

太湖北部湖区 COD 浓度空间分布及与其它要素的相关性研究

张运林¹, 杨龙元¹, 秦伯强¹, 高光¹, 罗澈葱¹, 朱广伟¹, 刘明亮²

(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, 南京 210008; 2. 南京农业大学, 南京 210095)

摘要: 利用 2004 年夏季在太湖北部湖区的采样数据, 分析了化学需氧量(COD)浓度的空间分布, 建立了 COD 浓度与有色可溶性有机物(CDOM)吸收、荧光、溶解性有机碳(DOC)浓度之间的定量关系. 并以 2004-01、2005-01、2007-06 的数据探讨了 COD 的来源. 结果表明, 夏季 COD 浓度的变化范围为 $3.77 \sim 7.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $(5.90 \pm 1.54) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. COD 浓度从梅梁湾内往湾口再往大太湖呈现逐渐降低趋势, 梅梁湾和大太湖的均值分别为 $(6.93 \pm 0.89) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(4.21 \pm 0.49) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 梅梁湾的值显著要高于大太湖开阔水域. COD 浓度与 CDOM 吸收、荧光、DOC 浓度存在显著的正相关. 通过对光学活性物质 CDOM 浓度的反演, 可以外推水体有机物污染程度, 为日后利用遥感影像反演和评估太湖水体有机物污染状况奠定基础. 夏季 COD 浓度与叶绿素 a 浓度存在极显著正相关, 而冬季没有相关或这种相关性很弱, 并且夏季的值明显要高于冬季的值, 反映了除入湖河流带来外源 COD 的输入外, 夏季浮游植物大量生长死亡腐烂后的降解产物也是水体中 COD 的重要来源.

关键词: 化学需氧量; 有色可溶性有机物; 溶解性有机碳; 荧光; 叶绿素 a; 太湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1457-06

Spatial Distribution of COD and the Correlations with Other Parameters in the Northern Region of Lake Taihu

ZHANG Yun-lin¹, YANG Long-yuan¹, QIN Bo-qiang¹, GAO Guang¹, LUO Lian-cong¹, ZHU Guang-wei¹, LIU Ming-liang²

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Spatial variation of chemical oxygen demand (COD) concentration was documented and significant correlations between COD concentration and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption, fluorescence, DOC concentration were found based on a cruise sampling in the northern region of Lake Taihu in summer including 42 samplings. The possible source of COD was also discussed using every two cruise samplings in summer and winter, respectively. The COD concentration ranged from 3.77 to $7.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with a mean value of $(5.90 \pm 1.54) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The mean COD concentrations in Meiliang Bay and the central lake basin were $(6.93 \pm 0.89) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(4.21 \pm 0.49) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. A significant spatial difference was found between Meiliang Bay and the central lake basin in COD concentration, CDOM absorption coefficient, fluorescence, DOC and phytoplankton pigment concentrations, decreasing from the river mouth to inner bay, outer bay and the central lake basin. Significant correlations between COD concentration and CDOM absorption, fluorescence, DOC concentration, suggested that COD concentration could be estimated and organic pollution could be assessed using CDOM absorption retrieved from remote sensing images. Significant and positive correlation was found between COD concentration and chlorophyll a concentration in summer. However, the correlation was weak or no correlation was found in winter. Furthermore, a significant higher COD concentration was found in summer than in winter ($p < 0.001$). Our results indicated that degradation of phytoplankton blooms was the main source of COD in summer, except for river terrestrial input.

Key words: chemical oxygen demand; chromophoric dissolved organic matter; dissolved organic carbon; fluorescence; chlorophyll a; Lake Taihu

由于流域和周围城市大量氮磷营养盐输入, 太湖面临着严重的湖泊富营养化和蓝藻水华暴发, 引起越来越多的关注^[1-3], 特别是 2007 年 5 月底 6 月初在贡湖湾口南泉水厂附近出现蓝藻水华异常堆积, 水华死亡腐烂降解释放出大量带有恶臭味的溶解性物质, 危及无锡人民的饮用水安全. 同时由于周围城市工业的迅猛发展, 有机化工产品的日益增多, 一些未经处理的废水进入太湖. 入湖河流带来的以

