

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征

赖俊翔^{1,2}, 俞志明¹, 宋秀贤¹, 韩笑天¹, 曹西华¹, 袁涌铨¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根据2009年5月、11月和2010年6月对长江口及邻近海域调查结果, 利用反相高效液相色谱技术(RP-HPLC)对该海域浮游植物特征色素组成和分布进行了研究, 并应用CHEMTAX软件研究了浮游藻类群落组成。结果表明, 在长江口及邻近海域分离鉴定了21种浮游植物色素, 主要的色素种类为叶绿素a、多甲藻黄素、岩藻黄素、19'-丁酰基氧化岩藻黄素、19'-己酰基氧化岩藻黄素、叶绿素b、硅甲藻黄素、别黄素和玉米黄素, 以叶绿素a的含量最高, 其次是岩藻黄素, 其他色素对总色素含量贡献较低。2009年5月和2010年6月航次期间通过对色素的分析检测到甲藻和硅藻藻华。主要特征色素的含量及分布特征与盐度、营养盐等环境因子关系密切。特征色素组成和分布特征表明, 研究海域浮游植物种类主要存在硅藻、甲藻、隐藻、绿藻、蓝藻、定鞭藻、金藻和青绿藻等8个类群。CHEMTAX分析结果表明, 2009年5月硅藻、甲藻和绿藻是最主要的类群; 2009年11月硅藻在群落结构中处于绝对优势; 2010年6月, 硅藻、甲藻和隐藻贡献了62.5%的叶绿素a生物量, 蓝藻所占的比重明显有所上升。浮游植物群落结构在空间分布上有着明显差异, 呈现区域性特征, 硅藻、绿藻和隐藻在近岸海域所占比重较高, 而定鞭藻、金藻和蓝藻在外海区域的站位对生物量的贡献明显上升。

关键词: 浮游植物; 色素; 群落结构; 长江口

中图分类号: X52; X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3405-11

Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas

LAI Jun-xiang^{1,2}, YU Zhi-ming¹, SONG Xiu-xian¹, HAN Xiao-tian¹, CAO Xi-hua¹, YUAN Yong-quan¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Three cruises were carried out in the Yangtze Estuary and its adjacent areas in May, November, June during 2009-2010. The spatial variations of phytoplankton community structure were investigated based on RP-HPLC analysis of pigments and CHEMTAX processing of the pigment data. 21 kinds of pigments were detected, among which chlorophyll a, peridinin, fucoxanthin, 19'-butanoyloxyfucoxanthin, 19'-hexanoyloxyfucoxanthin, chlorophyll b, diadinoxanthin, alloxanthin and zeaxanthin were the major pigments in the Yangtze Estuary and its adjacent areas. Chlorophyll a was the most abundant in all pigments, followed by fucoxanthin. Other pigments generally contributed a minor proportion to the total pigments. High concentrations of fucoxanthin and peridinin were observed in May 2009 and June 2010, indicating blooms of diatoms and dinoflagellates. The results showed that the composition and distribution of phytoplankton pigments were influenced by environmental factors. The phytoplankton community, as determined by biomarker pigment concentration using HPLC and CHEMTAX, was composed mainly of diatoms, dinoflagellates, cryptophytes, chlorophytes, cyanobacteria, prymnesiophytes, chrysophytes and prasinophytes. The dominant algal groups were diatoms, dinoflagellates and chlorophytes in May 2009. The phytoplankton community was characterized by high contribution of diatoms in November 2009. Diatoms, dinoflagellates and cryptophytes accounted for 62.5% of chlorophyll a in June 2010, and the relative abundance of cyanobacteria was higher in this cruise. The spatial variations of phytoplankton community structure featured distinct regionality. Diatoms, chlorophytes and cryptophytes were the main groups in the inshore waters, and the abundances of prymnesiophytes, chrysophytes and cyanobacteria were increasing from inshore to the open sea.

Key words: phytoplankton; pigment; community structure; Yangtze Estuary

浮游植物是海洋生态系统中最重要初级生产者, 构成了海洋食物链中的基础环节, 在海洋生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着重要的作用^[1]。在河口区域, 理化环境复杂多变与浮游植物群落组成和数量分布的时空变化有着密切关系, 其中营养盐是控制浮游植物生长最主要的环境因子之一^[2]。另一方面, 浮游植物的群落组成和分布变化可以敏感地反映出环境变化对生态系统的影响。

浮游植物的鉴定和计数通常是通过显微镜镜检, 这种分析方法专业水平要求高、费时费力且一些微型浮游植物类群很难得到检测, 有必要寻找新的方法

收稿日期: 2012-12-19; 修订日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金创新研究团体项目(41121064); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB428706); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA09Z107)

作者简介: 赖俊翔(1984~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为海洋环境科学, E-mail: laijunxiang@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zyu@qdio.ac.cn

加以补充^[3]. 随着高效液相色谱(HPLC)色素分析技术的发展,越来越多的藻类色素被检测出来,人们发现不同的浮游藻类群具有不同的特征光合色素,比如岩藻黄素被认为主要来自于硅藻;19'-己酰基氧化岩藻黄素是定鞭藻的标志物;而玉米黄素主要和蓝藻有关;多甲藻黄素和叶绿素 c_2 被认为是甲藻的标志物;别黄素则是隐藻独一无二的标志物;二烯基叶绿素 a 是原绿球藻的特征色素. 叶绿素 a 被用来指示浮游藻类的生物量,后根据一定的计算方法通过特征光合色素浓度可以计算不同藻类类群对总叶绿素 a 的贡献. 近年来 Mackey 等^[4] 发展的一种矩阵因子化程序 CHEMTAX,这个程序通过最陡下降算法来计算最适合的浮游植物各类群的色素比值,进而分析海水中较高分类学水平上的藻类群落组成和丰度.

长江是我国最大的河流,也是世界第三大河,年平均径流总量达到 $9.0 \times 10^{11} \text{ m}^3$. 近年来,随着长江流域社会经济的高速发展,将大量营养物质带入长江口海域,使得长江口及邻近海域富营养化加剧,改

变了该海域的浮游植物群落结构^[5]. 特别是三峡工程建成蓄水后,所引起的长江口及邻近海域浮游植物群落组成的长期变化受到人们越来越多的关注. 目前,有关长江口及邻近海域光合色素的研究主要集中在叶绿素 a 生物量和粒级组成特征等方面,而关于特征色素以及利用 CHEMTAX 研究浮游藻类群落组成的报道还十分有限^[2, 6~10].

本实验对长江口及邻近海域的浮游植物光合色素组成和分布特点进行了研究,并应用 CHEMTAX 分析了浮游藻类群落组成,以期为进一步探讨长江口水域富营养化对浮游植物的影响以及浮游植物对富营养化状况的指示作用提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究站位

于2009年5月、11月和2010年6月,分别搭载“科学1号”和“科学3号”调查船,在长江口及邻近海域各设置5个断面进行水文、化学和生物的综合调查(图1).

