

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苈解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义

李栋^{1,2}, 姚鹏^{1,3,4*}, 赵彬^{1,2}, 王金鹏^{1,2}, 潘慧慧^{1,2}

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 3. 海洋科学与技术青岛协同创新中心, 青岛 266100; 4. 中国海洋大学海洋有机地球化学研究所, 青岛 266100)

摘要: 利用高效液相色谱法分析了长江口-浙闽沿岸表层沉积物中的色素组成和含量, 探讨了海洋初级生产力、浮游植物功能类群和浮游植物色素保存效率的空间分布特征及其影响因素。结果表明, 沉积物中的色素类型主要为沉积绿素 (chloropigments, Chlorins) [包括叶绿素 a (chlorophyll-a, Chl-a) 及其降解产物 (pheopigments, Pheo-a), 如脱镁叶绿素 a (pheophytin-a, PHTin-a)、脱镁叶绿酸 a (pheophorbide-a, PHide-a)、焦脱镁叶绿素 a (pPheophytin-a, pPHTin-a)、甾醇绿素酯 (sterol chlorin esters, SCEs) 和胡萝卜醇绿素酯 (carotenol chlorin esters, CCEs)]。Chlorins 高值区呈南北两大斑块状分布, 可能主要是受到长江冲淡水及浙闽沿岸泥质区上升流输运的营养盐的影响。研究区域内类胡萝卜素整体上无明显趋势性变化, 在长江口以及浙闽沿岸各呈现一个高值区。基于沉积物中特征类胡萝卜素比例估算得到的浮游植物功能类群中硅藻、甲藻、定鞭藻、青绿藻、隐藻和蓝藻的相对贡献分别为 $48.8\% \pm 17.4\%$ 、 $10.7\% \pm 11.5\%$ 、 $8.1\% \pm 7.2\%$ 、 $18.6\% \pm 8.2\%$ 、 $9.4\% \pm 6.4\%$ 和 $4.3\% \pm 3.2\%$ 。对营养盐水平、水体盐度等外界环境的偏好导致硅藻和甲藻比例离岸降低, 青绿藻、隐藻和蓝藻比例离岸增加。Chl-a/Pheo-a 比值的分布表明, 较高的沉积速率以及季节性的底层水体缺氧事件导致了近岸海域 (长江口最大浑浊带外缘、杭州湾湾口以及浙闽沿岸上升流区) 具有较高的沉积色素保存效率, 这些沉积色素保存效率较高的区域可能是进行海洋生态环境历史重建的理想区域, 而杭州湾水体通过舟山群岛与外部海水进行水体交换时造成的较差沉积环境可能是导致杭州湾外海具有较低沉积色素含量和较低保存效率的主要原因。

关键词: 长江口; 沉积色素; 分布; 浮游植物功能类群; 保存; 影响因素

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2791-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.08.009

Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications

LI Dong^{1,2}, YAO Peng^{1,3,4*}, ZHAO Bin^{1,2}, WANG Jin-peng^{1,2}, PAN Hui-hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Collaborative Innovation Center of Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China; 4. Institute of Marine Organic Geochemistry, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Compositions and contents of sedimentary pigments were examined using high performance liquid chromatography in order to discuss the spatial distributions of phytoplankton primary production, phytoplankton functional type and the preservation efficiency of phytoplankton pigments and their influencing factors. The results showed that: chloropigments [Chlorins, including chlorophyll-a (Chl-a) and pheopigments (Pheo-a), such as pheophytin-a (PHTin-a), pheophorbide-a (PHide-a), pPheophytin-a (pPHTin-a), sterol chlorin esters (SCEs) and carotenol chlorin esters (CCEs)] were the major type of sedimentary pigments. The nutrients inputs from Changjiang Diluted Water and upwelling in the Zhe-Min coastal mud area were the major cause for the patchy distribution with high sedimentary chloropigment contents. Carotenoid contents showed no trending changes and exhibited high values in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coasts. Based on the relative proportions of each diagnostic carotenoid to the total diagnostic carotenoids in the sediments, the relative contributions of diatoms, dinoflagellates, prymnesiophytes, prasinophytes, cryptophytes and cyanobacterias in the phytoplankton functional types were $48.8\% \pm 17.4\%$, $10.7\% \pm 11.5\%$, $8.1\% \pm 7.2\%$, $18.6\% \pm 8.2\%$, $9.4\% \pm 6.4\%$ and $4.3\% \pm 3.2\%$, respectively. The preference for external environmental conditions (e. g. nutrient level and water salinity) was the main cause for the decreasing trends of diatoms and dinoflagellates proportions and the increasing trends of prasinophytes, cryptophytes and cyanobacterias seawards. Based on the spatial distribution of Chl-a/Pheo-a ratios, the higher preservation efficiencies of sedimentary pigments in the coastal regions (e. g. outer edge of maximum turbidity zone in the Changjiang Estuary, mouth of the Hangzhou Bay and upwelling region in the Zhe-Min Coast) were mainly due to the higher sedimentation rate and seasonal occurrences of hypoxia in bottom water, and these regions with higher sedimentary pigment preservation efficiencies were probably ideal areas for the

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41176063, 41221004)

作者简介: 李栋 (1986 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: wonderfullbf@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: yaopeng@ouc.edu.cn

marine eco-environmental evolutions. The bad sedimentary environment caused by the water exchange inside and outside of Hangzhou Bay was the dominant reason for the low sedimentary pigment contents and preservation efficiencies in this region.

Key words: Changjiang Estuary; sedimentary pigments; distribution; phytoplankton functional type; preservation; influencing factors

色素是浮游植物进行光合作用的基础,主要包括叶绿素和类胡萝卜素两大类,其中叶绿素 a (chlorophyll-a, Chl-a) 普遍存在于几乎所有的浮游植物中,常被用来指示海洋初级生产力或浮游植物生物量,而具有明显分类学意义的不同类型类胡萝卜素的含量变化则被广泛用来研究浮游植物的群落组成和相对丰度,例如多甲藻黄色素(peridinin, Perid)、岩藻黄素(fucoxanthin, Fuco)、玉米黄素(zeaxanthin, Zea)和别黄素(alloxanthin, Allo)等分别用来表征甲藻、硅藻、蓝藻和隐藻的存在及相对比例^[1]. 这些浮游植物色素在由表层水体中浮游植物合成直到在沉积物中埋藏的过程中会经历光氧化降解、浮游动物摄食以及微生物分解等一系列过程而发生不同程度分解^[2],这些在沉积物中保存下来的色素虽然仅占原来水体中总量的一小部分,但是由于河口与近海较高的初级生产力和沉积速率,沉积下来的量依然相当可观,并仍然保存了水体环境中浮游植物生物量和群落组成的丰富信息,对研究沉积物中有机碳的来源和分布、沉积环境对海源有机碳的保存的影响等具有重要意义^[2~5].

