

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳	(2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊	(2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳	(2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏	(2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝	(2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺	(2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君	(2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌	(2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷	(2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁	(2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕	(2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞	(2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛	(2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园	(2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨	(2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红	(2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪	(2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟	(2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德	(2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郭伟	(2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康	(2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆	(2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕	(2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波	(2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪	(2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏	(2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干	(2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯	(2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟	(2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕	(2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟	(2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文	(2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民	(2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏	(2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博	(2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨	(2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟	(2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体	(2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴	(2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄	(2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学	(2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松	(2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟	(2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博	(2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲	(2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康	(2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛	(2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高	(2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波	(2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江	(2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯	(2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静	(2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥	(2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳	(2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军	(2528)
《环境科学》征稿简则 (2431)		
《环境科学》征订启事 (2532)		
信息 (2157, 2271, 2367, 2418)		

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度

姜广甲^{1,2}, 马荣华^{1*}, 段洪涛¹

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 溶解有机碳(DOC)是水体中最大的有机碳库,在水体碳循环中起着重要作用. 有色溶解有机物(CDOM)是DOC的重要组成部分,其吸光作用改变着水下光场结构,是水色遥感监测的重要因子之一,建立两者的联系为利用遥感技术估算湖泊水体表层DOC浓度提供有效的技术方法. 基于2010年5月、2011年1月、2011年3月和2011年5月的太湖4期实验数据(183个采样点),利用CDOM特征波长吸收系数[$a_g(250)$ 和 $a_g(365)$]建立多元线性模型估算太湖水体DOC浓度,同时利用2011年8月29日~9月2日的数据($n=27$)对模型进行验证评价,并构建了湖泊水体DOC浓度的遥感反演模式. 结果表明,该模型能够有效估算太湖水体的DOC浓度;2011年1月DOC和CDOM的源和汇有较大差异,估算效果较差;其他3期数据的模型估算效果显著($R^2=0.64$, $RMSE=14.31\%$, $n=164$),并在201108期数据中得到了验证($R^2=0.67$, $RMSE=10.58\%$, $n=27$). 模型形式虽具有一定的通用性,但系数在不同的水域中有所差异,模型系数的区域化成为下一步研究的重点.

关键词: 遥感; CDOM 比吸收系数; 光谱斜率; DOC; 太湖

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2235-09

Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients: A Case Study in Taihu Lake

JIANG Guang-jia^{1,2}, MA Rong-hua¹, DUAN Hong-tao¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Dissolved organic carbon (DOC) is the largest organic carbon stock in water ecosystems, which plays an important role in the carbon cycle in water. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM), an important water color variation, is the colored fraction of DOC and its absorption controls the instruction of light under water. The available linkage between DOC concentration and CDOM absorptions enables the determination of DOC accumulations using remote sensing reflectance or radiance in lake waters. The present study explored the multi-linear relationship between CDOM absorptions [$a_g(250)$ and $a_g(365)$] and DOC concentrations in Taihu Lake, based on the available data in 4 cruises (201005, 201101, 201103, 201105) (totally 183 sampling sites). Meanwhile, the results were validated with the data of the experiment carried out from August 29 to September 2, 2011 in Taihu Lake ($n=27$). Furthermore, a universal pattern of modeling from remote sensing was built for lake waters. The results demonstrated that this method provided more satisfying estimation of DOC concentrations in Taihu Lake. Except the data obtained in January 2011, the fitted results of which were not conducive to the winter dataset (201101) in Taihu Lake, due to the diverse sources and sinks of DOC and CDOM, the multi-linear relationship was robust for the data collected in the other three cruises ($R^2=0.64$, $RMSE=14.31\%$, $n=164$), which was validated using the 201108 sampling dataset ($R^2=0.67$, $RMSE=10.58\%$, $n=27$). In addition, the form of the statistic model is universal, to some extent, for other water areas, however, there is difference in the modeling coefficients. Further research should be focused on the parameterization using local data from different lakes, which provides effective methodology for the estimation of DOC concentrations in lakes and other water regions.

Key words: remote sensing; specific absorption coefficients of CDOM; spectral slopes; DOC; Taihu Lake

水体中有机碳主要以溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)这2种形式存在. 通常以能否通过 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜为标准来区分DOC和POC,能透过的物质为DOC,反之为POC^[1,2]. DOC是水体中最大的有机碳库,相当于大气中的碳储量,在水体碳循环中起着重要作用^[3]. DOC的相对分子质量一般在 $1\sim 10\,000$ 之间,其中腐殖酸和棕黄酸占DOC总量的 $50\%\sim 75\%$,属于低分子量有机碳(LMW-

DOC);高分子量有机碳(HMW-DOC)以胶体态存在,约占DOC总量的 20% ^[1].

有色溶解有机物(chromophoric dissolved organic Matter, CDOM)是DOC的组成部分,主要由腐殖酸

收稿日期: 2011-09-30; 修订日期: 2011-12-14

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-QN311, KZCX2-EW-QN308); 国家自然科学基金项目(41171271, 41171273)

作者简介: 姜广甲(1984~),男,博士研究生,主要研究湖泊水体有机碳遥感估算, E-mail: gjjiang@niglas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: mrhua2002@niglas.ac.cn

和棕黄酸组成,在紫外和可见光波段对太阳光有强烈的吸收作用^[4],其吸收系数(a_g)随波长呈指数型递减,即 $a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)]$ ^[5]. 式中, λ 为波长; λ_0 为参考波长; S 为光谱斜率,与可溶性有机物相对分子质量和结构有关^[6].

大量研究表明,CDOM 吸收系数与 DOC 浓度之间存在较好的线性相关关系,在海岸带水体^[7,8]、河口^[9,10]以及湖泊水体^[11]的研究中均有报道. 对于湖泊水体,特别是大型浅水湖泊,水体垂直和水平交换速率均较大,并且一般有多条河流注入,因此湖泊有机碳受湖泊内源和陆域外源的共同影响,CDOM 吸收系数与 DOC 浓度之间的关系不稳定.