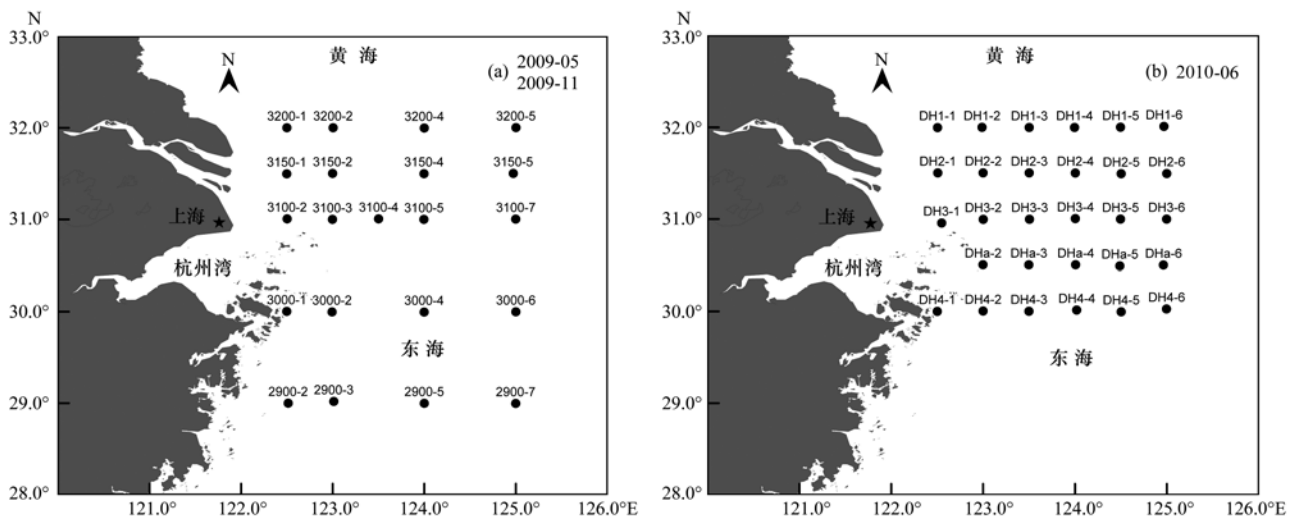


图1 采样站位示意

Fig. 1 Location of sampling stations

1.2 样品的采集与分析

现场使用 Niskin 采水器采集各站表层水样,其中营养盐水样经 GF/F 玻璃纤维滤膜(450℃灼烧 5 h)过滤后,加入氯仿 -20°C 下保存,回实验室中应用 SKALAR SAN^{plus} 营养盐自动分析仪测定. 浮游植物水样 500 mL 加入鲁哥氏液固定,带回实验室进行浮游植物物种鉴定和细胞丰度分析. 用于色素分析的水样经 200 μm 筛绢滤除大型浮游动物干扰后,在弱真空($<0.03 \text{ MPa}$)过滤到 47 mm Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜上,将滤膜折叠用锡纸包裹迅速

置于液氮中保存以减少色素转化,回到实验室进行分析. 温盐数据由 Sea Bird-CTD 现场测量获得.

1.3 浮游植物色素分析

将冷冻的滤膜解冻,吸取多余水分,置于离心管中,加入 5 mL 100% 甲醇研磨并在冰水浴中超声提取 5 min,然后通过尼龙滤膜针筒滤器(0.22 μm 孔径)以除去细胞和滤膜碎屑,后将 1 mL 的提取液和 200 μL 的超纯水混合后注入高效液相色谱(HPLC)测定. HPLC 色素分析方法是参照 Zapata 等^[11] 的方法略作修改. 分析系统为 Waters Alliance 2695 液相

色谱系统. 通过二极管阵列检测器 DAD 来检测洗出峰. 色谱柱为 Waters Symmetry C8 柱. 流动相 A: 甲醇: 乙腈: 吡啶水溶液 = 50: 25: 25 (体积比); 流动相 B: 甲醇: 乙腈: 丙酮 = 20: 60: 20 (体积比). 梯度洗脱程序如表 1 所示. 色素的鉴定是通过色素标准(色素标准品购自 Sigma 和 DHI)、二级阵列检测器获得的光谱图、保留时间等和文献中的数据比较得出, 色素的定量分析采用内标法.

表 1 HPLC 梯度洗脱程序
Table 1 HPLC linear gradient program

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0	100	0
2	95	5
22	60	40
28	5	95
38	5	95
40	100	0

表 2 用于 CHEMTAX 分析的输入色素与叶绿素 a 比值以及最终优化比值¹⁾

Table 2 Input pigment:chlorophyll a ratios and output values for CHEMTAX analysis

藻类	Perid	19'-butfu	Fucox	19'-hexfu	Neox	Pras	Diad	Violax	Allox	Zeax	Chl-b
初始比值											
青绿藻	—	—	—	—	0.046	0.32	—	0.06	—	0.03	0.89
甲藻	0.53	—	—	—	—	—	0.14	—	—	—	—
隐藻	—	—	—	—	—	—	—	—	0.229	—	—
定鞭藻	—	—	—	1.705	—	—	0.08	—	—	—	—
金藻	—	0.37	0.36	—	—	—	0.068	—	—	—	—
绿藻	—	—	—	—	0.063	—	—	0.054	—	0.009	0.263
蓝藻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.347	—
硅藻	—	—	0.46	—	—	—	0.24	—	—	—	—
优化比值											
青绿藻	—	—	—	—	0.031	0.28	—	0.05	—	0.02	0.37
甲藻	0.505	—	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—
隐藻	—	—	—	—	—	—	—	—	0.44	—	—
定鞭藻	—	—	—	0.61	—	—	0.04	—	—	—	—
金藻	—	0.17	0.27	—	—	—	0.088	—	—	—	—
绿藻	—	—	—	—	0.06	—	—	0.05	—	0.01	0.36
蓝藻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33	—
硅藻	—	—	0.43	—	—	—	0.073	—	—	—	—

1) Perid: 多甲藻黄素, 19'-butfu: 19'-丁酰基氧化岩藻黄素, Fucox: 岩藻黄素, 19'-hexfu: 19'-己酰基氧化岩藻黄素, Neox: 新黄素, Pras: 青绿素, Diad: 硅甲藻黄素, Violax: 紫黄素, Allox: 别黄素, Zeax: 玉米黄素, Chl-b: 叶绿素 b, 下同

1.5 数据处理

采用 Pearson 系数进行相关性分析, 当 $P < 0.05$ 为显著相关, 当 $P < 0.01$ 为极显著相关.

2 结果与分析

2.1 研究海域环境特征

研究海域各航次表层海水中环境参数的平均值及变化范围见表 3. 2009 年 5 月, 研究海域的表层平均温度为 19.61℃. 表层平均盐度为 29.50

1.4 浮游植物群落组成分析

根据检测到的特征色素种类和显微镜镜检到的藻类类群, 将浮游植物类群主要分为硅藻 (Diatoms)、甲藻 (Dinoflagellates)、隐藻 (Cryptophytes)、定鞭藻 (Prymnesiophytes)、金藻 (Chrysophytes)、绿藻 (Chlorophytes)、青绿藻 (Prasinophytes) 和蓝藻 (Cyanobacteria). 浮游植物各类群丰度是通过 CHEMTAX 矩阵因子程序对 12 种特征色素分析得来, 表示为叶绿素 a 生物量 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). CHEMTAX 是从藻类初始特征色素与叶绿素 a 比值出发, 再根据由 HPLC 分析所得的原始色素数据, 通过最速下降算法反复地优化一个包含每一个藻种的色素比率矩阵, 来定量地确定浮游植物种群组成和丰度. 各浮游植物类群的特征光合色素与叶绿素 a 比值初始值见文献 [2, 4, 6] 所报道的 (表 2).