长江是中国第一大河,其输运而来的大量营养盐和有机物对长江口和东海生态系统产生了重要影响^[6]. 自 20 世纪 60 年代以来,长江径流激增的溶解态无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)、无机磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)等营养盐输入已经造成长江河口区域显著地富营养化,以甲藻为优势种的有害藻华以及底层水缺氧事件的发生^[7]. 在长江口及其邻近海域,已经开展了许多针对水体中浮游植物 Chl-a 空间分布以及浮游植物群落结构的研究工作^[8~15]. 近年来,已有研究使用沉积色素作为生物标志物来反演长江口及其邻近海域的富营养化历史趋势以及气候变化对该海域浮游植物生物量的影响^[4,5,16,17]. 但诸如表层水体初级生产力、沉积速率、外界溶解氧浓度、微生物降解、浮游和底栖生物摄食、沉积物类型以及沉积水动力条件等因素均会对沉积色素的分布、降解和保存等产生影响^[2,18,19],因此如何在合适的区域选取有代表性的样品是进行浮游植物初级生产力历史重建的首要问题. 在一个比较大的区域范围内,了解沉积色素的组成、分布及其影响因素和指示意义是解决

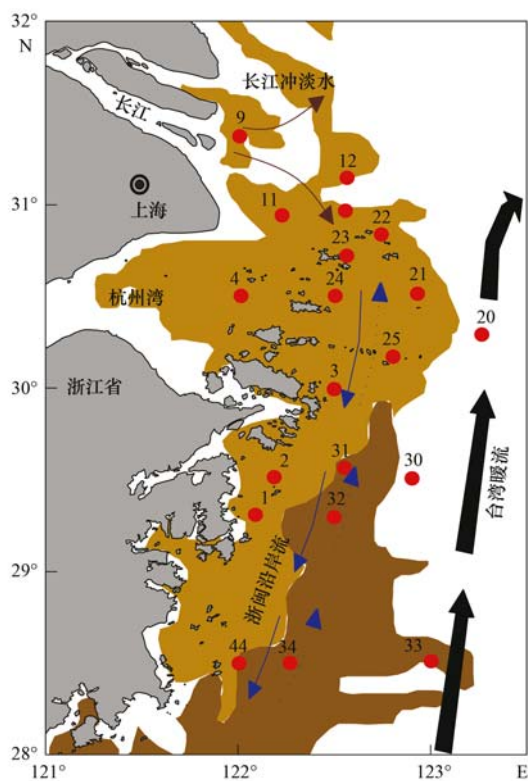
这一问题的一个思路,然而目前类似的研究还鲜见报道.

本研究的主要目的即通过对长江口-浙闽沿岸表层沉积物中浮游植物色素组成、丰度和空间分布特征的分析,探讨人类活动(主要指人类活动引起的富营养化)以及自然环境(例如浮游动物摄食和沉积水动力环境)对长江口及其邻近海域浮游植物生物量、群落功能类群及以色素为代表的海源有机碳的沉积和埋藏的影响,以期为选取适宜研究区域开展浮游植物生物量、群落结构变化及人类活动和气候变化的影响的历史重建提供基础.

1 材料与方法

于 2011 年 7 月 29 日至 8 月 3 日,利用“润江 1 号”海洋科研调查船,在长江口-浙闽沿岸使用箱式采泥器采集了 20 个站位的表层沉积物(约 0 ~ 3 cm),采样站位如图 1 所示,水深 10 ~ 72 m. 表层沉积物样品装入预先在 450℃ 下灼烧过的铝盒中,并在 -20℃ 条件下保存至岸上实验室进行下一步分析. 根据研究区域内约 0.5 ~ 6.0 cm·a⁻¹ (长江口区域约为 3.0 cm·a⁻¹,浙闽沿岸约为 1.5 cm·a⁻¹) 的沉积速率^[20],本实验中采集样品约代表过去 1 ~ 2 a 内上层水体浮游植物空间分布的综合结果.

在实验室内将沉积物用冷冻干燥机进行干燥处理,并研磨混匀. 沉积色素的提取采用文献[5]中的方法. 简单来讲,约 2 g 预先研磨过的沉积物转移到装有 6 mL 色谱纯丙酮的离心管中,涡旋振荡混合均匀,将混合物在冰水浴条件下超声 1 min, -20℃ 条件下静置保存 12 h. 离心(5 000 r·min⁻¹, 4℃)混合物,将上清液转入玻璃离心管中. 重复提取,直至上清液无色. 将多次提取的上清液混合,氮吹至干. 再使用 100 μL 色谱纯丙酮定容,用针头滤器(4 mm, 0.45 μm PTFE, Whatman)过滤后手动注射上机测定. 色素的分析采用文献[21]中的高效液相色谱方法,使用配有反相 C₁₈ 色谱柱(5 μm, 250 mm × 4.6 mm i. d., Alltech Adsorbosphere), 996 型二极管阵列检测器和岛津-RF535 型荧光检测器(激发波长 440 nm 和发射波长 660 nm)的高效液相色谱仪. 沉积物样品中色素的定性和定量基于与权威色素标准品的保留时间、最大特征吸收波长以及积分面积对比



棕色箭头代表长江冲淡水,蓝色实线和虚线箭头
代表浙闽沿岸流,黑色箭头代表台湾暖流
图 1 表层沉积物采样站位

Fig. 1 Sampling stations of surface sediments

完成,色素标准品[包括 Chl-a、脱镁叶绿素 a (pheophytin-a, PHTin-a)、脱镁叶绿酸 a (pheophorbide-a, PHide-a)、Perid、Fuco、19'-丁酰氧基岩藻黄素(19'-butanoyloxyfucoxanthin, 19'-

表 1 本研究中沉积绿素的含量变化范围与平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Ranges and averages of sedimentary chloropigments contents in this study/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

