Acta Scientiae Circumstantiae

殷燕,张运林,时志强,等.2010.太湖化学耗氧量和生化需氧量的时空分布特征[J].环境科学学报 30(12):2544-2552 Yin Y, Zhang Y L, Shi Z Q, *et al.* 2010. Temporal-spatial variations of chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand in Lake Taihu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 30(12):2544-2552

太湖化学耗氧量和生化需氧量的时空分布特征

殷燕^{1,2},张运林^{1,*},时志强¹,冯龙庆¹,朱广伟¹

中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室太湖湖泊生态系统研究站,南京 210008
中国科学院研究生院,北京 100049

收稿日期: 2010-04-09 修回日期: 2010-05-09 录用日期: 2010-05-13

摘要: 基于 2009 年 2 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)全太湖 32 个站点的化学耗氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、溶解性总氮 (DTN)、溶解性总磷(DTP)、浮游植物色素数据,分析了太湖 COD、BOD 的时空分布特征,并探讨了影响 COD、BOD 时空分布的因素.结果表明, 2009 年太湖 COD 值为 3.40~6.16 mg•L⁻¹,平均值为(4.38±0.72) mg•L⁻¹; BOD 为 0.64~5.93 mg•L⁻¹,平均值为(1.91±1.63) mg•L⁻¹. COD 值在秋冬季节较高,其值显著大于春夏季(p < 0.001);而 BOD 值冬季较高,其它季节都较低. COD 与 BOD 的空间分布格局相似,呈现出 自竺山湾、太湖西北沿岸区向梅梁湾区、湖心区、东南湖湾区依次递减的趋势.分类统计结果显示,河口沿岸区 COD、BOD 值显著高于开敞水域 区(p < 0.001).相关性分析结果表明,COD、BOD 与 DTN、DTP、浮游植物色素的相关性存在季节性差异.夏季浮游植物色素浓度与 COD、BOD 相关系数最高,说明夏季浮游植物降解对水体内 COD 和 BOD 的贡献要高于其它季节. COD 与 BOD 的时空分布特征主要受降雨量、河流输入、 "引江济太"及太湖浮游植物活动等的影响.

关键词: 化学耗氧量; 生化需氧量; 时空分布; 太湖

文章编号: 0253-2468(2010) 12-2544-09 中图分类号: X171.1 文献标识码: A

Temporal-spatial variations of chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand in Lake Taihu

YIN Yan^{1,2}, ZHANG Yunlin^{1,*}, SHI Zhiqiang¹, FENG Longqing¹, ZHU Guangwei¹

1. Taihu Lake Laboratory Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Received 9 April 2010; received in revised form 9 May 2010; accepted 13 May 2010

Abstract: The temporal-spatial distribution of chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), and the relationships between COD, BOD and phytoplankton pigment, dissolved total nitrogen (DTN) and dissolved total phosphorus (DTP) concentrations are presented based on the conventional monitoring data of COD, BOD, phytoplankton pigment, DTN and DTP from four seasons (winter: February; spring: May; summer: August; autumn: November) in 2009 including 32 samplings in Lake Taihu. The results showed that the COD concentration ranged from 3. 40 to 6. 16 mg•L⁻¹ with a mean value of (4.38 ± 0.72) mg•L⁻¹ and the BOD concentration ranged from 0. 64 to 5. 93 mg•L⁻¹ with a mean value of (1.91 ± 1.63) mg•L⁻¹. COD concentrations in winter and autumn were significantly higher than those in spring and summer (ANOVA , p < 0.001), while BOD concentration was higher in winter and lower in other seasons. A significant spatial difference was found in COD concentration and BOD concentration, decreasing from Zhushan Bay and the river inflows of northwest Lake Taihu to Meiliang Bay, and from the central lake to the southeast lake basin. Apparently, COD and BOD concentrations were higher in the mouths of inflowing rivers and in bays, compared with the concentration in open water in Lake Taihu (ANOVA , p < 0.001). Seasonal differences of relationships between COD, BOD and DTN, DTP, phytoplankton pigment are discussed. The highest correlation between COD , BOD and phytoplankton pigment concentration of more important contribution of

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(No.2009ZX07101-013);国家自然科学基金项目(No.40971252,40825004,40730529);中国科 学院知识创新工程项目(No.KZCX2-YW-QN312)

Supported by the Major Projects on Control and Rectification of Water Body Pollution (No. 2009ZX07101-013), the National Natural Science Foundation of China (No. 40971252, 40825004, 40730529) and the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-QN312)

作者简介: 殷燕(1987—),女 E-mail: yinxu1225123@ yahoo. com. cn; * 通讯作者(责任作者) E-mail: ylzhang@ niglas. ac. cn Biography: YIN Yan (1987—), female, E-mail: yinxu1225123@ yahoo. com. cn; * Corresponding author E-mail: ylzhang@ niglas. ac. cn phytoplankton degradation to COD and BOD in summer than other seasons. The temporal-spatial distribution characterizations of COD and BOD were affected by the rainfall, the river inflows, the hydraulic project "Yangtze River-Taihu Lake Water Transfer Project" and the degradation of phytoplankton blooms in Lake Taihu.

