

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 ..... 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)  
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 ..... 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)  
鄂东典型工业城市大气 PM<sub>10</sub> 中元素浓度特征和来源分析 ..... 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)  
常州夏秋季 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶特征及来源 ..... 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)  
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 ..... 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)  
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 ..... 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)  
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 ..... 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)  
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 ..... 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)  
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 ..... 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)  
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 ..... 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)  
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 ..... 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)  
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 ..... 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)  
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 ..... 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)  
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 ..... 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)  
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)  
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 ..... 肖丽微, 朱波 (4580)  
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 ..... 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)  
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 ..... 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)  
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 ..... 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)  
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 ..... 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)  
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) ..... 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)  
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 ..... 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)  
流态对生物添加强化硝化效果的影响 ..... 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)  
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 ..... 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)  
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 ..... 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)  
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)  
污水处理厂 CANON 工艺小试 ..... 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)  
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 ..... 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)  
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 ..... 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)  
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 ..... 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)  
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 ..... 张玉, 万方, 周集体 (4706)  
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 ..... 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)  
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 ..... 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)  
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 ..... 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)  
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 ..... 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)  
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 ..... 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)  
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)  
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 ..... 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)  
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的短期影响 ..... 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)  
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)  
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 ..... 周燕, 卢新卫 (4800)  
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 ..... 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)  
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 ..... 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)  
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)  
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 ..... 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)  
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 ..... 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)  
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 ..... 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)  
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 ..... 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)  
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 ..... 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)  
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 ..... 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)  
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 ..... 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)  
环境模型中敏感性分析方法评述 ..... 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)  
《环境科学》征稿简则(4462) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

# 基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究

李大鹏<sup>1</sup>, 张硕<sup>2,3</sup>, 张中发<sup>1</sup>, 罗娜<sup>1</sup>, 魏青青<sup>1</sup>, 张瑞<sup>2</sup>, 黄宏<sup>1,3\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 3. 上海海洋大学大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 海洋牧场是一种新的可持续的生产方式, 对中国海洋经济的转型具有重要作用. 本文根据海底构筑物的密集程度与投放时间把海州湾海洋牧场划分为 3 个区(外侧区、内测区、中心区), 对表层沉积物的温度( $T$ )、酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)、表面积平均粒径( $D[3, 2]$ )、总有机碳(TOC)这 5 种地球化学指标进行原位调查, 采用改进的 BCR 方法对重金属 Cr、Cu、Ni、Zn、Pb、Cd 进行连续提取. 结果表明, 沉积物 Eh 的横向分布受到了海底构筑物的影响, TOC 在  $11.7 \sim 13.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 与 pH 呈显著负相关; Cu、Zn、Ni、Cr 以原生相为主要赋存形态, Pb、Cd 以次生相的铁锰氧化物结合态(F2)为主要赋存形态, 并受 Eh 控制; 相关性及聚类分析表明, Cr、Cu、Ni、Zn 为天然源, Cd、Pb 存在明显的人为来源; Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 的可交换及碳酸盐结合态(F1)与 TOC 显著相关, Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 铁锰氧化物结合态(F2)、Cr、Ni、Cu、Zn 的残渣态(F4)都与沉积物粒度显著相关, 不同形态的 Cd 受多环境因子控制; 海洋牧场中心区和外侧区沉积物中重金属总量、次生相含量均较内侧区和对照区要低. 由于海底构筑物和水动力学的差异性, 海洋牧场内侧区细颗粒与有机质对沉积物重金属 Cr、Ni、Cu、Zn 次生相的富集、吸附作用要大于颗粒再悬浮的释放作用, 而在中心区、外侧区细颗粒和有机质影响较小; 沉积物富集系数显示 Cd 出现了富集现象.

**关键词:** 海洋牧场; 沉积物; 地球化学特性; 重金属; BCR; 海底构筑物; 海州湾

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4525-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.201704015

## Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics

LI Da-peng<sup>1</sup>, ZHANG Shuo<sup>2,3</sup>, ZHANG Zhong-fa<sup>1</sup>, LUO Na<sup>1</sup>, WEI Qing-qing<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, HUANG Hong<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Marine ranching is a new sustainable production method, which plays an important role in the transformation of China's marine economy. In this paper, Haizhou Bay marine ranching was divided into 3 areas according to the intensity and delivery time of the submarine structures. Five geochemical indicators of temperature ( $T$ ), pH, oxidation-reduction potential (Eh), grain size ( $D[3, 2]$ ) and total organic carbon (TOC) were determined on-site. A modified European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure was applied to determine the chemical speciation of different heavy metals (i. e. Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, and Cd). The results showed a horizontal distribution of the Eh was influenced by the submarine structures. The TOC content ranged from 11.7 to  $13.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which had a significant negative correlation with pH. Pb and Cd mainly present in the secondary phase of iron manganese oxide forms (F2), which were controlled by the Eh, however, Cu, Zn, Ni, and Cr were mainly present in the primary phase. A correlation and cluster analysis indicated that the Cr, Cu, Ni, and Zn present in sediments were from natural sources, while the Cd and Pb content obviously came from anthropogenic metal sources. The exchangeable and carbonate fractions (F1) of Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, and Cd were significantly correlated with TOC. The residuals (F4) of Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd were significantly correlated with the grain size of sediments as well as the iron-manganese oxide forms (F2) of Cr, Ni, Cu, and Zn. A different speciation of Cd was controlled by multiple geochemical characteristics of the sediment. The heavy metal levels of the primary and secondary phases in the central and lateral areas were lower than the control and medial areas because of differences in the submarine structures and hydrodynamics. The enrichment and adsorption of Cr, Ni, Cu, and Zn in sediment was stronger than the release of particles that were resuspended. While the influence of fine particles and organic matter from the sediment in the central and outer areas was limited, an enrichment factor analysis suggested that Cd in sediment showed enrichment to some extent. This paper provides a scientific basis for the construction of marine ranching and ecological restoration in Haizhou Bay.

**Key words:** marine ranching; sediments; geochemical characteristics; heavy metals; BCR; submarine structure; Haizhou Bay

收稿日期: 2017-04-03; 修订日期: 2017-05-16

基金项目: 农业部转产转业项目(D-8006-12-0018, D8006-15-8014); 公益性行业(农业)科研专项(201303047); 环境科学与工程本研一体化教学团队项目(A1-0201-00-032236)

作者简介: 李大鹏(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境污染与控制, E-mail: dapeng\_li1993@163.com

\* 通信作者, E-mail: hhuang@shou.edu.cn

中国海洋牧场建设起始于 20 世纪 70 年代末,以投放海底构筑物(人工鱼礁)和增殖放流海产品(杂色蛤、沙蚕、红带织纹螺等)为主要手段,其中海底构筑物投放形成的上升流、背涡流和环流等会改变生态环境<sup>[1]</sup>,以及构筑物投放为底栖生物营造了适宜的生活环境,进而改良海洋牧场底质环境.中国海洋牧场建设面积达 3770hm<sup>2</sup>,从北到南形成了辽西海洋牧场、大连獐子岛海洋牧场、秦皇岛海洋牧场、海州湾海洋牧场、宁德海洋牧场、汕头海洋牧场等 20 余处海洋牧场.在人工鱼礁投放等技术方面取得了较大进展,推动了海洋经济转型发展.目前,我国海洋牧场的环境监测技术还不成熟,针对海洋牧场生态修复效果的研究主要集中在海洋渔业生物资源的恢复方面<sup>[2-4]</sup>.海洋牧场的建设和人工鱼礁的投放仍具有一定的盲目性,调节流场和物质运输作用等方面的生态作用被忽视<sup>[5]</sup>,缺乏通过监测对环境的影响进行科学定量的评价<sup>[6]</sup>.尤其是构筑物投放后,对原位底质沉积物的重金属环境行为的研究尚属空白<sup>[2]</sup>.

自然状态下,海洋沉积物中大多数重金属元素可以认为是原生的,人为源元素(K、Ba、Zn、Pb、Cd、Ag、Tl 和 U)与天然源元素(Na、Mg、Ti、V 和 Ca)间存在拮抗作用<sup>[7]</sup>.沉积物重金属总量分布主要与细颗粒部分有关,颗粒物运输和沉淀控制重金属的横向分布<sup>[8]</sup>.但海洋沉积物总量分布仅反映水体动力学对沉积物搬运的影响,并不能完全表征沉积物重金属对原位环境变化的响应.原位沉积物-水界面微量元素的通量基本取决于它们在界面下的再生和固定化反应,同时还受沉积物氧化还原条件和不同元素扩散过程之间的动力学竞争控制<sup>[9]</sup>.沉积物重金属形态分析的连续提取法已经被广泛用于评价重金属的稳定度和风险性<sup>[10,11]</sup>.揭示沉积物重金属对原位环境变化的响应,需要更多地球化学信息,其中温度、pH、氧化还原电位(Eh)、粒度和有机质对沉积物中重金属形态的分布、转化存在较大影响<sup>[12,13]</sup>.