目前研究主要集中于水体中溶解有机物的光学特性^[12~14]、来源^[15]和时空分布特征^[16]方面. CDOM 为水体中的光活性物质,影响水体的遥感反射率或离水辐亮度^[17]. 因此,利用卫星遥感技术可以定量估算水体表层 CDOM 含量[一般用吸收系数表征, $a_g(\lambda)$]. 本研究试图利用 CDOM 特征波长吸收系数,建立太湖水体表层 DOC 浓度的估算模型,并试图构建湖泊水体表层 DOC 浓度的遥感估算模式,以期为进一步大型湖泊水体 DOC 浓度的卫星遥感估算奠定方法基础.

1 材料与方法

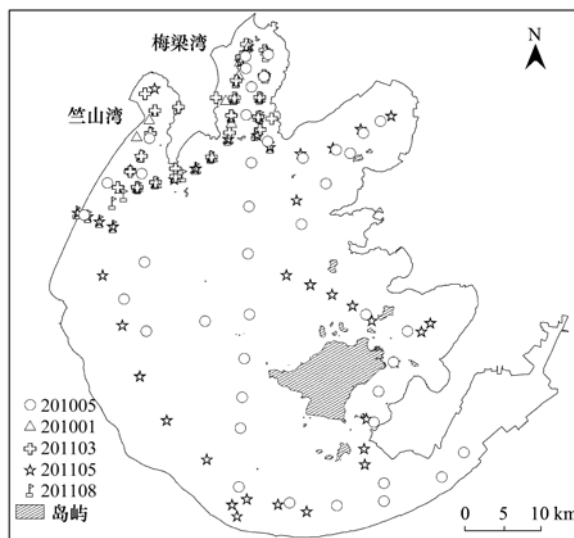
1.1 样点布设

2010 年 5 月(201005)、2011 年 1 月(201101)、2011 年 3 月(201103)和 2011 年 5 月(201105)在太湖共布设 183 个采样点(图 1),并同步进行 GPS 定位,测定各样点透明度、水深等常规数据(表 1). 采集表层水样,水样放入苯板保温箱保存,运回实验室在 4℃ 下冷藏,温度达室温后测定水质参数. 另外,于 2011 年的 8 月 29 日~9 月 2 日(201108)在太湖梅梁湾、竺山湾和西太湖共布设 27 个样点(图 1),用于模型的验证与评价.

1.2 参数测量

利用 10% 盐酸浸泡后的 Whatman 聚碳酸酯滤膜(孔径 0.2 μm)过滤水样,得到各样点滤液. 以 Milli-Q 水为参比,利用 UV-2401 分光光度计(日本岛津)在 200~800 nm(1 nm 间隔)波段范围内扫描测定滤液的吸光度,通过计算得到 CDOM 的吸收系数[公式(1)],并对 CDOM 吸收系数进行经过散射校正[公式(2)],从而得到校正后的 CDOM 的吸收光谱^[5].

$$a_g(\lambda)' = 2.303D(\lambda)/l \quad (1)$$



在 5 次采样中,梅梁湾、竺山湾区域为常规采样部分,不同期采样的样点重合

图 1 太湖采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Taihu Lake

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda)' - a_g(\lambda)' \times \lambda/700 \quad (2)$$

式中, λ 为波长(nm), $a_g(\lambda)'$ 为未校正的吸收系数(m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, l 为光程路径(m), $a_g(\lambda)$ 为校正后吸收系数.

孔径为 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)在马弗炉中 450℃ 灼烧 4 h 后过滤水样,将滤液转入棕色玻璃瓶中,利用总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-V CPN, 岛津)测定 DOC 浓度(c_{DOC}).

1.3 模型构建

CDOM 吸收光谱特征反映了其不同来源(浮游植物降解、陆源)与光学降解过程,光谱特征的变化与水文条件、地表径流、光照、生物种类等有关^[18~20]. 大量研究表明^[21],CDOM 在 250 nm 和 365 nm 处的吸收系数比值 [$a_g(250)/a_g(365)$] 与溶解有机物的相对分子质量有关,直接反映了 DOC 的光化学作用^[19]. 当溶解有机物相对分子质量增大时,由于在较长波长处大分子 CDOM 对光的吸收,导致 $a_g(250)/a_g(365)$ 的值减小,通过 $a_R = a_g(250)/a_g(365)$ 可以判断 DOC 的相对分子质量大小和分子结构的变化^[22].

CDOM 的特征参数(如光谱斜率 S 等)反映了 CDOM 光学动力过程和分子结构的变化^[11]. 本研究在 Origin 8.0 中利用非线性拟合方法计算得到 CDOM 吸收的光谱斜率 S ,参考波长为 280 nm,拟合波段为 250~365 nm.

有机碳比吸收系数定义为^[23]: $a_g^*(\lambda) = a_g(\lambda)/c_{\text{DOC}}$, 其中 $\lambda = 365 \text{ nm}$. 建立太湖 $a_g^*(365)$ 与 S 之间的关系, 发现指数模型拟合 $a_g^*(365)$ 与 S 的关系效果最好: $a_g^*(365) = 0.0237 \times \exp(-0.342 \cdot S)$, $R^2 = 0.83$ [图 2(a)]. 光谱斜率 S 与 CDOM 吸收系数呈较好的负相关关系^[12,15],

同时在 $250 \sim 365 \text{ nm}$ 波段范围内与 CDOM 比吸收系数 $[a_g^*(\lambda)]$ 有较好的负相关关系^[8], 而与 a_R 具有较好的正相关关系 ($R^2 = 0.96$) [图 2(b)], 说明 3 个过程具有相似的变化机制, 在判断 CDOM 的物质组成和源汇方面具有相似的指示作用.