Keywords: chemical oxygen demand; biochemical oxygen demand; temporal-spatial distribution; Lake Taihu

1 引言(Introduction)

近年来 随着长江中下游地区工业和经济的快 速发展,太湖和巢湖等一些浅水湖泊的水体污染问 题也越来越严重.在环太湖地区,工厂排放的大量 废水以及周边农业、生活污水等伴随入湖河流进入 太湖,致使太湖地区的水质污染、蓝藻爆发等问题 突出,并已严重影响到该地区的日常生活和经济发 展.目前,随着人们对太湖水质问题重视程度的增 加,已对太湖进行生态修复、蓝藻人工打捞、"引江 济太"等水体污染治理措施,使得太湖水质得到了 很大程度的改善.

化学耗氧量(COD)可作为表征水体中有机物 含量的有效指标 ,COD 值越大 ,说明水体中有机污 染物污染越严重(Kawabe et al., 1997a; 吕俊杰等, 2004). 而生化需氧量(BOD) 是在好气条件下微生 物分解水体中有机物质生物化学过程以及氧化无 机物质所需要的溶解氧(吕俊杰等,2004;金相灿 等,1990) 与 COD 类似,BOD 能间接反映出湖泊中 有机污染的污染程度. 目前已有很多研究用 COD 来 反映水质的好坏程度(Kawabe et al., 1997a, 1997b; 王泽良等 2004) 如吕俊杰等(2004) 分析了滇池水 体 BOD₅和 COD_M的空间变化 进而探讨了水体有机 污染物的空间变化特征;郭全等(2005)利用 COD 在渤海海区的分布规律研究了其对海洋富营养化 的贡献;此外 在珠江口附近 林卫强等(2003)利用 数学模型探讨了 COD 的分布规律,为珠江口的水体 污染治理提供了有力的依据.

关于太湖 COD 的监测研究已有一些报道(范成 新等,1998;张孝飞等,2006;张运林等,2008),但调 查区域主要集中在太湖的西北部区域,着重探讨的 是太湖局部区域的 COD 变化规律.迄今为止还未见 对全太湖地区 COD、BOD 时空分布规律的研究报 道,对其来源、转化规律等也知之甚少.因此,本研 究通过对 2009 年各个季节不同湖区 COD、BOD 分 布特征进行研究,着重探讨其时空变化规律及与溶 解性总氮(dissolved total nitrogen,DTN)、溶解性总 磷(dissolved total phosphorus,DTP)、浮游植物色素 之间的相关关系,以期能更全面地掌握太湖地区的 COD、BOD 时空变化规律和来源,为太湖水体的污染治理工作提供参考.

- 2 材料与方法(Materials and methods)
- 2.1 研究区域

太湖位于 30°56′~31°34′N,119°54′~120°36′ E 面积约为 2338 km²,最大水深 3.3m,平均水深 1.9m 是一个典型的浅水平原型湖泊.本研究分别 于 2009 年 2 月 13~15 日(冬季)、5 月 13~15 日 (春季) 、8月14~15日(夏季)、11月20~22日(秋 季) 对整个太湖水域进行调查监测. 在全湖共设置 了 32 个采样站点 涵盖了各个湖湾及不同类型湖区 (图1).水样为上、中、下3层的混合样,上层为水面 下 50cm 处水样,下层为水-沉积物界面上 50cm 处 水样,中层为上下层中间处水样.每个站点在采样 前先测定水深 然后根据水深确定下层和中层水样 的采集深度,并将上、中、下3层水样倒入一大塑料 桶混合搅拌然后取水样.为探讨外源河流输入对水 体 COD、BOD 的贡献 将采样站点分成河口沿岸区 和开敞水域两类 河口沿岸区包括 1[#]~12[#]站点,开 敞水域包括 13[#]~32[#]站点. 每次采样后 样品立即送 回实验室进行各项水质指标测定,主要检测指标包 括 COD、BOD、DTN、DTP、浮游植物色素.