色素名称	Chl-a	PHTin-a	PHide-a	pPHTin-a	CCEs	SCEs	Chlorins
变化范围	0 ~ 1 871	86 ~ 6 061	49 ~ 1 480	61 ~ 1 344	70 ~ 1 579	61 ~ 2 822	393 ~ 9 240
平均值	304 ± 435	1 211 ± 1 285	515 ± 399	539 ± 368	505 ± 337	855 ± 685	4 028 ± 2 453

2.2 沉积物中类胡萝卜素的分布

本研究中共检测出 12 种类胡萝卜素,其含量变化及空间分布分别见表 2 和图 3. 其中,共有 6 种具有分类学意义的特征类胡萝卜素,分别为 Fuco、Perid、19'-But、Prasino、Allo 和 Zea. Fuco 是沉积物中平均含量最高的一种类胡萝卜素,在长江口 12 号站位区域以及浙江沿岸 1 号站位有较高含量[图 3 (a)]. Perid、Prasino、Allo、Zea 以及 19'-But 没有明显的趋势性变化,但具有较为一致的空间分布;同时,这些特征色素的高值区域较 Fuco 高值区离岸更远(图 3). Viola、Diadino、Anthera、Lutein 和

But)、青绿藻黄素(prasinoxanthin, Prasino)、紫黄素(violaxanthin, Viola)、Allo、叶黄素(Lutein)、Zea、β-胡萝卜素(β-carotene, β-Car)、硅甲藻黄素(diadinoxanthin, Diadino)、百合黄素(antheraxanthin, Anthera)和硅藻黄素(diatoxanthin, Diato)]从丹麦 DHI Water & Environment 购买得到. 对于没有标准的焦脱镁叶绿素 a (pPheophytin-a, pPHTin-a)、胡萝卜醇绿素酯(carotenol chlorin esters, CCEs)和甾醇绿素酯(sterol chlorin esters, SCEs),使用与 PHTin-a 相同的响应因子来进行定量^[5,22]. 该方法所得沉积色素含量单位为 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (单位质量冻干沉积物中含有的沉积色素的质量). 该方法对目标色素含量测定的相对标准偏差 < 3%, 检出限约为 $1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[3,5].

2 结果与分析

2.1 沉积物中 Chl-a 及其降解产物的空间分布

沉积物中 Chl-a 及其 5 种主要降解产物(pheopigments, Pheo-a; 包括 PHTin-a、PHide-a、pPHTin-a、CCEs 和 SCEs)的含量和空间变化如表 1 和图 2 所示. 除 PHide-a 外,大部分沉积绿素(Chlorins,包括 Chl-a 及 Pheo-a)在浙闽沿岸海域以及长江口海域均有高值区分布(图 2),其中 pPHTin-a、SCEs 和 CCEs 的含量存在一定程度自北向南逐渐增加的变化趋势[图 2 (d)、2 (e) 和 2 (f)]. PHide-a 含量则具有明显的离岸增加趋势[图 2 (c)]. 叶绿素类色素较类胡萝卜素具有更高的含量,是沉积物中的优势色素.

Diato 这些在多种浮游植物中均有存在的非特征类胡萝卜素也有检出,均具有与特征类胡萝卜素(Fuco 除外)相似的分布趋势(图 3). 此外,β-Car 的含量与 Chl-a 含量具有一致的分布趋势[图 3 (1) 和图 2 (a)].

3 讨论

3.1 长江口-浙闽沿岸浮游植物生物量空间分布及其影响因素

营养盐输送可能是影响表层水体浮游植物生物量并进而影响表层沉积物中Chlorins空间分布的最

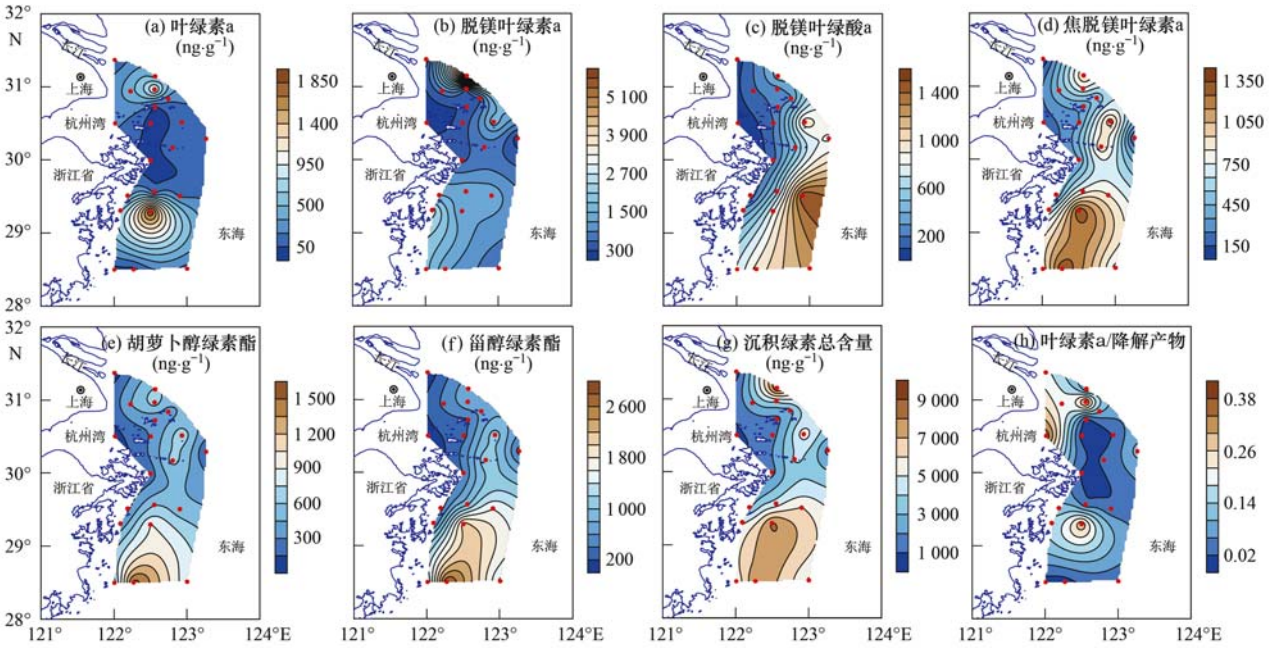


图2 研究区域表层沉积物中 Chl-a、Pheo-a、Chlorins 含量以及 Chl-a/Pheo-a 比值的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of Chl-a, Pheo-a, chlorins contents and Chl-a/Pheo-a ratios in the surface sediments of the study area