沉积物对重金属吸附主要与有机质的负荷有关<sup>[14]</sup>.黏土矿物对水体中重金属也有吸附作用,但作用没有有机质和铁锰氧化物显著<sup>[15]</sup>.温度和电导率变化会使 Cr、Cu、Cd、Pb 等重金属由非稳态向稳定态结构转化,碱性物质在厌氧过程中固定沉积物中的重金属<sup>[16]</sup>.沉积物重金属含量还受沉积物成岩作用的控制<sup>[17]</sup>.重金属释放受其在溶液相的环境条件影响,沉积物的地球化学特性、沉积地

域的差异性和重金属赋存状态都会影响重金属的释放<sup>[18]</sup>.由于水动力原因造成的沉积物颗粒的短期再悬浮也会促使重金属的释放,但长期来看重金属从悬浮颗粒中的净释放是有限的<sup>[19]</sup>.评估海洋沉积物重金属对生态系统的风险时,需要考虑海洋沉积物的受干扰状况.底栖无脊椎动物生物活动是干扰沉积物环境的另一因素.土壤中重金属形态研究表明,生物基本吸收酸溶性及可还原态的重金属<sup>[20]</sup>.沉积物中过高的重金属利用度会促进重金属由沉积物向生物体内的转移,造成生物体内积累.自然状态下,底栖生物和藻类生命活动可以为沉积物创建厌氧环境和增强腐殖质悬浮固体,但底栖动物活动对重金属的原位积累贡献率较低<sup>[21]</sup>.

为了解海洋牧场表层沉积物重金属行为特征以及海底构筑物对重金属环境行为的影响,本文对海州湾海洋牧场表层沉积物的温度( $T$ )、酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)、表面积平均粒径( $D[3,2]$ )、总有机碳(TOC)等地球化学指标进行监测,并统计底栖生物.利用修正的 BCR 方法对沉积物重金属进行连续提取,分析地球化学性质和沉积物重金属含量及形态的分布特征,通过聚类分析和与惰性元素 Fe 参比,确定沉积物和重金属来源特征.通过不同形态重金属空间分布与地球化学特性的相关性分析,探讨重金属对海底构筑物投放(人工鱼礁)的响应关系,以期为海洋牧场的建设和海域环境修复提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

海州湾位于中国黄海北部(34°50'00"~34°57'00"N,119°25'48"~119°33'36"E)海域内,总体面积约 160.25 km<sup>2</sup>.海洋牧场其始建于 2007 年,主要以投放海底构筑物(人工鱼礁)为主.工程实施于东西连岛北偏东 27.78 km 处.截止 2014 年,累计投放混凝土鱼礁 25 146 个、改造后的旧船礁 190 条、浮鱼礁 25 个、石头礁 28 934 个,总投放规模 129 491.5 (空)m<sup>3</sup>.海域潮汐类型属正规半日潮,实测潮流的流向为西南-东北向,底层余流流速为 3~9 cm·s<sup>-1</sup>.该海域水深 15~20 m,常年平均流速 0.3~0.5 m·s<sup>-1</sup>;年平均水温 13.4℃;盐度低于海洋平均盐度(34.7‰),范围为 26‰~35‰;海水呈弱碱性,pH 7.8~8.6;水质较为清澈,透明度在 2~3 m.

基于海州湾海洋牧场海底构筑物的具体投放情况(表 1), 根据投放密度和时间将海洋牧场划分为 3 个区域: A 区 ( $34^{\circ}52'1.2'' \sim 34^{\circ}58'34.8''N$ ;  $119^{\circ}25'58.8'' \sim 119^{\circ}28'22.8''E$ ), 即海洋牧场中心区, 该区域始建于 2007 年, 以船礁和石头礁的投放为主, 构筑物类型和数量最多, 建设时间最长; B 区 ( $34^{\circ}52'1.2'' \sim 34^{\circ}58'34.8''N$ ;  $119^{\circ}28'22.8'' \sim 119^{\circ}30'46.8''E$ ) 为内侧区, 建设于 2008 ~ 2011

年, 构筑物以混凝土礁和石头礁为主, 构筑物体积偏大, 与赣榆海岸线的直线距离约为 29.63 km; C 区 ( $34^{\circ}52'1.2'' \sim 34^{\circ}58'34.8''N$ ;  $119^{\circ}30'46.8'' \sim 119^{\circ}33'10.8''E$ ) 为外侧区, 建设于 2012 ~ 2014 年, 构筑物数量个体数多, 但体积较小, 与海州湾前三岛(牛车山岛、平山岛、达山岛)海域相距约 70.38 km. D 区为对照区, 属未投放人工鱼礁海域.

表 1 海州湾海洋牧场海底构筑物(人工鱼礁)投放规模<sup>1)</sup>

Table 1 Delivery situation of submarine structures for marine ranching off Haizhou Bay

年份	区域	混凝土礁		船礁		浮鱼礁		石头礁		总计 (空) $m^3$	构筑物密度 /(空) $m^3 \cdot m^{-2}$
		数量	(空) $m^3$	数量	(空) $m^3$	数量	(空) $m^3$	数量	(空) $m^3$		
2002 ~ 2007	中心区	3 340	24 538	190	57 000	25	113	0	0	81 651	$2.09 \times 10^{-3}$
2008 ~ 2010	内侧区	4 966	40 252	0	0	0	0	4 400	15 200	55 452	$1.38 \times 10^{-3}$
2011 ~ 2014	外侧区	16 840	52 696	0	0	0	0	24 534	9 318	62 014	$1.55 \times 10^{-3}$

1) 空  $m^3$  为人工鱼礁外部轮廓包围的体积, 是人工鱼礁的计量单位

## 1.2 采样

2016 年 10 月, 在海洋牧场 A、B、C 区及周边海域 D 区设置 10 个采样站点, 其中 8 个(S1 ~ S8) 位于海洋牧场内, 其余 2 个点(D1、D2) 布设在周边海域, 作为对照点, 采样点位置见图 1. 每个站点采集 3 个

平行样, 装入聚乙烯袋, 充氮气后密封, 于  $-40^{\circ}C$  冷藏保存. 利用真空冷冻干燥机(Christ Delta 1-24 LSC, Germany)将沉积物冷冻干燥后, 剔除贝壳、砾石等杂质, 用玛瑙研钵研磨并过 100 目筛, 四分缩分法取 10 ~ 20 g 制备好的样品, 保存于聚乙烯袋中备用<sup>[22]</sup>.

