

南太湖地区小型浅水湖泊自净能力季节变化研究

许磊¹, 李华^{1,2*}, 陈英旭^{1,2}, 姚玉鑫³, 梁新强^{1,2}, 周李³, 章献忠^{1,4}

(1. 浙江大学环境保护研究所, 杭州 310029; 2. 浙江省水体污染控制与环境安全技术重点实验室, 杭州 310029; 3. 湖州市环境保护监测中心站, 湖州 313000; 4. 兰溪市环境保护监测站, 兰溪 321100)

摘要:以南太湖地区小型浅水湖泊为对象, 研究了湖泊水体自净能力季节变化的特征. 结果表明, 湖泊对高锰酸盐指数、总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)的净化能力季节性差异较大. 各水质指标春季和冬季自净效果较好, 夏季自净效果较差的是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 秋季是 TP 和 Chl-a. 湖泊四季水体有机污染较轻, TN、TP 污染严重. TN、TP 浓度条件适宜藻类生长, 水体容易发生富营养化, 磷为限制性因子. Chl-a 浓度显示湖泊在夏秋两季处于富营养化水平, 冬春两季转变为中营养水平. 浮游植物的生长与暴发对水质有较大影响, 并影响到湖泊的自净能力. 影响水体 pH 值和溶解氧(DO)浓度的主要因素是水生植物的种类和数量, 农田肥料流失和农村生活污水排放是造成水体中氮磷含量过高的主要原因. 过量使用有机肥使得夏季湖泊水体中有机氮占 TN 的主要部分, 其他季节 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 的主要部分. 主成分分析结果表明, 影响南太湖地区小型浅水湖泊自净能力的 3 个主成分分别为浮游植物因子(水温、pH、高锰酸盐指数和 Chl-a)、农田排水因子(pH、DO 和 TN)和营养因子(TN 和 TP). 聚类分析结果表明 3 个湖泊 11 个采样点 4 个季节的水质可聚为两大类, 春秋冬季为一类, 夏季为一类, 这一结果是受温度变化及农田排水所致. 利用水温和 pH 拟合出用于计算湖泊水体中的高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a 的线性方程, 提高了现场快速预测能力.

关键词: 自净能力; 小型浅水湖泊; 季节变化; 主成分分析; 聚类分析; 线性拟合

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)04-0924-07

Research on Seasonal Variation of Self-purification Ability for Small Shallow Lakes in South Lake Taihu

XU Lei¹, LI Hua^{1,2}, CHEN Ying-xu^{1,2}, YAO Yu-xin³, LIANG Xin-qiang^{1,2}, ZHOU Li³, ZHANG Xian-zhong^{1,4}

(1. Institute of Environmental Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Key Laboratory for Water Pollution Control and Environmental Safety, Zhejiang Province, Hangzhou 310029, China; 3. Environmental Monitoring Central Station, Huzhou 313000, China; 4. Environmental Monitoring Station, Lanxi 321100, China)

Abstract: Seasonal variations of self-purification ability for small natural shallow lakes in South Lake Taihu were investigated. The results showed that seasonal difference of self-purification of permanganate index, total nitrogen (TN), ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), total phosphorus (TP), chlorophyll (Chl-a) in small shallow lakes were remarkable. Effects of self-purification were better in spring and winter, and were worse in summer by $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and in autumn by TP and Chl-a. Organic pollution was light, TN and TP pollution were seriously in four seasons. Concentrations of TN and TP brought a well condition to algae growth, and lakes were eutrophication easily by the limiting factor of phosphorus. Concentrations of Chl-a were showed that lakes were eutrophic in summer or autumn and mesotrophic in winter or spring. Growth and blooms of phytoplankton impacted water quality and self-purification of lakes. Species and quantity of aquatic plants were the main factors to affect the change of pH and dissolved oxygen (DO), and loss of fertilizer and domestic wastewater were the main reasons for high nitrogen and phosphorus concentrations in lakes. Organic nitrogen was the main portion of TN by using excessive organic fertilizer in summer, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was the main portion in other seasons. The principal component analysis result showed that the three principal components of self-purification ability were phytoplankton factor (water temperature, pH, permanganate index and Chl-a), farm drainage factor (pH, DO and TN), nutrient factor (TN and TP). The cluster analysis result showed that the water quality of four seasons in 11 sampling sites of three lakes could be divided into two categories: first, in spring, autumn and winter; second, in summer. This was caused by the temperature changes and agricultural drainage. Water temperature and pH were used to calculate the concentrations of permanganate index, TN, TP, Chl-a by linear equations, which improved the quick prediction ability in locale.

