

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曹辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Shevanelia oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析

刘洋洋, 沈芳*, 李秀珍

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 根据2013年8月对长江口邻近海域赤潮水体浮游植物优势物种及光吸收特性进行调查, 在34个调查站位中, 共10个站位发生赤潮, 其中, 6个站位发生硅藻赤潮, 3个站位发生甲藻赤潮。赤潮水体和非赤潮水体浮游植物吸收系数变化很大, 440 nm处吸收系数范围分别为 $0.199 \sim 0.832 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.012 \sim 0.109 \text{ m}^{-1}$; 而比吸收系数变化相对较小, 440 nm处比吸收系数在赤潮和非赤潮水体的平均值分别为 $0.023 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.035 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 。从赤潮水体向非赤潮水体过渡, 大粒径浮游植物所占比例减小, 小粒径浮游植物所占比例上升, 打包效应减小, 因而比吸收系数升高。浮游植物粒径指数的变化对440 nm和675 nm处的比吸收系数变化的贡献可分别达到43%和25%。不同类型赤潮(如硅藻和甲藻赤潮)在浮游植物粒级结构接近的情况下吸收光谱仍具有明显差异, 这是色素组成不同的结果。甲藻赤潮中硅甲藻黄素和叶绿素 c_2 的浓度之和与叶绿素a浓度的比值大于硅藻赤潮, 是甲藻在465 nm附近出现吸收肩峰的重要原因。

关键词: 长江口邻近海域; 赤潮; 浮游植物; 优势物种; 吸收系数; 粒径; 打包效应

中图分类号: X122 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2019-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.06.015

Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary

LIU Yang-yang, SHEN Fang*, LI Xiu-zhen

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Phytoplankton dominant species and their light absorption properties during the blooms occurred in August 2013 in adjacent waters of the Changjiang Estuary were analyzed. The results showed that phytoplankton blooms broke out in 10 out of 34 investigation stations, among which diatom blooms occurred in 6 stations while 3 stations were predominated by dinoflagellate. Phytoplankton absorption coefficients of both bloom and non-bloom waters exhibited large variations, with respective ranges of $0.199 \sim 0.832 \text{ m}^{-1}$ and $0.012 \sim 0.109 \text{ m}^{-1}$, while phytoplankton specific absorption coefficients spanned much narrower range, with the average values of bloom and non-bloom waters being 0.023 and $0.035 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, respectively. When transitioned from bloom to non-bloom waters, the proportion of phytoplankton with larger cell size lowered while that of smaller phytoplankton elevated, causing a less extent of package effect and thus higher specific absorption coefficients. Distinctive absorption spectra were observed between different types of bloom (such as diatom and dinoflagellate blooms) with similar phytoplankton cell size, mostly attributed to distinctive accessory pigment composition. The ratios of diadinoxanthin and chlorophyll- c_2 concentrations to chlorophyll-a concentration in dinoflagellate blooms were higher than those in diatom blooms, which largely contributed to the shoulder peaks at 465 nm in dinoflagellate blooms.

Key words: adjacent waters of the Changjiang Estuary; phytoplankton blooms; phytoplankton; dominant species; absorption coefficients; cell size; package effect

赤潮是一种常见的海洋灾害,严重影响着中国沿岸海域^[1]。近年来,随着陆源营养物质的输入,长江口邻近海域富营养化程度越来越严重,赤潮频繁发生^[2,3]。有关赤潮的生态学研究在此相继展开^[4~6],然而,赤潮发生时该海域浮游植物的光学性质研究鲜有报道。丘仲锋等^[7,8]对东海赤潮高发区水体的光谱吸收特性进行总体分析,但未将赤潮与非赤潮水体区别开来,且未判别赤潮类型。雷惠^[9]分析了东海赤潮高发区赤潮和非赤潮水体的固有光学性质,并基于固有光学参数差异对硅、甲藻赤潮进行遥感识别,然而对造成硅、甲藻赤潮之间和赤潮与非赤潮水体之间光吸收特性差异的原因尚未进行深入分析。浮游植物的光吸收特性是重要的固有

光学量,也是利用海洋水色遥感监测赤潮的基础参量之一^[10]。受长江径流影响,长江口及邻近海域泥沙含量大,浑浊度高,水色组分随长江径流和潮周期的季节变化呈现不均匀的时空分布特征^[11],传统的叶绿素遥感反演算法在此应用受到限制^[12],浮游植物光吸收特性研究已然成为提高该海域水色组分的反演精度,精确定义和表达生物-光学模型和固有光学量参数化的迫切需要。

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271375); 教育部博士学科点专项科研基金项目(20120076110009)

作者简介: 刘洋洋(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为海洋生物-光学, E-mail: yylu12@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fshen@sklec.ecnu.edu.cn

鉴于此,本研究依据海上现场调查数据,对长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性进行分析,并探究赤潮与非赤潮水体浮游植物光吸收特性的差异。

1 材料与方法

本研究依托国家基金委长江口共享航次,搭载“科学三号”科学考察船,对长江口邻近海域开展生物-光学调查,调查时间为2013年8月17日至28日,调查范围为122.2°~124.2°E,29.9°~32.1°N. 通过航次期间进行的现场原位测量,样品收集和过滤,以及返回陆地实验室进行的样品测试,获得了较为综合而全面的生物-光学数据集. 基于研究目标,本文着重分析航次进行期间赤潮水体浮游植物的吸收系数和基础水文生化参数。

利用集成有 Seabird CTD 传感器的 Niskin 莲座型采水器,现场采集表层水样,并按照拟测量参数的不同依次处理. 收集水样完毕后,立即在船上的实验室进行过滤操作或其他处理. 盐度和温度剖面数据由 RBRconcerto 多参数水质仪获得,营养盐和溶解氧浓度剖面数据由中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室采集和提供。

