

鄱阳湖水体水质变化特征分析

刘倩纯^{1,2}, 余 潮^{1,2}, 张 杰^{1,2}, 陈 熙^{1,2}, 葛 刚², 吴 兰^{1,2*}

(1.江西省分子生物学与基因工程重点实验室, 南昌 330031; 2.南昌大学生命科学与食品工程学院, 南昌 330031)

摘要: 为了分析鄱阳湖水体的水质变化特征, 分别于2010年10月与2011年5月采集了鄱阳湖主湖区、五河入湖口以及碟形湖的表层水样, 对水质理化参数进行了测定分析。结果表明, 鄱阳湖水体COD、TN、TP等营养参数已达到富营养化水平, 水质理化参数存在显著的时空差异。其中2010年10月鄱阳湖水体COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量和TN/TP均显著低于2011年5月的含量, 与之相反, 2010年10月鄱阳湖水体TP、Chl-a含量显著高于2011年5月水体; 饶河入湖口COD、TN、TP含量显著高于全湖其他样地, 居全湖最高, 而南矶山碟形湖的Chl-a显著高于其他样地。进一步的PCA分析结果显示, 影响鄱阳湖的环境因子主要为溶氧量、透光度和电导率。从样地变化来看, 湖口样地、南北主湖区、抚河入湖口及三江口样地受氮磷营养盐影响较小, 而其他各入湖口受碳氮磷营养盐影响较大。

关键词: 鄱阳湖; 水质; 富营养化; 主成分分析

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)06-1232-06 doi:10.11654/jaes.2013.06.021

Water Quality Variations in Poyang Lake

LIU Qian-chun^{1,2}, YU Chao^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, GE Gang², WU Lan^{1,2*}

(1.Key Laboratory of Molecular Biology and Genetic Engineering in Jiangxi Province, Nanchang 330031, China; 2.School of Life Sciences and Food Engineering of Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to analyze the variation of water quality, surface water was collected from ten sampling sites in Poyang Lake in Oct. 2010 and May 2011 respectively. The results indicated that the contents of COD, TN and TP have been subjected to eutrophication status in Lake Poyang. There were significant differences among physicochemical parameters. The contents of COD, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and TN/TP in Oct. 2010 were significantly lower than those in May 2011 respectively. In contrast, the contents of TP and Chl-a were significantly higher in Oct. 2010 than May 2011. Besides, samples from Rao River Estuary have highest concentrations of COD, TN, TP, and the content of Chl-a in Nanjishan Region Estuary was significantly higher than other sampling sites. Principal component analysis revealed that water quality in Poyang Lake was mainly affected by dissolved oxygen, transmittance and conductivity. According to the variation among sampling sites, water quality was affected less by nutrients of nitrogen and phosphorus in Hukou, the North and South regions of Poyang, Fu River Estuary and Sanjiangkou, while more in other sites.

Keywords: Poyang Lake; water quality; eutrophication; principal component analysis

全球水质污染的主要原因是过多的水体养分负荷^[1-2], 控制流域的营养水平是环保政策的一个主要目标^[3]。近年来随着工业化、城镇化进程的推进, 鄱阳湖的水质状况发生了显著变化, 1988年, 鄱阳湖水体TP和TN浓度平均值分别为0.08、0.68 mg·L⁻¹^[4], 处于中营养化水平; 1996年, 鄱阳湖水体TP和TN含量最

高值分别达到0.15、2.38 mg·L⁻¹^[5]; 2005年, 鄱阳湖区水体已达到一定程度的氮磷污染, 具备富营养化条件^[6]。2006年, 鄱阳湖水体有一定程度的富营养化^[7]。2010年, 鄱阳湖流域表层水体总氮、总磷含量较高, 达到了富营养化水平^[8]。以上结论表明, 鄱阳湖水质已缓慢发展为富营养化。

虽然鄱阳湖水质问题已经引起人们的广泛关注, 但大多数集中在对氮磷污染的研究^[4-10], 对不同时期鄱阳湖诸多营养盐参数的调查及它们之间的相关性报道较少。本研究于2010年10月和2011年5月两个季节分别对鄱阳湖流域进行了水体营养现状的系

收稿日期: 2012-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(31060082)

作者简介: 刘倩纯(1987—), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事环境微生物方面的研究。E-mail: lqc072150@126.com