Key words: self-purification ability; small shallow lake; seasonal variation; principal component analysis; cluster analysis; linear fitting

收稿日期: 2009-06-03; 修订日期: 2009-09-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006); 浙江省科技厅重点科研社会发展项目(2006C23070); 浙江省教育厅科研项目(N20080066)

作者简介: 许磊(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农村面源污染控制, E-mail: xulei81@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lisar2002@zju.edu.cn

水体的自净功能是指湖泊生态系统通过自然生态过程及物质循环作用,将水体中的富营养化物质或有害物质予以吸收、转化、再分配,使水体得以净化的能力^[1,2]。水体自净是水生态系统的一种生态修复手段^[3],它是一个包括物理、化学和生物的复杂过程^[2,4],这一过程受季节变化影响显著^[3,5,6]。研究表明,纳污水体营养状态会随着季节发生变化,碳、氮(N)、磷(P)和叶绿素 a(Chl-a)的表现形式为丰水期>平水期>枯水期^[7,8],水体沉积物释放量随着季节温度的变化而变化^[9,10],水生植物和藻类的生长规律也具有明显的季节性规律^[11,12]。近年来对于接纳工业废水的水体自净能力研究较多^[3,13~15],而对农业非点源区小型浅水湖泊的自净能力季节性变化鲜有报道。

在农业非点源区内的小型浅水湖泊中,水生植物系统(挺水植物、沉水植物、浮游植物和漂浮植物)发达,农田排出的污染物容易对水体水质产生较大冲击^[11],二者随季节变化明显导致整个湖泊生态系统对污染物的自净能力受季节变化影响显著。由于水体自净过程是营养盐相互影响并同时发生的过程,化学净化过程不仅体现在有机物的氧化分解能力上,同时也体现在营养盐的形态转化及消减程度上^[4]。要达到水生生态系统资源的可持续利用,一个重要的先决条件是实现具有自力更生和自净功能的生态系统^[13,16],而了解生物化学元素在生物地球化学流动中的作用,保持水生态系统持续发展对缓解水体富营养化具有重要作用^[17]。本研究以南太湖地区农业耕作区内小型浅水湖泊为研究对象,研究其不同季节对高锰酸盐指数、总氮(TN)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、总磷(TP)、Chl-a的自净能力,探讨小型浅水湖泊自净能力的季节变化特性;对3个湖泊11个采样点各季节水质(水温(t)、pH、DO、高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a)进行了主成分分析和系统聚类研究;并拟合南太湖地区小型浅水湖泊水质参数一维线性方程。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域是位于太湖南岸浙江省湖州市境内的3个小型浅水湖泊(大荡漾、陈湾漾和西塘漾,图1)。湖泊周围农田密布,村庄离湖泊较近,进水主要为农田排水和农村生活污水。周边内无工矿企业,土地利用状态近5年内未发生变化。湖泊出水经横山港和小梅港流入太湖。湖泊基本参数见表1。

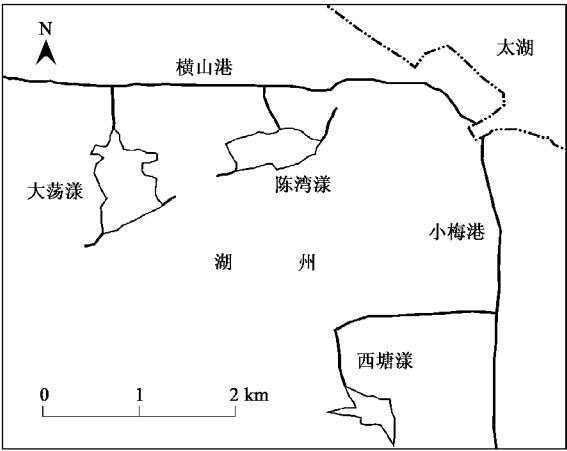


图1 研究区位置示意
Fig.1 Map of studying area

表1 湖泊的基本参数¹⁾
Table 1 Parameters of each lake

名称	面积 $\times 10^4/\text{m}^2$	平均水深/m	容积 $\times 10^4/\text{m}^3$
陈湾漾	29	2.0	58
大荡漾	40	1.5	60
西塘漾	12.5	1.2	15

1) 面积通过卫星遥感影像计算得出,平均水深为实测值的平均值

研究区域处于江南丘陵与平原水网结合处,农田高程在1.86~2.02 m之间(黄海标高)。区域内土地肥沃,大部分地区为湖松土和典型的水稻土,以种植水稻、蔬菜为主,人工植被以果树、桑、水杉为主,主要在道路、住宅周围种植。