(15.86 ~ 21.61), 受长江冲淡水影响区域盐度较低 (图 2). 溶解无机氮 (DIN) 和硅酸盐 ($\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$) 的分布均有从长江口近岸向外海递减的趋势, 它们与盐度均有极显著的相关性, 相关系数分别为 -0.851 ($P < 0.01$) 和 -0.707 ($P < 0.01$). 磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 浓度较低, 最高值出现在 3200-4 和 3200-5 站, 近岸海域的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较高. N:P 值在近岸海域较高, 一般大于 30, 随着离岸距离增加, N:P 开始下降.

2009 年 11 月,研究海域的表层平均温度为 18.57℃. 表层的平均盐度较 5 月有所上升,31 度等盐线明显向西移(图 2),这与长江径流量变化的影响有关. DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的分布均有从长江口近岸向外海递减的趋势,与盐度均呈显著负相关关系($P < 0.05$).

2010 年 6 月,由于进入夏季海水表层温度略

高于 2009 年 5 月,平均水温为 21.56℃. 表层盐度也呈现受冲淡水影响,形成明显的盐度梯度,由近岸向外海升高,与 11 月相比等盐线向东延伸(图 2). 从水平分布趋势看,DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 与盐度均呈显著负相关关系($P < 0.01$),由长江口近岸向外海方向,营养盐浓度总体呈下降趋势.

表 3 长江口及邻近海域水体指标的季节变化

水体指标	2009 年 5 月		2009 年 11 月		2010 年 6 月	
	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
盐度	29.50	19.29 ~ 33.25	32.43	25.37 ~ 34.04	29.04	17.28 ~ 32.34
水温/℃	19.61	15.86 ~ 21.61	18.57	12.16 ~ 21.49	21.56	20.03 ~ 23.60
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	9.00	3.70 ~ 37.15	10.45	4.07 ~ 31.12	18.10	5.68 ~ 43.91
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.18	0.02 ~ 1.09	0.45	0.18 ~ 1.33	0.13	0.01 ~ 0.43
$\text{DIN}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	8.76	0.35 ~ 59.97	9.56	0.83 ~ 44.45	9.44	0.15 ~ 44.43

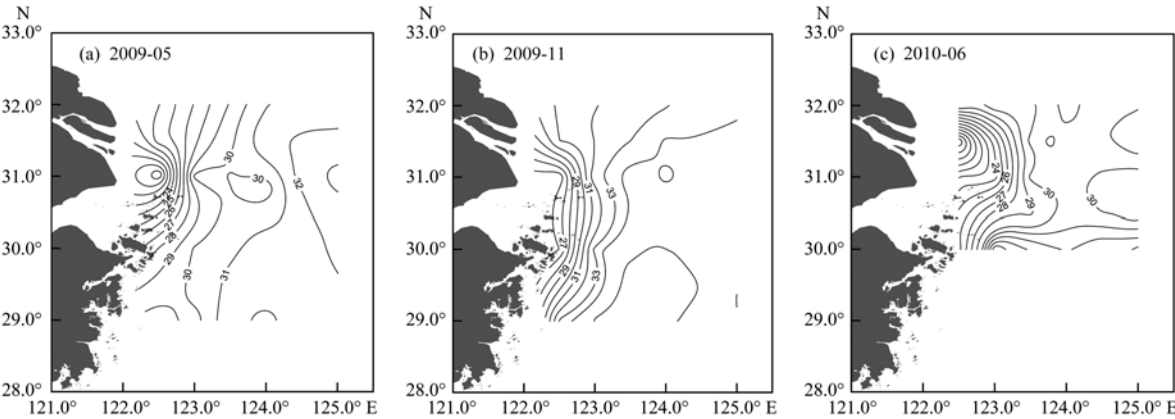


图 2 长江口及邻近海域表层盐度分布

Fig. 2 Distribution of surface salinity in the Yangtze Estuary and its adjacent areas

2.2 浮游植物色素组成和分布

调查结果显示,在长江口及邻近海域水体中存在的浮游植物特征色素主要包括:叶绿素类的叶绿素 a(Chl-a)、叶绿素 b(Chl-b)、叶绿素 $c_1 + c_2$ (Chl- $c_1 + c_2$)、脱植基叶绿素 a(Chlorophyllide a)以及类胡萝卜素类的多甲藻黄素(Peridinin)、岩藻黄素(Fucoxanthin)、19'-丁酰基氧化岩藻黄素(19'-butanoyloxyfucoxanthin)、19'-己酰基氧化岩藻黄素(19'-hexanoyloxyfucoxanthin)、新黄素(Neoxanthin)、硅甲藻黄素(Diadinoxanthin)、硅藻黄素(Diatoxanthin)、别黄素(Alloxanthin)、玉米黄素(Zeaxanthin)、叶黄素(Lutein)、 β , β -胡萝卜素(β , β -carotene)、 β , ϵ -胡萝卜素(β , ϵ -carotene)等 21 种. 从色素含量上看,浮游植物色素含量的变化范围较大,其中,叶绿素 a 和岩藻黄素的含量最高.

2009 年 5 月长江口及邻近海域主要浮游植物

色素的水平分布见图 3. 5 月正值浮游植物生长旺盛时期,调查海域叶绿素 a 浓度变化范围为 0.217 ~ 14.019 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 1.803 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;高值出现在调查海域的中西部近岸区域,3100-3 站更出现了 14.019 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高值,现场观测到水体变色现象,光学显微镜分析数据也表明该海域正发生东海原甲藻藻华. 多甲藻黄素作为甲藻的特征色素,最高值出现在 3100-3 藻华站,除藻华站外,水体中多甲藻黄素含量的平均值为 0.310 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 岩藻黄素浓度的变化范围为 0.195 ~ 1.105 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 0.289 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;高值区主要分布在调查海域近岸的中部. Pearson 相关性分析表明(表 4),岩藻黄素与叶绿素 a 显著正相关($P < 0.01$),多甲藻黄素与叶绿素 a 也呈显著正相关($P < 0.01$). 19'-己酰基氧化岩藻黄素的含量也较高,平均浓度为 0.274 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在调查海域中部出现高值. 叶绿素 b、19'-