表2 沉积物中类胡萝卜素的含量变化范围与平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Ranges and averages of sedimentary carotenoids contents/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

色素名称	Fuco	Perid	19'-But	Prasino	Allo	Zea	Viola	Diadino	Anthera	Lutein	Diat	β -Car
变化范围	65 ~ 1 791	0 ~ 779	0 ~ 298	4 ~ 588	8 ~ 280	0 ~ 106	0 ~ 441	6 ~ 230	8 ~ 204	0 ~ 141	2 ~ 141	0 ~ 178
平均值	529 $\pm$ 441	157 $\pm$ 215	97 $\pm$ 90	199 $\pm$ 142	90 $\pm$ 78	42 $\pm$ 31	94 $\pm$ 101	91 $\pm$ 65	72 $\pm$ 64	50 $\pm$ 38	48 $\pm$ 38	30 $\pm$ 45

主要因素。在海洋浮游植物生长的勃发期(特别是夏季),由于受到自南向北流动的浙闽沿岸流、台湾暖流以及黑潮的阻隔作用,大部分富营养的长江冲淡水被极大地限制在了长江口区域^[23~25],赖俊翔等^[15]、周伟华等^[26]和林竹峰等^[27]均在长江口 31.0°N,123.0°E 区域表层水体中发现了较高的浮游植物生物量,与该研究中长江口 12 号站位海域 Chl-a 和 Chlorins 高值区分布一致[图 2(a)和 2(g)]。位于浙闽沿岸泥质区 29°N 附近海域的 Chlorins 高值区,与宁修仁等^[28]和朱建荣^[29]在浙江沿岸上升流区次表层水体中发现的叶绿素 a 高值区相一致,表明沿岸流、台湾暖流表层以及台湾暖流深层水交接区形成的显著温度跃层以及汇集的丰富营养盐促进了这一海域水体中浮游植物的旺发^[30~33]。此外,对于长江口及其邻近海域这一潜在磷限制海区,表层沉积物自北向南逐渐增加的生物可利用磷含量以及随外界水体盐度增加而增大的向外释放 DIP 的能力^[34,35],可能也是造成浙闽沿岸海域初级生产力呈现此种空间分布的原因[图 2(g)]。

水动力条件以及沉积环境差异也会影响沉积物

中浮游植物色素的空间分布。虽然,杭州湾外海水域表层水体中浮游植物生物量处于较高水平(细胞丰度约 $200 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$ 或者 Chl-a 质量浓度约为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[15,36],但杭州湾外海域沉积物中 Chl-a 和 Chlorins 含量较低[图 2(a)和 2(g)],这可能是由于杭州湾水体通过舟山群岛与外部海水进行水体交换时产生的“峡道效应”和“蚀余堆积”现象,导致了海域海底沉积物的严重冲刷^[37~39]以及沉积物中较低的黏土颗粒物贡献[图 4(c)],而这种沉积环境可能不利于上层水体产生的含有色素的浮游植物碎屑在这一区域的沉积。此外,浙闽沿岸的上升流往往会带来较高的浮游植物初级生产^[28,29],以及上升流对细粒级颗粒物的富集作用也促进了这一海域泥质区的形成^[40,41],最终导致上升流区较高的 chlorins 含量和较多的泥质沉积[图 2(g)和图 4(c)]。整体而言, chlorins 含量高值区往往对应着沉积物中细粒级颗粒物的高值区(特别是黏土组份)[图 4(b)和 4(c)],河口砂质沉积区以及外海残余砂区较低 chlorins 含量进一步证明了此结论[图 2(g)和图 4(a)]。