图1 采样站点 Fig.1 Distribution of sampling stations

2.2 测定及分析方法

COD 的测定采用酸性高锰酸钾法(国家环境保 护总局 2002).BOD 测定的是 20℃培养 5d 的生物 化学过程需氧量,一般采用稀释培养法(国家环境 保护总局 2002).DTN 和 DTP 的测定均参照《湖泊 富营养化调查规范》(金相灿等,1990).

浮游植物色素的测定: 取 100 ~ 250mL 备用液 (每个站点根据水样中色素含量来决定),用 Whatman GF/F 滤膜抽滤; 然后将滤膜放在离心管 中,在冰箱冷冻(≥24h)后,加入90%的乙醇在控温 水浴锅中进行加热水浴3~5min; 之后将样品存放 在暗室里经乙醇萃取4~6h 后取出,用90%的乙醇 过滤洗涤,并记下总体积.上述叶绿素样品萃取液 在分光光度计上用90%乙醇作为参比液进行比色, 分别测定波长在665nm和750nm处吸光度,测定后 加1~2滴1%的稀盐酸进行酸化后重新测定其吸 光度. 然后通过计算得到叶绿素 a(chlorophyll a: Chla) 和脱镁叶绿素(phaeophytin-a: Pa) 浓度,浮游 植物色素浓度为叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度之和 (Chla + Pa).

2.3 数据的处理

使用 Surfer8.0 软件绘制等值线图,组间方差、 统计回归等分析采用 SPSS16.0 统计软件.

3 结果 (Results)

3.1 COD 时空分布

图 2 给出了 2009 年不同季节 COD 的空间分布 情况. 由图 2a 可知 ,冬季太湖水域 COD 范围为 3.76 ~7.30 mg•L⁻¹ ,平均值为(4.72 ±0.73) mg•L⁻¹; 最 大值出现在靠近太滆运河的竺山湾内(7[#]站点),并 以此站点为中心向四周扩散形成了一个高值区 (>4.8 mg•L⁻¹),高值区 COD 值大体呈现出自沿 岸向湖中心逐渐递减的趋势;在东太湖沿岸的 12[#] 站点处同时也形成了一个高值区(>5.0 mg•L⁻¹);



图 2 太湖水域不同季节的 COD 空间分布 Fig. 2 Spatial distributions of COD in four different seasons in Lake Taihu

在太湖的中心区域及其东部沿岸区 COD 值均小于 4.6 mg•L⁻¹,且分布比较均匀.而春季 COD 的空间 分布与冬季相似,在太湖西北部的竺山湾区、靠近 梁溪河处及 12[#]站位处都形成了 COD 分布高值区 (>4.4 mg•L⁻¹),最大值出现在靠近大浦河附近的 9[#]站点(图 2b);春季东太湖出现了多个 COD 分布 低值区(<3.2 mg•L⁻¹),而冬季却没有这么明显的 低值区,这主要是因为春季东太湖沉水植物的大量 生长对水体起到了一定的净化作用.

由图 2c 可知 夏季各个站点 COD 值为 2.77~ 6.05 mg•L⁻¹ ,平均值为(3.99±0.96) mg•L⁻¹; COD 高值区分布在太湖北部、西部沿岸区以及在太湖中 心 24[#]站点,最大值(6.05 mg•L⁻¹) 出现在靠近直湖 港附近的 6[#]站点,并从此站点逐渐递减扩散至梅梁 湾口的高值区. 与春季和冬季 COD 的空间分布不 同 夏季在太湖开敞水域也同样出现了一个 COD 高 值区(>5 mg•L⁻¹). 从图 2c 中还可以看出 ,COD 相 对低值区出现在太湖东部水域,且在东太湖地区 COD 分布比较均匀. 由此可知,夏季太湖地区 COD 分布呈现以下规律: 竺山湾区 > 西部沿岸区 > 梅梁 湾区 > 湖心区 > 东太湖. 秋季 COD 高值区由太湖西 北部沿岸继续向太湖中心延伸,在24[#]站点和25[#]站 点周围形成了两个高值区(>5 mg·L⁻¹),并且在 12[#]站点出现了最大值(7.09 mg•L⁻¹).而在靠近太 浦河附近的 32[#]站点及靠近胥江的 26[#]站位分别出 现了两个低值区(图2d) 这两个点分别位于草型湖 区的东太湖和胥口湾沉水植物非常茂盛的区域,可 能是由于沉水植物的净化作用使这两个区域的 COD 值偏低. 秋季太湖水域 COD 范围在 3.23~ 7.09 mg•L⁻¹之间,平均值为(4.88±0.96) mg•L⁻¹.