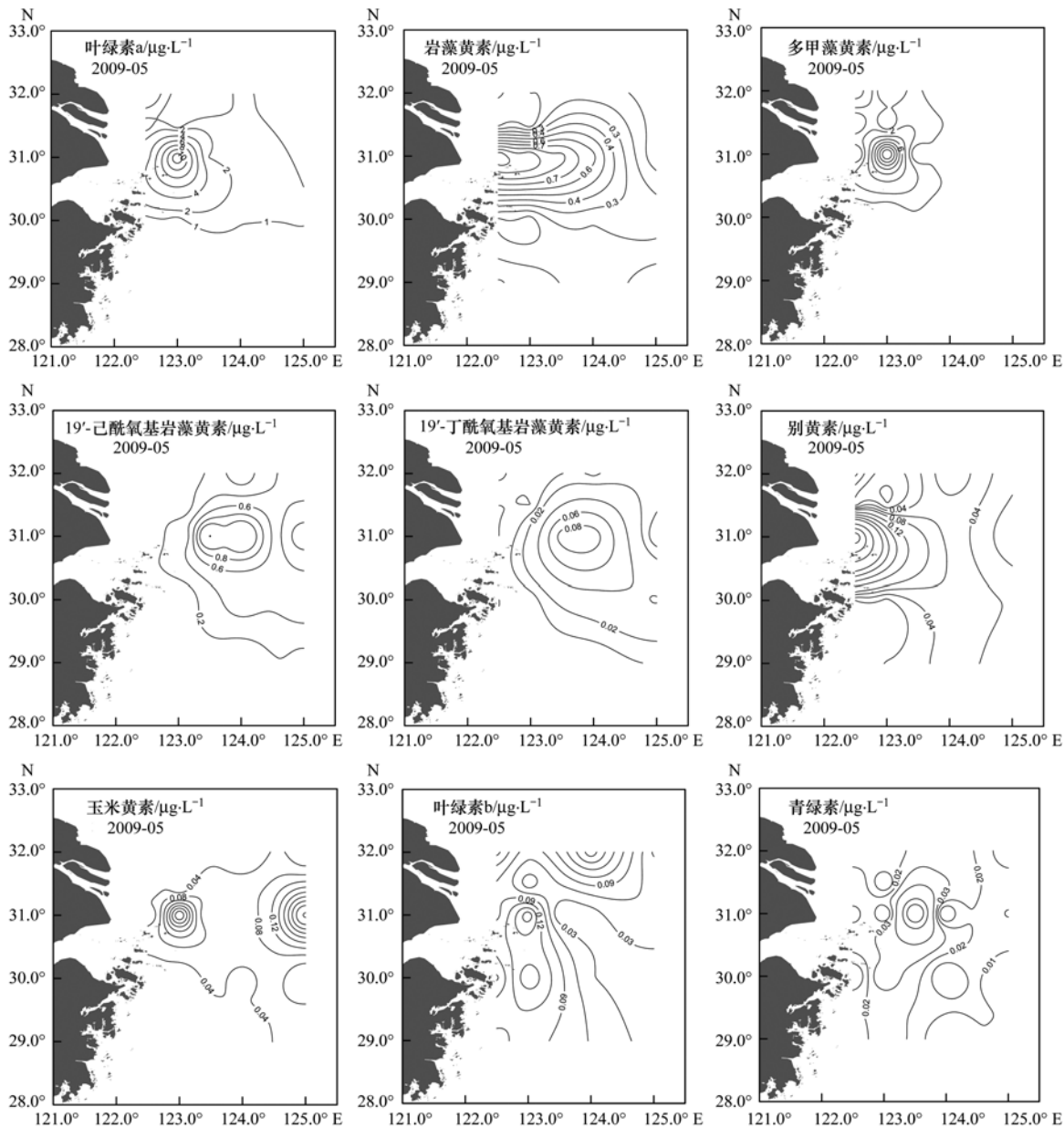


图3 2009年5月长江口及邻近海域色素分布

Fig. 3 Distributions of phytoplankton pigments in the Yangtze Estuary and its adjacent areas in May 2009

表4 长江口及邻近海域主要浮游植物色素与叶绿素a之间的相关性¹⁾

Table 4 Correlation analysis between main pigments and Chl-a in the Yangtze Estuary and its adjacent areas									
时间	项目	Perid	19'-butfu	Fucox	Pras	19'-hexfu	Allox	Zeax	Chl-b
2009-05	Chl-a	0.883 **	0.146	0.783 **	0.024	0.056	0.404	0.576 *	0.468
2009-11	Chl-a	0.409	0.228	0.872 **	0.531 *	0.321	0.702 *	0.191	0.868 *
2010-06	Chl-a	0.601 **	0.504	0.918 **	0.578 *	0.288	0.746 *	0.211	0.490 *

1) **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$

丁酰基氧化岩藻黄素、别黄素、玉米黄素和青绿素含量均较低,平均值分别为 0.090、0.017、0.072、0.052 和 0.021 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2009 年 11 月长江口及邻近海域主要浮游植物色素的水平分布见图 4。秋季,调查海域的叶绿素 a

浓度变化范围为 0.252 ~ 1.607 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 0.628 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,较春季明显降低;高值出现在调查海域的中部。其次,含量较高的特征色素就是岩藻黄素,浓度变化范围为 0.095 ~ 0.602 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 0.233 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。岩藻黄素与叶绿素 a 有相似的

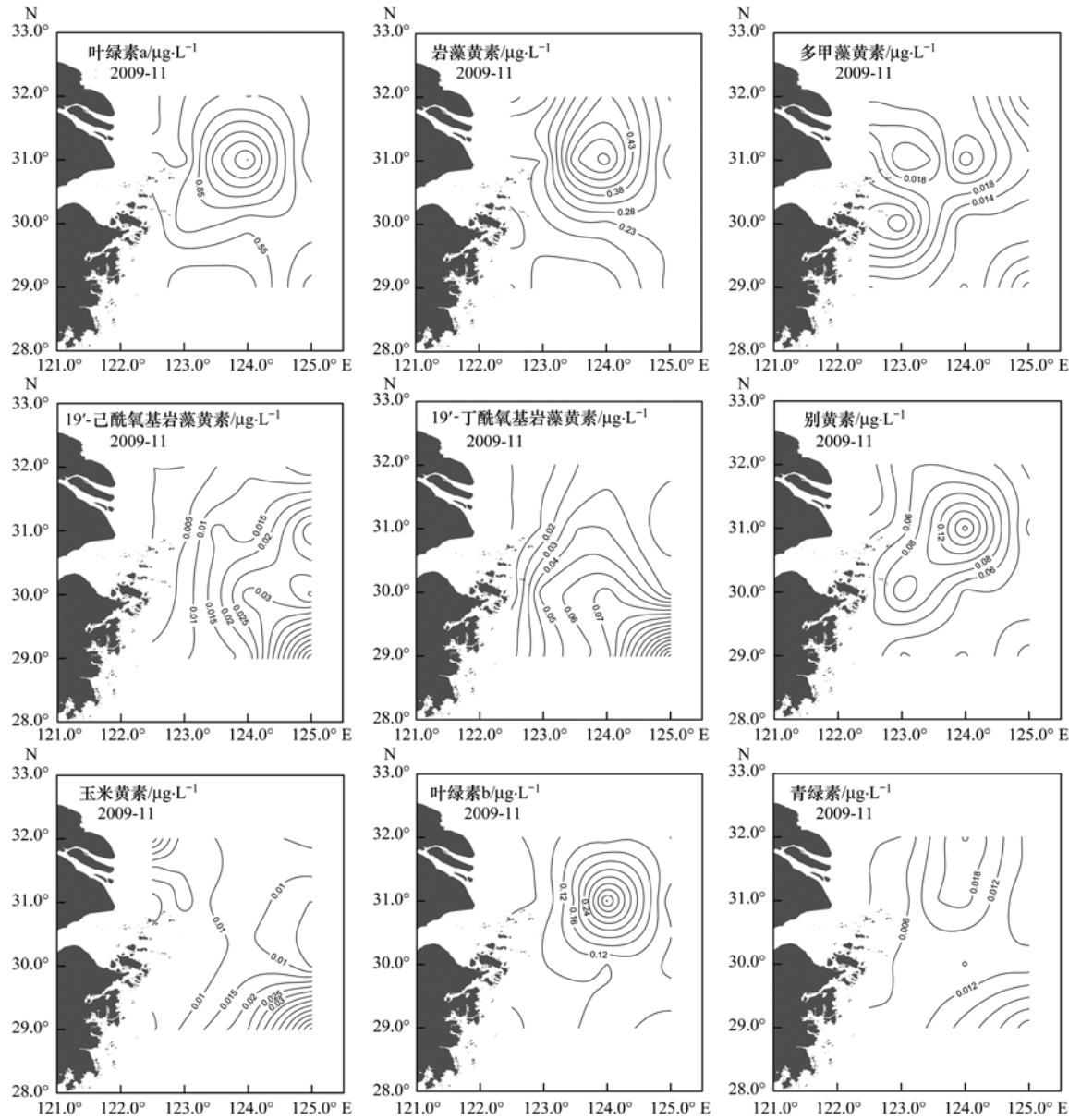


图 4 2009 年 11 月长江口及邻近海域色素分布

Fig. 4 Distributions of phytoplankton pigments in the Yangtze Estuary and its adjacent areas in November 2009