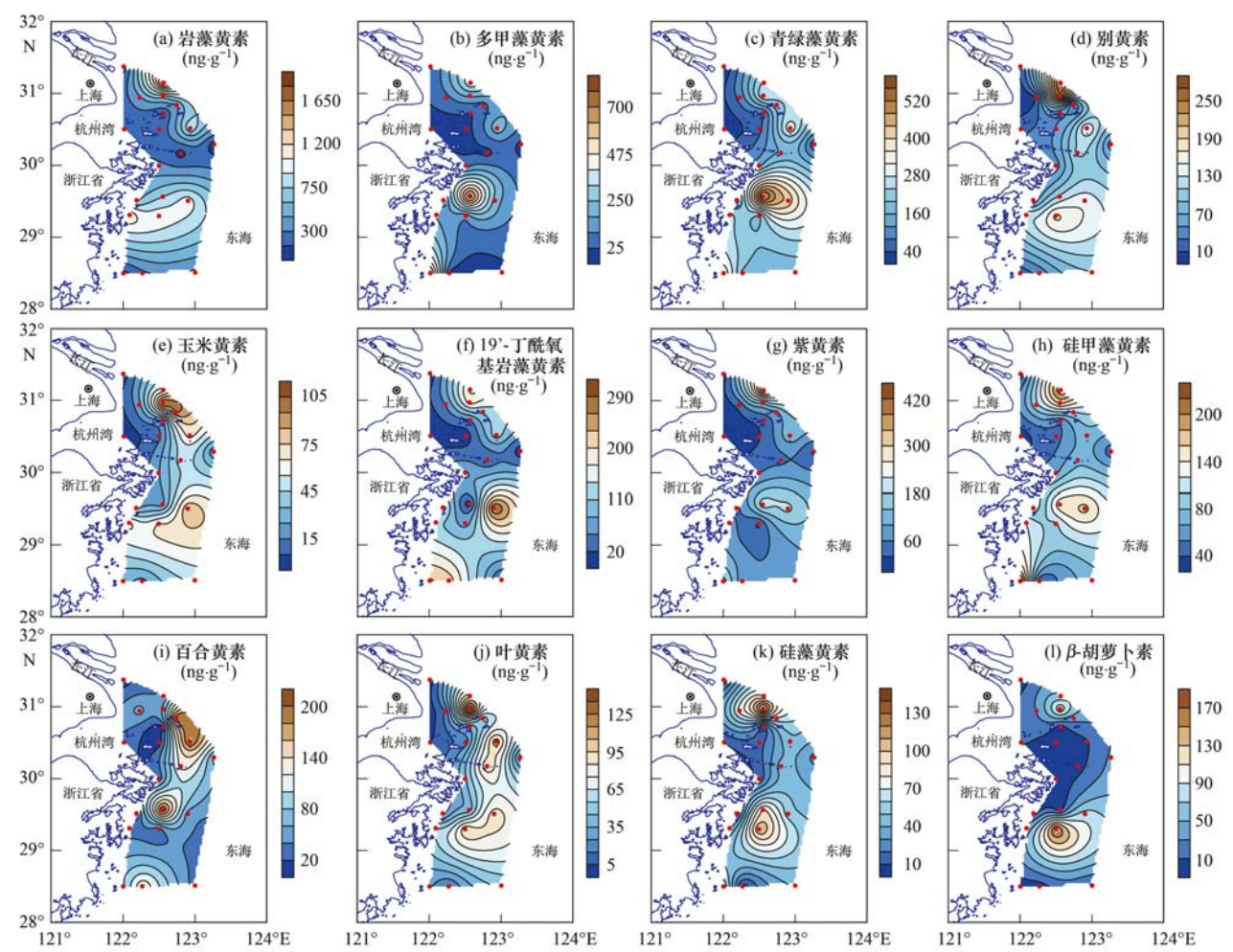
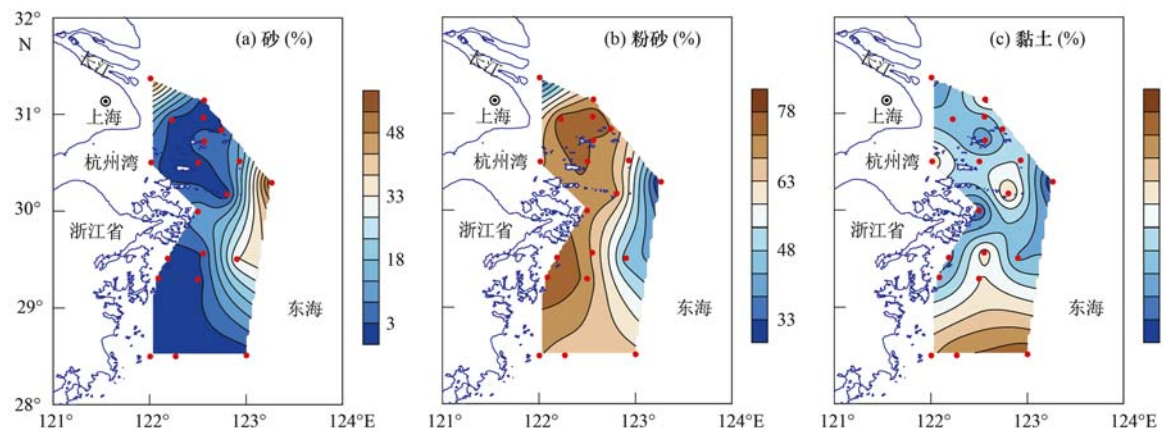


图 3 研究区域表层沉积物中类胡萝卜素含量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of carotenoid contents in the surface sediments of the study area



改自文献[42]

图 4 研究区域表层沉积物粒度组成空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of sediment compositions in the surface sediments of the study area

3.2 长江口-浙闽沿岸沉积物中浮游植物功能类群空间分布

根据不同特征类胡萝卜素对特定种类海洋浮游

植物的化学分类特性^[1,43], 本研究使用沉积物中 Fuco、19'-But、Perid、Prasino、Allo 和 Zea 这 6 种长江口及邻近海域常见特征色素各自含量与 6 种特征

色素总含量的比值,来简单估算沉积物中硅藻、定鞭藻、甲藻、青绿藻、隐藻以及蓝藻共 6 种浮游植物功能类群的相对贡献^[13,15,44,45],结果见表 3. 浮游植物功能类群具有明显空间分布差异,整体上表现为:硅藻与甲藻比例在近岸海域较高且离岸降低[图 5(a)

和 5(b)]; 定鞭藻比例在 34 号站位区域有高值区,在长江口门 9 号站位及杭州湾 4 号站位有低值区,在其它研究区域内分布较为均匀,且没有明显变化趋势;而青绿藻、隐藻以及蓝藻的相对丰度在外海区域较高且离岸逐渐增加[图 5(c)、5(d)和 5(e)].

表 3 长江口及其邻近海域水体和沉积物中浮游植物功能类群相对比例比较/%

Table 3 Relative contributions of phytoplankton functional types in the Changjiang Estuary and adjacent region/%

藻种名称	硅藻	甲藻	定鞭藻	青绿藻	隐藻	蓝藻
水体中 CHEMTAX 方法 ¹⁾	24.0 ~ 87.1 (43.3 ± 12.6)	0 ~ 41.3 (12.8 ± 12.3)	0.4 ~ 12.3 (6.3 ± 6.4)	1.5 ~ 8.4 (4.7 ± 3.5)	0.3 ~ 21.3 (10.0 ± 7.8)	1.1 ~ 25.6 (5.4 ± 4.8)
本研究表层沉积物特征色素相对比值方法	7.0 ~ 87.2 (48.8 ± 17.4)	0 ~ 48 (10.7 ± 11.5)	0 ~ 29.5 (8.1 ± 7.2)	3.5 ~ 36.7 (18.6 ± 8.2)	1.1 ~ 26.2 (9.4 ± 6.4)	0 ~ 11.2 (4.3 ± 3.2)

1) 该行数据由文献[9,13 ~ 15,44,46]中原始数据粗略计算得到

为了说明使用沉积物中特征类胡萝卜素相对比值来研究浮游植物功能类群分布和变化的可行性,将其与以往在长江口及邻近海域水体中利用 CHEMTAX 方法计算浮游植物群落结构的研究结果进行了比较. 表 3 汇总计算了相似研究区域内不同季节调查的相关研究结果^[9,13 ~ 15,44,46]. 虽然类胡萝卜素由于分子结构不同因而在海洋环境中具有不同的稳定性^[6],可能对利用沉积物中特征类胡萝卜素所占比例来表征浮游植物群落组成产生一定影响,但两种方法计算结果较为一致,可能原因是沉积色素在沉积物中的降解半衰期为年或者更长时间,相对于水体中浮游植物色素以天为半衰期的降解非常缓慢^[18],因而每种特征色素在表层沉积物中的相对比例可能较水体中还未发生明显改变. 从图 5 也可以看出,该方法所得分布趋势与前人在该海域水体中浮游植物群落结构分布的研究结果较为一致^[9,15,44],同样证明了沉积物中特征色素比值方法对上层水体浮游植物的空间分布趋势具有较好的指示作用.

