

鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价*

胡春华^{1,2}, 周文斌^{1,2}, 王毛兰^{1,2}, 魏志巍^{1,2}

(1: 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330029)

(2: 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031)

摘要: 根据 2008-10 至 2009-07 之间 4 次的记录资料, 阐述了鄱阳湖区氮磷营养盐的时间以及空间变化特征, 并对硝氮、氨氮、磷酸盐和 pH 进行了相关分析, 对鄱阳湖区进行了潜在性富营养化评价。结果表明: 该湖区氮磷营养盐随时间和空间的不同呈现不同的变化规律, 湖区水质受河流径流以及浮游植物的影响较大。在时间分布上表现出 4 月份的 N/P 比值最小, 说明该季节正是浮游植物生长和繁殖最主要时期。在空间分布上表现出鄱阳湖的上游污染物浓度远小于下游污染值, 湖区向出湖口浓度有增高趋势。N/P 值从 10 月份的 7.8 上升至 1 月份的 31.2, 随后下降到 4 月份的 7.4, 在 7 月份又上升至 8.9。氮磷营养盐和 pH 表现出不同的相关关系, 如在 4 月份无机氮和 pH 的相关系数达 0.5。综合各项因子的分析可以得出, 潜在性富营养化评价结果是鄱阳湖在调查期间为磷污染比较严重。

关键词: 鄱阳湖; 营养盐; 相关性; 潜在性; 富营养化评价

Inorganic nitrogen and phosphate and potential eutrophication assessment in Lake Poyang

HU Chunhua^{1,2}, ZHOU Wenbin^{1,2}, WANG Maolan^{1,2} & WEI Zhiwei^{1,2}

(1: *Key Lab of Lake Ecology and Bio-resource Utilization of Lake Poyang, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330029, P. R. China*)

(2: *School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China*)

Abstract: According to field data from October in 2008 to July in 2009, variation feature of nitrogen and phosphate in Lake Poyang was analyzed. Regression analyses of NO_3^- -N, NH_4^+ -N, and TP versus pH were carried out, and potential eutrophication of Lake Poyang was also assessed. It showed that inorganic nitrogen and phosphate in Lake Poyang varied in different months and different locations. Inorganic nitrogen and phosphate of lake areas were mainly affected by rivers and phytoplankton. April had the smallest N/P ratio, indicating that the mean-flow period was the major period on the growth and reproduction of phytoplankton. The upper reaches of Lake Poyang pollution was far less than the lower reaches and there was an increasing trend through lake area and the area out of the lake. Ratio of inorganic nitrogen to phosphate rose to 31.2 from 7.8 in October, then dropped to 7.4 in April, and rose to 8.9 in July. Inorganic nitrogen and phosphate versus pH show different correlation. For example, the correlation coefficient of inorganic nitrogen and pH even reached 0.5. Comprehensive analysis of the factors can be drawn. Potential eutrophication assessment indicates that during the survey period Lake Poyang can be classified as a phosphate-pollution nutrient area.

Keywords: Lake Poyang; nutrients; relevance; evaluation of potential

长江中下游许多湖泊水体富营养化非常严重^[1-4], 而作为长江中下游湖泊中最重要的鄱阳湖水体富营养化程度相对较低^[5], 朱海虹等在 1988 年^[6]的研究结果显示鄱阳湖水体 TN 和 TP 含量平均值分别为 0.684mg/L 和 0.076mg/L; 2006 年余进祥等^[7]研究结果显示鄱阳湖湖区水体 TN 和 TP 含量平均值分别为

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008zx07526-008-03)、国际科技合作资助项目(2006DFB91920)、“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAB23CO2)、国家自然科学基金项目(40672159)、中国经济改革实施技术援助项目(支援五期 TCC5:jxspyhzhx09-03)、全国创新性实验资助项目(071040306)和全国创新性实验资助项目(081040323)联合资助。2009-10-13 收稿; 2010-03-22 收修改稿。胡春华, 男, 1976 年生, 博士研究生; E-mail: ouyangyinghui@126.com.