3个小型浅水湖泊内水生植被较多,近岸挺水植物主要为芦苇、菖蒲,水面漂浮植物主要为黄花水龙、水鳖、马来眼子菜和菱,沉水植物主要为狐尾藻和菹草。

1.2 采样和分析方法

采样时间为2007年4月、5月、9月、11月及2008年1月和3月,13:00~15:00。采样点位于湖泊入水口及出水口处。样品都保存于4℃环境,3 h内送到实验室。

水温(t)、pH、溶解氧(DO)由水质监测仪(Yellow Spring,美国)测得。高锰酸盐指数采用高锰酸盐指数法;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法; NO_3^--N 采用酚二磺酸分光光度法;TP采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法;Chl-a采用丙酮萃取分光光度法。所有样品均平行3次测定,结果以平均值表示。

根据杨诗芳等^[18]的研究,参考浙江省北部地区的50 a气温数据,将研究区域的四季划分为春季(4

~5月,夏季:6~9月,秋季:10~11月,冬季:12~次年3月.春冬季各采样2次,夏秋季各采样1次.

各水质指标之间的相关性,主要水质指标(高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a)的一维线性方程拟合、主要水质指标(T、pH、DO、高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a)的主成分分析及聚类分析均由SPSS12.0软件得出.聚类分析为Q型系统聚类(Cases),采用欧式距离(euclidean distance),组间连接法(between-groups linkage).

1.3 自净能力计算方法

各季节湖泊自净能力根据该季采样中污染物流入/流出的平均值进行表征,如式(1).

$$\eta = 1 - \sum_{i=1}^n (Q/Q_i) \times 100\% / n \quad (1)$$

式中, η 为每季湖泊对特定污染物的自净能力, Q_i 为该种污染物的入湖量, Q 为该种污染物的出湖量, n 为采样次数.

2 结果与讨论

2.1 物理化学参数特征

监测期间水体pH值范围:7.42~8.12,DO浓度范围:6.56~10.47 mg·L⁻¹.pH值夏季最高,秋季最低;DO值冬季最高,秋季最低,二者的变化趋势具有相似性(图2),且二者在春夏秋季有极显著正相关关系(表2).由于植物生物量季节分布为夏>秋>春>冬^[19],漂浮植物在春夏季大量生长会阻止部分水面与大气进行氧气交换,但浮游植物和沉水植物光合作用向水体中释放氧气,因此水体DO浓度在春季和夏季基本平稳;而夏季浮游植物(主要是藻类)大量生长,引起水体pH值升高.秋季漂浮植物腐烂浮于水面,过多的浮游植物致使水体透光率减弱,沉水植物光合作用随之减弱,导致水体DO浓度在秋季最低,直到冬季漂浮植物腐烂完全或沉入水底,水面无水生植被覆盖,水体DO浓度有所回升,秋季浮游植物死亡腐烂也引起了水体pH值明显下降.在水中植物量最低的冬季,pH和DO之间无明显相关性($r = -0.161$);而水生植物生长时(春夏秋季),水体DO和pH有较好的相关性(r 分别为0.908、0.962、0.819),因此影响南太湖地区小型浅水湖泊水体pH值和DO浓度变化的主要因素应为水生植物(含浮游植物).

2.2 高锰酸盐指数

研究水域对高锰酸盐指数的净化能力见图3.一般地,若水体中有机质含量高,该水体自净能力则

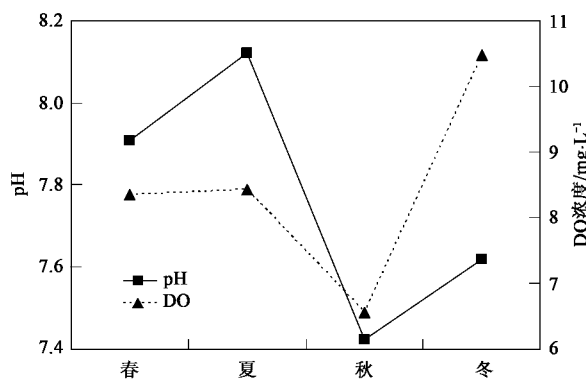


图2 pH和DO浓度的季节变化

Fig. 2 Changes of pH and DO concentrations in difference seasons

差,缺乏将复杂组分有机物分解成简单组分无机化合物的环境功能^[4],超过4 mg·L⁻¹(按高锰酸盐指数计,下同)时,表示水体已受有机污染^[20].而研究区高锰酸盐指数浓度大部分都低于6 mg·L⁻¹(地表水Ⅲ类水标准,GB 3838-2002),说明该水域受轻微有机污染.温度较高的夏季和秋季,水体中微生物数量和活性都较高^[12,19],对有机质的降解能力高;温度较低的冬季和春季,水生植物和微生物生长受抑制,对有机质的降解能力降低(图3).