* 通信作者: 吴 兰 E-mail: wl690902@hotmail.com

统调查,通过主成分分析进一步评估鄱阳湖富营养化的主要驱动因子,分析其变化规律,以期对鄱阳湖水质的预防控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖位于江西省北部、长江中下游交接处南岸,地理位置为东经 $115^{\circ}49' \sim 116^{\circ}46'$,北纬 $28^{\circ}24' \sim 29^{\circ}46'$,是我国最大的淡水湖泊,也是具有国际性保护意义的淡水湿地^[1]。该湖上承赣江、修河、抚河、信江、饶河五大河流,下接浩瀚长江,有“丰水一大片,枯水一条线”之称,对维护长江下游地区的水生态安全具有重要作用。

1.2 样品采集及处理

于2010年10月底和2011年5月中旬对鄱阳湖南、北主湖区、三角洲碟形湖、长江与湖区交界口、五大水系入湖口(赣、抚、饶、信、修)设置10个典型样地,样地位点见图1。水样采集方法:用2 L有机玻璃

采水器采取0~0.5 m深水样,每个样地水平设立3个重复采样点,即湖(河)中央一个点,从中央向两侧延伸200~500 m各一个点。

水样采集后分装于若干500 mL的聚乙烯瓶中(聚乙烯瓶酸洗后70%酒精消毒处理),运回实验室于4℃冰箱保存。部分水样加硫酸酸化,于72 h内测定总氮(TN)、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、总磷(TP)、化学需氧量(COD)及总有机碳(TOC);部分水样加1% MgCO_3 ,用滤膜过滤($0.45 \mu\text{m}$, Milipore),用于测定湖水叶绿素a(Chl-a)的含量。所测样品均设置3个平行。

1.3 测定方法及数据分析

现场用YSI便携式水质分析仪(556MPS, USA)记录pH、温度、容氧量(DO)及电导率(EC)等水质指标;同时用圆盘法测定水体透光度(SD)。TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, NH_4^+-N 使用纳氏试剂比色法, NO_3^--N 使用酚二磺酸分光光度法,TP使用钼酸铵分光光度法,COD使用重铬酸盐法,TOC使用非色散红外吸收法(Liqui TOC),Chl-a使用分光光度法测定^[2]。所有数据分析借助SPSS 19.0统计软件完成,PCA分析使用CANOCO 4.5分析软件完成。

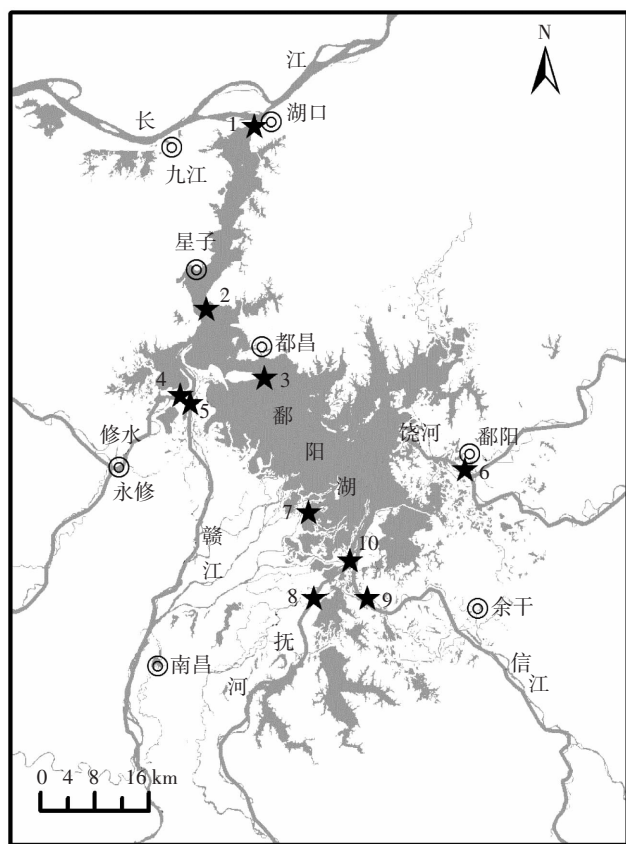
2 结果与讨论

2.1 鄱阳湖水体理化参数分析

鄱阳湖各水体的理化参数结果见表1。结果显示,鄱阳湖水体理化参数在不同的季节显著不同。2011年5月鄱阳湖的水温、透明度以及电导率均高于2010年10月;水体pH在2011年5月为中性偏酸,在2010年10月为中性偏碱;溶氧饱和度在不同季节无明显差异。