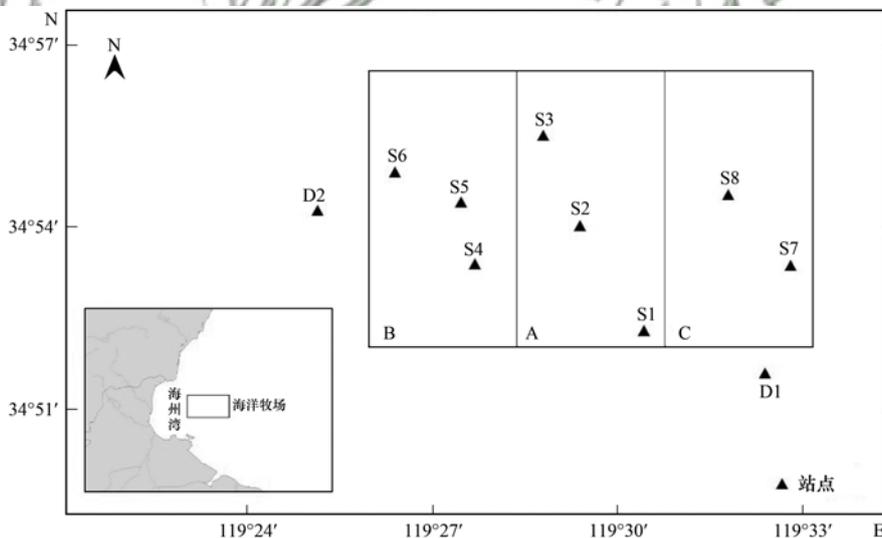


图 1 海州湾海洋牧场采样站点

Fig. 1 Sampling sites in the marine ranching areas of Haizhou Bay

## 1.3 沉积物指标分析

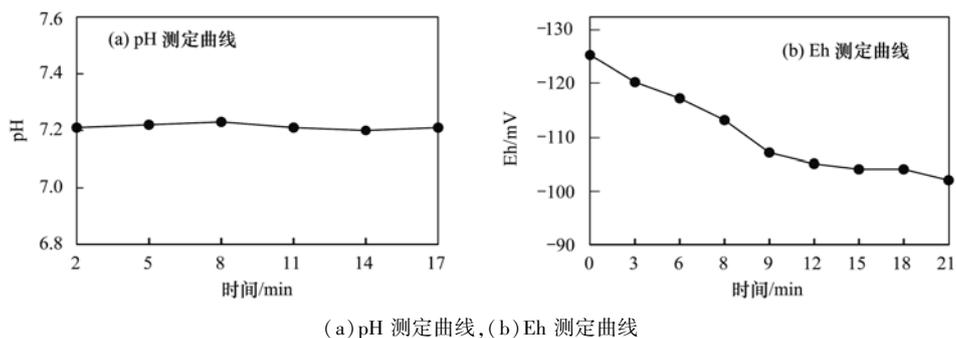
### 1.3.1 pH 和 Eh 现场测定

pH 和 Eh 在现场分别采用精密酸度仪 SX3808 (0.01, China) 和氧化还原电位仪 SX712 (1 mV, China) 测定. 实际测量时, 直接将铂电极插入采泥器中新鲜沉积物表层 0 ~ 2 cm 处. pH 在 2 min 内迅速稳定, 反映表层沉积物真实 pH[图 2(a)], 待读数

稳定记录数据. Eh 测定时间持续 21 min, 每隔 3 min 得到一个数据, 反映沉积物与空气接触后迅速氧化、Eh 逐渐增加的趋势[图 2(b)], 选取最先稳定者的最小值作为被测沉积物的 Eh 值<sup>[23]</sup>.

### 1.3.2 重金属含量分析<sup>[24]</sup>

称取 1g 沉积物样品, 用 20 mL 王水沙浴加热消解 (15 mL  $HNO_3$  + 5 mL  $HCl$  + 2 mL  $HF$ ). 所得消解



(a) pH 测定曲线, (b) Eh 测定曲线

图 2 表层沉积物 pH、Eh 测定曲线

Fig. 2 Measured values of pH and Eh of surface sediments against time

液离心(3 000 r·min<sup>-1</sup>, 20 min)后,用 2% HNO<sub>3</sub> 溶液定容至 100 mL. 用修正后的 BCR 法对沉积物重金属不同形态进行提取. 各形态提取液、总量消解液中的重金属含量都采用 ICP-MS (7500a, Agilent Technologies, USA) 进行测定. 以海底沉积物成分分析标准物质(GBW07314, China)作为质量控制样品.

BCR 法根据重金属与沉积物结合态,利用不同提取剂将沉积物中重金属分为可交换态及碳酸盐结合态(可交换态, F1)、Fe/Mn 氧化物结合态(可还原态, F2)、有机物及硫化物结合态(可氧化态, F3)以及残存在矿物晶格中的残渣态(F4),其中前 3 种形态统称为次生相,残渣态又称原生相. 标准品重金属元素的回收率  $R$  (%) 列于表 2,回收率在 98.7% ~ 105.0%,符合美国 EPA 标准要求的 80% ~ 120%.

连续提取法 BCR 对重金属元素的回收率  $R$  (%) 采用如下公式进行计算:

$$R = \frac{C_{F1} + C_{F2} + C_{F3} + C_{F4}}{C_T}$$

式中,  $C_{F1}$ 、 $C_{F2}$ 、 $C_{F3}$ 、 $C_{F4}$  分别表示利用 BCR 测得的重金属的 F1、F2、F3、F4 态的含量, mg·kg<sup>-1</sup>.  $C_T$  表示同一沉积物样品中,同一质量下利用湿法消解所得重金属的总量, mg·kg<sup>-1</sup>. 连续提取法对重金属的回收率处在 95.13% ~ 116.13% 范围内,回收率详见表 3.

表 2 沉积物标准样品(GBW07314)回收率实验结果

Table 2 Results of the recovery test for standard samples(GBW07314)

元素	测定值 /mg·kg <sup>-1</sup>	标准值 /mg·kg <sup>-1</sup>	回收率/%
Cu	30.60	31 ± 4	98.72
Pb	26.16	25 ± 4	104.64
Cd	0.21	0.20 ± 0.04	105.00
Cr	85.95	86 ± 4	99.90
Ni	34.5	34.3 ± 4.0	100.53
Zn	86.55	87 ± 2	99.50

表 3 BCR 法提取沉积物样品中重金属元素的回收率实验结果

Table 3 Results for the recovery of heavy metal elements in sediment samples by the BCR method

元素	$C_{F1}$ /mg·kg <sup>-1</sup>	$C_{F2}$ /mg·kg <sup>-1</sup>	$C_{F3}$ /mg·kg <sup>-1</sup>	$C_{F4}$ /mg·kg <sup>-1</sup>	$C_T$ /mg·kg <sup>-1</sup>	回收率/%
Cu	1.90 ± 2.10	3.64 ± 1.81	2.29 ± 1.81	14.95 ± 10.85	20.90 ± 10.12	108.52 ± 7.61
Pb	4.10 ± 4.75	9.16 ± 3.54	3.92 ± 0.78	4.28 ± 2.97	20.04 ± 7.11	107.56 ± 5.68
Cd	0.06 ± 0.04	0.04 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.04	0.21 ± 0.05	102.08 ± 6.95
Cr	0.56 ± 0.53	1.28 ± 0.42	4.42 ± 2.03	51.23 ± 33.73	56.15 ± 33.40	101.98 ± 5.95
Ni	2.28 ± 2.32	1.89 ± 1.26	5.51 ± 3.04	22.17 ± 17.03	31.20 ± 14.30	102.24 ± 4.38
Zn	5.82 ± 5.43	6.96 ± 2.74	8.26 ± 5.09	40.04 ± 27.46	60.33 ± 17.67	101.61 ± 3.96

### 1.3.3 总有机碳及粒度测定

用锡舟包裹置预处理好的样品于元素分析仪(Aurora 1030D, USA)中,采用 CN 模式分析 TOC 含量. 取沉积物新鲜样,用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern, UK)测定粒度组成.

### 1.4 重金属富集系数(enrichment factor, EF)

为消除物源的影响,区别重金属元素的自然和人为来源,通常采用化学性质稳定的惰性元素(Al、

Li、Fe、Sc 等)作为参比元素,判断沉积物重金属富集程度,鉴别沉积物中重金属的自然和人为来源的相对贡献率. 重金属元素与惰性元素的比值(富集系数)常用来判断沉积物中重金属元素的富集水平<sup>[25]</sup>. 当富集系数介于 0.5 ~ 1.5,表明重金属主要源自地壳或岩石圈的自然风化过程;大于 1.5 时,表明人为输入为明显来源. 采用 Fe 作为富集系数的参比元素<sup>[26]</sup>. 计算公式如下:

$$EF = \frac{C_n/C_{ref}}{B_n/B_{ref}}$$

式中,  $C_n$ 、 $C_{ref}$  分别为沉积物重金属及参比元素含量;  $B_n$ 、 $B_{ref}$  分别为重金属元素及参比元素背景值. 研究中参照黄海表层沉积物重金属背景值<sup>[27]</sup>, Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 分别为 0.088、64、18、26、22、67  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Fe 为 45.5  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 地球化学指标

沉积物地球化学指标影响着重金属分布. 由图 3、表 4 可知, 海州湾海洋牧场及周边海域表层沉积物呈中性-弱碱性, pH 在 7.07 ~ 7.28 范围内, 平均值为 7.22. 沉积物温度在 18.5 ~ 20.4 °C 之间.

采样点  $Eh < -100$  mV, 沉积物处于还原环境.  $Eh$  最小值 ( - 140 mV ) 出现在内侧区, 最大值 ( - 105 mV ) 出现在中心区. 中心区  $Eh$  要高于其他海域, 平均值为 - 111.67 mV. 海底构筑物产生的流态效应可达其高度的 2.14 ~ 2.17 倍<sup>[28]</sup>, 形成的上下流会使底层的低溶解氧水体与上层水体进行交换, 使底层水溶解氧升高, 进而促使沉积物  $Eh$  升高. 海洋牧场中心区建成时间最早, 海底构筑物密度最大, 流态效应应最为显著, 使得海洋牧场中心区沉积物  $Eh$  与其它海域相比较较高.