1.1 颗粒物吸收系数的测定

对200~1000 mL水样进行低压抽滤,颗粒物富集在直径为25 mm、0.7 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜上. 富集着颗粒物的滤膜被迅速置于 Corning 细胞培养皿中,用铝箔封闭并放入液氮中保存. 返回陆地后,利用带积分球的 Lambda 1050 双光束紫外-可见-近红外分光光度计测量颗粒物吸收光谱,扫描波长范围为300~1000 nm,分辨率为2 nm. 吸收系数计算参照 NASA 海洋光学规范^[13],光程放大因子取4.5^[14,15]. 浮游植物吸收系数 [phytoplankton absorption coefficients, $a_{ph}(\lambda)$] 即为颗粒物总吸收系数与甲醇萃取褪掉色素后的非藻类颗粒吸收系数之差. 浮游植物比吸收系数 [phytoplankton-specific absorption coefficients, $a_{ph}^*(\lambda)$] 定义为 $a_{ph}(\lambda)$ 与总叶绿素 a 浓度 (Total chlorophyll-a concentration, [TChla]) (测量方法详见1.2节)^[16]之比。

1.2 色素浓度的测定及浮游植物粒级结构分析

对200~2000 mL水样进行低压抽滤,将颗粒物富集在0.7 μm Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜上,迅速对折滤膜,并用铝箔包好,制成色素样品并转移至液氮中. 少量站位取200~2000 mL水样分别通过

20 μm 筛绢、2 μm Millipore 聚碳酸酯膜和0.7 μm Whatman GF/F 膜,迅速折叠筛绢和滤膜,其他步骤同上,制成分级叶绿素 a 样品,其中>20 μm 为小型浮游植物 (microplankton, Micro-) 叶绿素 a,2~20 μm 为微型浮游植物 (nanoplankton, Nano-) 叶绿素 a,0.7~2 μm 为超微型浮游植物 (picoplankton, Pico-) 叶绿素 a. 返回陆地后,用 Hitachi F-4500 荧光分光光度计测量叶绿素 a 浓度 (chlorophyll-a concentration, [Chla]) 和脱镁叶绿素 a 浓度^[17]. [TChla]为[Chla]和脱镁叶绿素 a 浓度之和. 测量前,使用 Sigma 叶绿素 a 标准品对荧光分光光度计定标. 少量站位的样品使用 Waters 2695 高效液相色谱仪 (high performance liquid chromatograph, HPLC) 结合二极管阵列检测器和反相 C8 色谱柱测试色素浓度^[13],测试的色素有岩藻黄素、多甲藻素、19 己酰基氧化岩藻黄素、19 丁酰基氧化岩藻黄素、别藻黄素、叶绿素 b、玉米黄素、叶绿素 c_2 和叶绿素 a. 色素标准品从 DHI-14C 公司购买. 由 HPLC 测量的叶绿素 a 浓度表示为 [Chla]^{HPLC}.

采用粒径指数 [size index, SI] 描述浮游植物细胞粒径的变化趋势,SI 定义为^[16]:

$$SI = F_M + 5F_N + 50F_P \quad (1)$$

式中, F_M 、 F_N 和 F_P 分别为 Micro-、Nano-和 Pico-分级叶绿素 a 浓度占 [Chla] 的百分比. Micro-、Nano-和 Pico-的平均粒径分别为1、5和50 μm,因此 SI 的变化范围为1~50 μm,取值为1 μm 代表浮游植物全部为 Pico-,取值为50 μm 代表浮游植物全部为 Micro-.

1.3 赤潮站位浮游植物物种鉴别

取500 mL 水样于大口聚乙烯瓶中,立即加中性甲醛溶液(终浓度为1%),密封后避光保存. 测量前,将样品沉降48 h,去上清液并浓缩至100 mL 后,使用 Olympus BX43 光学显微镜×200 和×400 倍下鉴别浮游植物物种和细胞计数。

2 结果与分析

研究站位如图1所示. 通过观测人员对现场水体水色的肉眼观察并结合叶绿素 a 数据 ([Chla] > 10 mg·m⁻³^[9,18]),确定 B1~B10 共10个赤潮站位. 赤潮站位主要位于长江口东部的口外海滨及其东北部浅水区,这与往年长江口邻近海域夏季叶绿素高值区的调查结果一致^[19~21]. 此外,本研究还选取了 O1~O10 和 Z1~Z14 共24个非赤潮站位以方便研究结果对比. 为此,将研究区域划分为3个子区域:B1~B10 称为 B 区,O1~

O13 称为 O 区,Z1 ~ Z14 称为 Z 区. 3 个子区域有明显的地理位置差别:B 区水深小于 50 m 且在 30.5°N 以北(B5 除外); O 区水深大于 50 m 且在 123°E 以东,远离海岸; Z 区位于 123°E 以西和 30.5°N 以南的浙江海域.

2.1 赤潮优势物种

根据镜检结果,将细胞密度大于 1×10^4 个·mL⁻¹的物种作为赤潮优势物种. 各优势物种细胞粒径均大于 20 μm,属于 Micro-,具体信息见表 1 (B3 优势物种信息缺失).