图 3 是太湖 COD 的全年平均值空间分布. 由图 3 可知,COD 的全年平均值范围为 3.40 ~ 6.16 mg•L⁻¹,总平均值为(4.38±0.72)mg•L⁻¹. 与图 2 中 COD 的季节性分布相似,太湖 COD 的全年平均 值分布规律大致为:西北部竺山湾区 > 西部沿岸区 > 北部梅梁湾水域 > 东太湖沿岸区 > 太湖湖心区 > 东南湖湾水草区.

COD 值季节性变化呈现出秋季 > 冬季 > 春、夏 季的趋势(图4),但春季与夏季、秋季与冬季之间的 差异较小.单因素组间方差分析(ANOVA)显示,春 季与夏季、冬季与秋季间的 COD 值没有显著性差 异,但春夏季 COD 值显著要低于秋冬季(*p* < 0.001),秋冬季 COD 均值分别是春夏季 COD 均值



Fig. 3 Spatial distribution of yearly average COD in Lake Taihu

的 1.22 倍.这与在珠江口广州海域 COD 值的季节 性分布一致(魏鹏等 2009).然而 涨运林等(2008) 在 2004 年 8 月份在太湖北部区域的研究却得出夏 季 COD 值显著高于冬季的结论,与本文的结论差异 较大,这可能是由于太湖北部区域靠近无锡市,生 活污水和工业废水大量的排入对太湖局部区域的 影响很大,尤其在夏季北部梅梁湾区域蓝藻爆发时 会使此处 COD 值增大,由此导致局部区域夏季 COD 值比冬季高.



Fig. 4 Seasonal variations of COD for all 32 stations

造成太湖 COD 季节性差异的原因主要为 2009 年为丰水年及"引江济太"工程. 据"引江济太"网站 (http://www.tba.gov.cn/ztbd/yjjt/index.asp)上数 据显示,望亭水利枢纽从 2009 年 4 月 28 日开始从 长江调水,至 6 月 29 日停止 期间总共调水 4.88 亿 m³,占到太湖年均贮水量的 11.0% 左右.调水期间, 引水中 COD 值为 3.63 mg•L⁻¹,明显低于太湖水体 中 COD 值 从图 2 b 中也可以发现 COD 值在"引江 济太"进入太湖的贡湖湾望虞河河口区域较低,因 此 引水在很大程度上稀释了湖体中 COD 值,使得 春季水体中 COD 值较低. 进入 7 月份后,太湖降水 明显增加 据位于梅梁湾湾口岸边中国科学院太湖 湖泊生态系统研究站的降水观测数据显示 2009 年 全年及6~8月份夏季降水都分别要高于2006~ 2008 年各年值及 6~8 月夏季值(图 5) 其中 夏季 降水达 692.5 mm 占到太湖平均水深的 36.6% 尽 管降雨会引起太湖周边河流径流量的增大,进而会 增加外源有机物的输入,尤其是靠近沿岸区的站 点 但单纯湖面降水也会造成水容量增加而使得水 体内 COD 得以稀释,从而使春夏季 COD 低于冬秋 季. 2009 年冬季太湖 COD 值较高 ,一方面源自夏秋 季节藻类及沉水植物死亡降解产物的累积 ,另一方 面则源于周边河流的外源输入.



图 5 2006~2009 年太湖流域降水量变化



3.2 BOD 时空分布

图 6 为 2009 年不同季节 BOD 的空间分布. 由 图 6a 可知 ,冬季太湖 BOD 与 COD 呈现出相同的分 布规律 ,BOD 变化范围是 0.49~8.32 mg•L⁻¹,平均 值为(2.51 ±2.10) mg•L⁻¹,但变化幅度比冬季 COD 值大 ,BOD最大值(8.32mg•L⁻¹) 同样出现在太湖





Fig. 6 Spatial distributions of BOD in four different seasons

西北部竺山湾沿岸区的 7^* 号站点(对应于冬季 COD 的最大值区域) ,而最小值(0.49 mg·L⁻¹) 出现在靠 近西洞庭山的 25^* 站点. 与 COD 相同 ,呈现出从近岸 水域向湖中心递减的趋势. 而从图 6b 可以看出 ,春 季太湖 BOD 最小值(0.63 mg·L⁻¹) 与最大值(6.75 mg·L⁻¹) 分别出现在靠近东洞庭山的 29^* 站点和太 湖西部沿岸区的 9^* 站点(与春季 COD 极值分布相 同 如图 2b 所示). 春季 BOD 在太湖中心水域形成 了小于 1 mg·L⁻¹ 的低值区,相对高值区(> 2 mg·L⁻¹) 位于太湖西北部河口沿岸区和靠近望虞河 的贡湖湾区.