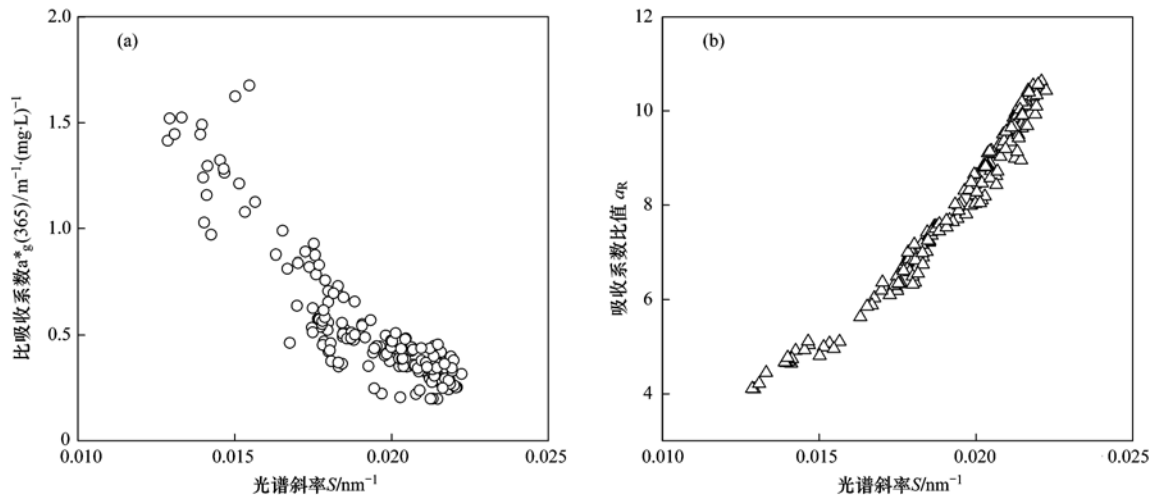


图 2 光谱斜率 S 与比吸收系数 $a_g^*(365)$ 之间的关系及与吸收系数比值 a_R 之间的关系

Fig. 2 Relationship between spectral slopes and specific absorption coefficients, $a_g^*(365)$, and ratios of absorption coefficients, a_R

因此, 本研究试图利用 $a_g(250)$ 和 $a_g(365)$ 估算 DOC 浓度, 其中的数据处理利用 IDL 7.1 软件完成, 数据统计采用 Origin 8.0 软件完成.

1.4 模型评价方法

建立水色因子 CDOM 吸收系数与太湖水体表层 DOC 浓度之间的关系, 利用现场数据对模型的可靠性与鲁棒性进行验证和分析. 采用观测值与模拟值之间的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评价估算模型的优劣, 其具体表现形式如下^[24]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (3)$$

式中, P_i 和 O_i 分别为模拟值和观测值; $\bar{O}$ 为观测值的平均值; n 为样本数.

RMSE < 10%, 表明模型拟合精度高, 拟合度好; 在 10% ~ 20% 之间, 说明模型拟合精度较高; 在 20% ~ 30% 之间, 说明模型拟合度一般; > 30%, 说明模型精度较差.

2 结果与分析

2.1 太湖 $a_g(365)$ 、 c_{DOC} 、 $a_g^*(365)$ 和 a_R 的时空分

布规律

表 1 给出太湖 4 次实验的 $a_g(365)$ 、 c_{DOC} 、 $a_g^*(365)$ 和 a_R 的描述性统计. 2010 年 5 月 (201005) 太湖 $a_g(365)$ 均值低于 2011 年, 2011 年 1 月 (201101) $a_g(365)$ 的均值最大, 约为 201005 期数据的 1.6 倍; 2011 年 3 月 (201103) 和 2011 年 5 月 (201105) 两期数据的 $a_g(365)$ 均值相差不大, 但 201105 期 $a_g(365)$ 的变异系数最大 (0.55). 对于 DOC 浓度来说, 201101 期的 c_{DOC} 均值最大, 是其它期数据的 1.8 ~ 3.2 倍, 201105 期 c_{DOC} 均值最小, 201005 和 201103 两期 c_{DOC} 均值相差很小, 但远大于黄海和东海秋季的 DOC 浓度 (均值 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[25]; 4 期数据的变异系数相差很小, 其中 201101 期最小 (0.10). $a_g^*(365)$ 均值大小表示 CDOM 在 DOC 中所占比例大小, $a_g^*(365)$ 均值最大出现在 201105 期, 201103 期数据次之, 201101 期 $a_g^*(365)$ 最小, 仅为 0.40. $a_g(250)/a_g(365)$ 的比值大小反映了 CDOM 的分子结构和相对分子质量的变化^[20], 2010 年太湖 a_R 的均值均大于 2011 年的 3 期实验数据, 2011 年不同数据之间 a_R 均值相差不大, 说明太湖水体 CDOM 的分子结构和相对分子质量年际差异显著, 而年内差别较小.

表 1 太湖 4 次实验 $a_g(365)$ 、 c_{DOC} 、 $a_g^*(365)$ 和 a_R 均值的描述性统计

Table 1 Descriptive Statistics of averages of $a_g(365)$, c_{DOC} , $a_g^*(365)$ and a_R in four <i>in situ</i> experiments in Taihu Lake							
采样时间	期号	采样区域	样点个数	$a_g(365)$ / m^{-1}	c_{DOC} / $mg \cdot L^{-1}$	$a_g^*(365)$ / $m^{-1} \cdot (mg \cdot L^{-1})^{-1}$	a_R
2010-04-23 ~ 2010-05-02	201005	全太湖	84	2.30 ± 0.83	4.77 ± 0.62	0.47 ± 0.12	8.79 ± 1.34
2011-01-22 ~ 2011-01-23	201101	梅梁湾、竺山湾	19	3.62 ± 1.36	9.08 ± 0.87	0.40 ± 0.13	7.59 ± 1.26
2011-03-24 ~ 2011-03-25	201103	梅梁湾、竺山湾	26	3.27 ± 1.46	4.79 ± 0.80	0.67 ± 0.25	7.99 ± 1.67
2011-05-01 ~ 2011-05-08	201105	全太湖	54	3.31 ± 1.82	3.70 ± 0.87	0.91 ± 0.45	7.16 ± 2.09