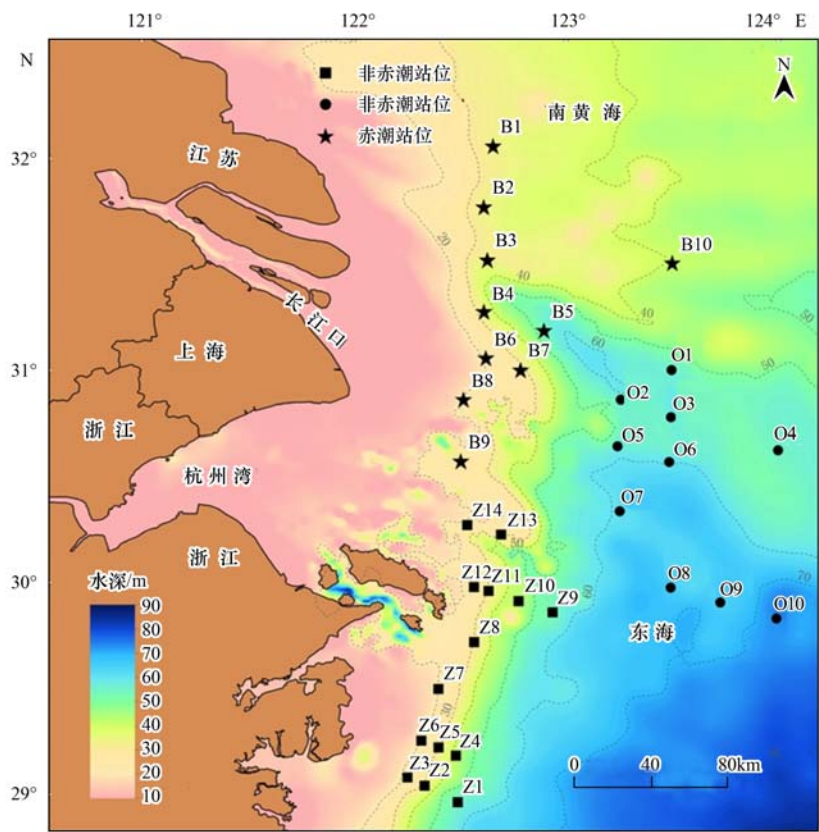


图 1 2013 年 8 月长江口邻近海域调查站位

Fig. 1 Investigation stations in adjacent waters of the Changjiang estuary during August 2013

表 1 赤潮站位及优势物种

Table 1 Phytoplankton bloom stations and their dominant species

站位名称	优势物种中文名	优势物种拉丁文名	所属门类
B1, B2	角海链藻	<i>Thalassiosira angulata</i>	硅藻门
	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	硅藻门
B4	琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>	硅藻门
	虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	硅藻门
B5, B10	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	硅藻门
	皇冠角毛藻	<i>Chaetoceros diadema</i>	硅藻门
	角海链藻	<i>Thalassiosira angulata</i>	硅藻门
B7	新月菱形藻	<i>Nitzschia closterium</i>	硅藻门
	琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>	硅藻门
B6, B8, B9	东海原甲藻	<i>Prorocentrum donghaiense</i>	甲藻门