夏季 BOD 值变化范围在 0.65~5.74 mg•L⁻¹之 间 与冬季相似 最大值(5.74 mg•L⁻¹) 出现在 7[#]站 点 而最小值 $(0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 却出现在太湖东南水 域的 31[#]站点. 与春季太湖 BOD 分布相比,高值区 (>3.60 mg•L⁻¹)向太湖西南沿岸水域和北部五里 河延伸 而在东太湖靠近西洞庭山和东洞庭山水域 周围则形成了低值区($<1 \text{ mg} \cdot L^{-1}$)(图 6c). 夏季太 湖 BOD 值变化幅度没有冬季大,平均值是(2.18 ± 1.37) mg·L⁻¹. 秋季太湖 BOD 的值变化范围在 0.30 $\sim 3.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间 与其他季节相比变化范围幅度 最小,平均值是(1.07 ± 0.84) mg•L⁻¹,最大值 (3.05 mg•L⁻¹)出现在靠近直湖港的6[#]站点,并形 成一个以此为中心的高值区(>2.30 mg·L⁻¹).与 其它季节相同,在太湖的西北部存在相对高值区 6^* 站点出现了次极大值 3.04 mg·L⁻¹. 秋季太湖水域 BOD 的低值区逐渐从东太湖水域向太湖中心内部 扩散,太湖整个开敞水域BOD的值都很低(图6d), 这与 COD 在秋季的空间分布略有不同.



图 7 太湖水域 BOD 全年平均值空间分布 Fig. 7 Spatial distribution of yearly average BOD in Lake Taihu

从 BOD 全年平均值空间分布图来看(图 7),其 空间分布格局与 COD 基本一样,大致规律为:西北 部竺山湾区 > 西部沿岸区 > 北部梅梁湾水域 > 东 太湖沿岸区 > 太湖湖心区 > 东南湖湾水草区.太湖 年平均 BOD 值是(1.91 ± 1.33) mg·L⁻¹,BOD 值季 节变化呈现出冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季(图 8),冬 季 BOD 均值分别是春季和秋季的 1.35 倍、2.33 倍,太湖 BOD 季节性变化的原因与 COD 相似.



3.3 河口沿岸区与开敞水域区 COD、BOD 的分类 比较

图9显示了不同季节及全年平均河口沿岸区和 开敞水域区 COD 和 BOD 值均值的差异. 由图 9a 可 知,河口沿岸区 COD 值在 3.72~6.16 mg•L⁻¹之间, 年平均值为(4.86±0.83) mg•L⁻¹; 开敞水域区 COD 值在 3.40~5.17 mg•L⁻¹之间,年平均值为(4.09 ± 0.46) mg·L⁻¹. 单因素组间方差分析结果显示 2009 年冬季和春季太湖 COD 值在这两类区域存在显著 的空间差异(p<0.01),河口沿岸区 COD 均极显著 高于开敞区 COD 均值(p < 0.01), 而夏季则是前者 显著高于后者(p < 0.05) 秋季 COD 均值在这两类 区域之间无显著性差异. 而对太湖河口沿岸区和开 敞水域区 BOD 值进行单因素方差分析发现(图 9b) 这两类区域在不同的季节都有着显著的空间 差异(p<0.001) 河口沿岸区 BOD 均值均显著高于 开敞水域区. 河口沿岸区 BOD 值为 1.32~5.93 mg•L⁻¹ 年平均值为(3.06 ±1.47) mg•L⁻¹; 开敞水 域区 BOD 值为 0.64~2.51 mg•L⁻¹,年平均值为 (1.21±0.54) mg·L⁻¹. 河口沿岸区 BOD 年平均值 是开敞水域区的 2.53 倍. 刘明亮等(2009) 对河口 区和开敞区有色可溶解性有机物(CDOM)进行研究 的同时也发现,太湖 COD 在入湖河口区的值大于开

