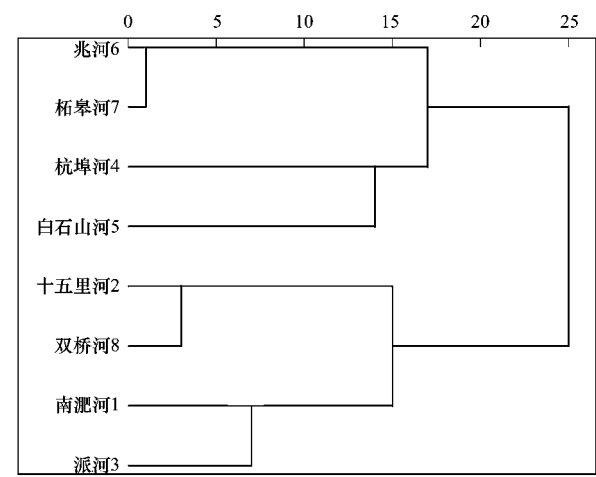


图3 巢湖入湖河流聚类结果

Fig.3 Cluster analysis results of inflow rivers of Chaohu Lake

表2 水质参数旋转因子负荷

Table 2 Rotated factor loadings structure of water quality parameters

水质参数	主成分		
	F1	F2	F3
t	0.01	0.74	-0.21
Q	-0.30	-0.14	-0.76
pH	-0.18	-0.03	0.92
EC	0.96	0.09	0.21
DO	-0.68	-0.34	-0.01
COD	0.78	0.58	0.14
BOD ₅	0.95	0.24	0.01
NH ₄ ⁺ -N	0.41	0.86	0.20
高锰酸盐指数	0.88	0.30	-0.08
TN	0.41	0.86	0.20
TP	0.46	0.83	0.17
特征值	6.41	1.53	1.39
贡献率/%	58.30	13.91	12.61

分贡献率为 13.91%,其中 TN、TP、NH₄⁺-N 的负荷因子较大,主要代表营养盐污染对水质的影响.第 3 主成分贡献率为 12.61%,而 pH 因子负荷较大,主要代表酸碱度对水质的影响.3 个主成分之间相互独立,反映了 3 种不同的污染机制.

从 9 条环湖河流在各个主成分中得分可以看出,南淝河、十五里河、派河、双桥河在第 1 主成分得分靠前,水质受有机污染影响较为显著[图 4(a)];十五里河、白石山河和兆河在第二主成分中得分较大,水质主要受氮、磷污染影响[图 4(a)];十五里河、白石山河、兆河、柘皋河、裕溪河、双桥河在第 3 主成分中得分较大[图 4(a)],酸碱度对其水质影响较大.结合各主成分贡献率,用各主成分得分与对应的方差贡献率乘积的总和即为综合得分,而主成

分综合得分在某种程度上反映了错综复杂的水质参数对河流污染程度的综合影响,为湖泊污染程度分级提供了数据支持.本次研究中,9 条环湖河流污染分级排序为:南淝河>十五里河>派河>双桥河>柘皋河>裕溪河>白石山河>兆河>杭埠河,见图 4.