高锰酸盐指数和TP在春秋冬季呈极显著正相关关系,而在夏季呈极显著负相关关系(表2),这可能和夏季水生植物/微生物生物量大吸收磷较多有关,同时也可说明该季周边村庄排放的生活污水中TP占入库TP比例较大,农村生活污水是造成湖泊水体中TP含量过高的主要原因.

2.3 N、P

研究水域对TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP的净化能力见图3.水体中TN浓度范围:0.95~2.75 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N浓度范围:0.01~0.62 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N浓度范围:0.01~2.62 mg·L⁻¹,TP浓度范围:0.024~0.096 mg·L⁻¹.从图4可以看出:除夏季外,NO₃⁻-N在TN组成中都占50%以上的;夏季,氮主要以有机氮形式存在;NH₄⁺-N在TN中的比例夏秋季较高,冬春季较低.

研究水域处于湖州市主要农业区,水体中TN、TP含量较高与农田化肥过度施用有关^[8].研究表明^[21,22],过量使用有机肥对稻田排水中的N、P影响较大,NO₃⁻-N是TN的主要组成部分.本研究中,水体对TN的净化效果在春秋季节较好,但在农田氮磷流失严重的夏季,TN的净化能力并未出现负值($\eta = 0.27\%$,图3),此时接纳湖泊水体中氮主要以有

机态存在(图 4) ,出水口的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量明显高于进水口(图 3). 由于进水口处的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度值较低 ,有机氮占 TN 的主要部分 ,因此在从进水口流到出水口的过程中 ,有机氮在生物/微生物作用下发生分解 ;且温度较高的夏季 ,底泥释放会增加水体中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的含量^[9 ,10] ,这 2 个因素解释

了在水流沿途中氮素被生物和微生物利用后而出水口 TN 浓度依旧保持和进水口一致的现象. 在农田田面水排水较少的春秋冬季 , $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主要的氮素形态 ,说明这三季中稻田排水以渗透水为主 ,而夏季以田面水为主的排水(可能是由于降雨流失导致)造成湖泊水体有机氮含量较高.

表 2 水质指标的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation among water quality indices								
高锰酸盐指数		TN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TP	pH	DO	Chl-a
高锰酸盐指数	1							
	-0.339							
	0.158							
	0.566 *	1						
TN	-0.415 *							
	0.196	0.674 * *						
	-0.777 * *	-0.268						
	0.293	0.644 *	1					
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.421 * *	-0.639 * *						
	-0.396 *	0.931 * *	0.524 * *					
	0.089	0.940 * *	-0.379					
	-0.316	-0.230	-0.627 *	1				
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	-0.385	0.913 * *	-0.814 * *					
	0.888 * *	-0.252	0.290	-0.378 *				
	-0.823 * *	0.115	0.786 * *	0.117				
	0.735 * *	0.376	0.224	-0.151	1			
TP	0.689 * *	-0.113	0.236	-0.068				
	-0.344	0.011	-0.355	-0.059	-0.272			
	0.742 * *	0.221	-0.598 *	0.112	-0.787 * *			
	0.005	0.097	0.163	-0.095	0.143	1		
pH	0.569 * *	0.214	-0.123	0.329	0.642 * *			
	-0.533 * *	0.053	-0.460 *	0.012	-0.474 *	0.908 * *		
	0.816 * *	0.262	-0.749 * *	0.182	-0.850 * *	0.962 * *		
	0.022	0.129	0.024	0.206	-0.113	0.819 * *	1	
DO	0.293	-0.609 * *	0.845 * *	-0.759 * *	0.166	-0.161		
	0.055	0.033	0.455	0.024	0.078	0.075	0.004	
	0.755 * *	-0.265	-0.718 * *	-0.213	-0.824 * *	0.593 *	0.661 *	
	0.578 *	0.569 *	0.312	-0.167	0.363	-0.120	0.282	1
Chl-a	-0.079	0.455 *	-0.461 *	-0.491 *	0.030	0.393 *	-0.430 *	