201005 期和 201105 期在全太湖采样,而 201101 和 201103 两次采样主要集中在梅梁湾和竺

山湾两个区域(表 1),为了统一比较,选取梅梁湾和竺山湾两采样区进行对比分析(图 3)。

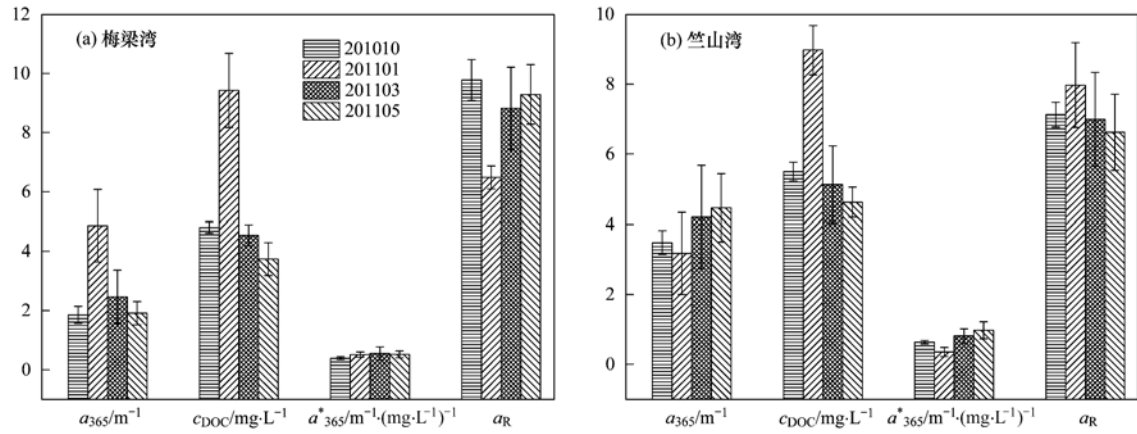


图 3 梅梁湾、竺山湾 $a_g(365)$ 、 c_{DOC} 、 $a_g^*(365)$ 和 a_R 在不同采样时间的分布情况

Fig. 3 Temporal distributions of $a_g(365)$, c_{DOC} , $a_g^*(365)$ and a_R in Meiliang Bay and Zhushan Bay

就梅梁湾而言,201101 期的 $a_g(365)$ 和 c_{DOC} 均值均大于其它日期采样数据,均是 201105 期数据的 2 倍;相反,201101 期的 a_R 均值最低,仅为 6.48. 4 期数据 $a_g^*(365)$ 均值相差不大,除 201005 期数据外 [$a_g^*(365) = (0.39 \pm 0.05) m^{-1} \cdot (mg \cdot L^{-1})^{-1}$], 其余各期均在 $0.51 \sim 0.55 m^{-1} \cdot (mg \cdot L^{-1})^{-1}$ 之间. 与全太湖比,201101 期 $a_g(365)$ 大于全太湖 $a_g(365)$ 均值,其它均小于全太湖均值;对于 DOC 浓度来说,只有 201103 期 c_{DOC} 均值大于全太湖数据,其它均小于全太湖均值;除 201101 期数据外, $a_g^*(365)$ 均值均小于全太湖数据,与 a_R 变化趋势完全相反。

就竺山湾 4 种参数的变化特征而言,201101 期的 $a_g(365)$ 和 $a_g^*(365)$ 均值均小于其它期数据,而 201101 期的 c_{DOC} 和 a_R 均大于其它期数据均值. 其它月份样点数据的 4 种参数均值差异不明显. 与全太湖相比,201101 期 $a_g(365)$ 、 $a_g^*(365)$ 均值高于全太湖数据,而 c_{DOC} 和 a_R 低于全太湖数据,与其它期数据变化趋势相反。

2.2 估算模型

$a_g^*(365) [a_g(365)/c_{DOC}]$ 、 $a_R [a_g(250)/a_g$

(365)] 和 $S_{250-365}$ 三者之间具有较好的相关关系(图 2),因此 DOC 浓度可以通过 CDOM 吸收系数的组合关系反演得到. 建立 $a_g^*(365)$ 与 a_R 相关关系,发现幂函数形式拟合相关性最强 ($R^2 = 0.80$),即:

$[a_g(365)/c_{DOC}] = f \cdot [a_g(250)/a_g(365)]^g$ (4)

公式两边取对数可得:

$\ln [c_{DOC}] = h + j \cdot \ln [a_g(250)] + k \cdot \ln [a_g(365)]$ (5)

式中, f, g, h, j, k 为拟合系数.

由于太湖水体的 DOC 浓度变化范围较小 ($3 \sim 9 mg \cdot L^{-1}$),本研究试图利用 $a_g(250)$ 和 $a_g(365)$ 建立多元线性模型估算 c_{DOC} ,其模型形式为:

$c_{DOC} = \alpha + \beta \cdot a_g(250) + \gamma \cdot a_g(365)$ (6)

式中, α, β 和 γ 为回归系数.

分别建立 CDOM 在 250 nm 和 365 nm 处的吸收系数 [$a_g(250)$ 和 $a_g(365)$] 与 DOC 浓度 (c_{DOC}) 之间的关系(图 4),结果表明 201005 期数据两者的关系较好, $a_g(250)$ 和 $a_g(365)$ 与 DOC 浓度 (c_{DOC}) 的决定性系数分别为: $R^2(250) = 0.77$, $R^2(365) = 0.63$; 201101 期数据最差, $R^2(250) = 0.22$, $R^2(365) =$

0.21.4 期数据中, $a_g(250)$ 与 c_{DOC} 的决定系数均好于 $a_g(365)$ 与 c_{DOC} 的决定系数.

基于太湖 4 期样点数据,测定 CDOM 吸收系数和 DOC 浓度,利用 CDOM 特征波长吸收系数 [$a_g(250)$ 和 $a_g(365)$] 建立多元模型估算太湖水体的 DOC 浓度(图 5). 4 期数据多元模型拟合系数均不相同(表 2). 对于 α 来说,除 201103 期 α 为负值外,其余 3 期均为正值; 201101 期拟合值最大,远大于

其它期 α 值. 4 期数据 β 值均为正值,其中 201101 期 β 值最小. 与 β 值变化相反, γ 值均为负值,且 201101 期 γ 值最大,绝对值最小 (- 0.03). 除 201101 期数据外 ($R^2 = 0.22$), 其它 3 期数据拟合效果较好, R^2 在 0.67 以上,且所有样点的拟合效果较好 ($R^2 = 0.47$). 从 RMSE 上看,4 期数据拟合度比较理想,除所有航次的 RMSE 在 20% ~ 30% 之间外,其余均在 20% 范围内.