上层水体浮游植物对外界营养盐水平、盐度等的偏好和耐受性可能是决定沉积物中不同种类浮游植物空间分布的主要原因. 研究表明,硅藻能够在富营养水体中快速繁殖成为优势种^[47],而长江冲淡水区富含的硅酸盐(dissolved silicate, DSi)更为硅藻合成硅质介壳提供了充足的物质基础^[48]. 过剩的 DIN、DIP 浓度可能是决定长江口及其邻近海域甲藻空间分布的主要因素^[15,49,50]. 因此,离岸逐渐降低的营养盐浓度(特别是 DSi 和 DIP)可能是决定本研究中硅藻和甲藻在近岸具有较高比例并且离岸降低的主要原因[图 5(a)和 5(b)]. 浮游植物粒径大小及其对营养盐吸收效率高、低、营养盐代谢快慢也

会通过浮游植物对外界营养盐水平的偏好和耐受性而决定浮游植物比例的空间分布^[51,52]. 隐藻(6 ~ 20 μm)、蓝藻(1 ~ 2 μm)以及青绿藻(0.1 ~ 5 μm)等粒径较小(< 20 μm)的微微型和微型浮游植物往往具有较高的营养盐吸收效率和较快的代谢速率^[14,53,54],因而在寡营养盐的长江口外混合水区占优势^[8],而对于粒径较大的硅藻(20 ~ 200 μm)和甲藻(2 ~ 200 μm)则往往在富营养的长江口冲淡水区具有更大的竞争力和比例^[11],与本研究结果一致[图 5]. 由于束毛藻等蓝藻以及青绿藻对水体高盐度、高透明度的偏好以及低营养盐水平的耐受性高,其在东海被用作黑潮水体的指示藻种^[9,46,55],因此蓝藻以及青绿藻比例由外海 123°E 海域向近岸的舌状延伸可能在一定程度上受控于黑潮水向东海近岸的入侵[图 5(d)和 5(f)].

3.3 长江口及其邻近海域沉积色素的降解和保存

凭借不同的稳定性,易降解的 Chl-a 与更稳定的 Pheo-a 含量之间的比值(Chl-a/Pheo-a)被用来指示沉积物中叶绿素的新鲜程度以及保存程度^[5]. 本研究中,Chl-a/Pheo-a 比值在离岸较近的长江口最大浑浊带外缘(13 号站位)、杭州湾湾口(4 号站位)以及浙闽沿岸中北部(32 号站位)有高值区[图 2(h)],指示这些区域具有较为新鲜的 Chl-a 输入以及较好的沉积色素保存效率,更适合作为进行海洋生态环境历史演化的研究区域.

叶绿素在水体中的降解速率较沉积物中的降解速率高 2 ~ 4 个数量级^[18],因此,颗粒物在水体中的停留时间可能是决定色素降解程度的一个最为主要的因素. Chl-a/Pheo-a 比值在沉积速率较高的泥质沉积区以及近岸海域具有高值[图 2(h)]^[20],表明随着含有浮游植物色素的海源有机物在水体中保留

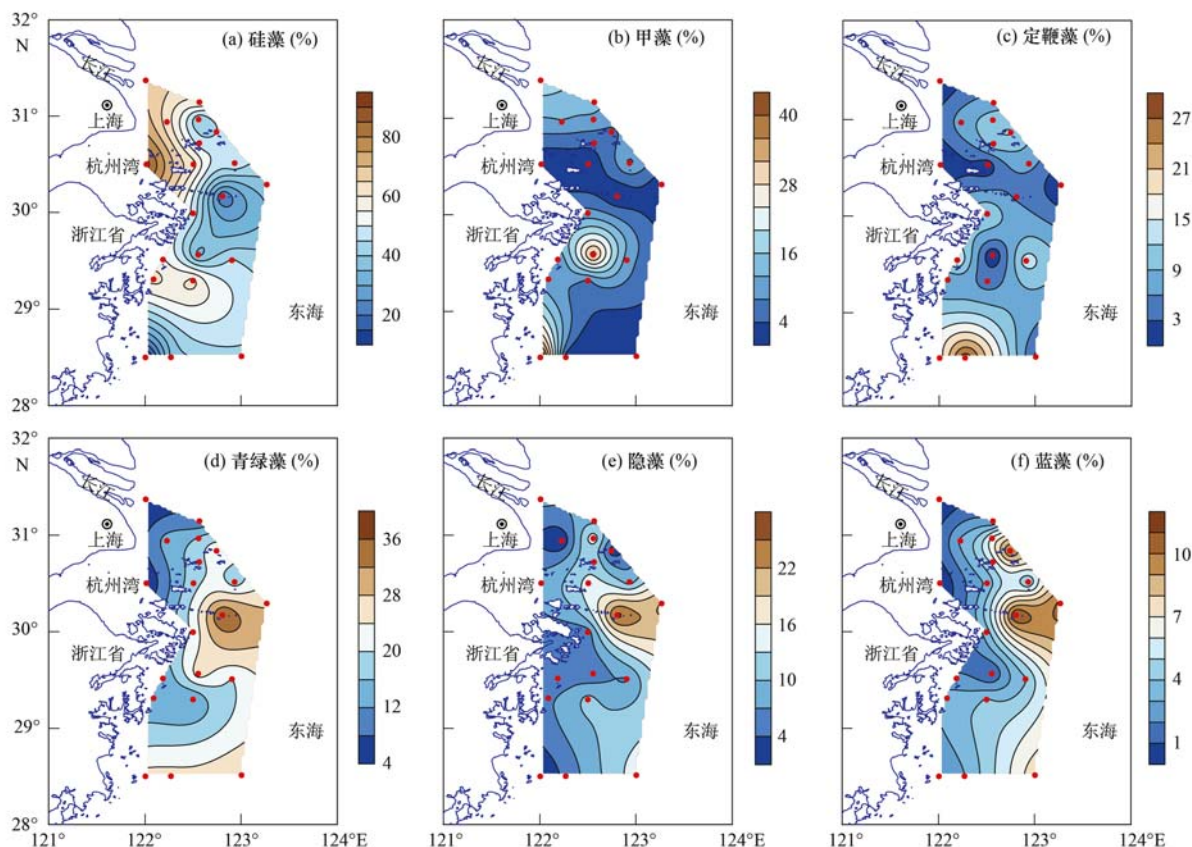


图5 基于沉积物中特征色素比例的研究区域浮游植物功能类群空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of phytoplankton functional types based on the relative proportions of sedimentary diagnostic carotenoids in the study area