2.2 不同时期水体化学需氧量和总有机碳含量变化

COD是一个表征环境水体有机物污染的特定指标,TOC反应了水体中总有机碳的分布情况。2010年10月和2011年5月鄱阳湖水体COD和TOC含量的分布结果见图2。结果显示,2010年10月鄱阳湖表层水体COD含量平均值为 $18.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而在2011年5月COD达到 $31.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2011年5月鄱阳湖水体COD含量明显高于2010年10月水体,且在不同的季节鄱阳湖水体COD含量样地间差异显著。对照我国地表水环境质量标准^[3]分析结果可知:2010年10月的修河4号、赣江北支5号以及饶河入湖口6号样地COD含量达地表水环境质量Ⅳ类标准;2011年5月的南主湖区3号、赣江北支入湖口5号等样地COD达到了地表水环境质量Ⅴ类标准。鄱阳湖水体



1.湖口;2.星子(北主湖区);3.松门山(南主湖区);
4.修河入湖口;5.赣江北支入湖口;6.饶河入湖口;
7.南矶山碟形湖;8.抚河入湖口;9.信江入湖口;10.三江口

图1 鄱阳湖水样采集位点

Figure 1 Location of sampling sites in Poyang Lake

表 1 不同时期鄱阳湖水体理化参数

Table 1 The physical and chemical parameters in different periods in Poyang Lake

样地	SD/cm		T/°C		pH		DO/%		EC/mS·cm ⁻¹		DT/m	
	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05
1	15	13	15.19	25.01	7.42	6.68	86.0	77.4	15.89	100.90	16.0	10.0
2	12	18	15.94	24.94	7.27	6.77	86.7	83.9	15.20	115.80	12.0	5.0
3	11	13	14.89	23.71	7.25	7.12	93.0	84.4	15.29	79.24	7.0	5.5
4	40	70	17.69	22.50	7.30	6.21	84.0	88.4	9.50	54.20	7.0	1.5
5	20	18	16.23	24.90	7.33	6.72	95.2	80.0	20.03	72.00	10.0	2.5
6	28	30	17.86	24.10	6.91	6.42	92.6	82.4	20.70	20.90	7.0	3.5
7	28	30	14.71	28.37	7.59	6.98	83.8	66.8	11.16	77.96	1.5	1.0
8	20	45	14.32	24.28	7.45	5.93	48.7	80.2	10.76	40.67	7.5	4.5
9	30	110	17.53	25.46	7.54	6.43	91.2	87.7	13.95	47.60	10.0	1.0
10	20	15	15.92	24.39	7.35	6.26	56.0	80.5	15.00	47.20	15.0	11.5

注:SD为透光度;DO为溶氧饱和度;EC为电导率;DT为水深。

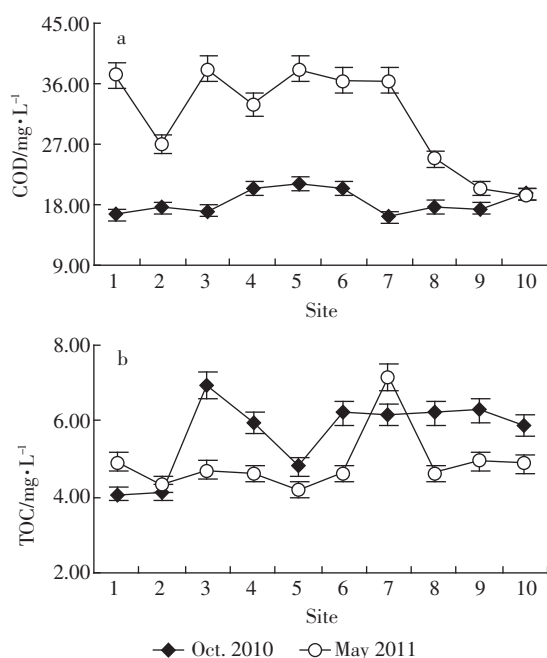


图 2 鄱阳湖不同时期 COD 和 TOC 含量

Figure 2 The concentrations of COD and TOC in different periods in Poyang Lake

COD 含量富营养化严重,部分样地 COD 含量达到极富营养水平。

TOC 含量结果表明(图 2b):2010 年 10 月鄱阳湖表层水体 TOC 含量平均值为 $5.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2011 年 5 月为 $4.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,除 2011 年 5 月的南矶山 7 号样地外,湖泊流域 TOC 含量无样地与季节的显著差异。结果显示,水位变化对湖泊 TOC 含量分布影响较小。有研究表明,不同类型的水体 COD 与 TOC 具有一定的相关性^[14-15]。本次统计分析结果显示鄱阳湖 COD 与 TOC 含量之间无明显相关性($P>0.05$),这可能是由于

