

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*

阮晓红¹, 石晓丹², 赵振华², 倪利晓², 吴芸², 焦涛²

(1: 南京大学地球科学与工程学院水科学系, 南京 210093)

(2: 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 运用回归统计方法, 研究苏州平原河网区 60 个浅水湖泊水体叶绿素 a 与水温、pH、DO、COD_{Mn}、TN、TP 等环境因子的相关性, 建立相应的回归方程, 同时分析了湖泊水体叶绿素 a 的时空分布特征。研究表明, 平原河网区浅水湖泊水体叶绿素 a 含量具有一定的时空差异性, 冬季叶绿素 a 平均含量比夏季低, 但冬、夏季叶绿素 a 含量空间分布具有一定相似性, 整个区域呈现较明显的东高西低的分布趋势; 湖泊水体叶绿素 a 含量与理化环境因子水温、pH、DO、COD_{Mn} 呈显著正相关, 水温可能是平原河网区浅水湖泊浮游植物生长的限制性因子; 叶绿素 a 与 NO₂⁻-N 呈显著正相关, 与 NH₄⁺-N 无明显负相关, 与 NO₃⁻-N 无明显正相关, 与 TN 无明显相关, 而叶绿素 a 的对数与 TP 的对数呈一定的正相关, 与 TN/TP 的对数呈显著负相关, 平原河网区浅水湖泊可能是一定程度的磷限制性湖泊。

关键词: 平原河网区; 叶绿素 a; 环境因子; 相关性

Correlation between chlorophyll-a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou

RUAN Xiaohong¹, SHI Xiaodan², ZHAO Zhenhua², NI Lixiao², WU Yun² & JIAO Tao²

(1: *Department of Water Sciences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, P.R.China*)

(2: *College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

Abstract: The correlation between chlorophyll-a concentration and some environmental factors (water temperature, pH, DO, COD_{Mn}, TN and TP) in sixty shallow lakes in plain river network areas of Suzhou was studied by regression statistical method, and the spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll-a were also analyzed. The results indicated that there were some differences in the spatial and temporal distribution of chlorophyll-a in shallow lakes. In winter, the average concentration of chlorophyll-a was lower than that in summer. The temporal distribution of chlorophyll-a in winter and summer also had some similar pattern decreasing from east to west. Significantly positive correlations were found between chlorophyll-a concentration and water temperature, pH, dissolved oxygen, permanganate indexes. Water temperature was possibly the main limited factor of phytoplankton growth. At the same time, significantly positive correlation was found between chlorophyll-a and nitrite nitrogen, but not for ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen. However, positive logarithmic correlation was found between chlorophyll-a and total phosphorus, and negative logarithmic correlation was found between chlorophyll-a and the ratio of total nitrogen to total phosphorus. The results suggested that phosphorus might be the limited factot in the shallow lakes to some extent.

Keywords: Plain river network areas; chlorophyll-a; environmental factors; correlation

苏州平原河网区地处太湖流域东部, 区域地势平坦, 水系发达, 河流纵横交错, 大小湖泊星罗棋布。平原河网区湖泊兼有调蓄、供水、养殖、航运、景观等多种功能, 是苏州城市发展的重要水资源。随着苏州社会经济的快速发展, 人们加大了对湖泊的开发利用, 使得湖泊出现了富营养化加剧、生物多样性减少等环境问题。水体富营养化会导致水体中的藻类急剧增殖形成水华, 而水体中叶绿素 a 的水平反映了

* 国家自然科学基金项目(40573051)资助。2007-07-20 收稿; 2007-12-03 收修改稿。阮晓红, 女, 1961 年生, 博士, 教授; E-mail: ruanxh@nju.edu.cn.