分布特征,如表 4 所示,两者呈显著相关关系($P < 0.01$);硅藻、金藻和定鞭藻都含有岩藻黄素,在这里岩藻黄素主要来自硅藻,因为金藻和定鞭藻的特征色素 19'-丁酰基氧化岩藻黄素和 19'-己酰基氧化岩藻黄素含量均较低,平均浓度分别为 $0.013 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.034 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 多甲藻黄素含量较 5 月显著下降,平均值为 $0.018 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,呈块状区域分布. 玉米黄素被认为主要来自蓝藻,11 月航次调查期间其变化范围为 $0.002 \sim 0.072 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在调查海域的东南角出现高值区. 叶绿素 b、别黄素和青绿素含量均较低且分布不均.

2010 年 6 月长江口及邻近海域主要浮游植物

色素的水平分布见图 5. 调查海域叶绿素 a 含量的变化范围为 $0.295 \sim 10.961 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.725 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,与营养盐的分布特征相似;调查期间在调查海域北部的 DH1-2、DH1-3 和 DH1-4 以及西部近岸的 DH3-1 正发生藻华,因此出现两个叶绿素 a 的高值区. 岩藻黄素浓度变化范围为 $0.015 \sim 12.797 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.939 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;最高值出现在 DH3-1,此处中肋骨条藻细胞丰度达到 $2.45 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$,表明岩藻黄素主要来自硅藻. 多甲藻黄素在调查海域北部形成高值区,最高值达到 $3.510 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,表明此处甲藻的生物量很高,显微镜分析资料也证实主要是东海原甲藻(细胞丰度达到

$1.1 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$). Pearson 相关性分析表明(表 4),岩藻黄素与叶绿素 a 显著正相关($P < 0.01$),多甲藻黄素与叶绿素 a 也呈显著正相关($P < 0.01$). 叶绿素 b、19'-丁酰基氧化岩藻黄素、19'-己酰基氧化岩藻黄素、别黄素、玉米黄素和青绿素在水平分布呈块状分布,在个别站位一些色素未检出.

将 3 个航次调查的主要色素作系统聚类分析,聚类结果见图 6. 8 种色素可明显分为 2 个类群:①岩藻

黄素、别黄素、多甲藻黄素和叶绿素 b; ②玉米黄素、19'-丁酰基氧化岩藻黄素、19'-己酰基氧化岩藻黄素和青绿素. 长江口及邻近海域主要浮游植物色素具有明显的分布特征,岩藻黄素和别黄素相似性较高,较早聚成了一类,主要分布在长江口羽状锋区域,多甲藻黄素和叶绿素 b 玉米黄素呈现块状分布特征,玉米黄素、19'-丁酰基氧化岩藻黄素、19'-己酰基氧化岩藻黄素和青绿素则主要分别在外海区.

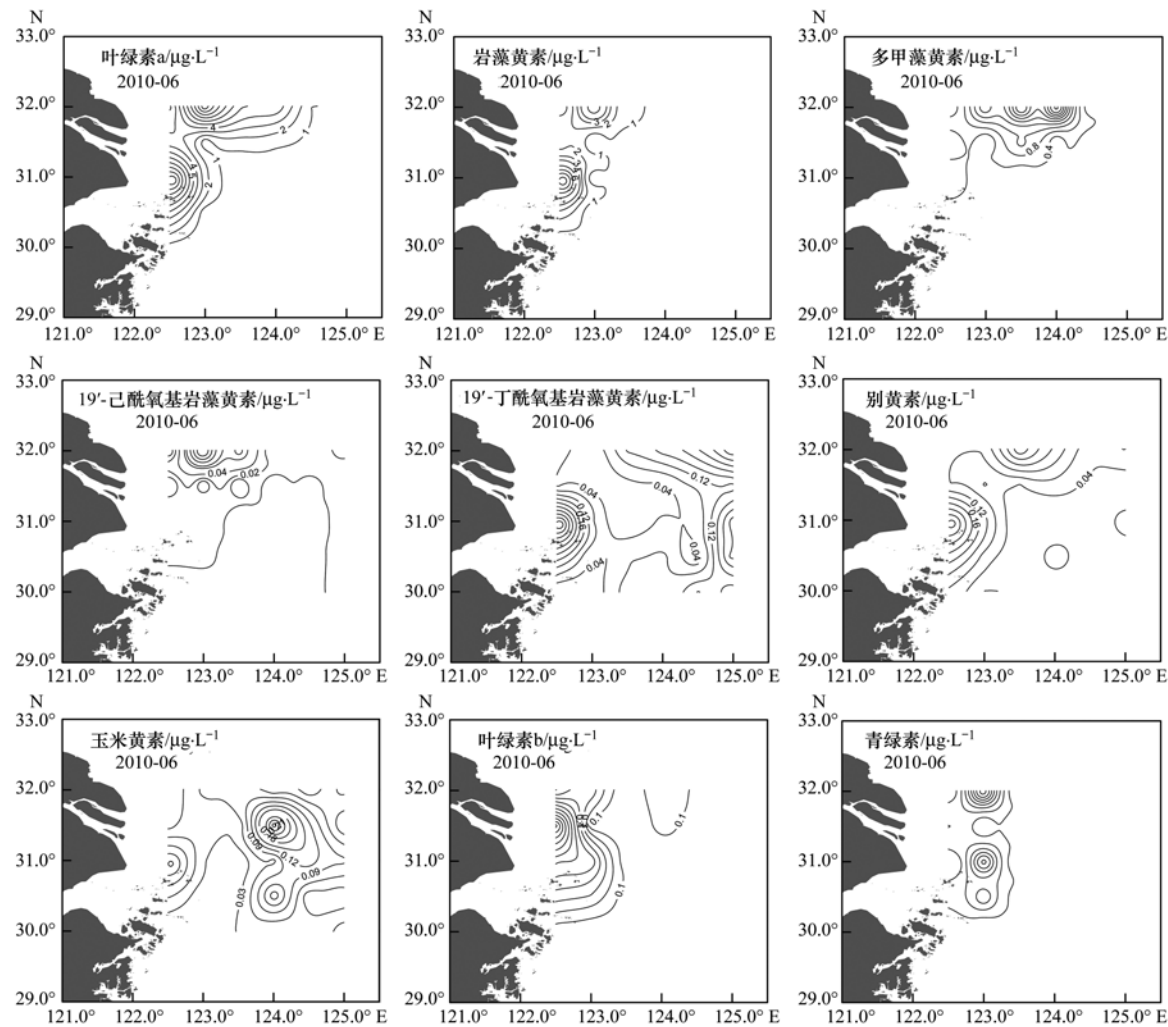


图 5 2010 年 6 月长江口及邻近海域色素分布

Fig. 5 Distributions of phytoplankton pigments in the Yangtze Estuary and its adjacent areas in June 2010