及蓝藻水华死亡降解后释放出来的有机物污染已成为太湖水质污染的主要问题之一. 由于有机污染物

收稿日期: 2007-06-06; 修订日期: 2007-08-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-419); 国家自然科学基金项目(40730529); 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”项目; 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长科研专项基金项目

作者简介: 张运林(1976~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水光学、水生态学和水质遥感, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

种类繁多,成分复杂,来源各异,目前很难对其有机成分进行全面分析.通常用化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)和生化需氧量(biological oxygen demand, BOD)等指标来间接反映水体中有机物污染程度.有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)表征的是溶解性有机物中带发色团的那部分,溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)则是以碳含量来表征溶解性有机物的浓度,与 COD、BOD 浓度会存在某种定量关系.夏季浮游植物大量生长死亡后会释放出大量溶解性物质,叶绿素 a 浓度反映了浮游植物现存量,因而其变化及与 COD 浓度的关系能初步反映 COD 可能来源.

随着光学遥感技术的快速发展,利用野外原位实测光谱、星载高光谱传感器和遥感影像等光学遥感技术来反演水体光学活性物质 CDOM 吸收、DOC 浓度已逐渐成为可能.国外发展了大量 CDOM 吸收和 DOC 浓度的经验、半经验和生物光学反演模型^[4~8].通过 CDOM 吸收和 DOC 浓度的遥感反演模型,结合 CDOM 吸收、DOC 浓度与 COD、BOD 浓度之间的定量关系,可望通过遥感手段来实现太湖 COD、BOD 浓度实时、动态、长期监测.同时通过分析叶绿素 a 与 COD 浓度间的定量关系,可以初步探明 COD 的来源.

基于 2004-08 在太湖北部湖区的采样数据,分析 COD 的空间分布,通过建立 COD 浓度与 CDOM 吸收、荧光、DOC 浓度之间的定量关系,以期日后利用遥感影像反演和评估太湖水体有机物污染状况奠定基础.并辅以 2007-06 在贡湖湾口南泉水厂以及 2004-01、2005-01 在梅梁湾的采样数据,探讨了 COD 的来源.

1 材料与方法

1.1 研究区域

于 2004-08-19 在太湖北部湖区的梅梁湾及大太湖开阔水域共布设 42 个采样点(图 1),其中 1~26 号点位于梅梁湾,27~42 号位于大太湖开阔水域.样品采集后放入冷藏箱内保存,当天带回实验室进行过滤预处理,然后放入冰箱内冷藏保存. COD 浓度、CDOM 吸收、荧光、DOC 及色素浓度均在 2~3 d 内测定完毕.2004-01、2005-01 分别在 1~42 号中选取 25、24 个点采集水样分析 COD 和叶绿素 a 浓度,其中位于大太湖开阔水域的样点分别只有 5 个和 4 个.2007-06-01 水华大量暴发时在南泉水厂附近采

集了 8 个点数据分析了 COD、叶绿素 a 浓度和 CDOM 吸收系数.

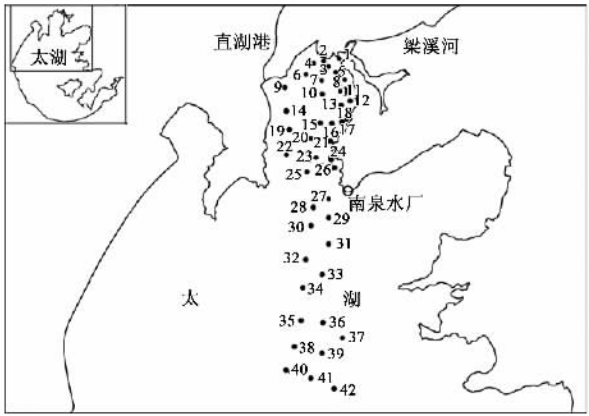


图 1 采样点分布
Fig.1 Distribution of sampling sites

1.2 测量及统计方法

化学需氧量 COD 的测定采用酸性高锰酸钾法^[9].