浮游植物生物量的高低^[1], 因此, 研究叶绿素 a 可以直观地描述水体富营养化的状况。

很多学者对叶绿素 a 及其与环境因子的相关性研究已经作了大量工作^[2-8], 且多是对富营养化的海域或湖泊(水库)的研究, 但有关苏州平原河网区湖泊的研究极少。本文通过分析苏州平原河网区 60 个浅水湖泊水体叶绿素 a 的时空分布特征, 探讨湖泊水体叶绿素 a 与环境因子的相关性, 筛选和识别影响浅水湖泊水体叶绿素 a 的主要环境因子, 以为富营养化湖泊水体生态治理的决策和实施提供一定的理论依据。

1 研究地区和方法

1.1 研究地区概况

研究区域分为阳澄、淀泖和滨湖 3 个水利分区, 分布有 60 个面积大于 0.5km² 的湖泊, 湖泊分布示意图见图 1。阳澄区分布有阳澄湖、昆承湖、傀儡湖、尚湖、漕湖等 15 个湖泊, 面积占湖泊总面积的 55.9%; 淀泖区分布有澄湖、金鸡湖、独墅湖、急水荡、同里湖等 40 个湖泊, 面积占湖泊总面积的 42.3%; 滨湖区分布有石湖、下淹湖、游湖、长荡和黄家湖 5 个湖泊, 面积仅占湖泊总面积的 1.8%。湖泊平均水深普遍在 2.0-3.0m 左右, 均为浅水湖泊。



图 1 苏州平原河网区湖泊分布示意图

Fig.1 Distribution of lakes in plain river network areas of Suzhou

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布设及采样频次 根据苏州平原河网区 60 个湖泊的地理位置和大小形状, 共布设 64 个采样点, 除阳澄湖在阳澄东湖、中湖、西湖、中东湖交界和中西湖交界处分别布设一个采样点外, 其余 4 大湖泊(昆承湖、澄湖、金鸡湖、独墅湖)及 55 个中小型湖泊只在湖心处布设一个采样点. 水样均在水体表层 0.5m 处采集. 2005 年 12 月和 2006 年 6 月各进行 1 次采样, 用 GPS 进行定位, 使 2 次采样位置保持一致. 5 大湖每次采样连续 2 天, 每天上午 8 点和下午 2 点各一次; 其余 55 个中小型湖泊每次采样 1 天, 仅下午 2 点 1 次.

1.2.2 监测项目及分析方法 监测项目主要有: 理化环境因子水温(WT)、pH、溶解氧(DO)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}); 营养盐环境因子总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)和总氮(TN); 生物环境因子叶绿素 a(Chl.a).

用水温计现场测定水温, pH 采用玻璃电极法测定, DO 采用碘量法测定, COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法测定; TP 采用钼锑抗分光光度法测定, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法测定, NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)乙二胺光度法测定, NO₃⁻-N 采用酚二磺酸光度法测定, TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定; Chl.a 采用分光光度法测定^[9].

1.2.3 数据分析 利用 STATISTIC6.0 软件计算统计数据的相关系数, 分析湖泊水体叶绿素 a 与环境因子的相关性, 建立相应的回归方程.

2 分析与讨论

2.1 浅水湖泊水体叶绿素 a 的时空分布特征分析

将冬、夏两季各湖泊水体 Chl.a 数据与各自的空间数据结合, 利用 Surfer8.0 软件, 采用 Kriging 空间内插法进行空间内插, 可得到平原河网区湖泊水体 Chl.a 含量等值线图(图 2).