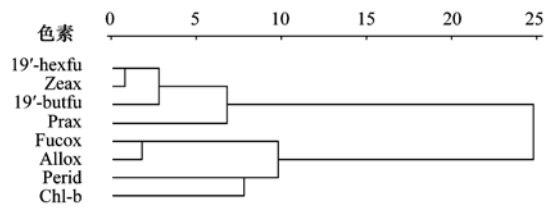


图 6 长江口及邻近海域色素聚类图

Fig. 6 Hierarchical cluster dendrogram of phytoplankton pigments in the Yangtze Estuary and its adjacent areas

2.3 浮游植物群落组成及丰度

2009 ~ 2010 年 3 个航次各站点浮游植物主要类群的组成结构如图 7、图 8 所示. 调查发现,2009 年 5 月航次浮游植物类群以硅藻、甲藻和绿藻为主,对生物量的平均贡献比重分别为 24.0%、23.5% 和 20%,其次是定鞭藻 12.0%,蓝藻、金藻和青绿藻在整个调查海域对总叶绿素 a 的贡献比重均较低. 浮游植物群落结构存在明显空间变化,绿

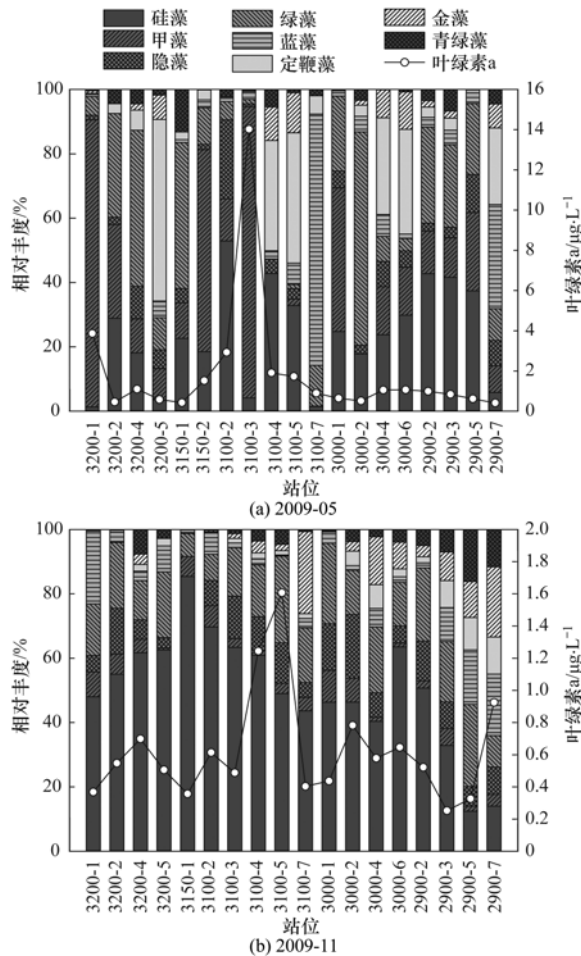


图7 2009年5月和11月调查站位浮游植物不同类群相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of different phytoplankton groups at study stations in May (top) and November (bottom) 2009

藻和隐藻在受河口输入影响较大的近岸站位比重相对较高,而定鞭藻、金藻和蓝藻在向外海区域的站位比重上升;在3100-3藻华站甲藻对总生物量的贡献达91.0%。11月,硅藻对总叶绿素a的贡献比重明显上升,为12.5%~85.4%,平均比重为52.1%,是生物量最主要的贡献者;其次是绿藻占有比较大的比重,平均值为16.9%;甲藻、隐藻、蓝藻、定鞭藻、金藻和青绿藻对总叶绿素a的平均贡献分别为4.4%、8.6%、5.6%、2.7%、5.6%和3.2%。从空间分布上近岸的站位硅藻所占比重要高于外海的站位,甲藻在近岸区域的站位比重略高于外海的站位,而蓝藻、定鞭藻和金藻则在外海的站位所占比重略高,绿藻和青绿藻的所占比重变化不大;与5月航次相比蓝藻在近岸海域的站位生物量的贡献上升。在2010年6月航次调查期间,硅藻、甲藻、隐藻、绿藻、定鞭藻、金藻和青绿藻所占平均比重分别为29.5%、15.3%、17.7%、4.1%、

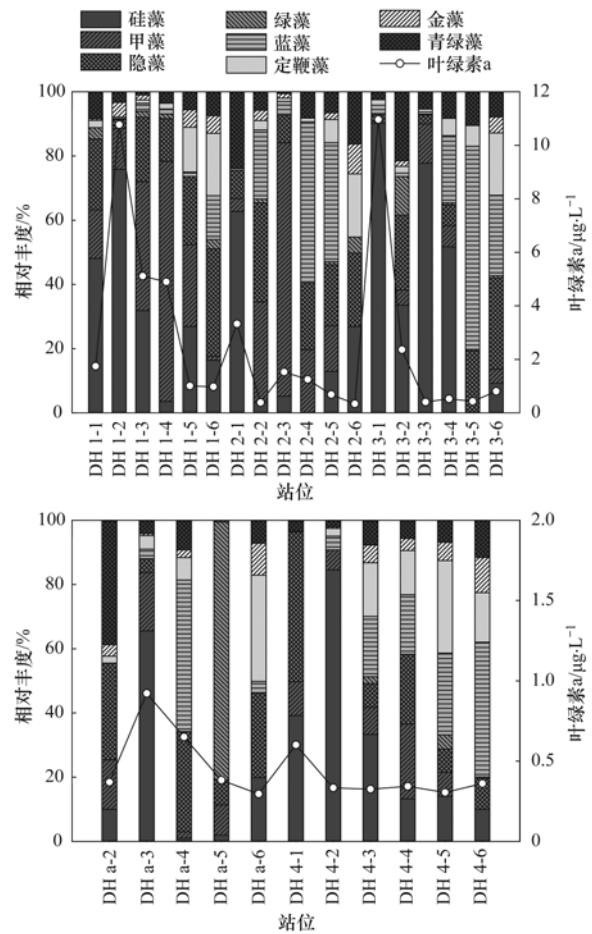


图8 2010年6月调查站位浮游植物不同类群相对丰度

Fig. 8 Relative abundance of different phytoplankton groups at study stations in June 2010

7.9%、2.9%和8.4%,此外与上两个航次相比蓝藻所占的比重明显有所上升,平均为14.1%,各类群的贡献较均衡。从空间分布上看,不同站位之间的浮游植物群落组成差异显著,在两个硅藻藻华站DH1-2和DH3-1硅藻所占的比重分别达到75.9%和90.0%;而在DH1-3和DH1-4则以甲藻为优势类群;蓝藻仍然在营养盐浓度较低的外海区域所占比重较高,在DH2-4和DH3-5蓝藻对总叶绿素a的贡献比重分别达到50.2%和63.3%。在6月的航次调查期间,青绿藻的比重也有显著提高,在DH2-1和DH a-2所占的比重分别达到23.9%和38.7%,在近岸海域青绿藻对生物量的贡献较高。