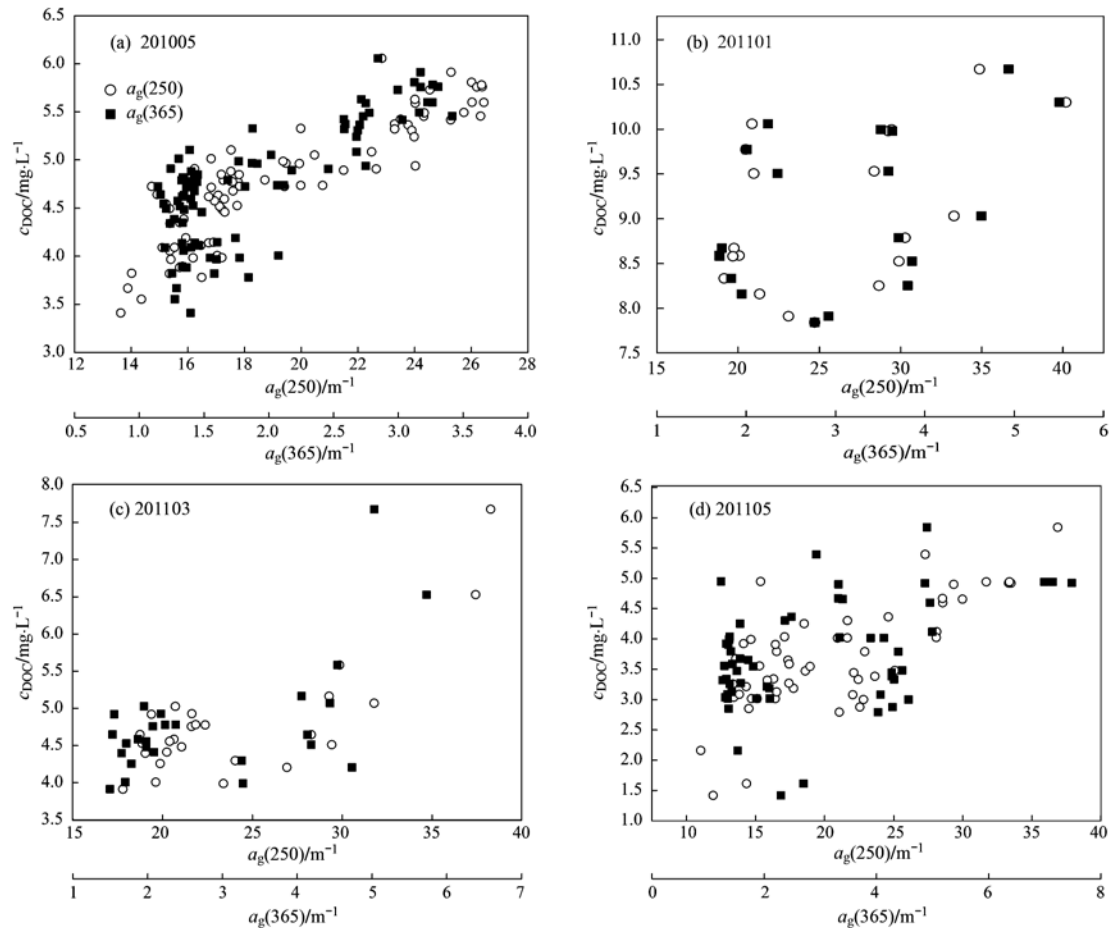


图 4 太湖 $a_g(250)$ 、 $a_g(365)$ 和 c_{DOC} 之间的关系
Fig. 4 Relationship between c_{DOC} , $a_g(250)$ and $a_g(365)$

表 2 太湖不同期 CDOM 吸收系数估算 DOC 浓度的回归系数

Table 2 Regression coefficients of the DOC concentrations estimated from CDOM absorption coefficients in different periods in Taihu Lake						
采样航次	有效样点个数	α	β	γ	R^2	RMSE/%
201010	84	0.57	0.33	-0.89	0.84	5.10
201101	19	7.30	0.07	-0.03	0.22	8.23
201103	26	-0.30	0.34	-0.96	0.81	7.17
201105	54	1.05	0.19	-0.37	0.67	13.35
所有样点	183	-0.46	0.40	-1.09	0.47	24.81

利用多元线性模型建立太湖 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度的关系效果较好[图 6(a)]. 对于 201101 期数据,利用该期有效样点数据和所有航次

样点数据的估算精度均较差[图 6(a)中的椭圆范围内样点为 201101 期数据采样点],说明该模型不适于太湖冬季 DOC 浓度的估算.