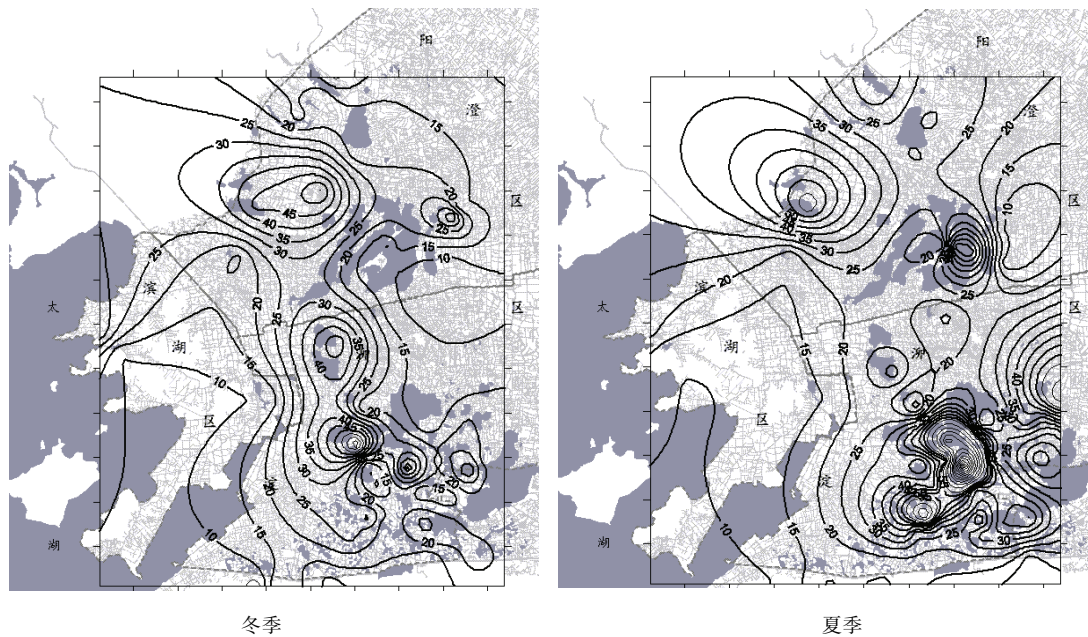


图 2 冬、夏季湖泊水体 Chl.a 含量($\mu\text{g/L}$)等值线
Fig.2 Isoline of chlorophyll-a ($\mu\text{g/L}$) in winter and summer

夏季湖泊水体 Chl.a 含量整体上要比冬季湖泊水体 Chl.a 含量高, 夏季和冬季 Chl.a 的平均含量分别为 31.4 $\mu\text{g/L}$ 和 20.6 $\mu\text{g/L}$ (图 2). 另外, 冬季湖泊水体 Chl.a 含量空间分布与夏季具有一定的相似性, 主要表

现为除平原河网区东南部外, 两者等值线图相似度较高; Chl.a 高值区主要分布于阳澄区和淀泖区, 滨湖区 Chl.a 含量明显降低, 整个区域呈现较明显的东高西低的分布趋势. 这可以说明, 平原河网区浅水湖泊水体 Chl.a 含量不仅表现出较明显的季节差异, 而且呈现出一定的空间差异性.

2.2 浅水湖泊水体叶绿素 a 与环境因子的相关分析

Chl.a 的现存量在一定程度上反映了湖泊中浮游植物的生长状况, 而浮游植物的生长又受到多种环境因子的影响和制约. 湖泊水体 Chl.a 含量和环境因子之间的 Pearson 相关系数及其两尾的显著性分析结果(表 1)可知, Chl.a 与水温、pH、DO、COD_{Mn} 和 NO₂⁻-N 呈显著正相关, 而与 TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN 无显著相关.

表 1 湖泊水体 Chl.a 含量与环境因子的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between chlorophyll-a and environmental factors

项目	WT	pH	DO	COD _{Mn}	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN
Chl.a	0.249**	0.534**	0.451**	0.514**	0.076	-0.132	0.334**	0.100	0.001

** P<0.01(双尾测验).

2.2.1 叶绿素 a 与理化环境因子的相关分析 (1) Chl.a 与水温的相关关系: 水温通过对浮游植物光合作用与呼吸代谢速率的控制而影响 Chl.a 含量. 对湖泊水体 Chl.a 含量与水温进行相关分析(图 3)表明, Chl.a 含量与水温呈现较明显的正相关关系, 相关系数为 0.249, 说明随着水温的上升, 浮游植物的生长速度也加快, 水温对浮游植物的生长具有一定的促进作用.

(2) Chl.a 与 pH 的相关关系: 平原河网区浅水湖泊水体 pH 绝大多数位于 7.25-8.75, 湖泊水质偏碱性. 湖泊水体 Chl.a 含量与 pH 的相关分析(图 4)显示, 湖泊水体 Chl.a 含量与 pH 的相关关系较显著, 相关系数为 0.534. pH 对湖泊的初级生产力有相当显著的影响, 一般浮游植物生长茂盛的水域, 水体 pH 比较高, 这主要由于浮游植物光合作用吸收水中的 CO₂, 放出 O₂^[10]. 因此 pH 是 Chl.a 的被动因子, 不是平原河网区浅水湖泊浮游植物生长的限制性因子.