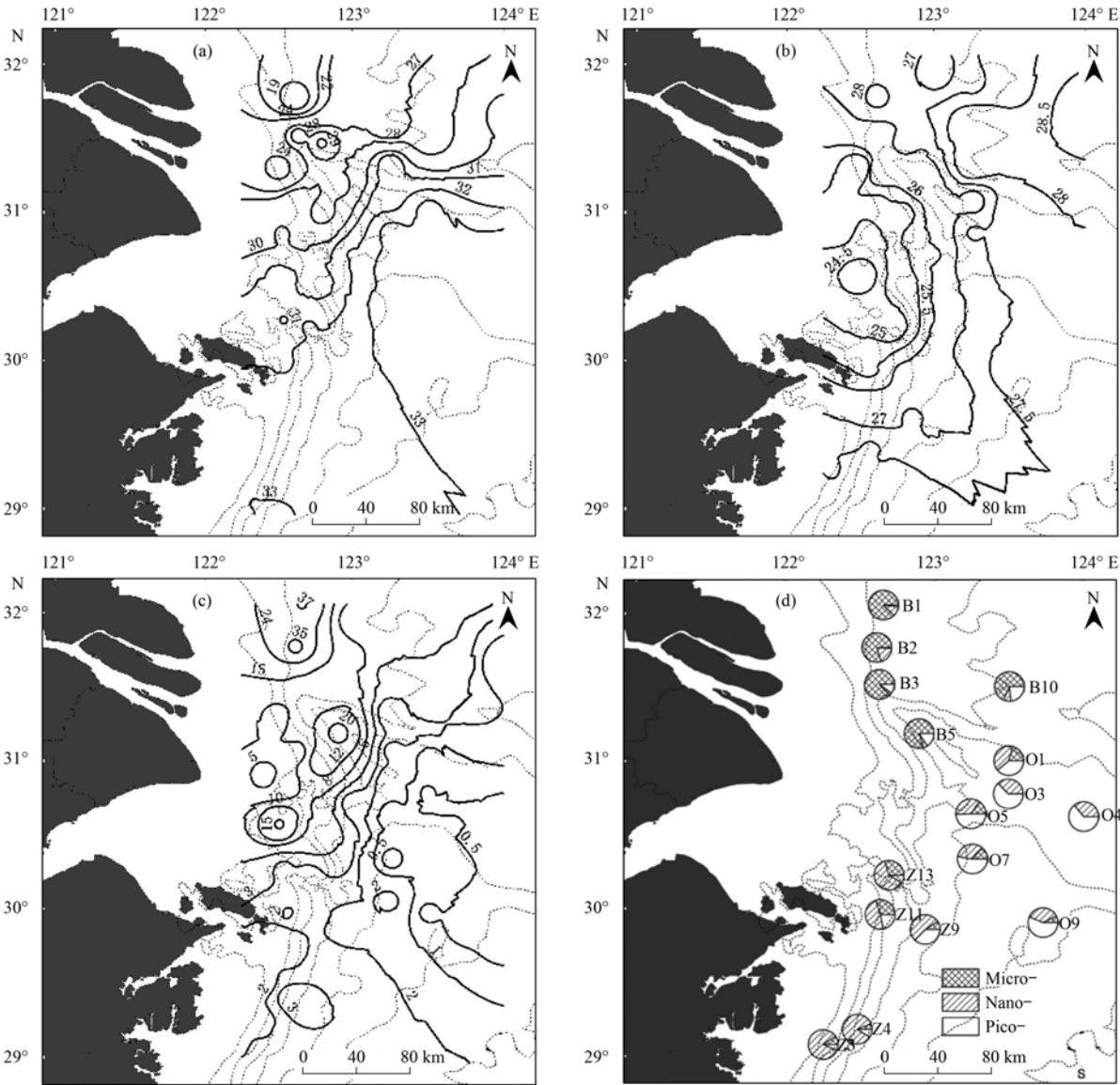
2.2 水文及生物化学参数

受长江冲淡水 and 海水的共同影响,研究海域表层盐度(sea surface salinity, SSS)在 15.48 ~ 33.64

之间. 由图 2(a)可以看出,长江冲淡水分两股向外扩展,一股朝东北偏北,一股朝南,且前者扩展的强度大于后者. 由于航次季节为夏季,海表温度(sea

surface temperature, SST) 较高, 在 23.89 ~ 29.32℃ 之间. 由图 2(a) 和 2(b) 可以发现, 长江口外南部海域存在一高盐冷水中心, 该中心大体位于 122.50°E、30.57°N, SSS 和 SST 达到 31.41 和 23.89℃, 其周围水体在水平方向的温度梯度十分明显, 表明该海域存在上升流. 台湾暖流的北上入侵可能是该海域上升流形成的重要原因之一. 叶绿素高值区位于 B 区, 与长江冲淡水的扩展方向和上升流的影响范围较为一致, 其 [Chla] 和 [TChla] 分别在 5.63 ~ 37.73 mg·m⁻³ 和 6.27 ~ 65.88 mg·m⁻³ 范围内, 最高值出现在 B1 站位; Z 区 [Chla] 和 [TChla] 分别在 0.92 ~ 2.82 mg·m⁻³ 和 1.31 ~ 3.66 mg·m⁻³ 范围内;

O 区在 0.24 ~ 0.54 mg·m⁻³ 和 0.39 ~ 0.74 mg·m⁻³ 之间. 根据 Bricaud 等^[16] 对水体营养程度的划分标准, B 区和 Z 区为富营养化水体, 而 O 区为中等营养水体. 整体上, [Chla] 由西北向东南降低, 并与盐度呈负相关 [Chla] = -2.28 SSS + 76.66 (Pearson's $r = -0.92, N = 32, ANOVA P < 0.0001$). 分级叶绿素 a 在不同水体所占的比例明显不同 [图 2(d)]: B、Z 区分别以 Micro-和 Nano-为主, 而 O 区除 O1 的 Nano-和 Pico-均较高外, 其余站位以 Pico-为主. SI 在 B、Z 和 O 区的平均值分别为 40.8、11.9 和 9.3 μm, 也表明由 B 区向 Z 区再向 O 区过渡时小粒径浮游植物所占比例的抬升. SI 随 [Chla] 的升高而呈



(a) SSS, (b) SST(℃), (c) 表层 [Chla] (mg·m⁻³), (d) 分级叶绿素 a 浓度的相对比例

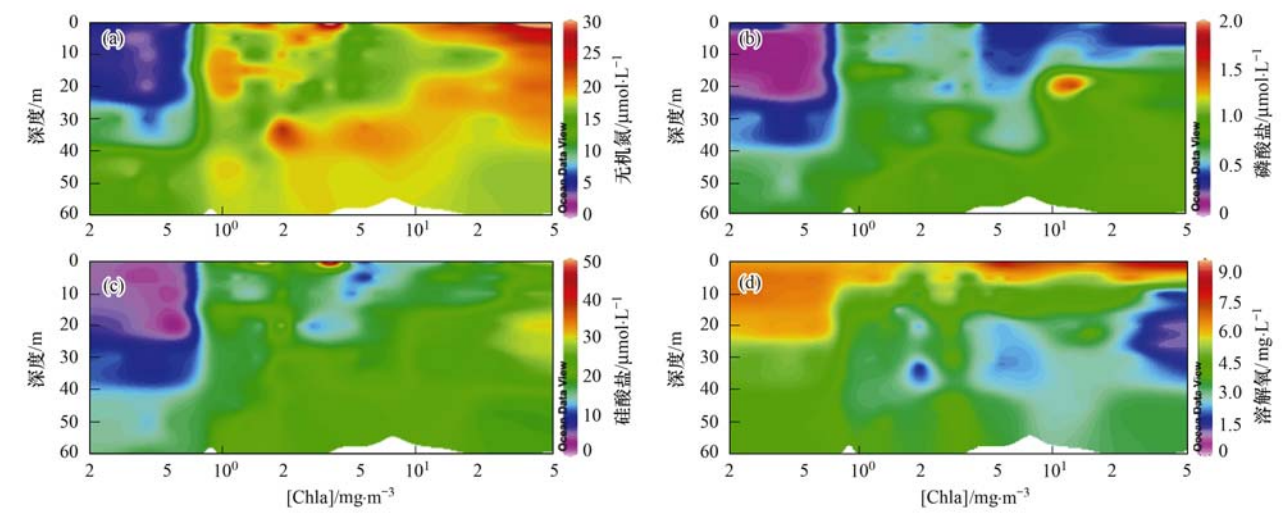
图 2 SSS、SST、表层 [Chla] 和分级叶绿素 a 浓度的相对比例的水平分布

Fig. 2 Horizontal distributions of salinity, temperature, surface [Chla] and proportions of size-fractionated chlorophyll a concentration

现幂函数增大的关系 ($SI = 2.157 [Chla]^{0.055}$, $R^2 = 0.78$, $N = 16$, ANOVA $P < 0.0001$). 表层水体溶解氧 DO 浓度均大于 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并在 B2 和 B10 处超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这是浮游植物光合作用旺盛的结果. 与之相对, B 区底层呈现缺氧状态[图 3(d)], B1 站位距底 11 m 处发现溶解氧最低值 ($0.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 低氧区的形成与赤潮水体表层浮游植物产生的大量有机物质在底层水体的氧化分解密切相关.