敞区值. Yang 等(2006) 在珠江口水域研究也得出

春季

夏季

秋季



全年

0

冬季

春季

河口沿岸区多分布在携带外源污染物进入太 湖的众多环湖河港水域.研究表明,无锡的陈东港、 大浦港和漕桥河是太湖主要的3条纳污河流(逢勇 等 2008; 许朋柱等 2005) ,采样位点 7[#]、8[#]、9[#]多分 布在此区域.河流输入携带大量的污染物进入太 湖,且在河口沿岸区积聚,从而导致沿岸区 COD、 BOD 值增大. 而太湖开敞水域区(包括东太湖区和 湖心区) 远离沿岸区,当河流输入带来的污染物进 入太湖时,受波浪、风向等因素的影响无法进一步 进入到太湖湖心区,而且太湖受到自身自净能力的 影响,也使得湖心区 COD、BOD 值维持在较低的水 平(图2、图6).另外 东太湖区虽然也靠近沿岸,但 东太湖是水生植被生长之地,植被有净化水质的作 用. 许朋柱等(2005)利用 2001~2002 年水文年太 湖及环太湖河道水量资料证实,太湖的出水主要集 中在东太湖区域 出水量占太湖总出水量的 47% 左 右 少量污染物随出湖河流流出太湖. 由此可知 ,东 太湖的 COD、BOD 处于全太湖最低水平. 不同季节 河口沿岸区 COD、BOD 都比开敞水域区高,这也说 明河流输入对太湖 COD、BOD 值有一定影响,且这 种影响在春季更加明显. 这是因为春季降雨量开始 增加,径流增大,入湖河流开始携带污染物进入太 湖但还没有向太湖内部迁移,此时 COD、BOD 在两 类区域的差异最大,其中,河口沿岸区 BOD 是开敞 水域区的 2.53 倍. 当进入夏季丰水期时,陆源上的 有机污染物大量进入太湖,一方面受风浪等因素的 影响使污染物向湖心区扩散, COD、BOD 在湖心区 形成了一个高值区(图2c、图6c);另一方面,大量的 降水冲淡了河口沿岸区的污染物 从而导致夏季两 类区域的 COD、BOD 差异没有春季大.

 3.4 COD、BOD 与浮游植物色素、DTN、DTP 相关性 分析

夏季

秋季

全年

COD 值在近岸水域大于远岸水域的结论.

对不同季节及全年 COD、BOD 值与浮游植物色 素、DTN、DTP 值进行相关分析,结果见表 1. 由表 1 可知,夏季 COD、BOD 与浮游植物色素浓度的相关 系数最高 /分别为 0.92 和 0.91 (p < 0.001). 由此对 夏季 COD、BOD 与浮游植物色素进行回归分析,结 果如图 10 所示. 夏季,浮游植物色素浓度出现最大 值的站点同时也是 COD 最大值出现的站点 最小值 出现的站点则是 BOD 最小值出现的站点. 张运林等 (2008) 在 2007 年对太湖北部区域 COD 与 Chla 之 间相关性进行研究时发现,夏季 COD 与 Chla 之间 显著正相关. 另外 2007 年 5 月底 6 月初在贡湖湾 口南泉水厂附近富集了大量蓝藻水华,死亡腐烂后 释放出大量溶解性有机物,形成黑水团,大量消耗 水体中的溶解氧,致使水体中 COD 高达 53.64 mg•L⁻¹(张运林等 2008). 韦蔓新等(2002) 在对广 西北海湾的研究也证实了浮游植物现存量与 COD 在夏季呈显著正相关关系. 在日本 Tokyo 湾,夏季 COD 的高值也与由浮游植物藻华引起的色素值密 切相关(Kawabe et al., 1997b). 这说明夏季蓝藻水 华死亡降解是水体内 COD、BOD 的重要潜在来源之 一. 至于水华暴发、浮游植物降解对 COD 的具体贡 献率 则需采集水华回实验室进行降解实验 ,从而 验证野外观测的结果并定量反映浮游植物降解对 总 CDOM 的贡献份额. 其它季节以及全年水平上 COD、BOD 值均与浮游植物色素值显著正相关,表 明富营养化湖泊浮游植物的生长死亡降解对太湖 有机污染有很大贡献.

7

6

5

3

2

1

0

冬季

COD/(mg·L⁻¹)

表1 COD、BOD 与 Chla + Pa、DTN、DTP 的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between COD , BOD and phytoplankton pigment , DTN , DTP concentrations

	COD					BOD				
_	冬	春	夏	秋	全年	冬	春	夏	秋	全年
COD	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88***	0.84 ***	0.82***	0.59***	0.58***
BOD	0.88 ***	0.84 ***	0.82***	0.59***	0.58***	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Chla + Pa	0.81 ***	0.70***	0.92***	0.69***	0.62***	0.66***	0.85 ***	0.91 ***	0.44^{*}	0.73***
DTN	0.74 ***	0.51 **	0.17	0.45 **	0.36***	0.88***	0.50**	0.32	0.71***	0.56***
DTP	0.61 ***	0.71 ***	0.72***	0.44^{*}	0.58 ***	0.83***	0.92***	0.90***	0.74 ***	0.65***

注: * * * p < 0.001 ,* * p < 0.01 ,* p < 0.05 ,不同季节样本数均为 32 ,全年样本数为 128.