从生物量变化(图9)来看,硅藻虽然在11月所占的比重要高于6月,但是生物量显著低于6月。5月和6月调查期间,都有甲藻藻华发生,因此甲藻的生物量在这两个航次调查期间较高。绿藻、定鞭藻和金藻生物量的变化与对总生物量贡献变化相一致。而隐藻、蓝藻和青绿藻在2010年6月的生物量

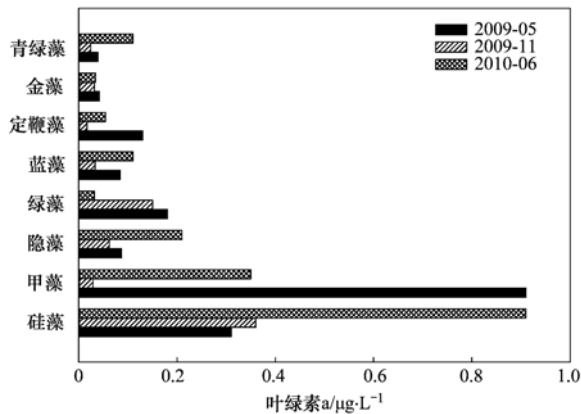


图9 3个航次浮游植物各类群的生物量

Fig. 9 Biomass of phytoplankton groups in the three cruises

显著高于另两个航次。

3 讨论

水体中浮游植物群落结构变化是色素组成和分布特征的最主要控制因素,此外光照强度、光源的光谱分布、日周期、温度、营养盐状态、离子浓度等环境条件也都可能对藻类色素的含量和组成产生影响^[12, 13]。长江口海域兼受长江径流、苏北沿岸流、东海外海水、台湾暖流和黄海冷水团等的影响,环境条件复杂多变,浮游植物的空间分布具有明显的块状分布特征,主要受海区的地理环境、水动力条件、营养盐、悬浮物等因素的制约^[14],因此特征色素的分布与环境因子之间也有着密切联系。从图2可以看出,沿长江口冲淡水扩展方向,呈现很强的盐度梯度,而悬浮物直接影响了海水透光性,很大程度决定了海域叶绿素a的分布,叶绿素a的高值区主要位于长江口羽状锋区域^[9, 14]。长江口及邻近海域赤潮多发生在春夏两季^[15]。因夏季,高温低盐的冲淡水入海后与低温高盐的海水混合,盐度和水温在垂向变化较大,形成温度和盐度跃层,使得水体较为稳定,一方面浮游植物在真光层中得滞留时间延长,另一方面冲淡水携带了大量营养盐,有利于浮游植物的生长,容易引发赤潮^[14, 16],在2009年5月和2010年6月的调查中,就在长江口羽状锋区域监测到赤潮的发生。本研究结果表明(表5),岩藻黄素与DIN以及 SiO_3^{2-} -Si呈显著正相关($P < 0.05$),岩藻黄素在低盐高营养盐的长江口近岸海域含量较高,而在寡营养的外海海域含量较低,这与硅藻分布相一致,这可能由于硅藻在高营养盐的水体中,能够快速吸收营养盐而大量繁殖从而形成优势^[17, 18]。而多甲藻黄素分布受 PO_4^{3-} -P的影响较大,其与

PO_4^{3-} -P呈显著正相关($P < 0.05$),因为相对于其他营养盐, PO_4^{3-} -P对甲藻的影响更大。别黄素与DIN以及 PO_4^{3-} -P呈显著正相关($P < 0.05$),说明隐藻的分布主要受到DIN和 PO_4^{3-} -P的影响。青绿素的分布则与DIN有较好的相关性。不同类群的浮游植物对生态环境具有不同的适应性,从而导致不同的分布特征^[19]。由于粒径大的浮游植物其营养盐半饱和常数大,使其在营养盐丰富的海域更具竞争力,在营养盐丰富海域大粒径浮游植物比重就较高,而小型浮游植物营养盐半饱和常数小,因此它们在寡营养海域丰度较高^[20, 21]。调查结果也显示,蓝藻和定鞭藻主要分布在高盐度高透明度低营养盐的外海区域,与之相对应的玉米黄素和19'-己酰基氧化岩藻黄素在这些海域通常含量较高^[22]。在长江口的外海区域,蓝藻占有较高的生物量比重,可能的原因是:在这些海域硝酸盐含量较低,限制了浮游植物的生长,而一些蓝藻种类比如束毛藻能够通过固氮获取氮营养,它们能够在低硝酸盐环境下获得竞争优势^[8]。历史资料表明,在长江口海域,浮游植物群落结构的季节变化有这样的规律,甲藻丰度在进入春季后迅速上升而在6月以后迅速下降^[5],本研究调查结果也显示,5月和6月调查海域多甲藻黄素的含量均显著高于11月。

近年来,国内外许多研究者已经成功地应用CHEMTAX来研究海洋中浮游植物的群落结构,并取得了较理想的结果^[7-8, 23-26]。利用显微镜对主要浮游植物类群丰度分析的结果与CHEMTAX分析得到的结果之间有较好的相关性,显微镜的硅藻计数值与利用CHEMTAX分析所得的硅藻的叶绿素a贡献值呈显著相关($r = 0.77, P < 0.01$),显微镜的甲藻计数值与甲藻的叶绿素a贡献值呈显著相关性($r = 0.70, P < 0.01$),两种方法分析结果都表明硅藻和甲藻是对总叶绿素a贡献最大的两个类群,这说明了CHEMTAX用来估算浮游藻类丰度的有效性。

长江口及邻近海域富营养化对浮游植物的一个重要影响就是改变了浮游植物的群落结构,与历史资料相比,一个重要的特征就是硅藻比重下降,甲藻比重上升^[5],且有研究者通过浮游植物粒级叶绿素a分析表明小型浮游植物($< 20 \mu\text{m}$)在长江口占有很大的比重^[27, 28]。本研究也支持了这些观点,在2009年5月和2010年6月硅藻对总叶绿素a的贡献未超过50%,而甲藻在调查中成为重要的贡献者。隐藻、蓝藻、定鞭藻以及青绿藻等粒径较小的浮游植物类群也对生物量有较大贡献,Furuya等^[6]

和陈纪新等^[8]在研究东海浮游植物群落结构时也发现了类似的结果,其中多数类群是属于微型和微型浮游植物,它们当中许多种类缺少明显的形态特征或很脆弱难以保存,在显微镜下难以鉴定.青绿藻就是一种超微型浮游植物,Furuya 等^[6]的研究发现青绿藻在东海海域特别是黑潮水中是比较常见的.本研究中,在长江口及邻近海域中存在较普遍的青绿素分布,平均含量为 $0.021 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这表明青绿藻在长江口海域的浮游植物群落结构中也占有

重要的地位.此外,在 124°E 以东海域的样品中检测到少量二乙基叶绿素 a,表明研究海域存在原绿球藻的分布.原绿球藻是迄今发现的唯一不以正常叶绿素为光合色素的浮游植物,在海洋生态系统中占有重要的生态地位,研究者直到 20 世纪 90 年代初才发现这一浮游植物类群并对其命名,Furuya 等^[6]和陈纪新等^[8]研究了原绿球藻在我国东海 PN 断面的分布,发现其主要分布于 124°E 以东海区,与本研究结果一致.