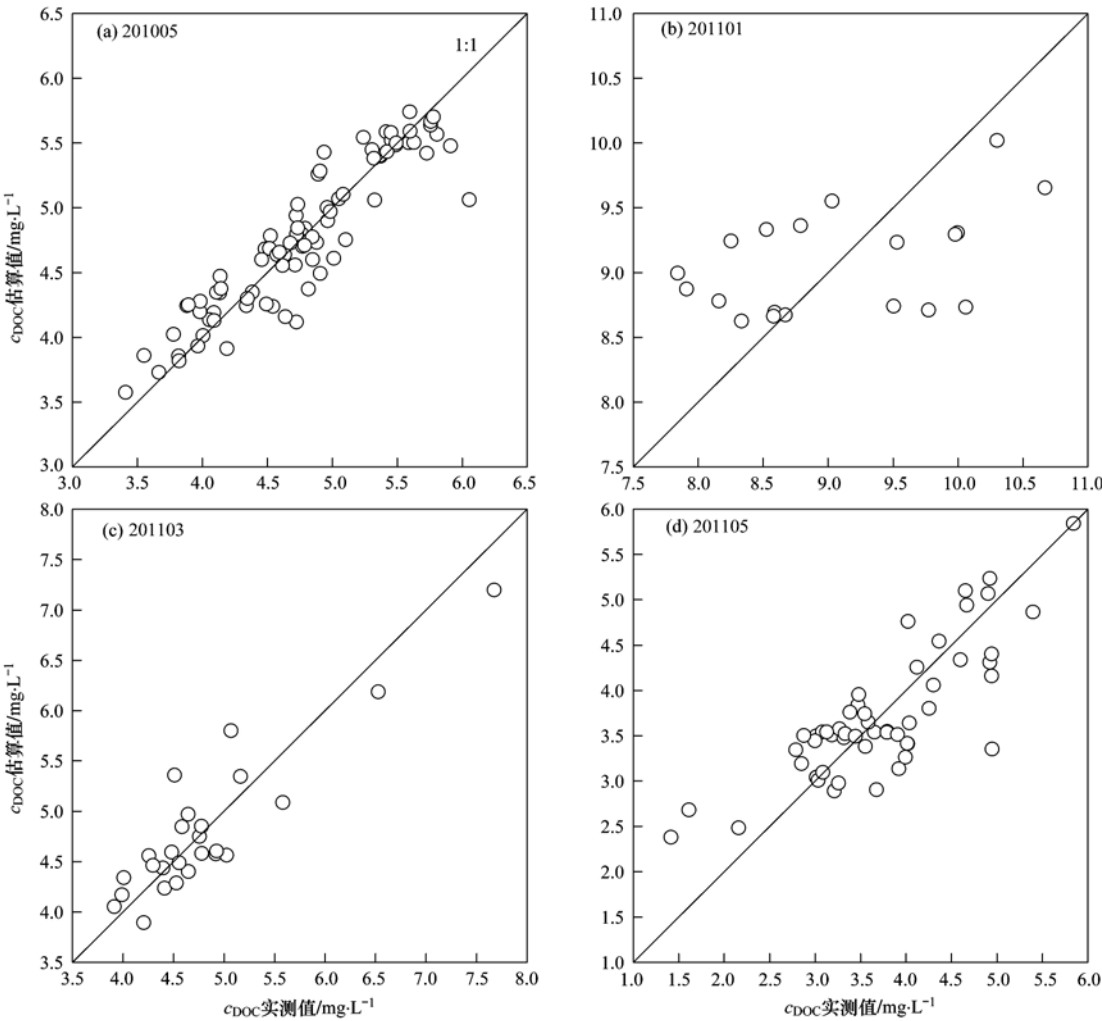


图 5 不同时期太湖 DOC 浓度估算值与实测值之间的关系

Fig. 5 Relationship between estimated and field DOC concentrations in different cruises in Taihu Lake

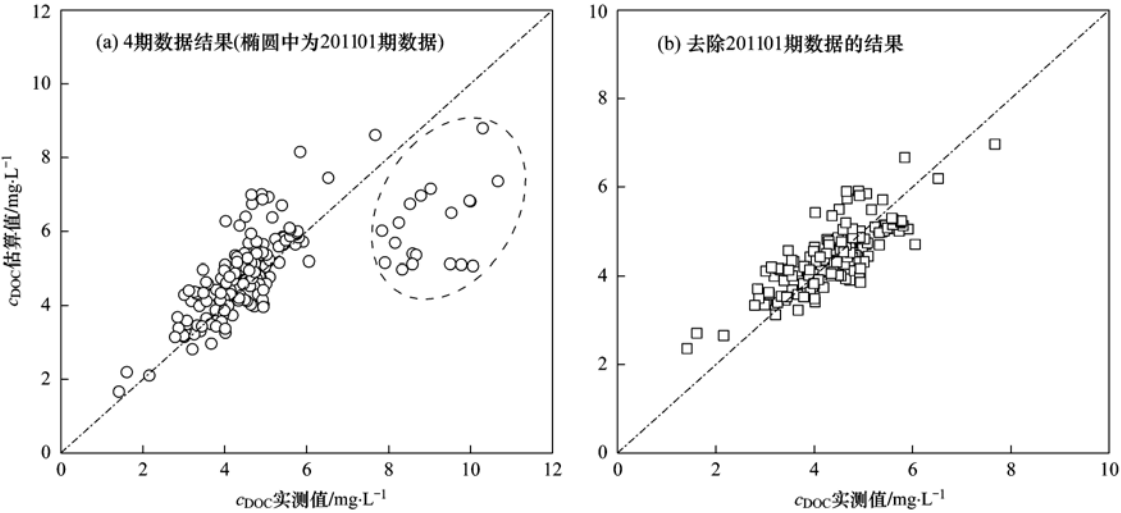


图 6 太湖 DOC 浓度与实测 DOC 浓度之间的关系

Fig. 6 Relationship between estimated and field DOC concentrations in Taihu Lake

2.3 模型验证与评价

当去除 201101 期数据后,基于 3 期太湖水体

CDOM 吸收系数建立的多元线性模型估算的 DOC 浓度与实测的 DOC 浓度数据相比,精度大大提高

($R^2 = 0.64$, $RMSE = 14.31\%$, $n = 164$) [图 6(b)]. 将该多元线性模型应用于 2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日在太湖梅梁湾、竺山湾和西太湖采集的水样 ($n = 27$) (图 1), 处理过程同它期采样数据 [$a_g(365) = (3.26 \pm 0.75) m^{-1}$; $c_{DOC} = (4.75 \pm 0.51) mg \cdot L^{-1}$; $a_g^*(365) = (0.68 \pm 0.14) m^{-1} \cdot (mg \cdot L^{-1})^{-1}$; $a_R = 6.86 \pm 0.97$]. 模型表达方式为:

$$c_{DOC} = 0.95 + 0.27 \times a_g(250) - 0.73 \times a_g(365) \quad (7)$$

该模型应用效果较好, 决定性系数 $R^2 = 0.67$, $RMSE$ 为 10.58%, 精度高于全部航次有效样点数据的拟合结果(图 7). 说明该模型具有一定的稳定性, 适合太湖水体.