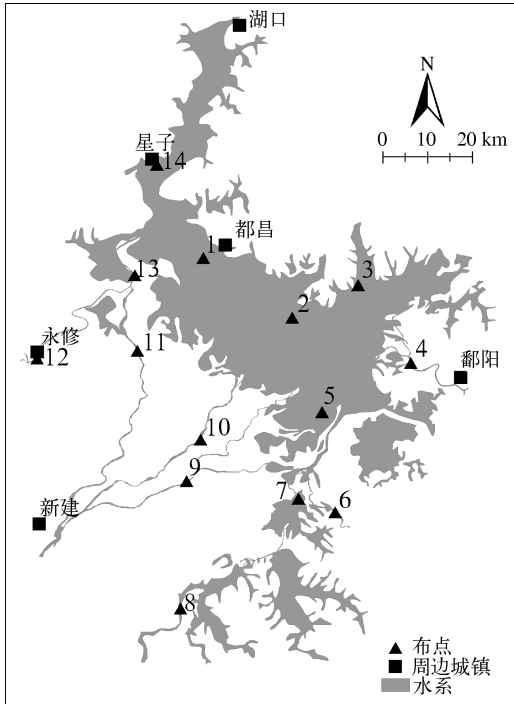


图 1 2008-10 至 2009-07 鄱阳湖站位

Fig. 1 Sampling locations in Lake Poyang from October in 2008 to July in 2009

(TIN) 为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 以及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 之和, 因 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在鄱阳湖中含量非常小^[9], 故考虑 TIN 约等于前两者之和。

1.3 评价方法

以营养盐模型分析相关性过程, r 是表示相关系数, 表示两个变量变化的共同趋势. r 亦可用 $\rho_{X,Y}$ 表示:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

其中, E 是数学期望, cov 表示协方差, 因为 $\mu_X = E(X)$, $\sigma_X^2 = E(X^2) - E^2(X)$, 同样地, 对于 Y , 可以写成:

$$\rho_{X,Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}}$$

相关系数是变量之间相关程度的指标. 样本相关系数用 r 表示, 相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$. $|r|$ 值越大, 误差 Q 越小, 变量之间的线性相关程度越高; $|r|$ 值越接近 0, Q 越大, 变量之间的线性相关程度越低。

2 结果与讨论

2.1 营养盐变化特征分析

2.1.1 氮磷营养盐的时间变化 据 4 次调查数据, 各个月所有站位的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、TIN 的平均值见图 2a, N/P 见图 2b. 水中无机态氮的含量顺序为 $\text{NO}_3^- - \text{N} > \text{NH}_4^+ - \text{N}$, 4 个月均一致。

N/P 比值是考察营养盐结构的主要指标^[10]. Redfield^[11] 研究发现一般大洋深层的 N/P 为 16 左右, 与浮游植物元素组分的 N/P 大致相同, 人们也注意到浮游植物的生长繁殖对无机氮和磷酸盐的摄取基本以该恒

1.59mg/L 和 0.73mg/L. 可见, 随着鄱阳湖流域经济的快速发展, 鄱阳湖水体中 N、P 含量在不断增加^[3], 鄱阳湖的水质污染加重。

关于鄱阳湖水质以及生态环境的系统性研究相对较少, 因此进行鄱阳湖营养盐的研究对于评价鄱阳湖水质、环境质量、控制环境污染和保护鄱阳湖的生态环境等具有重要意义. 本文通过实际调查资料对鄱阳湖区氮磷营养盐的时空变化及其与 pH 的关系进行分析, 并进行潜在性富营养化评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2008-10 至 2009-07 对鄱阳湖及其主要支流的入湖口进行现场调查以及系统样品采集, 采样时间为一个水文周期, 分别是 2008-10、2009-01、2009-04、2009-07, 采样位置见图 1. 水样采集后现场用 0.45 μm 的 Millipore 滤膜进行过滤, 并加 H_2SO_4 酸化保存, 运回实验室后立刻进行化学分析。

1.2 样品分析方法

pH、Eh、温度、电导率、溶解氧等参数在现场用 HACH 便携式现场分析仪进行测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 都按国家标准方法测定: 分别使用紫外分光光度法、纳氏试剂比色法 (GB/T7479-1987), 钼酸铵分光光度法 (GB/T11893-1989)^[8]. 总溶解无机氮