1)表中每一组数据从上到下依次表示为相对应水质指标在春季、夏季、秋季、冬季的相关性系数 ; * 表示 $p < 0.05$, * * 表示 $p < 0.01$;除Chl-a外 ,其余各水质指标样品数 :春冬季 $n = 22$,夏秋季 $n = 11$;Chl-a样品数 :春季 $n = 4$,夏秋季 $n = 11$,冬季 $n = 22$

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 DO 浓度在春季和夏季都呈显著负相关关系 ,冬季则为极显著正相关关系 ; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 DO 浓度在冬季呈极显著负相关关系(表 2). 一般来说 ,水中 DO 充足时 ,在微生物作用下易发生硝化反应. 然而在春夏季 , $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度降低的同时 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度并未升高(表 2) ,这说明 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 主要是被水生植物吸收. 冬季随着水体中 DO 增加 ,却出现了 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 升高且 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 降低的现象(表 2) ,这可能是由于进入冬季后湖泊沉积物释放 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 并吸附 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ^[8]和

水生植物腐烂释放 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ^[23]所致.

一般认为 ,当水体中 TN、TP 含量分别达到 0.20、0.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上时 ,水体存在发生富营养化的危险^[8]. 研究湖泊在整个监测周期内的 TN、TP 值全部高于此限值 ,表明这些湖泊 N、P 浓度条件适合藻类生长. N/P 对藻类的爆发性生长具有重要作用^[7 ,8]. 当水体中 $\text{N/P} < 7$,氮将限制藻类的生长 ,N/P在 8 ~ 30 为适应藻类生长范围 , $\text{N/P} > 30$,P 将成为藻类生长的限制因子^[24]. 研究水域的 N/P 范

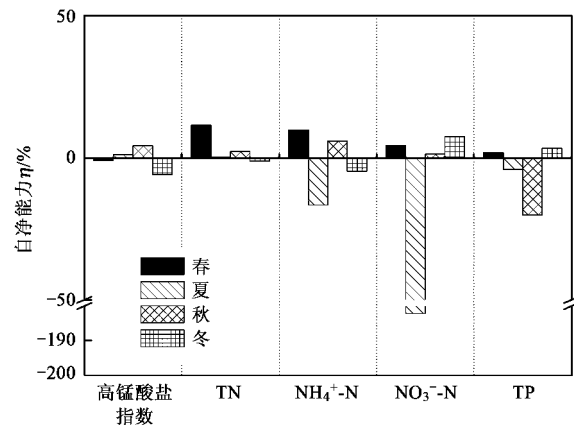


图3 湖泊对部分水质指标的净化能力的季节变化

Fig.3 Self-purification changes to lakes of part water quality indexes in difference seasons

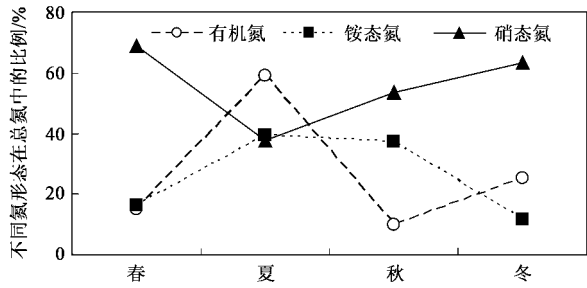


图4 不同季节中不同形态氮在总氮中的比例变化

Fig.4 Ratios of different nitrogen forms in total nitrogen change in different seasons

围在 10 ~ 74 ,绝大多数在 8 ~ 30 之间 ,这表明所研究湖泊中 P 为藻类生长的限制因子. 在本研究中夏季 TP 和 Chl-a、pH 之间呈极显著负相关关系(表 2) ,这可能是由于浮游植物的过快繁殖而大量消耗湖泊水体中的 TP.

夏季的农田肥料流失并未影响接纳水体对 TP 的去除能力 ,但在农田排水较少的秋季出现了 TP 流出湖泊的高峰期 ,其原因可能是水生植物夏季生长时吸收磷而秋季凋亡后排出湖泊引起了出水口 TP 浓度上升 ,沉积物在春秋季变换时向水体释放较多的磷也有一定的影响^[8]. TP 与 DO 浓度在春夏季的显著性负相关关系(表 2)则证实了湖泊生态系统(微生物/水生植物)在充足氧气条件下吸收磷 ,生物净化水质能力明显.