除夏季适宜的温度和光照条件外, 由长江冲淡水携带和上升流涌升的营养盐是赤潮发生的物质基

础. 赤潮水体无机氮和硅酸盐的含量较高[图 3(a)和 3(c)], 表层浓度范围分别为 $13.39 \sim 44.40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.81 \sim 43.23 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 氮和硅不对浮游植物生长造成限制. 表层磷酸盐含量较低, 浓度在 $0.17 \sim 0.61 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 这与长江冲淡水的磷酸盐浓度相对偏低有关^[22], 叶绿素最大值处磷酸盐浓度降到 $0.17 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的最低值, 说明浮游植物生长对磷酸盐的大量消耗^[23]; 而下、底层水磷酸盐浓度的抬升[图 3(b)]可能来自台湾暖流的补充^[22].



X 轴取对数坐标, 各标注刻度的数值分别代表 2×10^{-1} 、 5×10^{-1} 、 10^0 、 2×10^0 、 5×10^0 、 10^1 、 2×10^1 和 5×10^1

图 3 营养盐和溶解氧的垂向分布随表层 [Chla] 的变化

Fig. 3 Vertical distributions of nutrients and dissolved oxygen with variations of surface chlorophyll-a concentration

2.3 浮游植物光吸收特性

2.3.1 浮游植物吸收系数的变化

赤潮水体的浮游植物有着不同于非赤潮水体的吸收系数. 图 4 展示了 $a_{ph}(440)$ 的空间分布. 可以看出, 3 个子区域 $a_{ph}(440)$ 的大小关系为 O 区 $<$ Z 区 $<$ B 区, 赤潮发生时, $a_{ph}(440)$ 显著升高. 赤潮水体吸收光谱在 440 nm 和 675 nm 处存在明显的吸收峰. 总体上, $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 变化较大, 赤潮水体约有 4~5 倍的变化, 分别在 $0.199 \sim 0.832 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.135 \sim 0.619 \text{ m}^{-1}$ 之间, 最高值出现在 B2 站; 非赤潮水体约有 8~9 倍的变化, 对应变化范围为 $0.012 \sim 0.109 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.007 \sim 0.065 \text{ m}^{-1}$, 最低值出现在 O9 站. 赤潮水体的 $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 远高于非赤潮水体, 这主要是前者色素浓度较高的结果. 将 $a_{ph}(440)$ 与 [Chla] 按照 $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) [Chla]^{B(\lambda)}$ 的幂函数关系^[16,24]进行拟合, 结果见表 2. 可以看出, 总体上, $a_{ph}(440)$ 随 [Chla] 的升高而增大. 如图 5, 本研究赤潮水体的拟合结果明显高于非赤潮水体和

表 2 浮游植物在 440 nm 处的吸收系数与 [Chla] 的幂函数模型拟合系数及与其他模型的对比¹⁾

Table 2 Regression coefficients at 440 nm of power law function of phytoplankton and comparison with other models

数据来源	$a_{ph}(440)$			N
	A	B	R^2	
赤潮站位拟合	0.066	0.708	0.91	10
非赤潮站位拟合	0.042	0.710	0.84	24
Bricaud 等 ^[24]	0.037 8	0.627	0.90	1 166
Bricaud 等 ^[16]	0.065	0.728	0.93	596
Wang 等 ^[25]	0.053	0.721	0.89	66

1) 表内函数表达式为 $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) [Chla]^{B(\lambda)}$, N 为样品个数, R^2 为决定系数

Bricaud 等^[24]在 1998 年对一类水体的拟合结果, 略高于 Wang 等^[25]在珠江口硅藻赤潮的结果, 而与 Bricaud 等^[16]在 2004 年的结果非常接近, 这与其拟合时将富营养水体考虑在内有关.