各入湖口的水质状况不同,所受污染程度有所差异。2011 年 5 月水体有机碳含量较 2010 年 10 月低,可能是由于 2011 年 5 月气温升高,透光度增大,光降解和微生物降解能力加强所致。

2.3 鄱阳湖氮、磷含量变化

鄱阳湖 2010 年 10 月和 2011 年 5 月的氮、磷含量变化见表 2。结果显示,2010 年 10 月鄱阳湖水体总氮、氨态氮和硝态氮含量均显著低于 2011 年 5 月;与之相反,2010 年 10 月鄱阳湖水体总磷含量显著高于 2011 年 5 月水体。对于 TN/TP 比值而言,2011 年 5 月的鄱阳湖水体 TN/TP 显著高于 2010 年 10 月水体。结果显示,鄱阳湖水体营养特征可能与湖泊的水位变化密切相关,2010 年鄱阳湖为丰水年,高水位持续时间较长,而 2011 年鄱阳湖流域遭受百年罕见的春夏连旱,以致 5 月本应属于丰水期的鄱阳湖仍处于干旱状态(水位数据未列出)。

2010 年 10 月、2011 年 5 月鄱阳湖水体总氮含量平均值分别为 1.20 、 $1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均达到了富营养化水平;氨态氮和硝态氮含量分别为 0.47 、 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.98 、 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。结果显示鄱阳湖水体的氮素形式以氨态氮和硝酸盐氮为主。总氮在各采样点之间波动较大,主要是由于氮为不稳定元素,不同形态氮在沉积物与水界面进行循环转变,且鄱阳湖各个区域之间自然条件存在差异所致。对照地表水环境质量标准:2010 年 10 月鄱阳湖水体含氮量除 6 号饶河入湖口超过地表水环境质量 V 类标准外,其他样地均符合 II~III 类标准范围。2011 年 5 月鄱阳湖水体大部分样地处于 IV 类标准,少数样地如湖口、赣江北支超过了 V 类标准。

表 2 结果进一步显示,鄱阳湖有效氮含量明显偏高

表 2 不同时期鄱阳湖水体氮、磷含量

Table 2 The concentrations of nitrogen and phosphorus in different periods in Poyang Lake

样地	TN/mg·L ⁻¹		NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹		NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹		TP/mg·L ⁻¹		TN/TP	
	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05	2010-10	2011-05
1	1.03(±0.02)	2.14(±0.21)	0.25(±0.02)	0.98(±0.15)	0.33(±0.01)	1.08(±0.10)	0.20(±0.00)	0.07(±0.00)	5.17(±0.11)	29.05(±4.10)
2	0.97(±0.15)	1.94(±0.04)	0.47(±0.01)	0.97(±0.04)	0.30(±0.01)	0.94(±0.11)	0.09(±0.00)	0.08(±0.01)	10.81(±1.67)	24.69(±4.70)
3	1.41(±0.21)	1.87(±0.04)	0.55(±0.03)	0.78(±0.05)	0.31(±0.01)	0.59(±0.01)	0.14(±0.01)	0.04(±0.00)	10.67(±1.61)	43.68(±2.60)
4	1.33(±0.20)	1.34(±0.01)	0.43(±0.06)	0.68(±0.03)	0.34(±0.01)	0.36(±0.05)	0.09(±0.01)	0.03(±0.00)	16.87(4.54)	53.19(±3.93)
5	0.44(±0.01)	2.33(±0.22)	0.22(±0.01)	0.91(±0.17)	0.21(±0.01)	1.27(±0.03)	0.05(±0.01)	0.06(±0.00)	8.64(±1.32)	38.44(±3.64)
6	3.14(±0.64)	1.71(±0.05)	1.04(±0.01)	0.85(±0.20)	0.36(±0.03)	0.47(±0.03)	0.25(±0.04)	0.12(±0.02)	12.22(±0.81)	14.90(±1.71)
7	0.49(±0.07)	1.62(±0.08)	0.37(±0.03)	1.47(±0.09)	0.06(±0.00)	0.09(±0.01)	0.05(±0.00)	0.02(±0.00)	9.73(±1.35)	69.07(±2.22)
8	0.66(±0.04)	1.81(±0.08)	0.34(±0.03)	1.04(±0.04)	0.27(±0.03)	0.71(±0.03)	0.06(±0.01)	0.02(±0.00)	12.38(±2.56)	84.22(±4.81)
9	1.30(±0.36)	1.63(±0.07)	0.39(±0.06)	0.86(±0.06)	0.35(±0.04)	0.65(±0.05)	0.07(±0.01)	0.04(±0.01)	20.19(±6.65)	39.89(±6.25)
10	1.25(±0.32)	1.93(±0.39)	0.67(±0.11)	1.24(±0.15)	0.23(±0.04)	0.58(±0.09)	0.11(±0.00)	0.05(±0.00)	11.11(±3.06)	40.13(±3.89)