TOC 含量在内侧区平均含量高于 13.5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其他区域 11.7 ~ 13.5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 主要是内侧区北部 (S5、S6) 为藻场建设区, 藻类生物碎屑沉积会增加沉积物中有机质含量<sup>[29]</sup>. 沉积物中有机质组成中有 80% 是腐殖酸, 其中胡敏酸促进沉积物重金属由可交换态向铁锰氧化物结合态转变<sup>[30]</sup>.

海洋牧场沉积物组成以粉砂和砂为主, 比例在 80% 以上,  $D[3, 2]$  介于 3.71 ~ 8.02  $\mu\text{m}$ . 根据 Folk 分类法<sup>[31]</sup>, 内侧区沉积物类型为砂质粉砂, 中心区和外侧区为粉砂质砂, 对照区为砂质泥. 粒度空间分布存在较大差异, 内侧区较中心区和外侧区颗粒细, 中心区和外侧区粒度组成相似. 砂质所占比例呈现对照区 (36.8%) < 内侧区 (46.0%) < 中心区 (50.3%) < 外侧区 (56.0%), 粉砂所占比例呈现对照区 (49.8%) > 中心区 (39.9%) > 内侧区 (36.7%) > 外侧区 (33.3%). 有研究表明<sup>[32]</sup>, 砂质代表了水体沉积物中的推移组分, 表现为侧向加积, 粉砂代表递变悬移组分, 其表现为垂向加积. 说明海洋牧场沉积物受风浪、潮流等水动力堆积时, 会发生沉积物颗粒再悬浮.

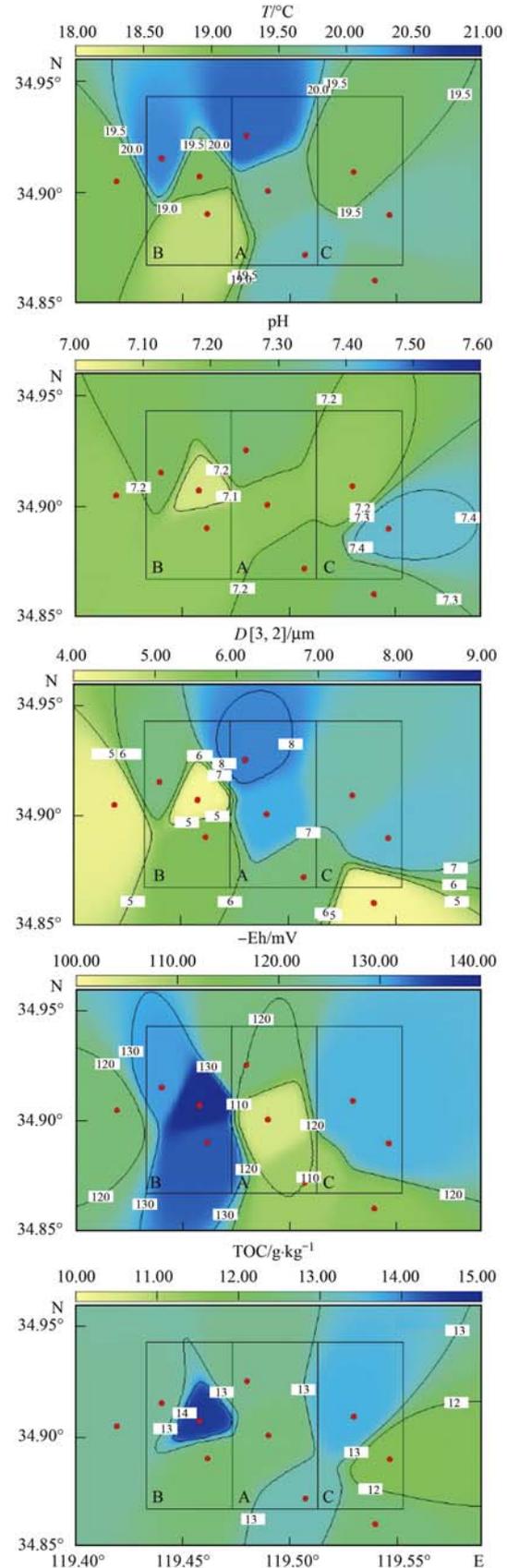


图 3 海洋牧场表层沉积物的  $T$ 、pH、 $D[3, 2]$ 、 $Eh$ 、TOC 分布

Fig. 3 Distribution of temperature, pH,  $D[3, 2]$ ,  $Eh$ , and TOC in the marine ranching

表 4 表层沉积物的地球化学指标

Table 4 Geochemical indicators of surface sediments

采样点	区域	T/°C	pH	Eh/mV	TOC /g·kg <sup>-1</sup>	D[3,2] /μm	粒度组成/%		
							黏土	粉砂	砂
S1	A	19.7	7.18	-105	13.445	7.723	9.54	54.35	36.09
S2	A	19.9	7.23	-110	13.11	6.458	11.13	40.41	47.46
S3	A	20.5	7.28	-120	13.755	8.017	7.85	24.81	67.34
S4	B	18.5	7.17	-134	12.34	5.828	12.84	35.35	51.81
S5	B	20.4	7.24	-131	12.88	6.595	10.98	38.44	50.53
S6	B	19.2	7.07	-140	10.55	4.104	23.04	36.23	35.73
S7	C	19.8	7.41	-129	13.205	7.411	10.21	34.92	54.86
S8	C	19.3	7.17	-129	13.08	7.043	10.46	31.74	57.8
D1	D	19.6	7.28	-112	9.43	3.712	28.33	57.76	13.89
D2	D	19.1	7.17	-119	10.88	4.279	20.94	40.33	39.72

2.2 重金属形态及分布

海洋牧场表层沉积物中重金属含量的空间分布

见图 4、5. 沉积物中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 次生相含量分别为 (0.17 ± 0.04)、(5.99 ± 1.11)、