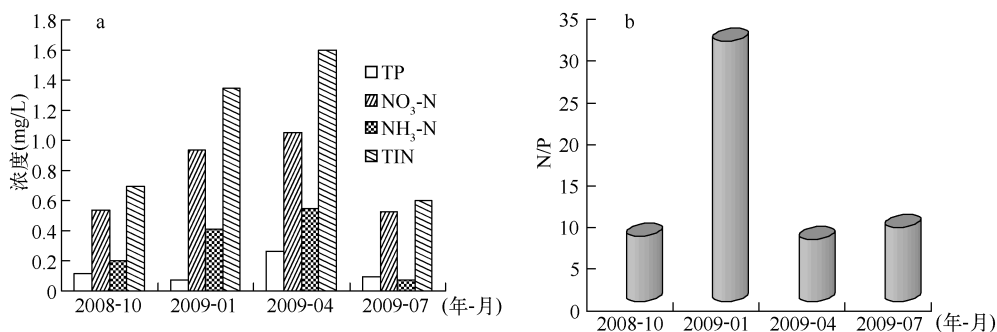


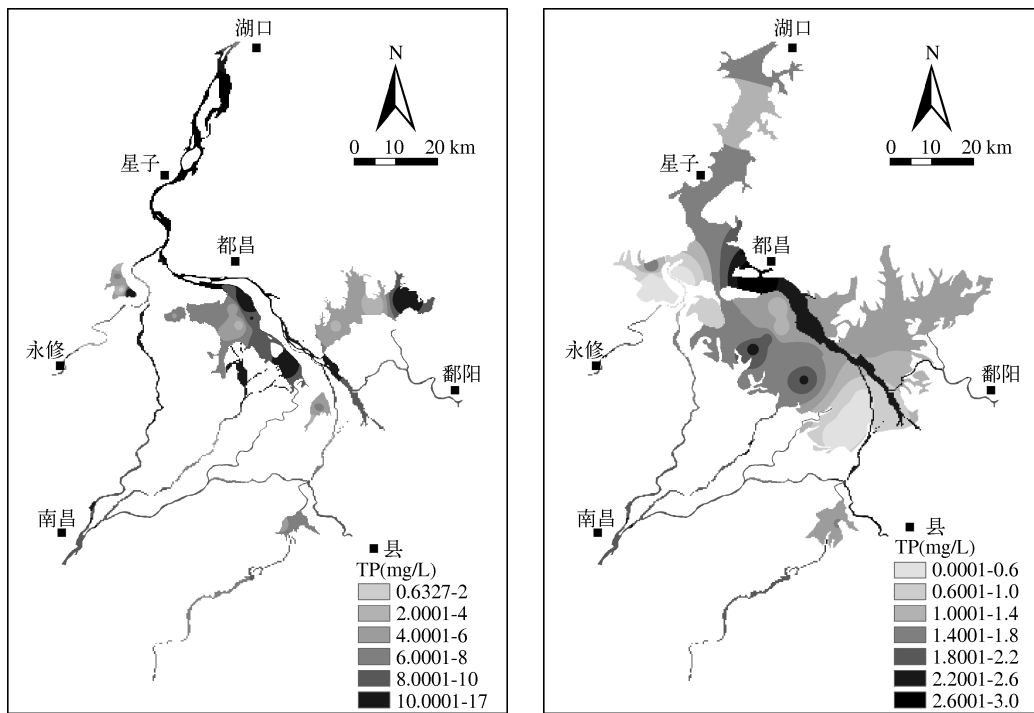
图2 2008-10至2009-07鄱阳湖各项因子(a)和N/P因子(b)变化

Fig. 2 Variability of every factor(a) and ratio of inorganic nitrogen to phosphate(b) in Lake Poyang from October 2008 to July 2009