CDOM 吸收系数测定与计算具体操作见文献^[10].由于 CDOM 由氨基酸、糖、氨基糖、脂肪酸、类胡萝卜素、氯纶色素、碳水化合物和酚等一系列物质组成,成分极为复杂,浓度无法测定,一般用吸收系数 $a(355)$ 、 $a(440)$ 来表示其浓度,吸收系数越大对应的 CDOM 浓度就越高.这里以 $a(355)$ 来表示 CDOM 浓度并与 COD 浓度建立关系.

DOC 的测定方法是用 GF/F 膜过滤水样得到过滤后清液,在 1020 型 TOC 仪通过高温燃烧法进行测定,仪器检测范围为 $0.5 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相对误差为 $\pm 3\%$.

选取国际上通用的 355 nm 作为激发波长,380~600 nm 作为发射光谱范围,用 Mill-Q 水做参比,使用 RF5301 荧光光度计测定荧光强度,其中仪器夹缝宽度为 5 nm,以 1 nm 间隔得到荧光光谱.采用 Hoge 等^[11]提出方法对荧光强度进行定标处理,即 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸奎宁的稀硫酸溶液定义为 10 个归一化荧光单位(NFIU),可以用式(1)表示:

$$F_n(355) = ([F_s/R_s]/[F_{qs}/R_{qs}]) \times 10 \quad (1)$$

式中, $F_n(355)$ 为 10 个归一化荧光单位; F_s 、 F_{qs} 分别为样品和硫酸奎宁 355 nm 激发波长、450 nm 发射波长的荧光信号, R_s 、 R_{qs} 分别为样品和硫酸奎宁在 355 nm 激发波长、405 nm 发射波长的水拉曼信号.

叶绿素 a 和脱镁叶绿素的测定采用分光光度法,用 GF/C 滤膜过滤水样,然后将滤膜置于冰箱中

冷冻 48 h 以上,取出用 90%的热乙醇萃取,然后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665、750 nm 处吸光度,并加入 1%稀盐酸酸化,换算得到叶绿素 a 和脱镁叶绿素^[12].

运用 SPSS11.0 进行数据统计分析.

2 结果与分析

2.1 COD 空间分布

2004-08 采样 COD 浓度的变化范围为 3.77 ~ 7.96 mg•L⁻¹,均值为(5.90 ± 1.54) mg•L⁻¹.最高值出现在梅梁湾内的 6 号点,在梁溪河入湖口的 1、3、4 号点 COD 浓度的值也均高出 7.90 mg•L⁻¹.最低值出现在大太湖开阔水域的 31 号点,而在 37、42 号点

COD 浓度也低于 3.90 mg•L⁻¹,空间分布呈现出梅梁湾的值要高于大太湖(图 1、图 2).将梅梁湾的 1~26 号点和大太湖 27~42 号点 2 组 COD 浓度数据进行组间方差分析发现存在显著的空间差异($p < 0.001$),梅梁湾的均值(6.93 ± 0.89) mg•L⁻¹,是大太湖均值(4.21 ± 0.49) mg•L⁻¹的 1.65 倍,表明梅梁湾 COD 浓度要显著高于大太湖.而梅梁湾内又表现为湾内值要高于湾口值,如湾内的 1~8 号的均值为湾口 19~26 号点均值的 1.28 倍.由此可见,COD 浓度的空间格局总体呈现从湾内到湾口,再到大太湖逐渐递减的趋势.而其它反映水体中溶解性有机物的指标,包括 CDOM 的吸收系数、荧光、DOC 浓度也基本上与 COD 浓度空间分布一致(图 1),梅梁湾的值