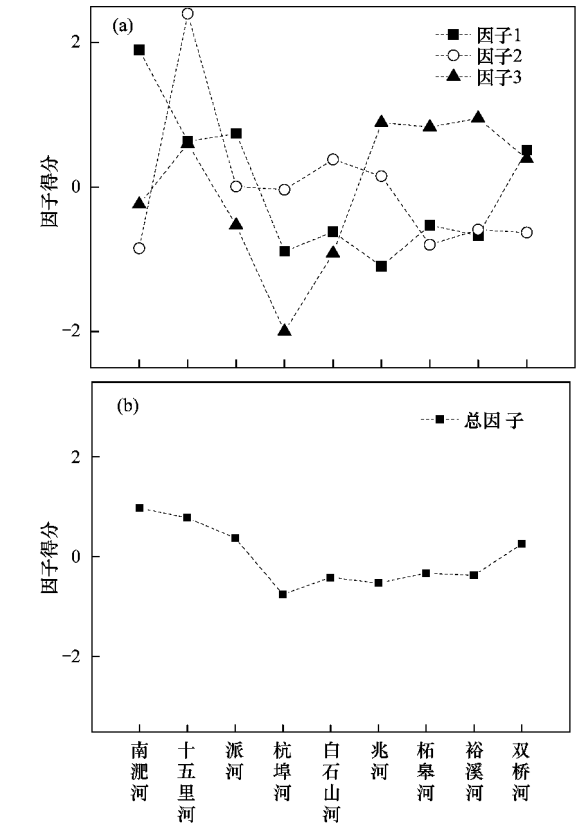


图4 巢湖入湖河流主成分得分

Fig.4 Principal component scores for inflow rivers of Chaohu Lake

3 讨论

从因子分析的结果看,入湖河流中南淝河污染等级最高,而杭埠河水质最好,但从整个湖泊营养盐的收支平衡来看,湖泊营养盐污染负荷不仅受到营养盐浓度的影响,还与入湖河流的流量相关.本研究利用入湖河流营养盐浓度与入湖河流流量估算出巢湖入湖河流的营养盐负荷,以期找出在富营养水平下对藻类生物量起主要贡献的营养盐负荷因子,为营养盐总量控制提供依据.

从表 3 可以看出,主要入湖河流输入到巢湖高锰酸盐指数为 $19.12 \times 10^3 \text{ t/a}$,TN 为 $7.87 \times 10^3 \text{ t/a}$,TP 为 $0.727 \times 10^3 \text{ t/a}$,较 1987 年和 1999 年通过入湖河流输入到巢湖中 TN 都有不同程度下降,但 TP 基本保持不变,主要是因为南淝河中 TN 输入大量减

小.就单因子而言,从杭埠河进入巢湖的高锰酸盐指数、TP 污染负荷最大,分别占全部入湖河流的 32.40%、25.21%,从十五里河进入巢湖 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 最大,分别占全部入湖河流的 42.92%、31.17%.结合聚类分析结果可以看出,从第一类入湖河流(南淝河、十五里河、派河、双桥河)输入到巢湖中高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 分别占全部入湖河流污染负荷的 41.29%、89.49%、72.27%和 60.14%,而贡献入湖 56% 水量的第二类入湖河流(杭埠河、白石山河)TN、TP 输入量仅占入湖总量的 18.33%、28.97%,尤其对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,仅占 7.23%.

表 3 巢湖主要入湖河流营养盐污染负荷(2008)/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$
Table 3 Nutrients pollution loads of the main inflow rivers
among Chaohu Lake in 2008/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$

名称	高锰酸盐指数	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP
南淝河	4 172	1 652	1 925	174
十五里河	1 172	2 189	2 453	146
派河	2 304	619	1 174	101
杭埠河	6 193	285	1 176	181
白石山河	1 282	84	267	27
兆河	2 283	115	423	46
柘皋河	1 466	53	316	32
双桥河	244	102	136	9
总计	19 117	5 098	7 871	717

进一步研究不可避免要回答一个关键性问题:通过入湖河流输入到水体中的营养盐是否都与藻类生物量有关系,在水体已经处于富营养状态下哪种营养盐能显著增加藻类生物量?本研究采用统计分析的方法对各个河流入湖区藻类生物量年均值与入湖河流营养盐输入负荷进行了正态分布检验和相关性分析,结果见表 4.

表 4 入湖河流污染负荷与藻类生物量相关性分析 ($n=8$)¹⁾
Table 4 Correlation analysis of inflow rivers
pollution loads and algal biomass

	高锰酸盐指数	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP	Chl-a
高锰酸盐指数	1				
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.14	1			
TN	0.39	0.95**	1		
TP	0.79*	0.70*	0.87**	1	
Chl-a	0.26	0.94**	0.94**	0.78*	1

1) * 表示显著相关 $P<0.05$; ** 表示极显著相关 $P<0.01$

从表 4 可以看出,各入湖区 Chl-a 浓度与入湖河流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 的输入量呈显著正相关,与高锰酸盐指数输入量不显著相关,但相关系数同为正值,说明氮、磷和有机污染物的输入可能增加巢湖藻