图 10 COD、BOD 与浮游植物色素值线性关系 Fig. 10 Linear regression between COD, BOD and phytoplankton pigment concentration

太湖 COD 与 DTN、DTP 之间的相关关系存在季 节性差异.春季,由于环太湖周边地区进行农田灌 溉化肥污水随着降雨以及径流进入太湖,COD、 BOD 值分别与 DTN、DTP 呈现出正相关关系. 从表1 中可以看出,COD、BOD与DTN的相关系数都要明 显低于其与 DTP 的相关系数 ,与 DTN 和 DTP 分别 在 95% 和 99% 置信水平上显著正相关 说明春季河 流输入携带的有机污染物经氧化还原后主要释放 溶解性磷.夏季,COD、BOD 与DTN 相关性不显著, 而与 DTP 仍显著正相关,这说明夏季太湖 COD、 BOD 来源主要是由于湖内浮游植物大量生长死亡 降解造成.另外,也不排除随着径流的增加,输入的 能释放溶解性磷的有机物也相应增加,从而对太湖 COD、BOD 有所贡献. 而对于冬季枯水期, COD、BOD 与 DTN、DTP 都显著正相关(置信水平 99%),说明 冬季太湖内源营养盐得到释放,再加上外源营养盐 的输入很少,致使太湖 COD、BOD 受氮、磷影响比 较大.

4 结论(Conclusions)

1) 太湖流域 COD 和 BOD 空间分布上呈现出相

似的格局,从太湖西北部竺山湾区向北部梅梁湾区 再往湖心区最后至东太湖依次递减. 总体而言,各 个季节河口沿岸区 COD、BOD 均值都显著高于开敞 水域区,这主要是受环太湖众多入湖河流输入污染 源及径流的影响. COD、BOD 值季节性分布差异很 大程度上受到 2009 年丰水年降雨量及"引江济太" 工程的影响,由于降雨量的增加及低 COD 引水使得 湖体内 COD 降低,从而呈现出枯水期 COD 高,丰水 期或平水期 COD 低的特点,表现出与 2004 年太湖 局部地区不同的季节性变化.

2) COD、BOD 与浮游植物色素、DTP、DTN 之间的相关关系存在季节性差异. COD、BOD 与浮游植物色素在夏季的相关系数最大,这是因为夏季浮游植物大量生长死亡降解产生有机物,浮游植物色素与 COD、BOD 有着部分相同来源.在其它季节 COD、BOD 与浮游植物色素相关系数则有所下降,反映 COD、BOD 受浮游植物色素控制下降. COD、BOD 与浮游植物色素在显著相关性,但与浮游植物色素不同,在夏季相关性不显著,而在冬季 COD、BOD 与 DTN、DTP 都显著正相关.这与太湖流域降雨量、径流不同而造成入湖河流携带陆地上有机污

染物量不同有关.

致谢(Acknowledgement):太湖湖泊生态系统研究站为本研 究提供了 COD、BOD、DTN、DTP 监测数据及降雨量数据,钱 荣树、陈非洲、王永平、蔡永久、商景阁等参加了2009 野外采 样工作,在此表示感谢.

责任作者简介: 张运林(1976—),男,博士,研究员,主要从 事内陆水体生物光学特性、CDOM 生物地球化学循环、UV-B 辐射环境效应、湖泊水质遥感、湖泊初级生产力等研究. Email: ylzhang@ niglas. ac. cn.

参考文献(References):

- 范成新,陈宇炜,杨龙元,等.1998.太湖梅梁湾南部水体有机污染 物降解表观动力学初步分析[J].湖泊科学,10(4):48-52
- Fan C X, Chen Y W, Yang L Y, et al. 1998. Preliminary analysis on apparent dynamics of organic pollutants on the decline in the south of Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 10(4): 48—52 (in Chinese)
- 郭全,王修林,韩秀荣,等.2005. 渤海海区 COD 分布及对海水富 营养化贡献的分析[J]. 海洋科学,29(9):71---74
- Guo Q , Wang X L , Han X R , et al. 2005. Spatial distribution of COD and its contribution to the eutrophication in Bohai Sea [J]. Marine Science , 29(9): 71—74 (in Chinese)
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版[M]. 北京:中国环境科学出版社.210-234
- State Environment Protection Administration of China. 2002. Monitoring and analytical Method of Water and Waste Water (4th Edition) [M]. Beijing: China Environment Science Press. 210—234 (in Chinese)
- 金相灿,屠清瑛.1990.湖泊富营养化调查规范(第2版)[M].北 京:中国环境科学出版社.197—206
- Jing X C , Tu Q Y. 1990. The Specification for Eutrophication Survey in Lakes (2th Edtion) [M]. Beijing: China Environment Science Press. 197—206 (in Chinese)
- Kawabe M , Kawabe M. 1997a. Factors determining chemical oxygen demand in Tokyo Bay [J]. Journal of Oceanography ,53:443—453
- Kawabe M , Kawabe M. 1997b. Temporal and spatial characteristics of chemical oxygen demand in Tokyo Bay [J]. Journal of Oceanography , 53: 19—26
- 林卫强,李适宇,历红梅.2003.夏季珠江口 COD 的浓度分布及影 响因素[J].海洋与湖沼,34(1):67-73
- Lin W Q , Li S Y , Li H M. 2003. The distribution and their influencing factors of COD in Zhujiang River estuary [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica , 34(1): 67-73 (in Chinese)
- 刘明亮,张运林,秦伯强.2009.太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸 收和三维荧光特征[J].湖泊科学,21(2):234-241
- Liu M L , Zhang Y L , Qin B Q. 2009. Characterization of absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra of chromophoric dissolved organic matter at the river inflow and the open area in Lake