2.3.2 浮游植物比吸收系数的变化

与吸收系数相比, $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(675)$ 变化较

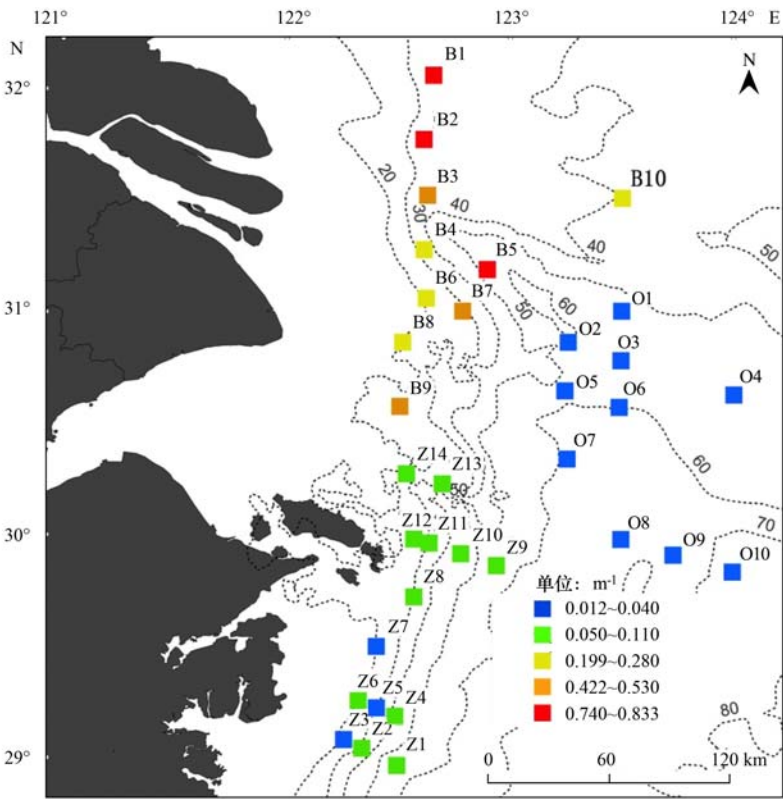
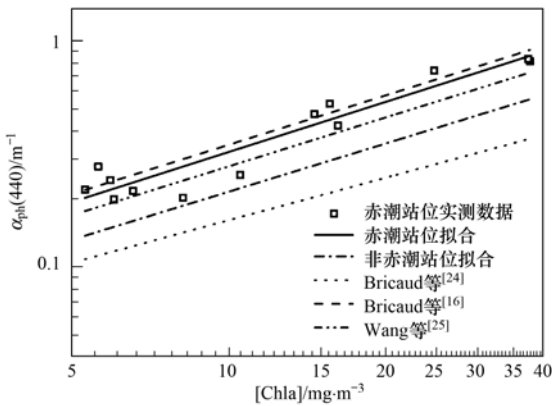
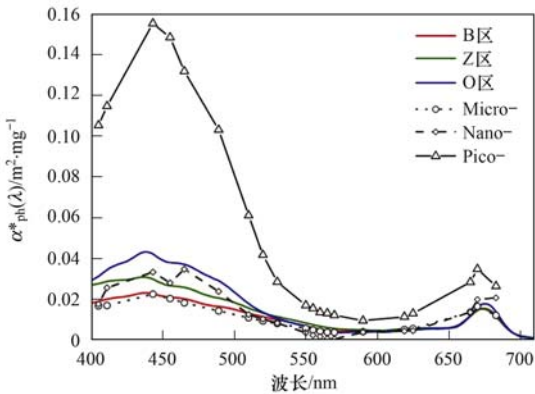


图 4 $a_{ph}(440)$ 的空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of $a_{ph}(440)$



X、Y 轴取对数坐标
图 5 赤潮水体 $a_{ph}(440)$ 与 $[Chla]$ 的关系及与其他模型的比较
Fig. 5 Relationships between $a_{ph}(440)$ and $[Chla]$ during phytoplankton blooms and comparison with other models



3 个分区(实测)和 3 个分级(Brewin 等^[26]模型)的
平均比吸收系数
图 6 平均比吸收系数的比较

Fig. 6 Comparison of phytoplankton mean specific absorption coefficients

小,赤潮水体分别在 $0.012 \sim 0.036 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.009 \sim 0.023 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 之间,最低值出现在 B1 站,平均值分别为 $0.023 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.015 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$,这与 Brewin 等^[26]提出的三粒级模型对于 Micro-比吸收系数的反推结果接近(图 6).非赤潮水体二者分别在 $0.021 \sim 0.066 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.012 \sim 0.026 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 之间,最高值出现在 O5 站,平均值为 0.035

$\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.016 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$,高于赤潮水体.总体上, $a_{ph}^*(440)$ 有随 $[Chla]$ 增加而减小的趋势 $[a_{ph}^*(440) = 0.034 [Chla]^{-0.193}, R^2 = 0.43, N = 34, \text{ANOVA } P < 0.0001]$.如图 6,3 个子区域比吸收系数平均值在蓝光波段的大小关系为 O 区 > Z 区 > B 区.比吸收系数的蓝红波段比值 $a_{ph}^*(440)/a_{ph}^*(675)$ (blue-to-red ratio, B/R) 在 B、Z 和 O 区的

平均值分别为 1.51、1.96 和 2.37, 且随 $[\text{Chla}]$ 的增加有减小的趋势 ($B/R = 2.084 [\text{Chla}]^{-0.130}$, $R^2 = 0.43$, $N = 34$, ANOVA $P < 0.0001$).

而在 B 区内部, 赤潮类型不同, 浮游植物比吸收系数也不尽相同. 如图 7, 从光谱形状上看, 赤潮站位除在 440 nm 和 675 nm 处存在吸收峰外, 在 495 nm 附近存在较不明显的吸收肩峰. 同时, B7、B9 和 B10 站在 465 nm 附近存在另一个吸收肩峰, 对应东海原甲藻赤潮; 而硅藻赤潮和其余未知类型赤潮站位在 465 nm 附近没有吸收峰. 从数值上看, 甲藻赤潮的 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 在 460 ~ 680 nm 内均大于其他类型赤潮.

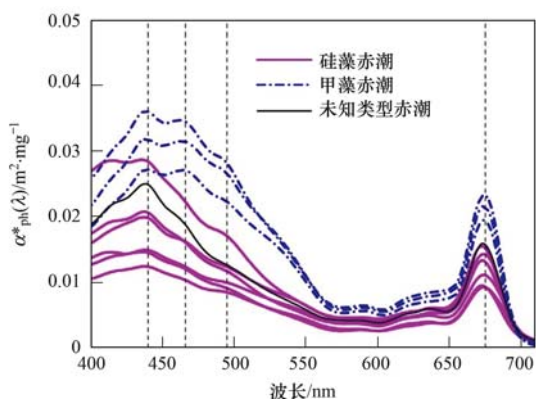


图 7 赤潮站位浮游植物比吸收光谱

Fig. 7 Phytoplankton specific absorption spectra of bloom stations

3 讨论

3.1 浮游植物粒径对 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 的影响

从图 2(d) 及 SI 的变化可知, 由 B、Z 向 O 区过渡时, 大粒径浮游植物所占的比例减小, 浮游植物由 Micro-到 Nano-到 Pico-过渡, 比吸收系数相应升高. 与 Brewin 等^[26]对三粒级比吸收系数的模拟结果进行比较(图 6): B 区的 Micro-占绝对优势, 其 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 的平均值与 Micro-比吸收系数的模拟值几乎一致; Z 区 Micro-所占比例较 B 区有所降低, 而 Nano-比例升高, 因此 Z 区 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 的平均值在蓝光和红光波段的数值接近但低于 Nano-比吸收系数的模拟值; 而在 O 区小粒径浮游植物比例进一步升高, 且 Nano-占有不可忽视的比例, 因而其 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 的平均值整体上大于 Nano-而远小于 Pico-的比吸收系数模拟值. $a_{\text{ph}}^*(440)$ 和 $a_{\text{ph}}^*(675)$ 随 SI 的增加而呈现幂函数衰减的趋势, R^2 分别为 0.43 和 0.25. 可见, 浮游植物粒径指数的变化对 440 nm 和 675 nm 处的比吸收系数变化的贡献可分别达到 43% 和 25%.