定的比例进行,因此把恒定的 N/P 比值 16 称为 Redfield 比值,作为研究生态环境中缺乏氮或磷的重要依据^[12]. 鄱阳湖湖区水中 2008-10、2009-01、2009-04、2009-07 N/P 比值依次为 7.8、31.2、7.4、8.9. 其中 2008-10、2009-04、2009-07 的 7.8、7.4、8.9 小于 Redfield 比值,说明污染物中的 N 为限制因子. 随着近几年鄱阳湖周边城镇经济飞速发展,化肥、农药用量剧增,水产养殖发展迅猛,生活以及工业废水大量排放,其中鄱阳湖支流中信江受其上游上饶市朝阳磷矿(华东第一大磷矿)的影响 TP 含量偏高(0.098-0.22mg/L),相关资料显示^[13],朝阳磷矿具有年产 $10 \times 10^4 - 15 \times 10^4$ t 过磷酸钙的生产能力,磷矿生产废水的直接排放是信江以及鄱阳湖采样点位置下游 TP 含量偏高的主要原因,因此 N/P 比值会小于 Redfield 值. 2009-01 的 31.2 大于 Redfield 比值,揭示此时期 N 相对比较充足,P 为限制因子. 3-7 月期间为浮游植物生长和繁殖旺盛时期,需要消耗鄱阳湖中大量的营养盐,4 月份的 N/P 比值最小,说明该平水期季节是浮游植物生长和繁殖的最主要时期.

2.1.2 氮磷营养盐的空间变化 鄱阳湖为过水性湖泊,湖中营养盐的来源不同,主要受周边支流及人类活动的影响. 结合湖泊以及河流的监测断面设置的有关规定,在入湖口、出湖口及城市布点. 由于各个营养盐的来源不同,其补充又与湖泊环境有关,因此在空间上存在差异^[14]. 主要选枯水期的 1 月份和丰水期的 7 月份进行分析,表明:(1) 枯水期 1 月份的污染程度总体上大于丰水期 7 月份的污染程度(星子在 1 月份、7 月份的 TP 分别为 0.195、0.033mg/L,都昌在 1 月份、7 月份的 TP 分别为 0.227、0.040mg/L),这主要是由于丰水期湖泊水量大幅度上涨,对水中的各类离子浓度起到了极大的稀释作用,而枯水期水量减少;(2) 污染物在 7 月份各站位间变化不大,主要在有支流入湖口及近岸处浓度值高,向湖区中间逐渐降低,这是因为在丰水期受主要支流口径流影响较大,其主要由于鄱阳湖湖边城区的污染物携带营养盐入湖,湖区中间不仅受人类作用影响小,而且鄱阳湖中间湿地自净作用强;(3) 在 1 月份不仅表现出 7 月份的规律,主要在有支流入湖口及近岸浓度值高,向湖区中间逐渐降低;而且鄱阳湖区总体呈现出湖的上游污染值远小于下游污染值;湖区向出湖口浓度有增高趋势(图 3).

2.1.3 营养盐与 pH 的相关性 营养盐和 pH 分布有密切关系^[12]. 对 2008-10 至 2009-07 中各项因子和 pH 进行相关分析,结果表明在 10 月份各因子和 pH 值均为负相关. 而在 1 月份硝氮和 pH 值正相关,相关系数达 0.23,硝酸盐随 pH 增加而增加. 而氨盐恰好相反,和 pH 值负相关,随 pH 增加而减少且相关性不如硝酸盐好. 这是因为浮游植物进行光合作用,对各种形态无机氮的吸收以氨氮为优先^[15],同时消耗水中的 CO₂ 导致 pH 值升高^[16]. 在 4 月份,硝酸盐和 pH 呈现较强正相关关系,氨盐亦和 pH 正相关,相关系数分别为 0.45、0.40;磷酸盐和 pH 都表现正相关,这说明磷酸盐的补充以有机物的分解再生为主. 湖底表层沉积物中的氮磷营养盐向上输送是湖中营养盐尤其是磷补充的一个重要来源. 浮游植物的大量繁殖也使得相应产生很多浮游植物残骸,这些有机物的不断分解,从而形成磷酸盐的不断补充,导致磷酸盐随 pH 增加而增加,磷酸盐和 pH 呈现正相关,缩小了和氨盐的比例,因此出现 N/P 比值减小的现象;在 7 月份,硝酸盐、氨盐和总



1月份

7月份

图 3 2009 年 1-7 月鄱阳湖污染物随空间变化

Fig. 3 Contamination with sampling sites in Lake Poyang from January to July in 2009