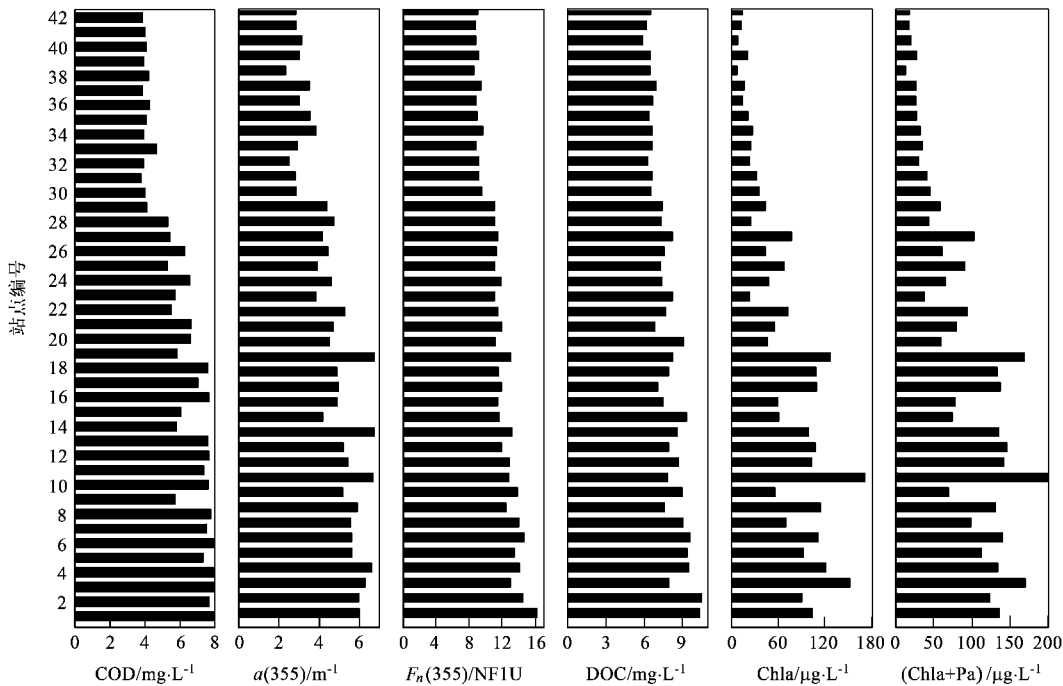


图 2 COD 浓度及其它光学参数的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of COD concentration and other optical parameters

要显著高于大太湖的值($p < 0.001$).

2.2 COD 浓度与 CDOM 光学特性的相关性

CDOM 吸收、荧光等光学特性以及 DOC 浓度反映的是水体溶解有机质,因而其与 COD 浓度势必会存在某种定量关系,而这些参数可以通过遥感技术反演得到,因而建立 COD 浓度与这些参数的定量关系并外推出 COD 浓度,有望通过遥感手段实现太湖全湖 COD 等有机污染物的快速、实时、动态、长期监测.利用线性、指数、幂函数以及对数函数拟合 COD 浓度与 CDOM 吸收、荧光、DOC 浓度之间的关系,发现幂函数拟合的结果最好(表 1、图 3),并且 COD 浓

度与 CDOM 吸收的相关性要好于荧光和 DOC 浓度.对 280~500 nm CDOM 吸收系数与 COD 浓度进行幂函数拟合分析发现,随波长增加决定系数逐渐上升,到 340 nm 后决定系数总体保持在一个较高水平,变化很小(图 4),因而用这些波段 CDOM 吸收与 COD 浓度建立定量关系可能会更好.

2.3 COD 来源分析

北部湖区 COD 浓度的空间分布格局,一方面与梅梁湾内入湖河流带来大量有机物有关,从河口到湾内、湾口再到湖心开阔区域,由于稀释作用水体 COD 的浓度逐渐降低;另一方面梅梁湾内营养盐浓

表1 COD浓度与CDOM吸收、荧光、DOC浓度的相关分析
($n=42, p<0.0001$)

Table 1 Correlations between COD concentration and $a(355)$, $F_n(355)$ and DOC concentration in Lake Taihu in summer ($n=42, p<0.0001$)