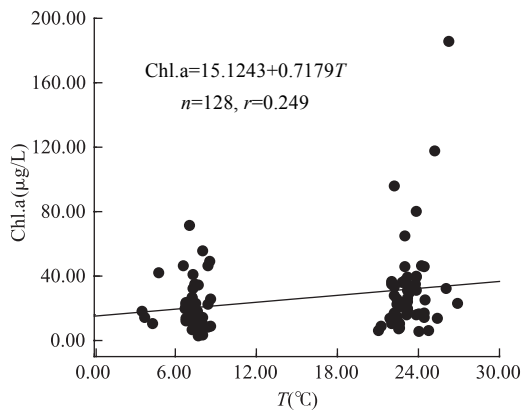


图 3 Chl.a 与水温的相关关系

Fig.3 Correlation between chlorophyll-a and water temperature

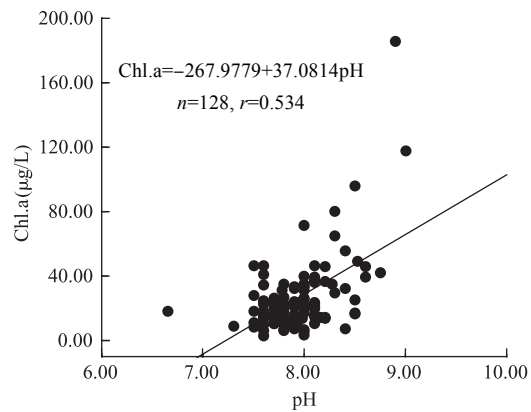


图 4 Chl.a 与 pH 的相关关系

Fig.4 Correlation between chlorophyll-a and pH

(3) Chl.a 与 DO 的相关关系: DO 是浮游植物繁殖的一个重要条件, 也是浮游植物代谢过程中的重要能源物质^[10]. 湖泊水体 Chl.a 含量与 DO 之间的相关关系如图 5 所示, 湖泊水体 Chl.a 含量与 DO 呈较显著的正相关关系, 相关系数为 0.451. Chl.a 含量越高, 浮游植物数量越多, 浮游植物在光合作用中释放氧分子, 就会使水体中 DO 浓度增加.

(4) Chl.a 与 COD_{Mn} 的相关关系: 平原河网区冬季湖泊水体 COD_{Mn} 含量为 3.10-8.80mg/L, 夏季为 4.10-10.00mg/L. 水体 COD_{Mn} 含量夏季略高于冬季, 是由于夏季水体中浮游植物大量繁殖, 浮游植物光合

作用时生成大量的有机体,使水体 COD_{Mn} 含量明显增高.对湖泊水体 Chl.a 含量与 COD_{Mn} 进行相关分析(图 6)表明,湖泊水体 Chl.a 含量与 COD_{Mn} 相关关系较显著,相关系数为 0.514.湖泊水体 COD_{Mn} 含量随着 Chl.a 含量的增加而增加,也是 Chl.a 的被动因子,这说明有机物不是浅水湖泊浮游植物生长的制约因素.