表 1 各项因子和 pH 相关分析结果

Tab. 1 Results of the analysis between every factor and pH

日期(年-月)	因子	相关方程	相关系数 <i>r</i>
2008-10	TP	$y = -95.09x + 830.3$	-0.211
	NO ₃ ⁻ -N	$y = -617.97x + 5141.1$	-0.499
	NH ₄ ⁺ -N	$y = -299.16x + 2434.4$	-0.260
	TIN	$y = -917.13x + 7575.4$	-0.441
	N/P	$y = -4714.1x + 43681$	-0.235
2009-01	TP	$y = -22.679x + 235.74$	-0.117
	NO ₃ ⁻ -N	$y = 304x - 1303.7$	0.234
	NH ₄ ⁺ -N	$y = -140.12x + 1405.4$	-0.103
	TIN	$y = 163.88x + 101.67$	0.068
	N/P	$y = 14364x - 73373$	0.152
2009-04	TP	$y = 28.02x + 59.753$	0.080
	NO ₃ ⁻ -N	$y = 606.5x - 3240.8$	0.448
	NH ₄ ⁺ -N	$y = 1260.7x - 8391.9$	0.401
	TIN	$y = 1867.2x - 11633$	0.492
	N/P	$y = 11297x - 72653$	0.445
2009-07	TP	$y = -9.9305x + 144.47$	-0.171
	NO ₃ ⁻ -N	$y = -29.26x + 748.22$	-0.058
	NH ₄ ⁺ -N	$y = -23.278x + 233.7$	-0.212
	TIN	$y = -52.538x + 981.91$	-0.095
	N/P	$y = 231.7x + 7808.5$	0.030

无机氮都和 pH 表现出负相关关系,但 N/P 比值和 pH 呈现正相关关系. 随浮游植物光合作用的增强,营养盐被不断消耗,但氮盐比磷酸盐更易于从陆地径流河流等得到补充,使磷酸盐相对减小,N/P 比值相对变大. 7 月各项化学因子和 pH 的相关系数较小,说明各项化学因子和 pH 之间没有明显的相关性.

2.2 潜在营养盐富营养化评价

湖泊及水库富营养化评价模式可归纳为三类:(1) 单一营养物质负荷模型^[17],如 Vollenweider 模型、Dillon 模型及 Laesen2Mercier 模型等;(2) 生态动力学模型^[17];(3) 浮游植物模型^[17]. 但三类模型均忽略了 N、P 营养盐限制对富营养化的影响. 因此,考虑到我国湖泊普遍具有营养盐比例不平衡,浮游植物生长受制于某一相对不足营养盐的特征,本文选用以潜在性富营养化的概念为基础,参照淡水水质标准及实验结果,提出分类的潜在性富营养化评价模式. 分类的潜在性富营养化评价模式的营养级分原则见表 2,运用潜在性富营养化模式,对整个鄱阳湖域进行了潜在性富营养化评价,评价结果见表 3.

评价结果表明:四次调查结果显示鄱阳湖总无机氮分别为 0. 923、2. 434、1. 909、0. 811mg/L;总磷值分别为 0. 118、0. 078、0. 258、0. 091mg/L;N/P 比值为 7. 8、31. 2、7. 4、8. 9,按营养分级应为富营养区. 但由于这种方法是从湖水中的营养盐情况来考虑,没有反映浮游植物等有机物的活动状况. 而营养盐和浮游植物生物量之间是一种相对动态变化关系. 由于夏季是浮游植物生长和繁殖的旺季,4 - 9 月份是营养盐的消耗时期,1 月份低,4 月份较高,到 7 月份其营养盐含量下降. 鄱阳湖中营养区的形成很可能是由于浮游植物大量繁殖和生长消耗了大量营养盐所致. 在 2008 年 10 月份鄱阳湖总磷超过 IV 类地表水的标准(0. 1mg/L)的站位有 36%,在 1 月份总磷超过 IV 类地表水的标准(0. 1mg/L)的站位有 29%,在 4 月份高达 100%,全部超过 IV 类地表水的标准,在 7 月份稍微有好转,也有 29% 超过 IV 类地表水的标准,甚至恶劣至 V 类. 而在 10 月鄱阳湖无机氮含量超过 IV 类地表水标准 1. 5mg/L 的站位只有赣江南支的滁槎(9 号站位),在 1 月无机氮含量超过 IV 类地表水标准 1. 5mg/L 的站位也只有 3 个,仅为 21%,4 月无机氮超过 IV 类地表水标准的站位稍有增加,为 50%,在 7 月无机氮含量没有超过 IV 类地表水标准的站位,由此也可以看出整个湖区磷污染特征还是比较明显的.