指标	拟合函数	关系式	R^2
$a(355)$	线性	$a(355)=0.7976\text{COD}-0.1999$	0.8709
	幂函数	$a(355)=0.678\text{COD}^{1.0631}$	0.8881
	指数函数	$a(355)=1.4289\text{e}^{0.1871\text{COD}}$	0.8721
	对数函数	$a(355)=4.487\ln\text{COD}-3.3004$	0.8696
$F_n(355)$	线性	$F_n(355)=1.1756\text{COD}+4.4527$	0.8251
	幂函数	$F_n(355)=3.9874\text{COD}^{0.5947}$	0.865
	指数函数	$F_n(355)=6.0412\text{e}^{0.1049\text{COD}}$	0.8537
	对数函数	$F_n(355)=6.6252\ln\text{COD}-0.1373$	0.8267
DOC	线性	$\text{DOC}=0.5784\text{COD}+4.3286$	0.5645
	幂函数	$\text{DOC}=3.6454\text{COD}^{0.4266}$	0.6109
	指数函数	$\text{DOC}=4.9239\text{e}^{0.0748\text{COD}}$	0.5958
	对数函数	$\text{DOC}=3.2849\ln\text{COD}+2.0266$	0.5743

度比较高夏季容易形成蓝藻水华,而藻华在死亡降解后释放出大量有机物,也会致使水体COD浓度上升,如2007年5月底6月初在贡湖湾口南泉水厂

附近由于富集了大量蓝藻水华,死亡腐烂后释放大大量溶解性有机物形成黑水团,大量消耗水体中的溶解氧,水体中COD的高达 $53.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.利用2004-08、2007-06以及2004-01、2005-01夏、冬季各2次数据,分析了COD浓度与浮游植物叶绿素a浓度的相关性,发现夏季2次COD浓度与叶绿素a浓度均存在极显著正相关,而冬季则是1次没有相关性,另1次只有微弱的正相关(图5).此外,2004年夏季COD浓度的均值为 $(5.90\pm1.54)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而冬季COD浓度的均值分别只有 (5.66 ± 0.62) 、 $(4.69\pm0.61)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,如果在2004年夏季采样中选取与冬季一致的站点进行平均,其值高达 $(6.32\pm1.42)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,冬、夏季组间方差分析显示夏季水体COD浓度明显高于冬季值($p<0.001$),而这些高出来的值很可能就是由于浮游植物死亡降解后释放出来的.由此可见,太湖北部湖区COD的来源冬季主要来自入湖河流携带的溶解性有机物,而夏季除了入湖河流的影响外浮游植物大量生长死亡降解后也会释放相当量的溶解性有机物.

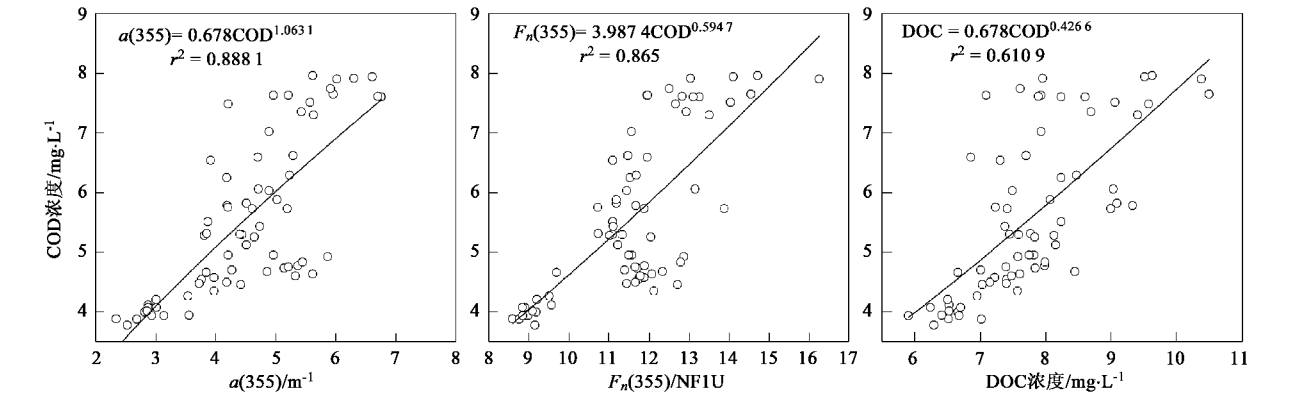


图3 COD浓度与CDOM吸收、荧光、DOC浓度的幂函数拟合结果

Fig.3 Power fitting between COD concentration and CDOM absorption, fluorescence and DOC concentration