细胞粒径是影响色素打包效应的重要因素^[24,27~30]. 打包效应对 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 的影响可用打包效应指数 [package effect index, $Q_a^*(\lambda)$] 衡量. $Q_a^*(\lambda)$ 为 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 与同等色素物质在溶解状态下的比吸收系数 [phytoplankton-specific absorption coefficient of cellular matter dispersed into solution, $a_{\text{sol}}^*(\lambda)$] 之比^[16]. 叶绿素 a 在 675 nm 处的吸收峰受辅助色素干扰最小^[28,31], 也就是说, $a_{\text{ph}}^*(675)$ 的变化几乎不受色素组成的影响而只源于叶绿素 a 打包效应^[32], 取 $a_{\text{sol}}^*(675)$ 为 $0.0207 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ^[29], 计算得到 B、Z 和 O 区 $Q_a^*(675)$ 的范围分别为 0.44 ~ 1.12、0.59 ~ 1.20 和 0.65 ~ 1.24, 在剔除数值超过 1 的情况后^[16], 3 个分区 $Q_a^*(675)$ 的均值分别为 0.65、0.70 和 0.82. 这表明, 赤潮水体的色素打包效应强于非赤潮水体, 总体上, B、Z 和 O 区 $Q_a^*(675)$ 变化约有 35%、30% 和 18% 是由打包效应造成的. $Q_a^*(675)$ 随 SI 的增大而具有幂函数减小的趋势 ($R^2 = 0.25$). 在远离近岸的 O 区, 随浮游植物细胞粒径减小而减小的打包效应比 B 区赤潮水体和 Z 区近岸水体小 1.5 ~ 2 倍, 因此相应的比吸收系数较大.

事实上, 浮游植物粒径与色素浓度和组成在某种程度上存在共变, 因此, 它对比吸收系数的影响往往可以代表打包效应和色素组成对比吸收系数的共同作用. 一般地, 在高叶绿素浓度的水体, 大粒径浮游植物占总生物量比例较高^[33~35], 打包效应较强, 辅助色素占总色素浓度的比例较小^[36,37], 这些因素共同造成大粒径浮游植物具有低 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ ^[28], 反之亦然.

3.2 浮游植物色素组成对 $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ 的影响

B 区各站位浮游植物粒径范围一致, 均为 Micro-占优, 具有非常接近的 SI, 但比吸收光谱形状仍有各自明显的特征(图 7), 肩峰的差异与辅助色素有关. 东海常见赤潮硅藻和甲藻的特征色素分别为岩藻黄素和多甲藻素^[18,38,39], 这两种色素均在 490 nm 附近存在吸收峰, 但后者还在 460 nm 附近有吸收峰^[18,40,41]. 同时, 东海常见赤潮硅藻和甲藻的辅助色素——硅甲藻黄素和叶绿素 c_2 也在 460 nm 处存在吸收峰^[40], 然而, 二者的浓度之和与 $[\text{Chla}]^{\text{HPLC}}$ 的比值不同: 硅藻赤潮站位 (B1、B2、B5 和 B7) 的范围为 0.02 ~ 0.06, 而甲藻赤潮站位 (B8 和 B9) 的范围为 0.16 ~ 0.19, 硅藻远小于甲藻, 这与许多研究一致^[18,38,39]. 由此推断, 甲藻在 465 nm

处的吸收肩峰是多甲藻素、硅甲藻黄素和叶绿素 c_2 共同作用的结果。

4 结论

(1) 赤潮水体与非赤潮水体的浮游植物吸收光谱不同. 浮游植物吸收系数变化很大, 440 nm 处赤潮水体和非赤潮水体吸收系数范围分别为 $0.199 \sim 0.832 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.012 \sim 0.109 \text{ m}^{-1}$; 而比吸收系数变化相对较小, 440 nm 处比吸收系数在赤潮和非赤潮水体的平均值分别为 $0.023 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.035 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$.

(2) 浮游植物粒径是影响比吸收系数的重要因素. 从赤潮水体向非赤潮水体过渡, 大粒径浮游植物所占比例减小, 小粒径浮游植物所占比例上升, 打包效应减小, 因而比吸收系数升高. 浮游植物粒径指数的变化对 440 nm 和 675 nm 处的比吸收系数变化的贡献可分别达到 43% 和 25%.

(3) 甲藻和硅藻色素组成差异对浮游植物比吸收系数有着重要影响. 甲藻赤潮中硅甲藻黄素和叶绿素 c_2 的浓度之和与叶绿素 a 浓度的比值大于硅藻赤潮, 是甲藻在 465 nm 附近出现吸收肩峰的重要原因.

致谢: 真诚感谢王桂芬博士、周雯博士、沈盎绿博士、余小龙、陈雨和姚林杰对于数据采集和处理的帮助, 以及中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室和宋书群博士提供相关同步测量数据.