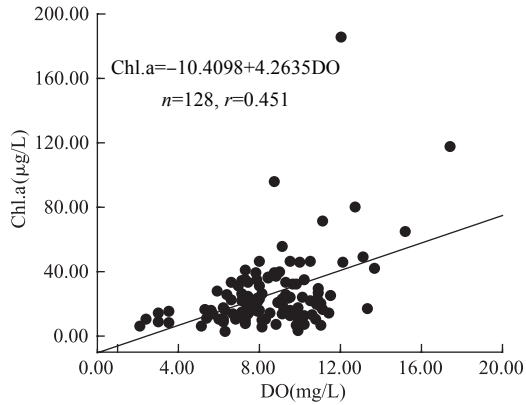


图 5 Chl.a 与 DO 的相关关系

Fig.5 Correlation between chlorophyll-a and dissolved oxygen

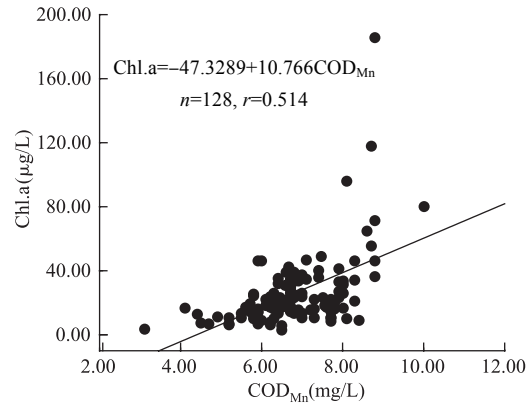


图 6 Chl.a 与 COD_{Mn} 的相关关系

Fig.6 Correlation between chlorophyll-a and permanganate indexes

2.2.2 叶绿素 a 与营养盐环境因子的相关分析 营养盐是水体浮游植物生长必不可少的因素,营养盐的含量变化可以影响浮游植物的数量,而浮游植物的生长状况又是营养盐含量变动的主要条件.作为浮游植物体内主要成分的叶绿素 a,其与营养盐的关系较为复杂^[11].国际经济与合作发展组织(OECD)为研究叶绿素 a 与理化因子之间的相互关系,在北欧所做的 264 次水体实验中发现,水体磷为唯一主导因子的占 80%,氮为唯一主导因子的占 11%,其余 9%的水体为氮、磷共同作用^[12].以往的研究表明^[2,7,13-15],认为氮或磷与浮游植物有正负相关或无相关的结论都存在.

OECD 在北美、北欧、阿尔卑斯地区、人工湖进行的综合调查表明^[16], $\lg(\text{Chl.a})=0.96\lg(\text{TP})-0.55$ (单位 $\mu\text{g/L}$).坂本对日本几个湖泊的变温层 Chl.a 含量与 TP 之间关系的研究结果表明^[16],当 N/P 重量比在 10:1-25:1 之间时,Chl.a 与 TP 之间存在如下关系: $\lg(\text{Chl.a})=1.59\lg(\text{TP})-1.18$ (单位 $\mu\text{g/L}$).我国岳阳南湖水体 Chl.a 含量与 TP 的关系^[7]为: $\lg(\text{Chl.a})=0.7829\lg(\text{TP})+1.04$ (单位 $\mu\text{g/L}$);宁夏沙湖水体 Chl.a 含量与 TN/TP 的关系^[13]为: $\text{Chl.a}=0.0743(\text{TN}/\text{TP})^{0.7115}$.大量的研究结果都表明,Chl.a 含量的对数与 TP 的对数呈直线关系,但直线的斜率、截距因地区、水体有所差异.本研究平原河网区湖泊水体 Chl.a 含量与 TP、TN 和 TN/TP 的相关分析结果如图 7-9,Chl.a 含量的对数也与 TP、TN/TP 的对数呈一元线性相关,Chl.a 的对数与 TP 的对数呈一定的正相关($r=0.222$, $p<0.05$),与 TN/TP 的对数呈显著负相关($r=-0.250$, $p<0.01$),而 Chl.a 与 TN 无显著相关.由此可以说明,平原河网区浅水湖泊可能是一定程度的磷限制性湖泊.

另外,湖泊水体 Chl.a 含量与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的相关分析结果如图 10-12 所示,Chl.a 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 无明显负相关关系,与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈显著正相关,与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 无显著正相关关系.浮游植物需要摄取水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,通过光合作用合成细胞所需要的氨基酸等物质.虽然大多数浮游植物都能够吸收利用这 3 种氮源,但通常倾向于吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[17].在水体的自净过程中,由于浮游植物的消耗, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 会不断转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,再转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$.然而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量并没有因为浮游植物的消耗而减少,主要是由于水体不断地受到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染的影响,从而使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 绝对含量并不随着浮游植物的增加而明显减少,这也进一步证实了 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量随浮游植物增多而升高;同时,湖泊水体 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 Pearson 相关系数为 0.889($p<0.01$),这说明湖泊水体 TN 含量不会随着 Chl.a 含量的变化而变化.