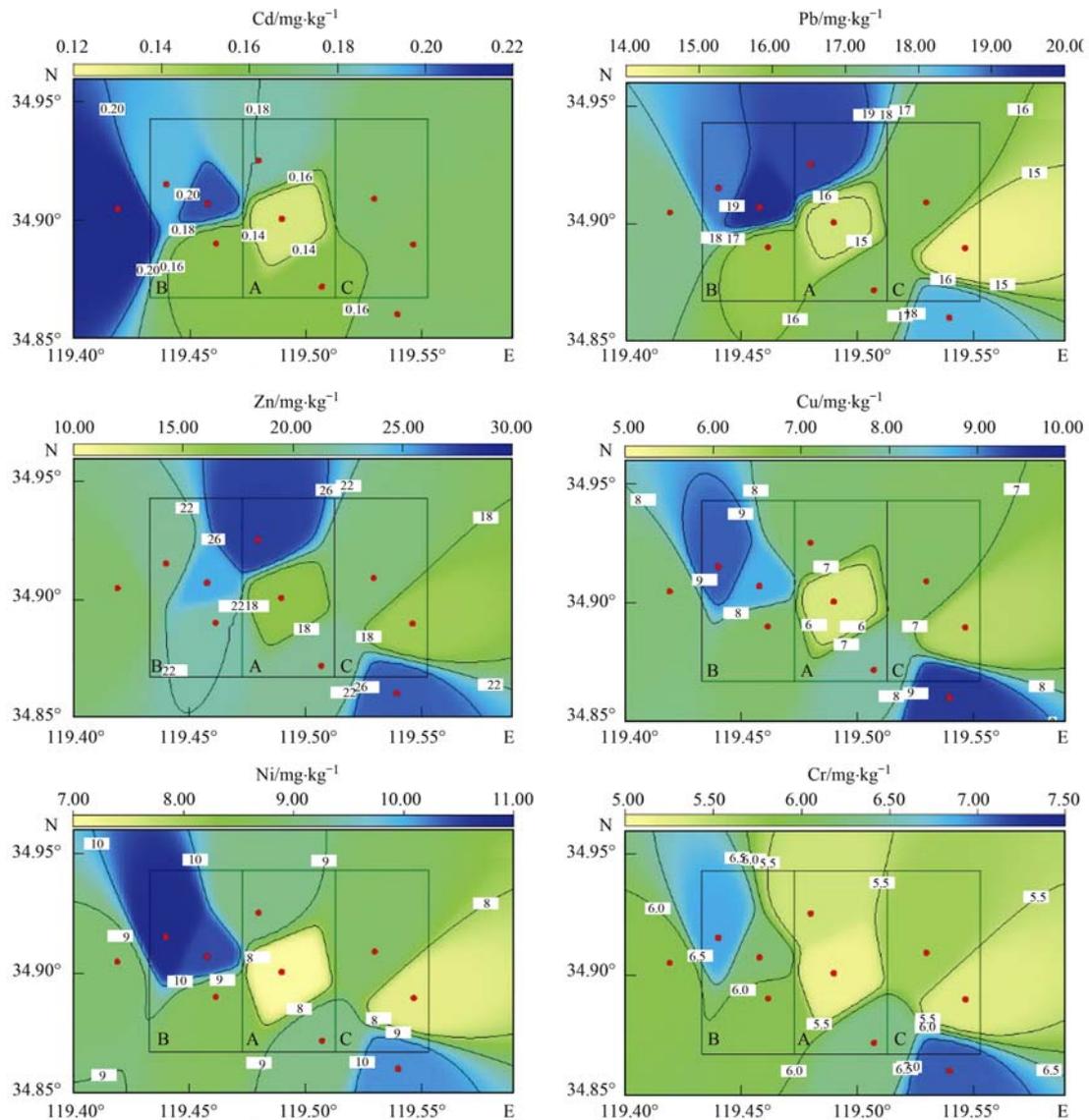


图 4 海洋牧场表层沉积物中次生相重金属的空间分布

Fig. 4 Distribution of secondary heavy metals in surface sediments of the marine ranching

( $7.66 \pm 1.84$ )、( $9.04 \pm 1.81$ )、( $17.16 \pm 2.49$ )、( $21.55 \pm 6.15$ )  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Pb、Cd 次生相占总量的质量分数高,分别为 80.47%、71.16%,Cu、Zn、Ni 次生相赋存形态水平相当,分别占 34.46%、34.74%、31.09%。Cr 次生相赋存比例最小,占 11.09%。重金属次生相空间分布具有显著差异性。

可交换态及碳酸盐结合态(F1)重金属对外界环境变化敏感,在中性或弱酸性条件下即可释放出来,迁移性高<sup>[33]</sup>。海洋牧场表层沉积物中 Cr 的 F1 态占总量的质量分数最小,仅为 0.94%,Cu、Zn、Ni 均在 8% 左右,Pb 和 Cd 较高,分别为 19.19%、18.18%。不同重金属 F1 态空间分布差异明显,Cd、Cu、Ni、Zn 呈现内侧区 > 对照区 > 外侧区 > 中心区。Pb、Cr 的 F1 态空间分布类似,中心区和外侧区要高于内侧区和对照区。海洋牧场沉积物呈中性至弱碱性,碳酸盐结合态重金属在正常环境条件下不向水体释放,可交换态的重金属能够被底栖生物直接利用。

Fe/Mn 氧化物结合态(F2)被铁锰氧化物包裹或本身已成为氢氧化物沉淀的一部分,属于较强的离子键结合的化学形态,当氧化还原电位降低或水体缺氧时易释放,具有潜在可迁移性和生物可利用性<sup>[33]</sup>。Cr 的 F2 态含量较 F1 态略高,为 2.28%。Pb、Cd 赋存形态明显,次生相中以 F2 为主要赋存形态,分别占质量分数的 43.50%、31.98%。Cu、Zn 的 F2 态质量分数在 10% ~ 15% 之间。Ni 的 F2

态含量与 F1 态差异小,为 7.52%。空间分布上,Cu、Cr、Pb、Zn 的 F2 态在中心区含量最低,在内侧区和外侧区相近,差值在 0.1% ~ 2% 之间,对照区最高。

有机质及硫化物结合态(F3)是重金属元素与有机活性基团或硫离子结合的部分,强氧化条件下才可能释放出来。F3 态的 Cr 占总量的质量分数为 7.87%,占次生相的比例最高。Ni、Zn 的次生相赋存形态以 F3 态为主,占总量质量分数的 17.92%、13.54%,其中 Ni 的 F3 态是 F1 和 F2 态的 2 ~ 3 倍,Zn 的 F1 态至 F3 态以 2% 的质量分数增加。Pb、Cd 的 F3 态占总量的质量分数与 F1 态差值小,分别为 19.97%、18.79%。Zn、Pb、Cr 的 F3 态的空间分布具有一致性,呈现出对照区 > 内侧区 > 中心区 > 外侧区。Cu、Ni 的 F3 态在中心区和外侧区含量要低于对照区和内测区,而 Cd 的 F3 态在内侧区含量最高。

残渣态(F4)主要赋存在原生矿物和次生硅酸盐矿物晶格中,具有极高稳定性,对沉积物重金属的迁移和生物可利用性贡献极小。6 种重金属元素原生相的含量在内侧区均高于中心区。Cd、Cr、Pb、Zn 的原生相含量在内侧区高于外侧区,Ni、Cu 的原生相含量在内侧区低于外侧区。

总体来看,海州湾海洋牧场表层沉积物中重金属迁移能力的顺序为:Pb > Cd > Cu = Zn > Ni > Cr。Pb、Cd 元素以次生相的铁锰氧化物结合态为主要

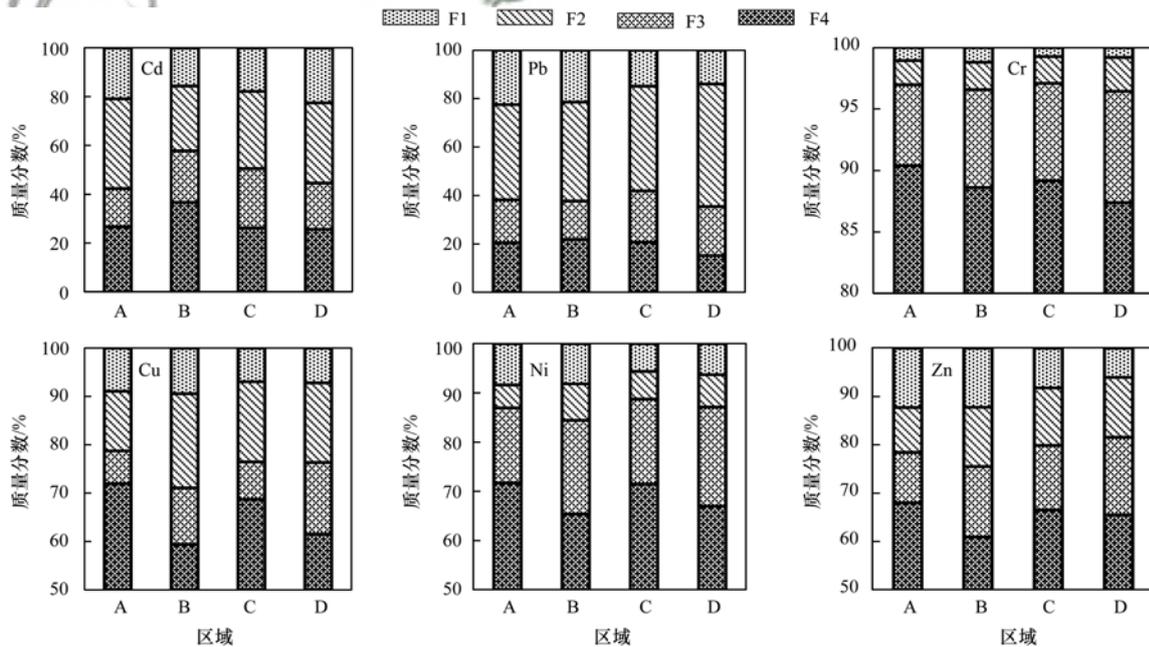


图5 海洋牧场表层沉积物中重金属各形态的质量分数

Fig. 5 Percentage of heavy metals speciation in surface sediments of the marine ranching

赋存形态, Cu、Zn、Ni、Cr 以原生相为主要赋存形态. Pb、Cd 次生相空间分布呈现出中心区 < 外侧区 < 内侧区 < 对照区, Cu、Ni 的次生相分布呈现出中心区 < 外侧区 < 对照区 < 内侧区, Zn 次生相空间分布呈现出外侧区 < 中心区 < 内侧区 < 对照区, Cr 次生相空间分布呈外侧区 < 中心区 < 对照区 < 内侧区. 重金属总量、次生相含量在海洋牧场中心区和外侧区较内侧区和对照区小, 内侧区平均含量普遍高其它海域.