的样地是 6 号饶河入湖口(2010 年 10 月该地 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 分别高达 1.04 mg·L⁻¹ 和 0.36 mg·L⁻¹)。这一研究结果与王毛兰等^[9]的研究结论一致。据统计,饶河段的养殖业比较发达,鱼虾的养殖将含有大量悬浮物质和营养盐的水排入河水中,使河水含氮量明显偏高^[16]。而在两个季节中有效氮含量变化最大的是 5 号赣江北支入湖口,有研究报道,赣江主干流氮磷含量沿水流方向波动明显^[10],赣江是流入鄱阳湖的最大河流,沿岸城镇较多,赣江北支位于南昌下游,南昌城镇生活污水排放及农业面源污染等人为因素影响的波动可能是造成氮含量变化较大的原因。研究结果提示,应重视工农业生产中对废弃物和废水排放的限制,以及渔业养殖生产中对水质指标值的限制。

2010 年 10 月、2011 年 5 月鄱阳湖水体 TP 含量平均值分别为 0.11、0.05 mg·L⁻¹,均已达到了富营养化水平,其 TP 含量最高的样地均为饶河入湖口 6 号样地,分别为 2010 年 10 月的 0.25 mg·L⁻¹ 和 2011 年 5 月的 0.12 mg·L⁻¹,该地 TP 含量均达到甚至超过了地表水 V 类标准。其他样地的总磷含量均处于地表水环境质量 III~IV 类范围内。有研究指出,磷的滞留机制主要为颗粒磷的沉降作用^[17],水体中的磷酸根能被悬浮颗粒物吸附或包裹,因此磷受泥沙的运输影响较大。2011 年干旱时间较长,上游来水减少,流速减慢,水流对泥沙的搅动力及运输量降低,这可能是造成 2011 年 5 月 TP 含量低于 2010 年 10 月的原因。另外 2011 年 5 月湖口、北主湖区、赣江北支的磷含量较其他样地高,原因可能是由于这几个样地本身水位比其他样地要高且常年采砂频繁,水流搅动引起湖泊底质颗粒磷及内源营养盐释放,增大了磷含量。

从表 2 中可以看出,2010 年 10 月鄱阳湖水体 N/P

波动较小,各样地间无显著差异($P>0.05$)。2011 年 N/P 波动较大,各样地间差异十分显著($P<0.001$)。Downing 等^[18]认为氮磷比随营养水平的增加而降低,低氮磷比的湖泊意味着较高的营养负荷,研究结果显示,2011 年 5 月的氮磷比显著高于 2010 年 10 月,可见鄱阳湖在不同季节营养负荷波动显著。值得注意的是,6 号饶河入湖口处在不同水位环境下 N/P 值波动最小,且在 2011 年达到全湖最低值,说明饶河营养负荷较稳定,不同时期营养负荷均较高。