2.4 Chl-a

Chl-a 反映了浮游植物生物量的高低^[25] ,它可以直观地描述水体富营养化状况^[26]. 本研究中水体中 Chl-a 浓度范围在 1.03 ~ 42.3 mg · m⁻³. 根据

OECD 富营养化单因子评价标准(Chl-a < 3 mg · m⁻³ 为贫营养 ; Chl-a 3 ~ 11 mg · m⁻³ 为中营养 ; Chl-a 11 ~ 78 mg · m⁻³ 为富营养 ; Chl-a > 78 mg · m⁻³ 为严重富营养)^[27] ,夏秋两季的水域皆为富营养化水平 ,冬春两季时转变为中营养或贫营养水平.

夏季 Chl-a 与 NH₄⁺-N、TP 呈显著性负相关关系(表 2) ,表明在夏季浮游植物生长过程中大量吸收 NH₄⁺-N 和磷. 浮游植物大量生长也引起了水体中有机的增加(表 2).

2.5 主成分分析

将获得的水样水质指标 t、pH、DO、高锰酸盐指数、TN、TP 和 Chl-a 进行主成分分析 ,统计信息如表 3. 从表 3 可以看出 ,第 1 ~ 3 因子的特征根均大于 1 ,且第 1 ~ 3 因子的累计贡献率为 80.509% ,由此确定因子 1 ~ 3 为主成分.

表 3 主成分统计信息表			
Table 3 Principal component statistical information			
因子	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.991	42.728	42.728
2	1.570	22.432	65.160
3	1.074	15.350	80.509
4	0.739	10.558	91.068
5	0.277	3.958	95.025
6	0.210	3.002	98.028
7	0.138	1.972	100.000

因子载荷如图 5 所示. 可以看出 ,第一主成分包括 t、pH、高锰酸盐指数和 Chl-a. 随温度变化而进行的浮游植物生长与繁殖过程 ,对水体 pH、DO 和高锰酸盐指数影响较大 ,因此可以将第一主成分称为浮游植物因子. 第二主成分包括 DO、pH 和 TN. TN 主

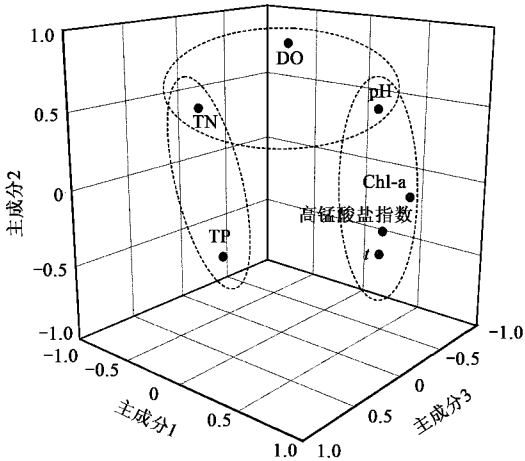


图5 主要水质指标因子载荷图

Fig.5 Component plot of main water quality indexes

要是由农田排放 ,通过影响湖泊水生植物/微生物生物量来影响水体 DO 和 pH ,因此可以将第二主成分称为农田排水因子. 第三主成分包括 TN 和 TP. TN、TP 反映了水体氮、磷元素含量的综合 ,是水体营养水平评价的重要指标^[28] ,因此可以将第三主成分称为营养因子. 农田排水因子可用来解释湖泊夏季自净能力较差的原因 ,因为夏季湖泊水质自净能力最差的是 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,而浮游植物因子和营养因子则用来解释湖泊秋季 Chl-a 和 TP 自净能力较差的原因.

2.6 Q 型聚类分析

图 6 为含有 t 、pH、DO、高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a 的聚类分析结果. 可以看出 4 个季节 11 个采样点的水质被分为 2 大类 ,第一大类主要是春秋冬季的水质 ,第二大类主要是夏季的水质 ,这说明 3 个湖泊水质变化规律季节性明显 ,夏季最为突出 ,春秋冬季较为相似. 综上所述可以推断出 ,这是由于夏季相对于春秋冬季 ,其较大的农田排污量、高温引起的沉积物释放营养物及藻类暴发共同作用引起湖泊自净能力发生较大变化.