## 2.3 沉积物地球化学特性与重金属含量相关性

### 2.3.1 相关性分析

通过重金属含量相关分析, 可以了解重金属之间来源. 表 5 为不同重金属元素含量间的相关矩阵, Cr、Cu、Ni、Zn 两两之间均表现为显著相关性, Pearson 相关系数大部分达 0.650 ( $P < 0.05$ ) 以上, 表明 Cr、Cu、Ni、Zn 重金属元素来源相似. Cd、Pb 两者相关性显著, 相关系数为 0.650 ( $P < 0.05$ ), 且与其它重金属元素相关性不显著, 说明 Cd、Pb 的来源一致且与其它 4 种元素异源.

表 5 重金属元素之间的相关性分析矩阵

Table 5 Correlation analysis matrix between heavy metals

	Cd	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni
Cd	1.000					
Cu	0.193	1.000				
Zn	0.025	0.836**	1.000			
Pb	0.650*	0.485	0.371	1.000		
Cr	-0.161	0.682*	0.679*	0.203	1.000	
Ni	0.023	0.822**	0.639*	0.444	0.920**	1.000

通过不同形态的重金属与沉积物地球化学特性的相关性分析, 可以了解控制重金属分布主要因子. 为控制二元变量相关分析的精确性, 采用偏相关性分析. 在控制其它变量的线性影响下, 分析沉积物单个地球化学特性与沉积物重金属单一形态间的相关性关系. 相关性分析表明(图 6), 海洋牧场不同形态重金属元素的受控因素存在差异.  $T$ 、pH 与不同形态的 Cr、Cu、Ni、Zn、Pb 相关性不明显, Pearson 系数在  $-0.327 \sim 0.390$ . Eh 与 Cr、Ni 的 F3 态显著正相关, 相关性系数分别为 0.648、0.637 ( $P < 0.05$ ). TOC 与 6 种重金属元素的 F1 态相关性显著, 相关系数在 0.651 以上 ( $P < 0.05$ ), 主要是重金属易通过吸附、阳离子交换及螯合反应与有机碳形成络合物, 同时有机质分解耗氧造成的还原条件也有利于重金属沉积与积累<sup>[34]</sup>. 表面积平均粒径  $D[3,2]$  与 6 种重金属元素的 F2 态显著负相关, 相关系数在  $-0.681 \sim -0.629$  ( $P < 0.05$ ), 与 Cu、Zn、

Cr、Ni 的 F4 态也呈显著负相关, 相关系数在  $-0.653 \sim -0.581$ . 不同形态的 Cd 受多环境因素的控制, Cd 的 F1 态与 pH、Eh、TOC 的相关性显著, 相关性系数分别为  $-0.648$ 、 $-0.639$ 、 $0.651$  ( $P < 0.05$ ), F2 态与  $T$ 、pH、Eh、TOC 相关性显著(表 6), 相关性系数分别为  $-0.649$ 、 $-0.649$ 、 $-0.621$ 、 $0.630$  ( $P < 0.05$ ), F3 态与  $T$  相关性显著, 相关系数为 0.638, F4 态与 pH 相关性显著, 相关系数为 0.618.

表 6 不同形态 Cd 与沉积物地球化学特性的相关性

Table 6 Correlation coefficients between different speciations of Cd and the geochemical characteristics of the indicators

项目	F1	F2	F3	F4
$T$	0.023	$-0.649^*$	$0.638^*$	$-0.156$
pH	$-0.648^*$	$-0.649^*$	$-0.124$	$0.618^*$
Eh	$-0.639^*$	$-0.621^*$	$0.515$	$0.538$
TOC	$0.651^*$	$0.630^*$	$-0.072$	$-0.387$
$D[3,2]$	$-0.406$	$-0.579$	$-0.252$	$-0.028$

沉积物 pH 与 TOC 呈极显著负相关性, Pearson 相关系数为  $-0.775$  ( $P < 0.01$ ). 沉积物其它地球化学特性之间的相关性不明显. 沉积物 pH 分布与底栖动物活动关系密切. 底栖动物的掘穴、摄食等行为引起的颗粒物再生、海水灌溉等直接影响沉积物 pH 在横纵方向的扩大和收缩<sup>[35]</sup>. 同时底栖动物生物量丰度直接影响沉积物中的碳含量, 底栖动物的新陈代谢水平和数量与沉积物中碳含量呈线性关系<sup>[36]</sup>. 海州湾海洋牧场底栖动物平均栖息密度可达  $0.1428 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均生物量  $1.38 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 对照区底栖生物平均栖息密度  $0.0517 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均生物量  $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . 海洋牧场区底栖生物组成种类丰富, 生物量和栖息密度较对照区海域偏高. 底栖生物的生命活动可能是造成 TOC 与 pH 的相关系数高的原因.

### 2.3.2 聚类分析

为进一步研究各变量之间的差异性, 同时验证及配合相关性分析对重金属来源及控制因素. 利用 Primer 5.0, 对沉积物地球化学特性指标、不同态重金属元素含量进行 Q-型聚类分析(即样本聚类). 结果见图 7.

Q-型聚类分析结果显示: 海洋牧场及邻近海域表层沉积物样品可以分为 4 类. 第一类为 S6(B)、D2, 此类位置上相邻, 分布在海洋牧场西北区域, 离海岸线相对较近, 陆源碎屑输入来源较大. 第二类为 S3(A)、S4(B)、S5(B)、S7(C), 采样点位于不同区域, 水平距离较远, 海底构筑物分布稀疏, 构筑

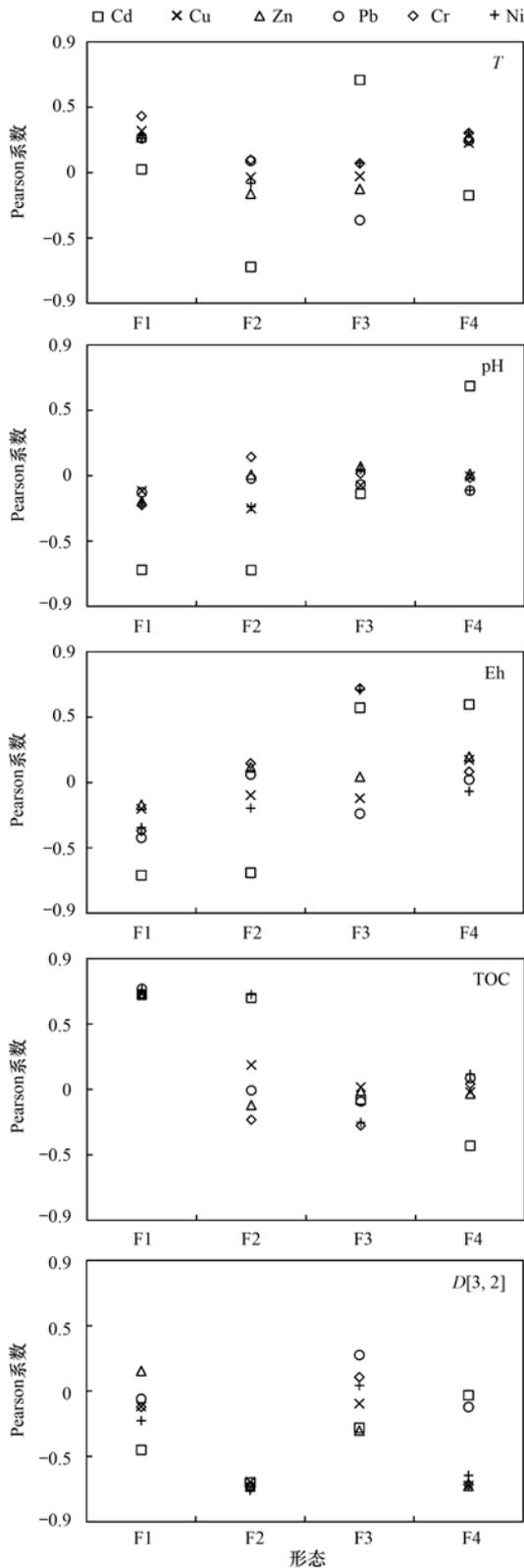


图6 重金属形态与沉积物地球化学特性之间的 Pearson 系数  
 Fig. 6 Pearson coefficients between element speciation using the modified BCR method and sediment geochemical properties

物密度约  $1.5 \times 10^{-3}$  (空)  $m^3 \cdot m^{-2}$ . 第三类为 S1 (A)、S2(A)、S8(C), 处于海洋牧场中心及邻近海

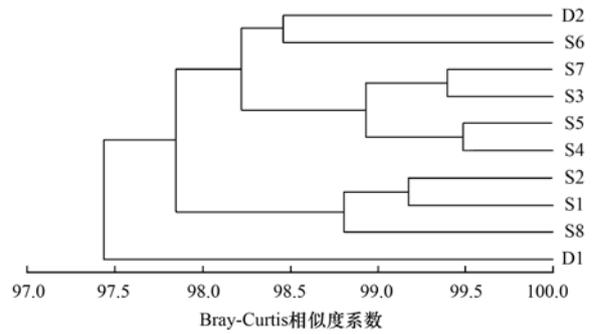


图7 海洋牧场样本聚类分析(Q-型)等级树状图  
 Fig. 7 Cluster analysis level tree(Q-method) of samples in the marine ranching

域, 鱼礁较为密集, 构筑物密度约 (空)  $m^3 \cdot m^{-2}$ . 第四类为 D1, 离海岸较远, 位于海洋牧场外侧, 未投放鱼礁. 聚类分析表明, 所有采样站点沉积物的来源一致 (Bray-Curtis 系数在 95% 以上), 构筑物投放影响海洋牧场沉积物分布.