3 讨论

在太湖针对COD等有机污染物的研究相对较少,1987~1988年全湖37个站点的调查显示COD浓度的最高值只有 $5.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出现在五里湖,绝大多数站点的值都低于 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [13].而现在太湖北部湖区的平均值都已高出当年的最高值,在藻华暴发期其值已高达 $53.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD浓度已有明显上升.另据1998年环湖调查显示,相比1987~1988年10a间入湖污染物总量COD增加了 $2.8\times10^5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,增长率为65.4%[14].外源COD的排入造成其空间分布呈现从河口往湾内、湾口,再往大太湖呈递减的趋势.大量入湖COD增加加重太湖水体有机污

染的同时,夏季蓝藻水华暴发后死亡降解会释放大大量有机物,消耗掉水体里的溶解氧,造成鱼类因缺氧窒息死亡,同时会形成恶臭味,危及水厂的供水安全.而夏季蓝藻水华死亡腐烂降解释放出来的内源COD则造成COD的空间分布呈现出与叶绿素a浓度的空间分布一致,在叶绿素a非常高的站点同样会出现COD的异常高值.夏季由于内源释放的COD的增加,因而往往形成夏季COD浓度高于冬季.另外,夏季在梅梁湾和大太湖观测到CDOM吸收系数与Chla浓度存在显著正相关,这与日本东京湾的一些观测结果比较相似,可以类比.Kawabei等[15]利用1980~1989年在东京湾的月观测资料分析了COD浓度的时空变化,最高值出现在7月,最低值出现在

1月,COD浓度的季节循环与浮游植物色素浓度季节循环一致,两者存在极显著正相关。

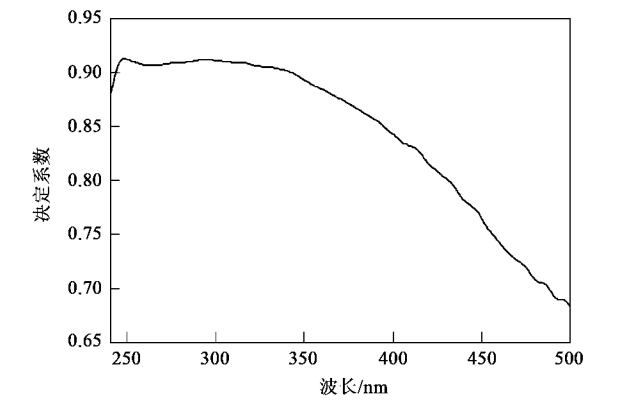


图4 CDOM吸收与COD浓度幂函数决定系数
Fig.4 Spectral determination coefficient of power fitting between COD concentration and CDOM absorption

尽管国内先前有些研究利用水色卫星和TM等遥感影像资料发展COD浓度的反演模型^[16~18],但在湖泊研究中却很少,并缺乏COD光谱信号形成机理的研究^[19].COD表征的是水体内溶解性有机物程度,其形成的光谱事实上就水体内4类光学活性物质中CDOM的光谱.CDOM的光谱特征是从短波往长波随波长增加一般按指数函数递减,因而有机物浓度的上升会增强水体在可见光波段的吸收性能,遭受有机污染的水体的反射率尤其在短波要明显低于清洁水体,而有机污染物浓度较高的水体一般颜色较深,呈深蓝或蓝黑色.已有的研究表明,在内陆水体的湖泊一般选取红光与绿光波段的比值来反演水体中CDOM吸收^[7],笔者在太湖的研究发现645nm与520nm波段的比值能比较好地用于CDOM的反演,因而这些波段也可以考虑用于COD等有机污染物的遥感反演。