2.4 鄱阳湖水体叶绿素 a 含量变化

鄱阳湖水体 2010 年 10 月与 2011 年 5 月的叶绿素 a(Chl-a)含量见图 3。鄱阳湖水体 Chl-a 总体上含量较低,2010 年 10 月 Chl-a 为 0.88~3.87 μg·L⁻¹,2011 年 5 月 Chl-a 为 0.42~2.21 μg·L⁻¹,2010 年 10 月鄱阳湖水体 Chl-a 含量显著高于 2011 年 5 月水体。有研究表明^[19]鄱阳湖叶绿素 a 质量浓度具有一定的空间分布特征,空间分布上南湖区>北湖区,本次调查显示鄱阳湖水体 Chl-a 含量具有显著的样地差异性。值得注

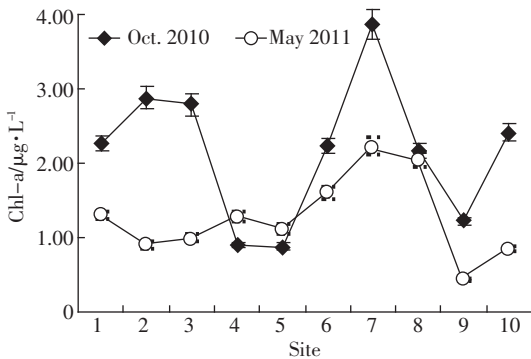


图 3 鄱阳湖不同时期 Chl-a 含量

Figure 3 The concentrations of Chl-a in different periods in Poyang Lake

意的是南矶山碟形湖的Chl-a含量在不同时期均高于全湖其他样地,可能是由于南矶山离市区较远,人为影响较小,外加水体交换较弱所致。

Chl-a浓度反应了浮游植物的生物量^[20],结果表明,2011年5月鄱阳湖湖水中藻类等浮游植物的生物量比2010年10月有所降低。翁笑艳^[21]认为在淡水湖泊或水库中,Chl-a含量或藻类的生长是由多因素控制的,影响藻类生长的因子主要有水动力条件、气象条件、营养盐等。也有研究认为,当环境中的氮磷比达到Redfield值(16)时,浮游植物或微生物呈现迅速生长和饱和状态,而正偏离或负偏离Redfield值时,微生物的生长都会出现营养盐限制现象^[22]。图3结果结合N/P值与各营养盐的相关性分析结果,2011年5月鄱阳湖Chl-a含量变化可能是磷营养盐限制的结果(N/P与TP的相关性 $r=-0.88$, $P<0.01$),但由于影响鄱阳湖浮游植物生长的主要因素复杂,仍需经过大量的研究进一步阐明。

2.5 鄱阳湖流域不同时期理化因子的主成分分析

对上述测定的13个环境参数进行PCA分析(图4)。结果显示,依据环境参数的不同,2010年10月鄱阳湖样地聚为3类(图4a):1号湖口、2、3号南北主湖区和5号赣江北支环境差异较小聚为一类;4号修河入湖口、6号饶河入湖口、7号南矶山样地和9号信江入湖口聚为一类;8号抚河入湖口和10号三江口样地聚为一类。2011年5月的1号湖口与2号北主

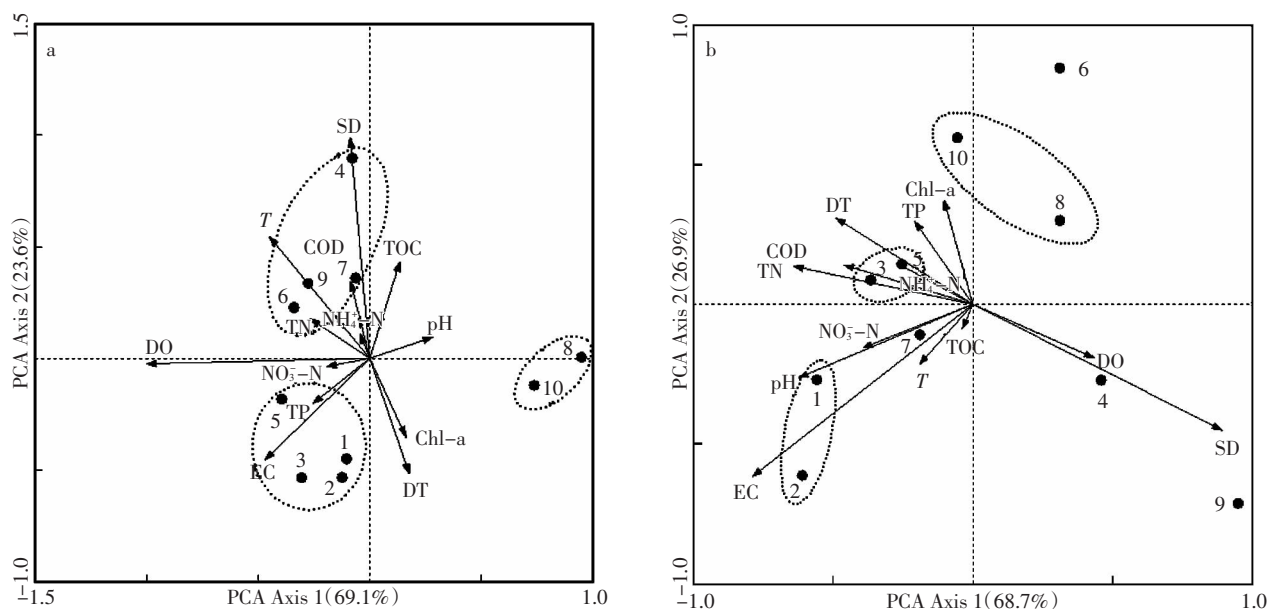
湖区、3号南主湖区与5号赣江北支入湖口、8号抚河和10号三江口样地分别聚集在一起(图4b)。结果显示鄱阳湖样地间理化参数的差异可能与地理位置的距离有关,样地间的地理位置相距越远,样地间的环境参数差异性越大。