2.3.3 重金属富集系数

图8比较了不同区域各种重金属元素的富集系数. 海洋牧场内侧区 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 的平均富集系数分别为 1.05、1.27、1.34、1.27、1.15, 小于 1.5, 表明 5 种重金属元素在海洋牧场内侧区未出现富集. 中心区和外侧区的富集程度相似, 平均富集系数差值在 0.05 ~ 0.12, 但均小于 1.5. 对照区 6 种重金属元素的平均富集系数在 1.02 ~ 1.21, 均未呈现富集现象. 重金属 Cd 在内侧区、中心区、外侧区的富集系数均大于 1.5, 分别为 1.93、1.62、1.65, 说明海洋牧场沉积物中 Cd 受到了人为源影响. Cd 地球化学行为较复杂, 次生相的 Cd (F1、F2、F3) 受 T、pH、TOC、Eh、D[3,2] 等多环境因素共同控制, 为其在沉积物中富集提供可能<sup>[37]</sup>. EF 显示同为人为源输入的 Pb 并未在表层沉积物产生富集, 可能与 Pb 自身的地球化学行为有关.

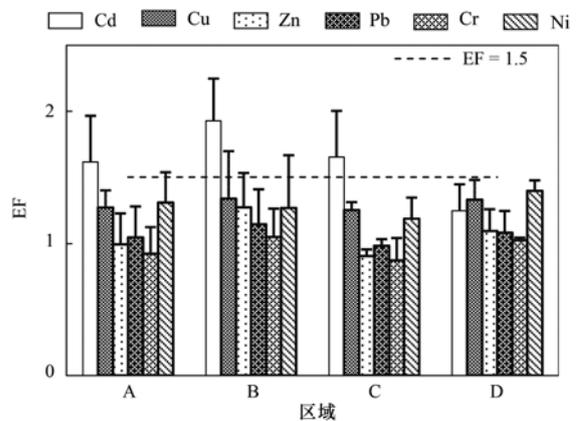


图8 沉积物中重金属富集系数(EF)

Fig. 8 Enrichment factor of heavy metals in the sediment

#### 2.4 沉积物重金属对海洋牧场建设的响应

根据聚类分析,沉积物陆源输入和海底构筑物的阻碍作用造成了沉积物在海洋牧场内侧区的加积. 粒度与不同形态重金属的相关性分析表明,Cr、Ni、Cu、Zn 的原生相(F4)与细颗粒分布呈显著正相关关系. 原生相是 Cr、Ni、Cu、Zn 的主要赋存形态,分别占内侧区总重金属含量的 67.28%, 67.12%, 88.63% 和 65.42%,属于稳定态,不会伴随沉积物的搬运释放进入水体. 说明沉积物重金属总量在内侧区的加积,主要是由于体积较大的内侧区海底构筑物阻挡了陆源输入的沉积物向外海运输所造成的,Cr、Ni、Cu、Zn 与惰性元素 Fe 的参比结果也证明了天然源是海洋牧场沉积物重金属的主要来源. 相对于中心区和外侧区,内侧区沉积物粒度细,易受到潮流、风浪等水动力学的扰动作用,易发生再悬浮现象<sup>[38]</sup>. 再悬浮过程会使还原态沉积物暴露于有氧环境,有机质的氧化降解进而促使次生相(F1、F2、F3)重金属向水体释放,降低沉积物中重金属的含量<sup>[39]</sup>. 从沉积物重金属的次生相空间分布来看,内侧区的分布要高于中心区和外侧区. 相关性分析结果显示沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn 的 F1 态与 TOC 呈显著正相关,F2 态与颗粒物的粒径呈显著负相关. 说明海洋牧场内侧区细颗粒和有机质对沉积物重金属 Cr、Ni、Cu、Zn 次生相的富集、吸附作用要大于颗粒再悬浮的释放作用.

相对于内侧区,海洋牧场中心区投放时间最早,海底构筑物密度大,对陆源沉积物运输阻碍作用最明显,沉积物重金属含量最高. 从重金属形态分布来看,天然源重金属的 Cr、Ni、Cu、Zn 原生相所占比例较其它海域高出 1%~10%. 中心区重金属次生相的含量则与外侧区差别不大,较内侧区低,可能是中心区和外侧区沉积物更易受到潮流干扰作用造成. 受潮水影响水体会在沉积物表面产生典型切应力<sup>[40]</sup>,海洋牧场中心区和外侧区所处海域研究表明,海域底部水体在潮流作用下表现为强烈混合<sup>[41]</sup>,而海底构筑物投放加剧混合作用,沉积物 Eh 的横向分布也说明了这点. 中心区和外侧区的底质类型皆为砂质粉砂,粒度较内侧区偏粗,由于海底构筑物的存在和水动力学条件,使该海域内沉积物处于不稳定环境. 颗粒再悬浮对中心区和外侧区 Cr、Ni、Cu、Zn 次生相的释放作用要大于细颗粒和有机质的富集、吸附作用.

人为源输入的 Pb、Cd 在海洋牧场的空间分布上具有一致性,表现为内侧区大于中心区和外侧区,

因为重金属人为源主要为陆源输入,内侧区沉积物的颗粒组成较细,TOC 含量高,对水体中游离金属离子吸附作用较强,造成重金属在内侧区富集. 已富集在沉积物中的重金属,由于海底构筑物作用不易向中心区和外侧区迁移. 二者不同形态的组成比例具有相似性,次生相赋存含量远高于原生相. 沉积物重金属原生相的含量与其成岩、矿化作用有关,需要周期长<sup>[42]</sup>. 二者比例反映出 Pb、Cd 受人为源的较大影响. 海洋牧场区 Eh 平均值在 -111.67 mV,说明海域内沉积物的氧化还原反应受 Fe、Mn 元素的控制<sup>[43]</sup>. 因此,Pb、Cd 元素主要赋存形态是次生相的铁锰氧化物结合态.

### 3 结论

(1)海州湾海洋牧场沉积物呈中性-弱碱性,属还原环境. Eh 横向分布受到海底构筑物的影响. TOC 在 11.7~13.5 g·kg<sup>-1</sup>. 沉积物组成以粉砂和砂为主,占 80% 以上,表面积平均粒径  $D[3,2]$  介于 3.71~8.02  $\mu\text{m}$ . 内侧区沉积物类型为砂质粉砂,中心区和外侧区为粉砂质砂,对照区为砂质泥.

(2)重金属迁移能力顺序为:Pb > Cd > Cu = Zn > Ni > Cr. Pb、Cd 元素以次生相的铁锰氧化物结合态为主要赋存形态,Cu、Zn、Ni、Cr 主要以原生相形态存在. 重金属总量、次生相含量在海洋牧场中心区和外侧区较内侧区和对照区小,内侧区平均含量普遍高于其它海域. 沉积物中重金属 Cr、Cu、Ni、Zn 基本为天然来源,Cd、Pb 为人为来源. Cd 出现了较明显的富集.

(3)T、pH 与 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 相关性不明显. TOC 与 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 的可交换及碳酸盐结合态(F1)显著相关,沉积物粒度与 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 铁锰氧化物结合态(F2)、Cr、Ni、Cu、Zn 的残渣态(F4)显著相关,Eh 与 Cr、Ni 的有机质及硫化物结合态(F3)显著相关. 不同形态的 Cd 受多环境因子控制.