2.7 一维线性水质方程拟合

湖泊自净能力与许多物理化学、生物及水动力状况有十分密切的关系^[5-12] ,秦伯强等^[11] 发现太湖 Chl-a 浓度可以用 TN 或 TP 的一维线性方程来表达. 从文中 2.1 ~ 2.6 的研究结果可以看出 ,南太湖地区小型浅水湖泊水质变化和水生植物种类及数量关系密切. 不同季节(温度不同)水生植物种类和数量造成了水体中常规水质参数 pH、DO 的不同 ,但春秋冬季水质可能具有相似性(图 6). 因此 ,利用 t 、pH、DO 对水体中的水质参数进行多重线性回归分析 ,发现 t 和 pH 可以用于拟合本研究中的高锰酸盐指数、TN、TP 和 Chl-a 浓度值 ,如表 4 所示. 利用表 4 中的表达式 ,可用 2 个水质指标(pH 和 t)对高锰酸盐指数、TN、TP 和 Chl-a 浓度值进行快速估算 ,提高

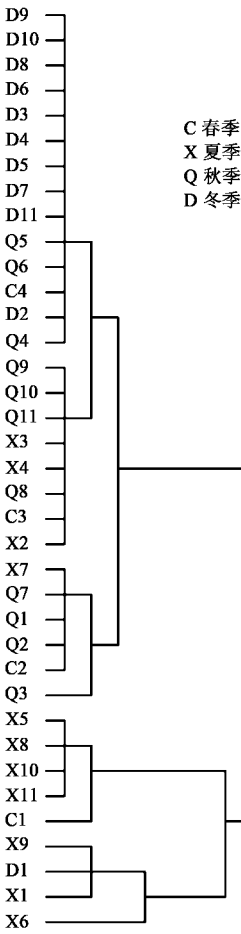


图 6 11 个采样点不同季节水质指标聚类树状图
Fig. 6 Cluster dendrogram of water quality indexes at 11 sampling sites in different seasons

了现场预测的能力. 用 2008 年 4 月(春季)和 8 月(夏季)数据代入表达式进行计算 ,得出的数值与实际值误差均不超过 30% ,可满足模型计算的要求^[29] . 这说明在南太湖农业耕作区小型浅水湖泊中 ,水体中污染物的转化具有一定规律性 ,水体自净能力和水生生物的季节变化有较大关系.

表 4 主要水质指标的表达式

表达式	相关系数(R^2)	平均误差(春季 $n = 7$)/%	平均误差(夏季 $n = 7$)/%
① 高锰酸盐指数 = $0.042t + 0.45 \text{ pH}$	0.984	9.44	17.57
② $\text{TN} = 0.137 \text{ pH}$	0.924	28.09	16.93
③ $\text{TP} = (0.672t + 7.2 \text{ pH}) / 1000$	0.913	23.84	18.41
④ $\text{Chl-a} = 0.759t - 1.033 \text{ pH}$	0.786	15.62	24.36

3 结论

(1)南太湖地域农业耕作区内的小型浅水湖泊水体主要污染源为农田排水和农村生活污水 ,有机

污染较轻 ,N、P 污染严重 ,TN 和 TP 含量都高于藻类生长限值($\text{N } 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{P } 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ,容易发生富营养化 ,P 为限制性因子. Chl-a 浓度显示湖泊在夏秋两季处于富营养化水平 ,冬春两季转变为中

营养水平. 水生植物是湖泊重要的氮库和磷库.

(2)南太湖地区小型浅水湖泊有一定的自净能力. 春季和冬季湖泊水质自净效果较好. 夏季自净效果较差的是 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 秋季自净效果较差的是 TP 和Chl-a. 夏季浮游植物暴发, 吸收水体中的氮磷, 并造成湖泊在秋季Chl-a自净能力最低. 水生植物(含浮游植物)影响南太湖地区小型浅水湖泊水体 pH 值和 DO 浓度在四季中的变化.

(3)主成分分析结果表明, 影响南太湖地区小型浅水湖泊自净能力的 3 个主成分分别为浮游植物因子(t , pH、高锰酸盐指数和Chl-a)、农田排水因子(pH、DO 和 TN)和营养因子(TN 和 TP). 农田排水因子可用来解释湖泊夏季自净能力较差的原因, 而浮游植物因子和营养因子则用来解释湖泊秋季自净能力较差的原因.

(4)聚类分析结果表明, 3 个湖泊 11 个采样点 4 个季节的水质可聚为两大类, 春秋冬季为一类, 夏季为一类, 这是受温度变化及农田污水排放所致.

(5)南太湖地区小型浅水湖泊中高锰酸盐指数、TN、TP 和Chl-a浓度可用由 t 和 pH 构成的一次线性方程表征.

参考文献：

[1] Ostroumov S A. An aquatic ecosystem : A large-scale diversified bioreactor with the function of water self-purification function [J]. Doklady Biological Sciences 2000 , **374** : 514-516.