类生物量.同时可以看出,高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 污染负荷之间都存在着不同程度的显著相关性,因此,为了防止多重共线性,同时为了找出对藻类生物量最有效的贡献因子,本研究采用多元逐步回归分析,以期建立不同营养盐输入量对藻类生物量的“最优”回归方程:

$$y = 0.025 \times L_{\text{TN}} + 18.536$$

式中, y 为 Chl-a 年均值, mg/m^3 ; L_{TN} 为入湖河流 TN 的年输入量, t/a .可以看出,相对于高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP,巢湖入湖河流中 TN 的输入量可能更能显著增加藻类生物量,这与巢湖水体中磷浓度相对较高有关.此结论对于“分期”治理巢湖富营养化提供了一条可参考的建议:在现有经济条件下,可优先控制巢湖入湖河流 TN 的输入总量.同时聚类分析结果显示,巢湖入湖河流可分为 3 类,分别为城市污染控制型河流、水土保持控制型河流和面源污染控制型河流,结合因子分析得出的污染分级,为“分类、分级”治理巢湖提供了理论依据.对于城市污染控制河流,应采取污染减排,调整产业结构,加大环境保护投入优化产业布局等措施,显著削减入湖污染负荷;对于水土保持控制河流,应加强水土保持,增加森林覆盖率,推行生态补偿制度,保证清水入湖;对于东部面源污染控制河流,应重点防治面源污染,提高农村污水处理水平,处理好农业面源污染整治中技术、经济和管理的关系,保证清水入湖.

4 结论

(1)采用聚类分析将巢湖入湖河流分为 3 类,分别为城市污染控制型河流、水土保持控制型河流和面源污染控制型河流,其中城市污染控制河流(南淝河、十五里河、派河、双桥河)输入到巢湖中高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 分别占全部入湖河流污染负荷的 41.29%、89.49%、72.27%和 60.14%.

(2)9 条环湖河流污染分级排序为:南淝河 > 十五里河 > 派河 > 双桥河 > 柘皋河 > 裕溪河 > 白石山河 > 兆河 > 杭埠河.

(3)入湖河流中 TN 的输入量可能更能显著增加藻类生物量,可优先控制巢湖入湖河流 TN 的输入总量.

参考文献:

[1] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems [J]. Environmental Pollution, 1999, 100(1): 179-196.

[2] Howarth R W, Sharpley A, Walker D. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals [J]. *Estuaries*, 2002, **25** (4): 656-676.

[3] 王书航,姜霞,钟立香,等. 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征[J]. *环境科学*, 2010, **31** (4): 946-953.

[4] 袁旭音,许乃政,陶于祥,等. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J]. *资源调查与环境*, 2003, **24** (1): 20-28.

[5] Kowalkowski T, Zbytniewski R, Szejna J, *et al.* Application of chemometrics in river water classification [J]. *Water Research*, 2006, **40** (4): 744-752.

[6] 谢平. 翻阅巢湖的历史[M]. 北京:科学出版社, 2009. 62-63.

[7] 安徽省规划编制领导小组. 巢湖流域综合防治规划(2001-2015) [R]. 2001.

[8] 逢勇,颜润润,李一平,等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究[J]. *水利学报*, 2008, **39** (9): 1051-1059.

[9] Pei H P, Wang Y. Eutrophication research of West Lake, Hangzhou, China: modeling under uncertainty [J]. *Water Research*, 2003, **37** (2): 416-428.

[10] 邓建才,陈桥,翟水晶,等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. *环境科学*, 2008, **29** (12): 3382-3386.

[11] Heisler J, Glibert P M, Burkholder J M, *et al.* Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus [J]. *Harmful Algae*, 2008, **8** (1): 3-13.

[12] 姜霞,钟立香,王书航,等. 巢湖水华暴发期水-沉积物界面溶解性氮形态的变化[J]. *中国环境科学*, 2009, **29** (11): 1158-1163.

[13] 罗缙,逢勇,林颖,等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J]. *河海大学学报*, 2005, **33** (2): 131-135.

[14] 黄卫,张祥志,朱泽华,等. 江苏省太湖流域入湖河流污染物入湖总量监测[J]. *中国环境监测*, 2005, **21** (2): 52-55.

[15] 孟伟,张远,王西琴,等. 流域水质目标管理技术研究: V. 水污染防治的环境经济政策[J]. *环境科学研究*, 2008, **21** (4): 1-9.

[16] 金相灿,屠清英. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.

[17] Kowalkowski T, Zbytniewski R, Szejna J, *et al.* Application of chemometrics in river water classification [J]. *Water Research*, 2006, **40** (4): 744-752.

[18] 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蓝藻水华的初步预测[J]. *湖泊科学*, 2001, **13** (1): 63-71.

[19] 董毅. 因子分析在水系沉积物测量地球化学分区中的应用探讨[J]. *矿产与地质*, 2008, **22** (1): 78-82.