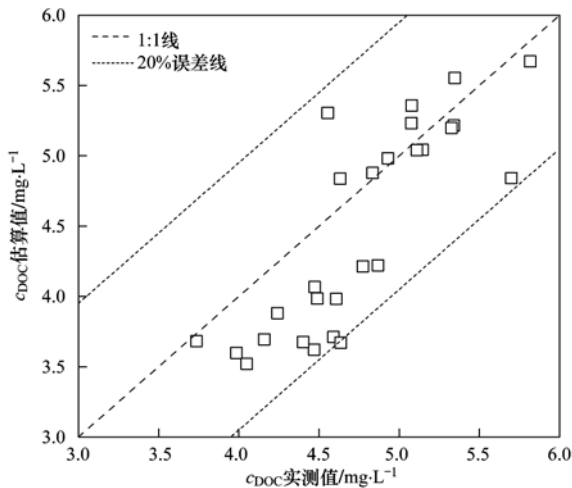


图 7 201108 期数据 DOC 估算值与 DOC 实测值之间的关系

Fig. 7 Relationship between estimated and field DOC concentrations of 201108 dataset

3 讨论

3.1 DOC 与 CDOM 的关系

除 2010 年 5 月外, CDOM 在 250 nm 和 365 nm 处的吸收系数 [$a_g(250)$ 和 $a_g(365)$] 与 DOC 浓度 (c_{DOC}) 之间的相关性都比较差(图 4), 主要与溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)的源和汇有关. 一般认为, DOM 有 2 个来源, 即陆源和内源^[26]. 陆源主要是陆生植被降解后形成的腐殖质由河流携带进入水体中; 内源主要是水体中的浮游植物经细菌、光照等腐烂降解产生. 海岸带^[7, 8]、河口^[9, 10]以及深水湖泊^[11]等水域, DOM 的来源较为单一, CDOM 吸收系数或荧光特性与 DOC 浓度相关性较好. 对于浅水湖泊来说, 底泥的再悬浮过程也是表层水体 DOM 的主要来源^[27]. 同时, 表层 DOM 在光照条件下发生一系列光化学过程(photochemical

processes), 如光化漂白(photobleaching)和光化腐殖化(photohumicating)等^[20]. 大量研究表明, 细菌在 DOM 的降解过程中具有非常重要的作用^[28]. 因此, DOC 和 CDOM 两者的源和汇并不统一, CDOM 与 DOC 的相关关系的稳定性较差.

CDOM 在紫外波段范围内吸收非常强烈, 特别在 UVA(315~400 nm)、UVB(280~315 nm)和 UVC(100~280 nm)波段内的吸收系数是可见光范围内吸收系数的几十倍, 在紫外波段的光化降解能力较高. 在 CDOM 吸收系数和 DOC 浓度的线性关系中, DOC 轴的截距代表了 DOC 所包含的无色溶解有机物(uncolored dissolved organic matter, UDOM)的比重^[29]. 不同 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度线性关系的斜率和截距不同, 无法判定两者的固定关系. 太湖 $a_g(250)$ 和 $a_g(365)$ 与 DOC 浓度 (c_{DOC}) 之间的关系表明, 太湖水体 DOC 中 CDOM 和 UDOM 的比例不固定, 不同区域、不同季节均有不同(图 4, 表 1). CDOM 经光化降解产生 UDOM 和 DIM(dissolved inorganic matter, 溶解无机物)2 种物质^[29]. 在 DOC 的物质组成中, 当 CDOM 和 UDOM 呈比例时, CDOM 吸收系数与 DOC 浓度的关系较好. 由于 CDOM 在 250 nm 处的强烈吸收, 光化作用强, 由 CDOM 释放的 UDOM 较多, 与 c_{DOC} 之间的关系优于 $a_g(365)$ 与 c_{DOC} 之间的关系.

CDOM 是 DOC 中的有色物质, 决定着水体颜色的变化^[30]. 除 201101 期数据外, 利用 CDOM 特征波长吸收估算太湖水体 DOC 浓度精度较高(图 6). 2011 年 1 月 DOC 浓度较高, 均值为 $(9.08 \pm 0.87) mg \cdot L^{-1}$, 相应的 CDOM 吸收系数 [$a_g(365)$] 也比较大 $(3.62 m^{-1} \pm 1.36 m^{-1})$, 但 CDOM 比吸收系数最小(表 1), 说明 CDOM 在 DOC 的比重较小, 相反的 UDOM 比重较大. 1 月处于冬季, 光照时间短, 雨水较少, 藻类以孢子形态沉于湖底, DOM 主要来源于藻类的死亡和湖底 DOM 的再悬浮作用. 冬季太湖有结冰现象, 光照时间短, 温度低, 水体表层 DOM 分解速率减慢; 雨水较少, 陆源输入少; 藻类大量死亡降解, 对 DOM 的贡献较大, DOC 浓度和 CDOM 吸收系数较高; 但由于风浪较大, 太湖为浅水湖泊(平均深度 1.9 m), 湖底 DOM 的再悬浮对水体表层 DOM 浓度的贡献较大, 因此, 1 月太湖水体中 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度的浓度高于其他月份, 但多年沉积的 DOM 与表层 DOC 和 CDOM 的相关关系不明显, 两者的相关性较差.

要充分认识 CDOM 与 DOC 的关系, 需要明确

DOM 的源和汇这 2 个过程. 确定 DOM 的两个端元 (内源和陆源) 后, 进行 DOM 光化学模拟实验, 才能从根本上确定两者的内在联系.

3.2 湖泊水体 DOC 浓度的遥感反演模式

水体光学特性受水体组分以及组分浓度的影响, 包括水体本身、浮游植物、悬浮泥沙和黄色物质 (CDOM)^[31]. CDOM 后向散射可以忽略不计, 其吸收作用影响水体离水辐亮度, 进而影响了水体的光谱反射率. 大量学者利用遥感技术估算 CDOM 特征波长吸收系数, 在湖泊^[11]、海洋^[32]和河流^[33]等水体中都有研究, 主要研究方法为经验比值方法^[11]和半分析方法^[32].

CDOM 吸收系数的遥感反演模式:

$$a_g(\lambda) = \delta \cdot [R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)]^\varepsilon \quad (8)$$

其中, δ 和 ε 为拟合系数. 为减弱叶绿素 a 和悬浮泥沙对 CDOM 吸收的影响, 往往 λ_1 和 λ_2 分别采用 412 nm 和 555 nm^[32].

本研究基于 CDOM 吸收系数建立 DOC 浓度的估算模型, 其模型形式简单, 只需测定 2 个波长处的 CDOM 吸收系数就可以估算水体表层的 DOC 浓度. 结合式(6)和式(8), 构建湖泊水体表层 DOC 浓度的遥感反演模式:

$$c_{\text{DOC}} = \alpha + \beta \cdot \left(\frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} \right)^{\varepsilon_1} + \gamma \cdot \left(\frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} \right)^{\varepsilon_2} \quad (9)$$

利用湖泊水体表层 DOC 浓度的遥感反演模式, 有利于以后的工作中利用遥感技术估算湖泊水体以及其他水域的 DOC 浓度, 为内陆水体碳循环提供有力的技术支撑. 该模型形式具有一定的通用性, 但系数在不同的水域中有所差异, 模型系数的区域化成为下一步研究的重点.