3 结论

- (1) 从调查资料来看,鄱阳湖 N、P 污染严重,水质状况没有好转趋势,水质状况为 IV 类,甚至恶劣至 V 类.
- (2) 鄱阳湖湖水 N、P 污染存在明显的时间变化特征,最高点大致在 4 月份. 时间变化趋势分析表明:NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 营养盐含量的时间变化特征与湖区生态环境的时间演变和陆源径流的影响基本吻合.
- (3) 鄱阳湖湖水 N、P 污染也存在着空间变化特征,各位点含量空间波动程度较大,空间分布很不稳定,均由河流入湖口向湖区递减,湖区向出湖口增高.
- (4) 潜在性富营养化评价结果表明:受到陆域的污染物以及自身产生的分解物影响,鄱阳湖区无机氮含量水平很高,N/P 小于 Redfield 值,这表明 P 污染是该湖区水体富营养化的控制因素.

表 2 评价参数分级标准
Tab. 2 Classification of standard evaluation parameters

营养类型	评价指标	
	TP (mg/L)	TIN (mg/L)
贫	0.002	0.150
贫-中	0.005	0.300
中	0.010	0.600
中-富	0.023	1.000
富	0.050	1.500
重富	0.110	2.000
极富	0.250	3.000

表 3 潜在性富营养化评价
Tab. 3 Potential eutrophication assessment standards

日期 (年-月)	TP		TIN	
	浓度 (mg/L)	级别	浓度 (mg/L)	级别
2008-10	0.118	极富	0.923	中-富
2009-01	0.078	富	2.434	极富
2009-04	0.258	极富	1.909	重富
2009-07	0.091	富	0.811	中-富

4 参考文献

- [1] Wang Baodong. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **69**(3-4):471-477.
- [2] Chai Chao, Yu Zhiming, Song Xiuxian *et al.* The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) estuary and the adjacent East China Sea, China. *Hydrobiologia*, 2006, **563**(1): 313-328.
- [3] 王毛兰, 周文斌, 胡春华. 鄱阳湖区水体氮、磷污染状况分析. 湖泊科学, 2008, **20**(3):334-338.
- [4] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3):193-202.
- [5] 李博之. 鄱阳湖水体污染现状与水质预测, 规划研究. 长江流域资源与环境, 1996, **59**(1):60-66.
- [6] 朱海虹, 张 本. 鄱阳湖——水文·生物·沉积·湿地·开发整治. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1997: 125-128.
- [7] 余进祥, 刘娅菲, 钟晓兰等. 鄱阳湖水体富营养化评价方法及主导因子研究. 江西农业学报, 2009, **21**(4):125-128.
- [8] 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(第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002:266-268.
- [9] 万金保, 闫伟伟. 鄱阳湖水质富营养化评价方法应用及探讨. 江西师范大学学报(自然科学), 2007, **31**(2): 210-214.
- [10] 彭云辉, 孙丽华, 陈浩如等. 大亚湾海区营养盐的变化及富营养化研究. 海洋通报, 2002, **21**(3):44-48.
- [11] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *Am Sci*, 1958, **46**:561-600.
- [12] 曲丽梅, 姚 德, 丛巫福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价. 环境科学, 2006, **27**(2):263-267.
- [13] 张维球. 解决用朝阳磷矿湿法生产过磷酸钙水分超标的问题. 磷肥与复肥, 2000, **15**(1):22-23.
- [14] 蒋 枚, 沈新强. 杭州湾及邻近水域叶绿素 a 与氮磷盐的关系. 海洋渔业, 2004, **26**(1):35-39.
- [15] 张晓萍. 厦门马妾湾水域无机氮的化学特征. 台湾海峡, 2001, **20**(3):319-322.
- [16] 王玉衡, 蒋国昌, 董恒霖. 春季浙江南部海区溶解氧及 pH 值和营养盐分布特征及相互关系研究. 海洋学报, 1990, **12**(5):654-660.
- [17] 韩 菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述. 水科学进展, 2003, **14**(6):785-791.