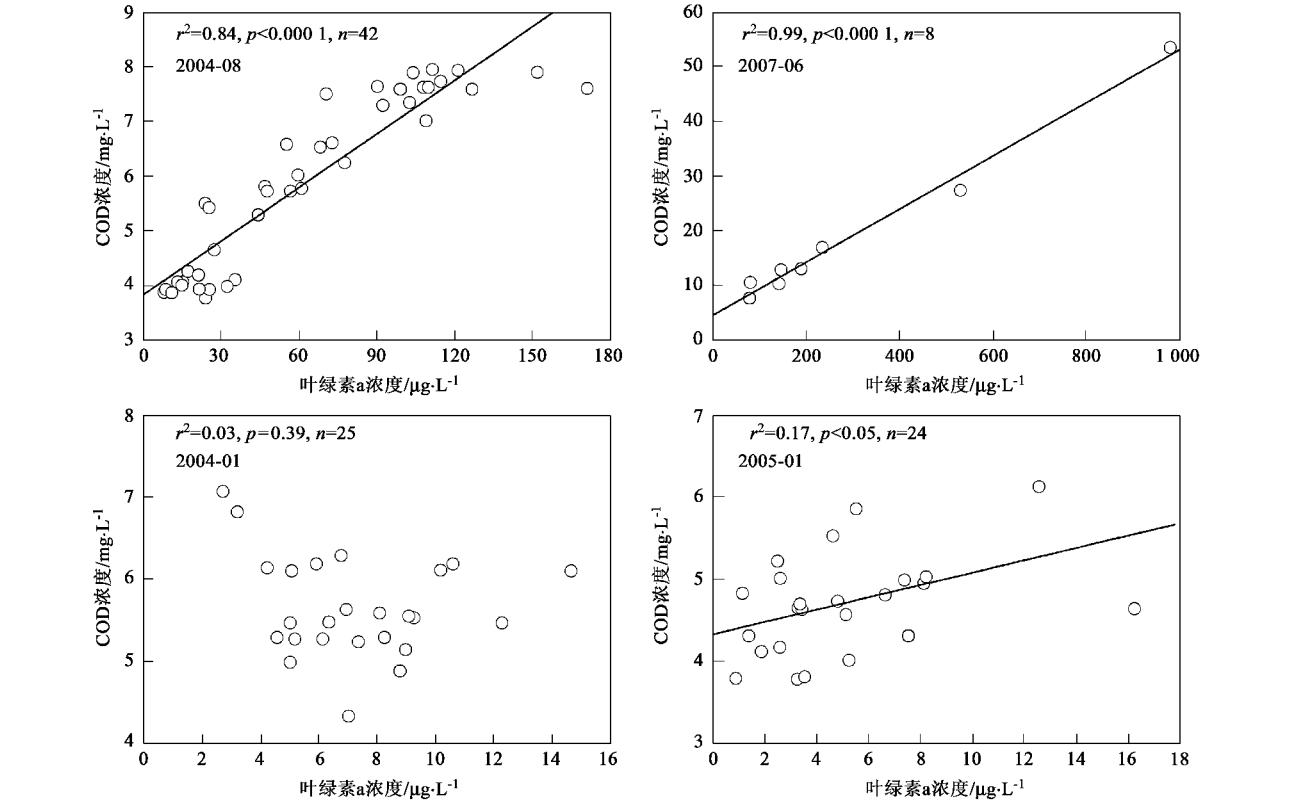


图5 夏、冬季浮游植物叶绿素a与COD浓度的线性关系
Fig.5 Linear correlations between chlorophyll a concentration and COD concentration in summer and winter

研究表明,水体中的COD浓度与总有机碳存在非常好的线性相关^[20,21].本研究结果显示COD浓度与CDOM吸收的相关性要更好,可以用CDOM吸收作为COD替代参数来反映水体有机物污染程度.另外李宏斌等^[22]用三维荧光方法分析太湖水体中溶

解有机物时也发现其吸光度与BOD、COD有机物污染物指标存在很好的相关性.本研究建立的COD浓度和CDOM吸收、荧光、DOC浓度之间定量关系,一方面证实了COD与CDOM的类似性和同源性,另一方面也可以考虑通过反演水体中CDOM的浓度来定

量评估水体有机物污染程度,为太湖水环境监测提供定量指标和一种行之有效的手段.希望通过进一步的研究,利用生物光学模型高精度反演太湖悬浮物、叶绿素 a 和 CDOM 等光学活性物质,为水环境的在线监测以及蓝藻水华、有机污染实时预报奠定基础.