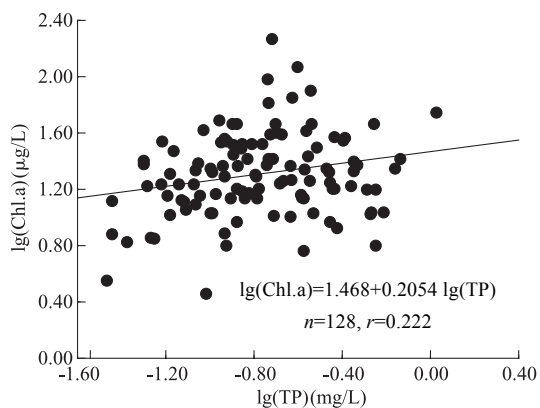


图 7 Chl.a 与 TP 的相关关系

Fig.7 Correlation between chlorophyll-a and total phosphorus

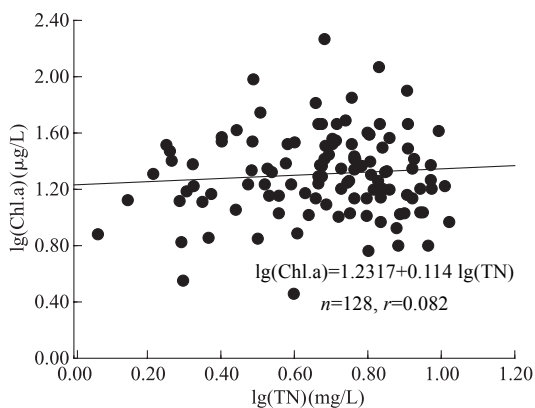


图 8 Chl.a 与 TN 的相关关系

Fig.8 Correlation between chlorophyll-a and total nitrogen

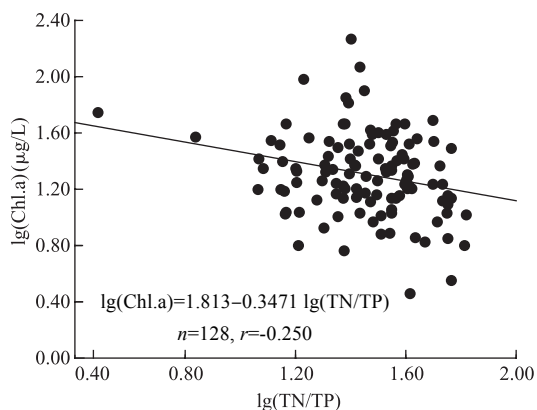


图 9 Chl.a 与 TN/TP 的相关关系

Fig.9 Correlation between chlorophyll-a and the ratio of total nitrogen to total phosphorus