表 5 长江口及邻近海域主要浮游植物色素与环境因子之间的相关性

Table 5 Correlation analysis between main pigments and environmental factors in the Yangtze Estuary and its adjacent areas

环境因子	Perid	19'-butfu	Fucos	Pras	19'-hexfu	Allox	Zeax	Chl-b	Chl-a
盐度	-0.064	0.091	-0.471 *	-0.026	0.045	-0.371 *	0.092	-0.461 **	-0.181
水温	-0.016	0.197	0.185	0.121	0.051	-0.036	0.126	0.132	0.084
DIN	-0.023	-0.045	0.598 **	0.344	-0.068	0.566 **	-0.126	0.413 **	0.366 *
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	0.562 *	-0.076	-0.043	0.021	-0.041	0.403 *	-0.160	0.101	-0.048
$\text{SiO}_4^{2-}-\text{Si}$	0.114	0.005	0.512 *	0.042	-0.071	0.434 *	0.007	0.441 **	0.316 *

4 结论

(1)长江口及其邻近海域的海水中存在多种浮游植物特征色素,主要的色素种类有叶绿素 a、叶绿素 b、多甲藻黄素、岩藻黄素、19'-丁酰基氧化岩藻黄素、19'-己酰基氧化岩藻黄素、硅甲藻黄素、别黄素、玉米黄素等.从色素含量上看,各种色素含量的变化范围较大,其中,叶绿素 a 和岩藻黄素的含量最高.

(2)特征色素的含量及分布特征受到盐度、营养盐等环境因子的影响,岩藻黄素与 DIN 以及 $\text{SiO}_4^{2-}-\text{Si}$ 呈显著正相关,多甲藻黄素则与 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 呈显著正相关,别黄素与 DIN 以及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 均呈显著正相关.

(3)特征色素组成和分布特征表明长江口及邻近海域可能存在的主要浮游植物类群包括硅藻、甲藻、隐藻、绿藻、蓝藻、定鞭藻、金藻和青绿藻.调查期间,硅藻是最主要的类群,其次是甲藻和绿藻,隐藻、蓝藻、定鞭藻以及青绿藻这些粒径较小的浮游植物类群也对生物量有较大贡献.浮游植物群落结构存在明显的区域性分布特征,硅藻、绿藻和隐藻在近岸海域所占比重较高,而定鞭藻、金藻和蓝藻在外海区域的站位对生物量的贡献明显上升.

参考文献:

[1] Falkowski P G, Barber R T, Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production [J]. Science, 1998, **281**(5374): 200-206.

[2] Zhu Z Y, Ng W M, Liu S M, *et al.* Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: A study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2009, **84**(3): 393-401.

[3] 姚鹏,于志刚,米铁柱.海洋浮游藻类的化学分类法[J].海洋环境科学,2003, **22**(1): 75-80.

[4] Mackey M D, Mackey D J, Higgins H W, *et al.* CHEMTAX-A program for estimating class abundances from chemical markers: Application to HPLC measurements of phytoplankton [J]. Marine Ecology-Progress Series, 1996, **144**(1-3): 265-283.

[5] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River [J]. Continental Shelf Research, 2008, **28**(12): 1483-1489.

[6] Furuya K, Hayashi M, Yabushita Y, *et al.* Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2003, **50**(2): 367-387.

[7] 陈纪新,黄邦钦,贾锡伟,等.利用光合色素研究厦门海域超微型浮游植物群落结构[J].海洋环境科学,2003, **22**(3): 16-21.

[8] 陈纪新,黄邦钦,刘媛,等.应用特征光合色素研究东海和南海北部浮游植物的群落结构[J].地球科学进展,2006, **21**(7): 738-746.

[9] 余小青,金海燕,陈建芳,等.2009年初夏长江口及毗邻海区表层浮游植物群落结构的色素表征[J].海洋学研究,2011, **29**(3): 145-154.

[10] 赖俊翔,俞志明,宋秀贤,等.利用特征色素研究长江口海域浮游植物对营养盐加富的响应[J].海洋科学,2012, **36**(5): 42-52.

[11] Zapata M, Rodriguez F, Garrido J L. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method

- using a reversed phase C-8 column and pyridine-containing mobile phases[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2000, **195**: 29-45.
- [12] Schluter L, Mohlenberg F, Havskum H, *et al.* The use of phytoplankton pigments for identifying and quantifying phytoplankton groups in coastal areas: testing the influence of light and nutrients on pigment/chlorophyll *a* ratios[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2000, **192**: 49-63.
- [13] 丛敏, 江涛, 吕颂辉, 等. 珠江口水域表层水体光合色素分布特征研究[J]. *海洋环境科学*, 2012, **31**(3): 305-309, 336.
- [14] 李云, 李道季, 唐静亮, 等. 长江口及毗邻海域浮游植物的分布与变化[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 719-729.
- [15] 刘录三, 李子成, 周娟, 等. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2497-2504.
- [16] 蒲薪明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 II. 春季的营养限制情况[J]. *海洋学报*, 2001, **23**(3): 57-65.
- [17] Tilman D, Kiesling R, Sterner R, *et al.* Green, bluegreen and diatom algae: taxonomic differences in competitive ability for phosphorus, silicon and nitrogen[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, **106**(4): 473-485.
- [18] Sarthou G, Timmermans K R, Blain S, *et al.* Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review[J]. *Journal of Sea Research*, 2005, **53**(1-2): 25-42.
- [19] 蓝文陆, 王晓辉, 黎明民. 应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构[J]. *生态学报*, 2011, **31**(13): 3601-3608.
- [20] Gibb S W, Cummings D G, Irigoien X, *et al.* Phytoplankton pigment chemotaxonomy of the northeastern Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, **48**(4-5): 795-823.
- [21] 彭欣, 宁修仁, 孙军, 等. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3959-3968.
- [22] Gibb S W, Barlow R G, Cummings D G, *et al.* Surface phytoplankton pigment distributions in the Atlantic Ocean: an assessment of basin scale variability between 50 degrees N and 50 degrees S[J]. *Progress in Oceanography*, 2000, **45**(3-4): 339-368.
- [23] Rodriguez F, Varela M, Zapata M. Phytoplankton assemblages in the Gerlache and Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) determined by light microscopy and CHEMTAX analysis of HPLC pigment data[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, **49**(4-5): 723-747.
- [24] Eker-Develi E, Berthon J F, Van der Linde D. Phytoplankton class determination by microscopic and HPLC-CHEMTAX analyses in the southern Baltic Sea[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2008, **359**: 69-87.
- [25] Lionard M, Muylaert K, Tackx M, *et al.* Evaluation of the performance of HPLC-CHEMTAX analysis for determining phytoplankton biomass and composition in a turbid estuary (Schelde, Belgium)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **76**(4): 809-817.
- [26] He X J, Peng X Y. Spatial variability of summer and autumn phytoplankton community structure in Xiamen Western Bay based on pigment analysis[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, **31**(5): 165-175.
- [27] 邓春梅, 于志刚, 姚鹏, 等. 东海、南黄海浮游植物粒级结构及环境影响因素分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2008, **38**(5): 791-798.
- [28] 宋书群, 孙军, 沈志良, 等. 长江口冬季和春季浮游植物的粒级生物量[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(3): 658-666.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHU Xian-xuan, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人