4 结论

利用 2010 年和 2011 年中在太湖 4 次实验 (201005、201101、201103、201105) (共计 183 个采样点) 的有效样点数据, 建立 CDOM 特征波长吸收系数与 DOC 浓度之间的多元线性模型, 估算太湖水体中 DOC 浓度, 并在 2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日的太湖采样点中得到了验证. CDOM 在 250 nm 和 365 nm 处的吸收系数 $[a_g(250)$ 和 $a_g(365)]$ 与 DOC 浓度(c_{DOC})之间的相关性都比较差, 但 $a_g(250)$ 与 c_{DOC} 的关系均好于 $a_g(365)$ 与 c_{DOC} 的关系. 基于 4 期实验数据, 利用多元线性模型拟合得到的系数均不相同; 除 201101 期数据外, 其它 3 期数据拟合效果

较好, 该模型在太湖冬季的应用效果不好. 当去除 201101 期数据后, 基于 3 期太湖水体 CDOM 吸收系数建立的多元线性模型估算的 DOC 浓度与实测的 DOC 浓度数据相比, 精度大大提高 ($R^2 = 0.64$, $\text{RMSE} = 14.31\%$, $n = 164$); 将拟合系数应用于 201108 期数据中, 估算效果较好 ($R^2 = 0.67$, $\text{RMSE} = 10.58\%$, $n = 27$). 最后, 结合 CDOM 吸收系数的遥感反演模型, 构建了湖泊水体表层 DOC 浓度的遥感反演模式; 该模式形式简单, 并具有一定的通用性. 利用该模型可有效估算太湖水体中 DOC 浓度, 为利用遥感技术快速、大面积估算太湖水体中 DOC 浓度提供了技术支撑; 该模型的回归系数需要区域化, 在以后的研究工作中需要针对不同湖泊、不同水域、不同季节建立区域化的回归系数.

致谢: 在实验过程中得到了饶家旺、赵晨露、王泽人、王长凤、齐琳、苑惠丽、林珊、项文华等人的帮助, 并且在论文的书写和修改中得到了苏文同学的帮助, 在此一并感谢!

参考文献:

- [1] Hope D, Billet M F, Cresser M S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes[J]. *Environmental Pollution*, 1994, **84**(3): 301-324.
- [2] 宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 4-5.
- [3] Carlson C A, Ducklow H W, Michaels A F. Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso Sea[J]. *Nature*, 1994, **371**(6496): 405-408.
- [4] Nieke B, Reuter R, Heuermann R, *et al.* Light absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM), in the St. Lawrence Estuary (Case 2 waters)[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, **17**(3): 235-252.
- [5] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [6] Carder K L, Steward R G, Harvey G R, *et al.* Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(1): 68-81.
- [7] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay[J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.
- [8] Fichot C G, Benner R. A novel method to estimate DOC concentrations from CDOM absorption coefficients in coastal waters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**: L03610.
- [9] Spencer R G M, Aiken G R, Butler K D, *et al.* Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: a case study of the Yukon River, Alaska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**: L06401.
- [10] Del Castillo C E, Miller R L. On the use of ocean color remote

- sensing to measure the transport of dissolved organic carbon by the Mississippi River Plume [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(3): 836-844.
- [11] Kutser T, Pierson D C, Tranvik L, *et al.* Using satellite remote sensing to estimate the colored dissolved organic matter absorption coefficient in lakes[J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(6): 709-720.
- [12] 马荣华, 戴锦芳, 张运林. 东太湖 CDOM 吸收光谱的影响因素与参数确定[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(2): 120-126.
- [13] 段洪涛, 马荣华, 孔维娟, 等. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 242-247.
- [14] 姜广甲, 刘殿伟, 宋开山, 等. 长春市石头口门水库 CDOM 的光学特性[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2009, **26**(5): 640-646.
- [15] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析[J]. *水科学进展*, 2007, **18**(3): 415-423.
- [16] 张运林, 冯胜, 马荣华, 等. 太湖秋季光学活性物质空间分布及其遥感估算模型研究[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2008, **33**(9): 967-972.
- [17] 马荣华, 段洪涛, 唐军武, 等. 湖泊水环境遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 31-32.
- [18] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.
- [19] Bertilsson S, Tranvik L J. Photochemical transformation of dissolved organic matter in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(4): 753-762.
- [20] Loiselle S A, Bracchini L, Dattilo A M, *et al.* The optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 590-597.
- [21] De Hann H, De Boer T. Applicability of light absorbance and fluorescence as measures of concentration and molecular size of dissolved organic carbon in humic Lake Tjeukemeer[J]. *Water Research*, 1987, **21**(6): 731-734.
- [22] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [23] Del Vecchio R, Blough N V. Spatial and seasonal distribution of chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Middle Atlantic Bight [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 169-187.
- [24] 曹静, 刘小军, 汤亮, 等. 稻麦适宜氮素营养指标动态的模型设计[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(2): 359-364.
- [25] 张婷, 王作华, 石晓勇, 等. 黄海、东海溶解有机碳的分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2011, **30**(2): 162-166.
- [26] 沈红, 赵冬至, 付云娜, 等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(6): 949-954.
- [27] Boss E, Pegau W S, Zaneveld J R V, *et al.* Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(C5): 9499-9507.
- [28] Rochelle-Newall E J. Dynamics of chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in experimental mesocosms[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(3): 627-641.
- [29] Vodacek A, Blough N V, DeGrandpre M D, *et al.* Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: terrestrial inputs and photooxidation [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 674-686.
- [30] Kalle K. The problem of the Gelbstoff in the sea [J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1966, **4**: 91-104.
- [31] Prieur L, Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(4): 671-689.
- [32] Morel A, Gentili B. A simple band ratio technique to quantify the colored dissolved and detrital organic material from ocean color remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(5): 998-1011.
- [33] Yu Q, Tian Y Q, Chen R F, *et al.* Functional linear analysis of *in situ* hyperspectral data for assessing CDOM in rivers [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010, **76**(10): 1147-1158.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人