时间的逐渐增加,更多的新鲜 Chl-a 转化成了 Pheo-a. 但长江口门处最大浑浊带的存在抑制了口门区域(9 号和 11 号站位海域)浮游植物初级生产^[56],造成口门区较低的 Chl-a/Pheo-a 比值[图 2(h)].

长江口及邻近海域赤潮高发区底层水体的低氧和缺氧环境也可以促进叶绿素的保存. 长江口及邻近海域低氧区($<3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)主要位于 $28.5^{\circ} \sim 33.5^{\circ}\text{N}$ 、 $122.0^{\circ} \sim 124.0^{\circ}\text{E}$ 海域内,特别是在 31.0°N 、 122.5°E 附近区域内自 20 世纪 50 年代以来就多年均能观测到底层水体低氧现象^[57~59]. 在本研究中,13 号站位正位于长江口缺氧区中心区域,具有次高的 Chl-a/Pheo-a 比值(~ 0.33)[图 2(h)],表明这一季节性缺氧区域有较好的叶绿素保存效率,位于浙闽沿岸泥质区中北部区域的 32 站位同样具有较高的 Chl-a/Pheo-a 比值(~ 0.30)[图 2(h)],该区域同样发生过多缺氧事件^[57~59]. 可能的原因为缺氧的底层水体通过抑制 Chl-a 的光化学氧化降解以及减少底栖生物活动的途径来促进 Chl-a 的保存.

后生动物对新鲜浮游植物的摄食作用同样对沉积色素的新鲜程度也有一定影响. 自长江口门至外

海(123°E 区域)逐渐增加的浮游动物以及底栖生物生物量^[60~63]有可能会通过对浮游植物更大的摄食压力从而导致沉积物中较低的 Chl-a/Pheo-a 比值[图 2(h)],反之,研究区域内具有较高 Chl-a/Pheo-a 比值的区域浮游以及底栖生物生物量均较低[图 2(h)]^[62,64]. 此外,与长江口泥质区、浙闽沿岸泥质区沉积物相比,杭州湾外海由于较强水动力条件可能导致了这一区域沉积有机碳的埋藏效率较低^[65],进而导致沉积色素较低的新鲜程度和保存效率[图 2(h)].

4 结论

(1) 长江冲淡水以及浙闽沿岸上升流的营养盐输送是造成长江口及邻近海域表层沉积物中 Chlorins 高值区呈南北两大斑块状分布的主要原因. 较差的沉积环境导致杭州湾外海 Chlorins 含量较低,而浙闽沿岸上升流区对应的泥质沉积区则是 Chlorins 的重要沉积场所.

(2) 使用沉积物中特征色素比值估算的沉积物中浮游植物功能类群结果表明:硅藻、甲藻、定鞭藻、青绿藻、隐藻和蓝藻的相对贡献分别为 48.8%

$\pm 17.4\%$ 、 10.7% $\pm 11.5\%$ 、 8.1% $\pm 7.2\%$ 、 18.6% $\pm 8.2\%$ 、 9.4% $\pm 6.4\%$ 和 4.3% $\pm 3.2\%$, 与以往在长江口及邻近海域水体中利用 CHEMTAX 软件方法计算的浮游植物群落结构结果及浮游植物的空间分布特征较为一致。

(3) 长江口最大浑浊带外缘、杭州湾湾口以及浙闽沿岸中北部区域具有较高的沉积色素保存效率, 适合作为进行海洋生态环境历史演化的研究区域。整体上, 较高沉积速率以及较短的水体中颗粒物保留时间是导致近岸海域具有较高的沉积色素保存效率的主要原因。长江口以及浙闽沿岸缺氧区季节性暴发的底层水体缺氧事件也会促进该水域沉积物中浮游植物色素的保存。

致谢: 感谢“润江 1 号”海洋科研调查船全体船员、赵美训、陈洪涛、张海龙以及赵宗山在调查采样期间给予的帮助!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵军, 姚鹏, 于志刚. 海洋沉积物中色素生物标志物研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, **25**(9): 950-959.
- [3] Li X X, Bianchi T S, Allison M A, *et al.* Composition, abundance and age of total organic carbon in surface sediments from the inner shelf of the East China Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2012, **145-147**: 37-52.
- [4] Li X X, Bianchi T S, Allison M A, *et al.* Historical reconstruction of organic carbon decay and preservation in sediments on the East China Sea shelf [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(3): 1079-1093.
- [5] Zhao J, Bianchi T S, Li X X, *et al.* Historical eutrophication in the Changjiang and Mississippi delta-front estuaries: Stable sedimentary chloropigments as biomarkers[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, **47**: 133-144.
- [6] Yang S L, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **263**(1-4): 56-71.
- [7] Zhang J, Liu S M, Ren J L, *et al.* Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf[J]. *Progress in Oceanography*, 2007, **74**(4): 449-478.
- [8] 周伟华, 霍文毅, 袁翔城, 等. 东海赤潮高发区春季叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1055-1059.
- [9] 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.
- [10] 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, 2006, **36**(Sup.): 114-120.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 金海燕. 近百年来长江口浮游植物群落变化的沉积记录研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [14] 孔凡洲. 长江口赤潮区浮游植物的粒级结构、种类组成和色素分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
- [15] 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 等. 长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3405-3415.
- [16] Li X X, Bianchi T S, Yang Z S, *et al.* Historical trends of hypoxia in Changjiang River estuary: Applications of chemical biomarkers and microfossils [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, **86**(3-4): 57-68.
- [17] Zhu Z Y, Wu Y, Zhang J, *et al.* Reconstruction of anthropogenic eutrophication in the region off the Changjiang Estuary and central Yellow Sea: From decades to centuries[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, **72**: 152-162.
- [18] Leavitt P R. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1993, **9**(2): 109-127.
- [19] Leavitt P R, Hodgson D A. Sedimentary pigments [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 295-325.
- [20] Liu J P, Li A C, Xu K H, *et al.* Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, **26**(17-18): 2141-2156.
- [21] Chen N H, Bianchi T S, McKee B A, *et al.* Historical trends of hypoxia on the Louisiana shelf: application of pigments as biomarkers[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, **32**(4): 543-561.
- [22] Chen N H, Bianchi T S, Bland J M. Novel decomposition products of chlorophyll-a in continental shelf (Louisiana shelf) sediments: formation and transformation of carotenol chlorin esters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, **67**(11): 2027-2042.
- [23] Li M T, Xu K Q, Watanabe M, *et al.* Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**(1-2): 3-12.
- [24] 郭志刚, 杨作升, 张东奇. 冬、夏季东东北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. 海洋学报, 2002, **24**(5): 71-80.
- [25] 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000 年 8 月长江口外海区冲淡水 and 羽状锋的观测[J]. 海洋与湖沼, 2003, **34**(3): 249-255.
- [26] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报, 2004, **26**(3): 143-150.
- [27] 林竹峰, 吴玉霖, 于海成, 等. 2004 年长江口浮游植物群落结构特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2008, **39**(4): 401-410.
- [28] 宁修仁, 刘子琳, 胡钦贤. 浙江沿岸上升流区叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. 海洋学报, 1985, **7**(6): 751-762.
- [29] 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]. 地球科学, 2004, **34**(8): 757-762.