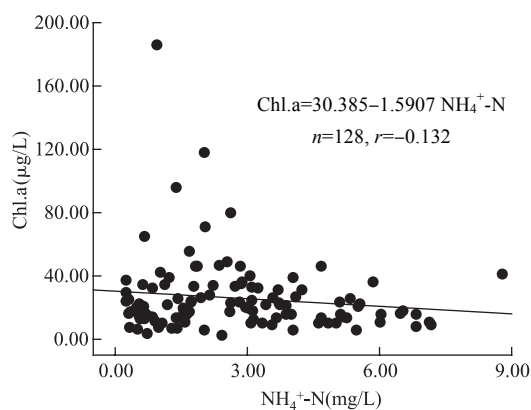


图 10 Chl.a 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的相关关系

Fig.10 Correlation between chlorophyll-a and ammonia nitrogen

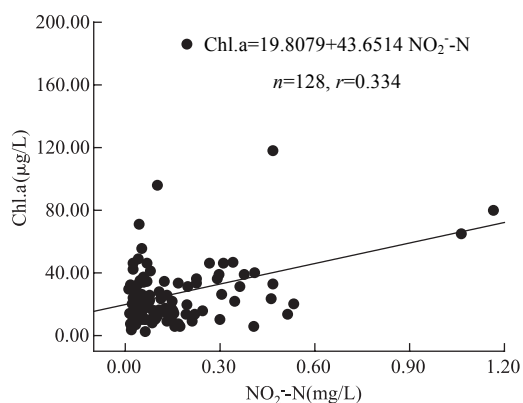


图 11 Chl.a 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的相关关系

Fig.11 Correlation between chlorophyll-a and nitrite nitrogen

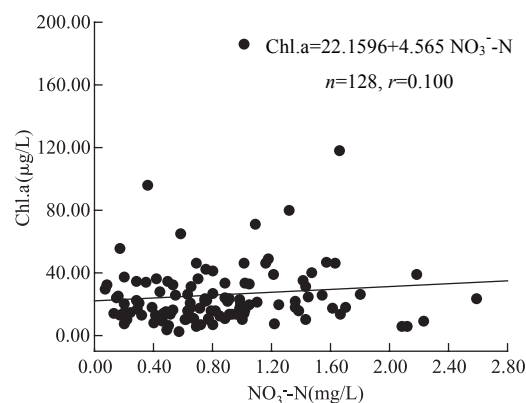


图 12 Chl.a 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的相关关系

Fig.12 Correlation between chlorophyll-a and nitrate nitrogen

3 结论

由于所用监测数据的时间较短, 分析结果还是初步的, 但总的看来, 分析结果有其合理性。

(1) 冬季和夏季湖泊水体 Chl.a 的平均含量分别为 20.6 $\mu\text{g/L}$ 和 31.4 $\mu\text{g/L}$; 冬季湖泊水体 Chl.a 含量空间分布与夏季具有一定的相似性, Chl.a 高值区主要分布于阳澄区和淀泖区, 滨湖区 Chl.a 含量明显降低, 整个区域呈现较明显的东高西低的分布趋势, 具有一定的时空差异性。

(2) 湖泊水体 Chl.a 含量与理化环境因子水温、pH、DO、COD_{Mn} 呈显著正相关, 水温的上升能够促进浮游植物的生长, 而 pH、DO 和 COD_{Mn} 是 Chl.a 的被动因子, 其含量随着 Chl.a 含量的增加而增加, 说明水温可能是平原河网区浅水湖泊浮游植物生长的限制性因子。

(3) 平原河网区浅水湖泊可能是一定程度的磷限制性湖泊, Chl.a 的对数与 TP 的对数呈一定的正相关, 与 TN/TP 的对数呈显著负相关; Chl.a 虽然与 NO₂⁻-N 呈显著正相关, 但是与 NH₄⁺-N 无明显负相关, 与 NO₃⁻-N 无显著正相关, 与 TN 无显著相关。

4 参考文献

- [1] Reynolds CS. The ecology of freshwater phytoplankton. London: Cambridge Univ. Press, 1984.
- [2] 韩新芹, 叶麟, 徐耀阳等. 香溪河库湾春季叶绿素a浓度动态及其影响因素分析. 水生生物学报, 2006, 30(1): 89-94.
- [3] 吕唤春, 王飞儿, 陈英旭等. 千岛湖水体叶绿素a与相关环境因子的多元分析. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1347-1350.
- [4] Bock MT, Miller BS, Bowman AW. Assessment of eutrophication in the firth of clyde: Analysis of coastal water data from 1982 to 1996. *Mar Poll Bull*, 1999, 38: 222-231.
- [5] Romo S, Van Donk E, Gylstra R *et al.* A multivariate analysis of phytoplankton and food web changes in a shallow biomanipulated lake. *Freshwater Biology*, 1996, 36: 683-696.
- [6] 黄伟建, 陈菊芳, 徐宁等. 鄱阳湖水环境要素与叶绿素 a 的灰关联模型 {GM(1,n)}. 水生生物学报, 2001, 25(4): 416-419.
- [7] 葛大兵, 吴小玲, 朱伟林. 岳阳南湖叶绿素 a 及其水质关系分析. 中国环境监测, 2005, 21(4): 69-71.
- [8] Wang XL, Lu YL, He GZ *et al.* Multivariate analysis of interactions between phytoplankton biomass and environmental variables in Taihu Lake, China. *Environ Monit Assess*, 2007, 133(1-3): 243-253.
- [9] 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: 156-290.
- [10] 屠清瑛. 巢湖——富营养化研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 37-41.
- [11] 胡韧, 林秋奇, 段舜山等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素a与磷分布的特征. 生态科学, 2002, 21(4): 310-315.
- [12] Organization for Economic Cooperation and Development. Eutrophication of Waters. Monitoring Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative Program on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD, Paris, 1982.
- [13] 任学蓉, 张宁惠. 沙湖水体富营养化限制性因子分析. 宁夏工程技术, 2006, 5(3): 288-291.
- [14] Juan CC, Rosario JE, Antonio PB. Numerical analysis of hydrogeochemical data: A case study. *Appl Geochem*, 2000, 15: 1053-1067.
- [15] Lau SSS, Lane SN. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: a long-term study. *Science of the Total Environment*, 2002, 228: 167-181.
- [16] 宋敬阳. 湖泊富营养化相关物理量的定量关系. 中国环境管理干部学院学报, 1999, 9(1): 33-36.
- [17] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 2000: 38-50.