Taihu [J]. Journal of Lake Science, 21 (2): 234-241 (in Chinese)

- 吕俊杰,杨浩,陈捷,等. 2004. 滇池水体 BOD₅和 COD_{Mn}空间变化 研究[J]. 中国环境科学,24(3): 307-310
- Lü J J , Yang H , Chen J , et al. 2004. Studies on the spatial variation of BOD₅ and COD_{Mn} in Dianchi Lake waters [J]. China Environmental Science , 24(3): 307—310 (in Chinese)
- 逢勇, 颜润润, 李一平, 等. 2008. 内外源共同作用对太湖营养盐贡 献量的研究[J]. 水利学报, 39(9): 1051—1059
- Pang Y , Yan R R , Li Y P , et al. 2008. Contribution of combined action of exogenous source and internal load on water nutrient in Taihu Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 39(9): 1051—1059 (in Chinese)
- 王泽良,陶建华,季民,等. 2004. 渤海湾中化学需氧量(COD) 扩 散、降解过程研究[J]. 海洋通报,23(1): 21-31
- Wang Z L , Tao J H , Ji M , et al. 2004. Study on Dispersion and Degradation of COD in the Bohai Bay [J]. Marine Science Bulletin , 23(1):21—31 (in Chinese)
- 韦蔓新,童万平,赖廷和,等. 2002. 广西北海湾 COD 与水文生物 要素及不同形态氮磷的关系[J]. 台湾海峡,21(2): 162—166
- Wei M X , Tong W P , Lai T H , et al. 2002. Relationship between COD , hydrological and biological elements , various states of nitrate and phosphate in Beihai Bay , Guangxi [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait , 21(2): 162—166 (in Chinese)
- 魏鹏,黄良民,冯佳和,等. 2009. 珠江口广州海域 COD 与 DO 的分 布特征及影响因素[J]. 生态环境学报,18(5): 1631—1637
- Wei P , Huang L M , Feng J H , et al. 2009. Distribution characteristics of COD and Do and its influencing factors in the Guangzhou sea zone of the Pearl River Estuary [J]. Ecology and Environment Sciences , 18(5): 1631—1637 (in Chinese)
- 许朋柱,秦伯强. 2005. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污 染物通量[J]. 湖泊科学,17(3): 213—218
- Xu P Z , Qin B Q , 2005. Water quantity and pollutant fluxes of the surrounding rivers of Lake Taihu during the hydrological year of 2001 - 2002 [J]. Journal of Lake Science , 17 (3): 213-218 (in Chinese)
- Yang M L , Liu Q , Huang H H , et al. 2006. Distribution characteristics of COD in the waters of Pearl River Estuary [J]. Marine Science Bulletin , 8(1): 68—74
- 张孝飞,林玉锁,俞飞,等. 2006. 太滆流域典型水体中总氮、总磷 及 COD 含量变化研究[J]. 江苏环境科技,19(5):1-3
- Zhang X F , Lin Y S , Yu F , *et al.* 2006. The change of TN , TP and COD in representative water body of Tai-Ge valley [J]. Jiangsu Environment Science and Technology , 19(5): 1—3 (in Chinese)
- 张运林,杨龙元,秦伯强,等.2008.太湖北部湖区 COD 浓度空间 分布及与其他要素的相关性研究[J].环境科学,29(6): 1457—1462
- Zhang Y L , Yang L Y , Qin B Q , et al. 2008. Spatial distribution of COD and the correlations with other parameters in the northern region of Lake Taihu [J]. Environmental Science , 29(6): 1457— 1462 (in Chinese)