参考文献:

- [1] 梁松, 钱宏林, 齐雨藻. 中国沿海的赤潮问题 [J]. 生态科学, 2000, **19**(4): 44-50.
- [2] 韩秀荣, 王修林, 孙霞, 等. 东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1097-1101.
- [3] Chai C, Yu Z M, Song X X, *et al.* The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) Estuary and the adjacent East China Sea, China [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**: 4687-4695.
- [4] 叶属峰, 纪焕红, 曹恋, 等. 长江口海域赤潮成因及其防治对策 [J]. 海洋科学, 2004, **28**(5): 26-32.
- [5] 周名江, 于仁成. 有害赤潮的形成机制、危害效应与防治对策 [J]. 自然杂志, 2007, **29**(2): 72-77.
- [6] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展 [J]. 生命科学, 2001, **13**(2): 54-59.
- [7] 丘仲锋, 席红艳, 何宜军, 等. 东海赤潮高发区半分析算法色素浓度反演 [J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1516-1521.
- [8] 丘仲锋, 何宜军, 唐军武, 等. 东海赤潮高发区水体光谱吸收特性分析 [J]. 海洋科学集刊, 2007, **48**: 1-14.
- [9] 雷惠. 基于固有光学量的东海赤潮遥感提取算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011. 25-133.
- [10] 赵冬至. 赤潮灾害卫星遥感探测技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009. 1-12.
- [11] Shen F, Zhou Y X, Hong G L. Absorption property of non-algal particles and contribution to total light absorption in optically complex waters, a case study in Yangtze Estuary and adjacent coast [A]. In: Advances in Computational Environment Science [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 61-66.
- [12] Cui T W, Zhang J, Tang J W, *et al.* Assessment of satellite ocean color products of MERIS, MODIS and SeaWiFS along the East China Coast (in the Yellow Sea and East China Sea) [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, **87**: 137-151.
- [13] NASA/TM-2000-209966. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 2 [S].
- [14] 余小龙, 沈芳, 张晋芳. 影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 [J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1745-1753.
- [15] Röttgers R, Gehnke S. Measurement of light absorption by aquatic particles: improvement of the quantitative filter technique by use of an integrating sphere approach [J]. Applied Optics, 2012, **51**(9): 1336-1351.
- [16] Bricaud A, Claustre H, Ras J, *et al.* Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2004, **109**(C11): 183-197.
- [17] Neveux J, Lantoin F. Spectrofluorometric assay of chlorophylls and phaeopigments using the least squares approximation technique [J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1993, **40**(9): 1747-1765.
- [18] 庄宏儒. 水质自动监测系统在厦门同安湾赤潮短期预报中的应用 [J]. 海洋环境科学, 2006, **25**(2): 58-61.
- [19] 宋书群, 孙军, 沈志良, 等. 三峡库区蓄水后夏季长江口及其邻近水域粒级叶绿素 a [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, **36**(S1): 114-120.
- [20] 韦钦胜, 臧家业, 战闰, 等. 夏季长江口东北部上升流海域的生态环境特征 [J]. 海洋与湖沼, 2011, **42**(6): 899-905.
- [21] 朱建荣. 长江口外海区叶绿素 a 浓度分布及其动力成因分析 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, **34**(8): 757-762.
- [22] Liu K K, Tang T Y, Gong G C, *et al.* Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan [J]. Continental Shelf Research, 2000, **20**(4-5): 493-523.
- [23] 俞志明, 沈志良. 长江口水域富营养化 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 50-96.
- [24] Bricaud A, Morel A, Babin M. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case I) waters: analysis and implications for bio-optical models [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 1998, **103**(C13): 31033-31044.
- [25] Wang G F, Cao W X, Yang Y Z, *et al.* Variations in light

- absorption properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, **30**(9): 1085-1094.
- [26] Brewin R J W, Devred E, Sathyendranath S, *et al.* Model of phytoplankton absorption based on three size classes [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(22): 4535-4549.
- [27] Cleveland J S. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll a concentration [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13333-13344.
- [28] Bricaud A, Babin M, Morel A, *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [29] Morel A, Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, **28**(81): 1375-1393.
- [30] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: a comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(3): 562-582.
- [31] Stramski D, Morel A. Optical properties of photosynthetic picoplankton in different physiological states as affected by growth irradiance [J]. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1990, **37**(2): 245-266.
- [32] Partensky F, Hoepffner N, Li W K W, *et al.* Photoacclimation of *Prochlorococcus* sp. (Prochlorophyta) strains isolated from the north Atlantic and the Mediterranean Sea [J]. *Plant Physiology*, 1993, **101**(1): 285-296.
- [33] Ciotti á M, Lewis M R, Cullen J J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(2): 404-417.
- [34] Lohrenz S E, Weidemann A D, Tuel M. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition [J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(1): 33-61.
- [35] Brewin R J W, Sathyendranath S, Hirata T, *et al.* A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean [J]. *Ecological Modelling*, 2010, **221**(11): 1472-1483.
- [36] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans (1978-2012)*, 2003, **108**(C7): 1-20.
- [37] Bricaud A, Babin M, Claustre H, *et al.* Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 2010, **115**(C8): 488-507.
- [38] Yao P, Yu Z G, Deng C M, *et al.* Classification of marine diatoms using pigment ratio suites [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, **29**(5): 1075-1085.
- [39] Zapata M, Fraga S, Rodríguez F, *et al.* Pigment-based chloroplast types in dinoflagellates [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, **465**: 33-52.
- [40] Johnsen G, Nelson N B, Jovine R V M, *et al.* Chromoprotein- and pigment-dependent modeling of spectral light absorption in two dinoflagellates, *Prorocentrum minimum* and *Heterocapsa pygmaea* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, **114**: 245-258.
- [41] Bidigare R R, Ondrusek M E, Morrow J H, *et al.* In vivo absorption properties of algal pigments [J]. *SPIE Ocean Optics X*, 1990, **1302**: 290-302.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行