PCA前两轴共解释了2010年10月鄱阳湖环境变量的92.7%(图4a)和2011年5月环境变量的95.6%(图4b)。在2010年10月,鄱阳湖水质主要的影响因素为溶氧量、透光度、温度和水深(DT),其中溶氧量显著与第一轴负相关(-0.99),透光度显著与第二轴正相关(0.98)。在2011年5月,鄱阳湖水质主要的环境影响因素为透光度、电导率、总氮、pH和溶氧量,其中透光率与第一轴正相关(0.89),电导率(-0.78)和总氮(-0.64)与第一轴负相关。以上分析表明,影响鄱阳湖的主要环境因子为溶氧量、电导率和透光度,其中透光度均与主成分轴有正相关的关系,电导率均与主成分轴有负相关的关系。

值得注意的是,鄱阳湖1号湖口、2号北主湖区、10号三江口及8号抚河样地受氮磷营养盐影响较小,而其他各入湖口受碳氮磷营养盐影响较大,其原因可能与各河流沿途流经的城市污染源排放有关,信江样地受水深影响较大。

3 结论

(1)鄱阳湖水体COD、TN、TP等营养盐含量较高,



(a)2010年10月理化因子主成分分析;(b)2011年5月理化因子主成分分析

图4 不同时期鄱阳湖水体理化因子主成分分析

Figure 4 Principal components analysis of physicochemical parameters in different periods in Poyang Lake

达到富营养化水平。

(2)鄱阳湖水体理化参数存在显著的时间差异性。2010年10月鄱阳湖水体COD、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量和TN/TP均显著低于2011年5月的含量,与之相反,2010年10月鄱阳湖水体TP、Chl-a含量显著高于2011年5月水体。鄱阳湖水体理化参数尤其是营养盐含量存在显著的空间差异,其中6号饶河入湖口COD、TN、TP含量显著高于其他样地居全湖最高,7号南矶山碟形湖的Chl-a显著高于其他样地。

(3)PCA结果显示,第一、二轴可充分解释鄱阳湖的环境变量,且影响鄱阳湖的环境因子主要为溶氧量、透光度和电导率,其中透光度与主成分轴有正相关关系,电导率与主成分轴有负相关的关系。从样地变化来看,1号湖口样地、2和3号南北主湖区、8号抚河及10号三江口样地受氮磷营养盐影响较小,而其他各入湖口受碳氮磷营养盐影响较大。

(4)通过对鄱阳湖氮磷等诸多营养盐的测定可以看出,鄱阳湖水质富营养化状况日益严重,为保护鄱阳湖水质,需要加快流域污染源控制和调整经济发展模式,尽量减少流域污染物排放对水质以及生态环境的影响。

参考文献:

- [1] Vitousek P M et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecol Appl*, 1997, 7: 737-750.
- [2] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle[J]. *Science*, 2010, 330: 192-196.
- [3] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: Where do we go from here?[J]. *Trends Ecol Evol*, 2009, 24: 201-207.
- [4] 朱海虹, 张本. 鄱阳湖: 水文·生物·沉积·湿地·开发整治 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997: 125-128.
ZHU Hai-hong, ZHANG Ben. Poyang Lake: Hydrological·Biological·Sedimentary·Wetlands·Development and rehabilitation [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1997: 125-128.
- [5] 李博之. 鄱阳湖水体污染现状与水质预测、规划研究[J]. 长江流域资源与环境, 1996, 5(1): 60-66.
LI Bo-zhi. Research on the present situation of water pollution and the forecast and planning for water quality in Poyang Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1996, 5(1): 60-66.
- [6] 王毛兰, 周文斌, 胡春华. 鄱阳湖区水体氮、磷污染状况分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 334-338.
WANG Mao-lan, ZHOU Wen-bin, HU Chun-hua. Status of nitrogen and phosphorus in waters of Lake Poyang Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(3): 334-338.
- [7] 吴兰, 葛刚, 龚世杰, 等. 鄱阳湖水体细菌群落组成及遗传多样性[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1145-1149.
WU Lan, GE Gang, GONG Shi-jie, et al. Genetic diversity and composition of bacterial community in water of Poyang Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(10): 1145-1149.
- [8] 刘倩纯, 胡维, 葛刚, 等. 鄱阳湖枯水期水体营养浓度及重金属含量分布研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1230-1235.
LIU Qian-chun, HU Wei, GE Gang, et al. Contents of nutrients and heavy metals in the Poyang Lake during dry season[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(10): 1230-1235.
- [9] 王毛兰, 周文斌. 鄱阳湖水体无机氮时空分布特征研究[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 88-91.
WANG Mao-lan, ZHOU Wen-bin. Spatial-temporal distribution characteristics of inorganic nitrogen in Poyang Lake[J]. *Yangtze River*, 2010, 41(1): 88-91.
- [10] 王毛兰, 周文斌, 胡春华. 枯水期赣江流域氮磷的分布特征[J]. 地球与环境, 2007, 35(2): 166-170.
WANG Mao-lan, ZHOU Wen-bin, HU Chun-hua. The distribution characteristics of various forms of nitrogen and phosphorus in the Gan-jiang catchment during dry seasons[J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(2): 166-170.
- [11] Zhu H H. Poyang Lake[M]. Hefei: Chinese Science and Technology University Press, 1997: 1-3.
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration 《Water and wastewater monitoring analysis methods》Editorial Board. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 国家环境保护总局. 国家质量监督检验检疫总局. GB3838 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 2.
State Environmental Protection Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB3838 Surface water environmental quality standard [S] Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 2.
- [14] 陈光, 刘延良, 孙宗光. 水体中TOC与COD相关性研究[J]. 中国环境监测, 2005, 21(5): 9-12.
CHEN Guang, LIU Yan-liang, SUN Zong-guang. Research of the correlation between TOC and COD in water[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(5): 9-12.
- [15] 江莉, 张业明, 曹刚, 等. 富营养化东湖水COD与TOC的相关性研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(10): 37-39.
JIANG Li, ZHANG Ye-ming, CAO Gang, et al. Correlation between COD and TOC in eutrophic East Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(10): 37-39.
- [16] Longgen G, Zhongjie L. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage: Culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China[J]. *Aquaculture*, 2003, 226: 201-212.
- [17] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers [J]. *American Journal of Science*, 1982, 282(40): 401-450.
- [18] Downing J A, McCauley E. The nitrogen:Phosphorus relationship in lakes[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37: 936-945.
- [19] 区铭尧, 周文斌, 胡春华. 鄱阳湖叶绿素a空间分布及与氮、磷质量浓度关系[J]. 西北农业学报, 2012, 21(6): 162-166.
OU Ming-liang, ZHOU Wen-bin, HU Chun-hua. Chlorophyll-a's spatial distribution and relationship with nitrogen and phosphorus in Poyang Lake[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(6): 162-166.
- [20] Lau S S S, Lane S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: A long-term study[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 288: 167-181.
- [21] 翁笑艳. 山仔水库叶绿素a与环境因子的相关分析及富营养化评价[J]. 干旱环境监测, 2006, 20(2): 73-78.
WENG Xiao-yan. Correlation between chlorophyll-a and related environmental factors in Shanzi Reservoir[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2006, 20(2): 73-78.
- [22] Karl D M, Letelier R, Tupas L, et al. The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1997, 388: 533-538.