[2] Vagnetti R , Miana P , Fabris M , *et al.* Self-purification ability of a resurgence stream[J]. Chemosphere , 2003 , **52** : 1781-1795.

[3] Ostroumov S A. On some issues of maintaining water quality and self-purification [J]. Water Resources , 2005 , **32**(3) : 337-346.

[4] 何本茂 , 韦蔓新. 铁山港湾水体自净能力及其与环境因子的关系初探[J]. 海洋湖沼通报 , 2006 (3) : 21-26.

[5] Ostroumov S A. On the biotic self-purification of aquatic ecosystems , Elements of the theory [J]. Doklady Biological Sciences , 2004 , **396** : 206-211.

[6] 任瑞丽 , 刘茂松 , 章杰明 , 等. 过水性湖泊自净能力的动态变化[J]. 生态学杂志 , 2007 , **26**(8) : 1222-1227.

[7] 张晟 , 郑坚 , 刘婷婷 , 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学 , 2009 , **30**(1) : 58-63.

[8] 张晟 , 李崇明 , 郑坚 , 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. 环境科学 , 2009 , **30**(1) : 64-69.

[9] Byran M S , Laurence C , Rupert P , *et al.* Effects of light on sediment nutrient flux and water column nutrient stoichiometry in a shallow lake[J]. Water Research , 2008 , **42**(4-5) : 977-986.

[10] Jiang X , Jin X C , Yao Y , *et al.* Effects of biological activity , light , temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake , China[J].

Water Research , 2008 , **42**(8-9) : 2251-2259.

[11] 秦伯强 , 胡维平 , 陈伟民 , 等. 太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2004. 19-297.

[12] 范成新 , 王春霞. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2007. 300-370.

[13] Ostroumov S A. Inhibitory analysis of top-down control : new keys to studying eutrophication , algal blooms , and water self-purification [J]. Hydrobiologia , 2002 , **469** : 117-129.

[14] Korfali S I , Davies B E. Seasonal variations of trace metal chemical forms in bed sediments of a karstic river in Lebanon : implications for self-purification [J]. Environmental Geochemistry and Health , 2005 , **27** : 385-395.

[15] Karrasch B , Parra O , Cid H , *et al.* Effects of pulp and paper mill effluents on the microplankton and microbial self-purification capabilities of the Biobío River , Chile[J]. Science of The Total Environment , 2006 , **359**(1-3) : 194-208.

[16] Wei G L , Yang Z F , Cui B S , *et al.* Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River , China[J]. Water Resources Manage , 2009 , **23** : 1763-1780.

[17] Ostroumov S A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification : current conceptualizations and concluding remarks [J]. Hydrobiologia , 2002 , **469** : 203-204.

[18] 杨诗芳 , 毛裕定. 浙江省近 50 年气温变化及四季划分[J]. 浙江气象 , 2008 , **29**(4) : 1-6.

[19] 蔡启铭. 太湖环境生态研究(一) [M]. 北京 : 气象出版社 , 1998. 98-108.

[20] 刘建康. 东湖生态学研究(二) [M]. 北京 : 科学出版社 , 1995. 63-226.

[21] 李学平 , 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. 环境科学 , 2008 , **29**(2) : 434-439.

[22] 邱为国 , 唐浩 , 王超. 上海郊区水稻田氮素渗漏流失特性及控制对策[J]. 中国环境科学 , 2005 , **25**(5) : 558-562.

[23] 成小英 , 王国祥 , 濮培民 , 等. 凤眼莲腐烂分解对湖泊水质的影响[J]. 中国环境科学 , 2004 , **24**(3) : 303-306.

[24] 彭近新 , 陈慧君. 水质富营养化与防治 [M]. 北京 : 中国环境科学出版社 , 1988. 15-47.

[25] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. London : Cambridge Univ Press , 1984.

[26] 阮晓红 , 石晓丹 , 赵振华 , 等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系 [J]. 湖泊科学 , 2008 , **20**(5) : 556-562.

[27] Organization for Economic Cooperation and Development. Eutrophication of waters monitoring , assessment and control [M]. Paris : OECD , 1982.

[28] 龚珞军 , 杨学芬 , 熊邦喜 , 等. 武汉市夏季湖泊水体理化指标主成分和聚类分析 [J]. 长江流域资源与环境 , 2009 , **18**(6) : 550-554.

[29] 逢勇 , 韩涛 , 李一平 , 等. 太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算 [J]. 环境科学 , 2007 , **28**(9) : 1960-1964.