4 结论

(1) 夏季太湖北部湖区 COD 浓度、CDOM 吸收系数、荧光、DOC 浓度的空间格局呈现从湾内到湾口,再到大太湖逐渐递减的趋势,梅梁湾的值要显著高于大太湖($p < 0.001$).

(2) COD 浓度与 CDOM 吸收、荧光、DOC 浓度存在显著的正相关,通过对光学活性物质 CDOM 浓度的反演,可以定量反演和评估水体有机物污染程度.

(3) 夏季水华暴发时 COD 浓度与浮游植物叶绿素 a 浓度存在极显著正相关,而冬季没有相关或这种相关性很弱,反映了夏季浮游植物降解产物可能是水体中 COD 的重要来源,而冬季则可能主要以陆源为主.

致谢:野外采样得到冯胜、蔡永久、晁建颖等同志的帮助,谨表谢意.

参考文献:

[1] 秦伯强. 太湖水环境面临的问题、研究动态和初步成果[J]. 湖泊科学, 1998, **10**(4): 1-9.

[2] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.

[3] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.

[4] Vertucci L F A, Likens G E. Spectral reflectance and water quality of Adirondack mountain region lakes[J]. Limnol Oceanogr, 1989, **34**(8): 1656-1672.

[5] Hirtle H, Renz A. The relation between spectral reflectance and dissolved organic carbon in lake water: Kejimikujik National Park, Nova Scotia, Canada[J]. Int J Remote Sensing, 2003, **24**(5): 953-967.

[6] Kowalczyk P, Olszewski J, Darecki M, *et al.* Empirical

relationships between coloured dissolved organic matter (CDOM) absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters[J]. Int J Remote Sensing, 2005, **20**(2): 345-370.

[7] Kutser T, Pierson D C, Kallio K Y, *et al.* Mapping lake CDOM by satellite remote sensing[J]. Remote Sens Environ, 2005, **94**: 535-540.

[8] Bowers D G, Evans D, Thomas D N, *et al.* Interpreting the colour of an estuary [J]. Estuar Coast Shelf S, 2004, **59**: 13-20.

[9] 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.

[10] Zhang Y L, Zhang B, Wang X, *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2007, **592**: 105-120.

[11] Hoge F E, Vodacek A, Blough N V. Inherent optical properties of the ocean: retrieval of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from fluorescence measurements[J]. Limnol Oceanogr, 1993, **38**(7): 1394-1402.

[12] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 185-188.

[13] 范成新, 袁静秀, 叶祖德. 太湖水体有机污染与主要环境因子的响应[J]. 海洋与湖沼, 1995, **26**(1): 13-20.

[14] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 科学出版社, 2004. 25-28.

[15] Kawabe M, Kawabe M. Temporal and spatial characteristics of chemical oxygen demand in Tokyo Bay[J]. J Oceanogr, 1997, **53**: 19-26.

[16] 何执兼, 邓孺孺, 兴玲, 等. 应用水色卫星对海水油及 COD 的遥感探测[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1999, **38**(3): 81-84.

[17] 张华, 曾光明, 李忠武, 等. 内陆水环境污染监测的多时相遥感信息模型[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(5): 63-68.

[18] 黄妙芬, 齐小平, 于五一, 等. 水环境 COD 遥感识别模式及其应用[J]. 干旱区地理, 2006, **29**(6): 885-893.

[19] 王学军, 马延, 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况[J]. 环境科学, 2000, **21**(6): 65-68.

[20] 汤峰, 钱益群. 巢湖水总有机碳(TOC)-高锰酸盐指数(COD_{Mn})相关性研究[J]. 重庆环境科学, 2001, **23**(4): 64-66.

[21] 李少艾, 刘德全, 周密, 等. 深圳市饮用水源中 COD_{Mn}与 TOC 的相关性研究[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(6): 30-33.

[22] 李宏斌, 刘文清, 张玉钧, 等. 水体中溶解有机物的三维荧光光谱特征分析[J]. 大气与环境光学报, 2006, **1**(3): 216-221.