- [30] 石晓勇, 李鸿妹, 王颖, 等. 夏季台湾暖流的水化学特性及其对东海赤潮高发区影响的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 2013, **44**(5): 1208-1215.
- [31] 颜廷壮. 中国沿岸上升流成因类型的初步划分[J]. 海洋通报, 1991, **10**(6): 1-6.
- [32] 王颖. 夏季台湾暖流的水文, 化学特性及其对东海赤潮高发区生源要素补充的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [33] 张传松, 王修林, 石晓勇, 等. 东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2416-2424.
- [34] Sutula M, Bianchi T S, McKee B A. Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico[J]. Limnology and Oceanography, 2004, **49**(6): 2223-2235.
- [35] Meng J, Yao P, Yu Z G, *et al.* Speciation, bioavailability and preservation of phosphorus in surface sediments of the Changjiang Estuary and adjacent East China Sea inner shelf[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, **144**: 27-38.
- [36] 林军, 朱建荣, 张经, 等. 长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2011, **35**(1): 74-87.
- [37] 蒋国俊, 陈吉余, 姚炎明. 舟山群岛峡道潮流动力沉积特性[J]. 海洋学报, 1998, **20**(2): 139-147.
- [38] 蒋国俊. 舟山群岛峡道水动力及沉积特性[J]. 浙江大学学报(理学版), 2001, **28**(1): 82-91.
- [39] 罗向欣, 杨世伦, 张文祥, 等. 近期长江口—杭州湾邻近海域沉积物粒径的时空变化及其影响因素[J]. 沉积学报, 2012, **30**(1): 137-147.
- [40] Hu D X. Upwelling and sedimentation dynamics. I. The role of upwelling in sedimentation in the Huanghai Sea and East China Sea-A description of general features[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1984, **2**(1): 12-19.
- [41] Qu T D, Hu D X. Upwelling and sedimentation dynamics. II. A simple model[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1993, **11**(4): 289-295.
- [42] Li D, Yao P, Bianchi T S, *et al.* Organic carbon cycling in sediments of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implication for the influence of Three Gorges Dam[J]. Journal of Marine Systems, 2014, **139**: 409-419.
- [43] 邓春梅, 姚鹏, 刘淑霞, 等. 海洋浮游藻色素分析和化学分类研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2010, **40**(4): 91-98.
- [44] 刘淑霞. 中国近海常见浮游藻色素生物标志物的研究和应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [45] 姚鹏, 于志刚, 邓春梅, 等. 基于诊断色素分析的胶州湾浮游藻功能类群研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, **44**(4): 866-876.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 等. 长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 908-914.
- [49] Jin H Y, Chen J F, Weng H X, *et al.* Variations in paleoproductivity and the environmental implications over the past six decades in the Changjiang Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, **29**(3): 38-45.
- [50] Dai X F, Lu D D, Xia P, *et al.* A 50-year temporal record of dinoflagellate cysts in sediments from the Changjiang estuary, East China Sea, in relation to climate and catchment changes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, **112**: 192-197.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 姚鹏. 胶州湾浮游藻的色素分析和基于色素的分类方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [54] 江雪娇. 北黄海微藻型浮游植物的丰度及微藻型真核浮游生物分子多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [55] 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°N and 50°S[J]. Progress in Oceanography, 2000, **45**(3-4): 339-368.
- [56] 韩秀荣. 长江口及邻近海域浮游植物生长的多环境效应因子影响解析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [57] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1649-1654.
- [58] 张哲, 张志锋, 韩庚辰, 等. 长江口外低氧区时空变化特征及形成, 变化机制初步探究[J]. 海洋环境科学, 2012, **31**(4): 469-473.
- [59] Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y, *et al.* Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition[J]. Marine Chemistry, 2011, **125**(1-4): 108-116.
- [60] 纪焕红, 叶属峰. 长江口浮游动物生态分布特征及其与环境的关系[J]. 海洋科学, 2006, **30**(6): 23-30.
- [61] 刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [62] 华尔, 张志南, 张艳. 长江口及邻近海域小型底栖生物丰度和生物量[J]. 生态学报, 2006, **25**(9): 2234-2242.
- [63] 王小谷, 王春生, 张东声, 等. 长江口及其陆架春季小型底栖生物丰度和生物量[J]. 生态学报, 2010, **30**(17): 4717-4727.
- [64] 孙亚伟, 曹恋, 秦玉涛, 等. 长江口邻近海域大型底栖生物群落结构分析[J]. 海洋通报, 2007, **26**(2): 66-70.
- [65] Yao P, Zhao B, Bianchi T S, *et al.* Remineralization of sedimentary organic carbon in mud deposits of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implications for carbon preservation and authigenic mineral formation[J]. Continental Shelf Research, 2014, **91**: 1-11.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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