(4)海底构筑物的存在造成了内侧区沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 的累积. 中心区和外侧区沉积物重金属受海底构筑物的影响小.

致谢:上海市浦东新区环境监测站丁溪萍、徐青协助指导部分实验分析,谨致谢忱!

#### 参考文献:

- [1] Wolanski E, Hamner W M. Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence[J]. Science, 1988, 241 (4862): 177-181.
- [2] 陈勇,杨军,田涛,等. 獐子岛海洋牧场人工鱼礁区鱼类资

- 源养护效果的初步研究[J]. 大连海洋大学学报, 2014, **29**(2): 183-187.
- Chen Y, Yang J, Tian T, *et al.* The enhancement effect of fishery resources on artificial reefs in marine ranching area in Zhangzi Island[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, **29**(2): 183-187.
- [3] 陈晨, 焦海峰, 王一农, 等. 象山港海洋牧场示范区大型底栖生物的时空变化[J]. 海洋与湖沼, 2016, **47**(1): 130-139.
- Chen C, Jiao H F, Wang Y N, *et al.* Temporal and spatial changes of macrobenthos in marine pasture demonstration area in Xiangshan Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, **47**(1): 130-139.
- [4] 李纯厚, 贾晓平, 齐占会, 等. 大亚湾海洋牧场低碳渔业生产效果评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(11): 2346-2352.
- Li C H, Jia X P, Qi Z H, *et al.* Effect evaluation of a low-carbon fisheries production by marine ranching in Daya Bay[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(11): 2346-2352.
- [5] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, **40**(7): 1133-1140.
- Yang H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, **40**(7): 1133-1140.
- [6] 阙华勇, 陈勇, 张秀梅, 等. 现代海洋牧场建设的现状与发展对策[J]. 中国工程科学, 2016, **18**(3): 79-84.
- Que H Y, Chen Y, Zhang X M, *et al.* Modern marine ranching: status and development strategy [J]. Engineering Sciences, 2016, **18**(3): 79-84.
- [7] Young S M, Ishiga H, Roser B P, *et al.* Geochemistry of sediments in three sectors of Trincomalee Bay, Sri Lanka: provenance, modifying factors and present environmental status [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(1): 204-217.
- [8] Song Y X, Ji J F, Yang Z F, *et al.* Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River [J]. Catena, 2011, **85**(1): 73-81.
- [9] Rigaud S, Radakovitch O, Couture R M, *et al.* Mobility and fluxes of trace elements and nutrients at the sediment-water interface of a lagoon under contrasting water column oxygenation conditions[J]. Applied Geochemistry, 2013, **31**: 35-51.
- [10] Malherbe W, Wepener V, Van Vuren J H J. The contribution of physical and chemical sediment characteristics to environmental risk from an irrigation scheme in South Africa [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, **15**(4): 1005-1018.
- [11] Meng Q P, Zhang J, Feng J C, *et al.* Geochemical speciation and risk assessment of metals in the river sediments from Dan River Drainage, China [J]. Chemistry and Ecology, 2016, **32**(3): 221-237.
- [12] Weng H X, Ma X W, Fu F X, *et al.* Transformation of heavy metal speciation during sludge drying: mechanistic insights [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **265**: 96-103.
- [13] Liu B L, Hu K, Jiang Z L, *et al.* Distribution and enrichment of heavy metals in a sediment core from the Pearl River Estuary [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(2): 265-275.
- [14] Saeedi M, Hosseinzadeh M, Rajabzadeh M. Competitive heavy metals adsorption on natural bed sediments of Jajrood River, Iran [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(3): 519-527.
- [15] Wang X L, Li Y. Measurement of Cu and Zn adsorption onto surficial sediment components: new evidence for less importance of clay minerals [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(3): 719-723.
- [16] Sumi H, Kunito T, Ishikawa Y, *et al.* Effects of adding alkaline material on the heavy metal chemical fractions in soil under flooded and non-flooded conditions [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2014, **23**(8): 899-916.
- [17] Prajith A, Rao V P, Chakraborty P. Distribution, provenance and early diagenesis of major and trace metals in sediment cores from the Mandovi estuary, western India [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, **170**: 173-185.
- [18] Fonti V, Dell'Anno A, Beolchini F. Influence of biogeochemical interactions on metal bioleaching performance in contaminated marine sediment [J]. Water Research, 2013, **47**(14): 5139-5152.
- [19] Fetters K J, Costello D M, Hammerschmidt C R, *et al.* Toxicological effects of short - term resuspension of metal - contaminated freshwater and marine sediments [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2015, **35**(3): 676-686.
- [20] Sungur A, Soylak M, Ozcan H. Investigation of heavy metal mobility and availability by the BCR sequential extraction procedure: relationship between soil properties and heavy metals availability [J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2014, **26**(4): 219-230.
- [21] Schaller J, Brackhage C, Dudel E G. Invertebrates minimize accumulation of metals and metalloids in contaminated environments [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, **218**(1-4): 227-233.
- [22] GB 17378.5-2007, 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析 [S].
- GB 17378.5-2007, The specification for marine monitoring-Part 5: sediment analysis [S].
- [23] 齐红艳, 范德江, 徐琳, 等. 长江口及邻近海域表层沉积物 pH、Eh 分布及制约因素 [J]. 沉积学报, 2008, **26**(5): 820-827.
- Qi H Y, Fan D J, Xu L, *et al.* The states of pH, Eh in surface sediments of the Yangtze River Estuary and its adjacent areas and their controlling factors [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, **26**(5): 820-827.
- [24] Nemati K, Bakar N K A, Abas M R, *et al.* Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **192**(1): 402-410.
- [25] 张伯镇, 王丹, 张洪, 等. 官厅水库沉积物重金属沉积通量及沉积物记录的生态风险变化规律 [J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 458-465.
- Zhang B Z, Wang D, Zhang H, *et al.* The flux of sedimentary heavy metals and variation of ecological risks recorded by sediments from Guanting reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 458-465.
- [26] Abraham G M S, Parker R J. Assessment of heavy metal

- enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **136**(1-3): 227-238.
- [27] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [28] 兰孝政, 万荣, 唐衍力, 等. 圆台型人工鱼礁单体流场效应的数值模拟 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, **46**(8): 47-53.  
Lan X Z, Wan R, Tang Y L, *et al.* Numerical simulation of the flow field around the truncated-cone shaped artificial reef [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, **46**(8): 47-53.
- [29] 张硕, 王功芹, 朱珠, 等. 海州湾表层沉积物中不同形态氮季节性赋存特征 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(8): 1336-1341.  
Zhang S, Wang G Q, Zhu Z, *et al.* Seasonal changes of nitrogen forms in the surface sediments of Haizhou Bay [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(8): 1336-1341.
- [30] Olu-Owolabi B I, Popoola D B, Unuabonah E I. Removal of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  from aqueous solution by bentonite clay modified with binary mixture of goethite and humic acid [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **211**(1-4): 459-474.
- [31] 王中波, 李日辉, 张志珣, 等. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, **36**(6): 101-109.  
Wang Z B, Li R H, Zhang Z X, *et al.* Grain size composition and distribution pattern of seafloor sediments in Bohai Bay and adjacent areas [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, **36**(6): 101-109.
- [32] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2013, **41**(2): 114-119.  
Hou J, Wang C, Wang P F, *et al.* Temporal variability and spatial distribution of granulometric composition of surface sediments and classification in Taihu Lake [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, **41**(2): 114-119.
- [33] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3562-3571.  
Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Heavy metal speciation and stability in the sediment of Lihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [34] Barry J P, Buck K R, Lovera C, *et al.* The response of abyssal organisms to low pH conditions during a series of  $\text{CO}_2$ -release experiments simulating deep-sea carbon sequestration [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, **92**: 249-260.
- [35] Morse J W, Beazley M J. Organic matter in deepwater sediments of the northern Gulf of Mexico and its relationship to the distribution of benthic organisms [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2008, **55**(24-26): 2563-2571.
- [36] López-López J A, García-Vargas M, Moreno C. A chemometric approach to the evaluation of atmospheric and fluvial pollutant inputs in aquatic systems: the Guadalquivir River estuary as a case study [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(5): 1136-1143.
- [37] Young S M, Ishiga H. Environmental change of the fluvial-estuary system in relation to Arase Dam removal of the Yatsushiro tidal flat, SW Kyushu, Japan [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(7): 2301-2314.
- [38] Kalnejais L H, Martin W R, Signell R P, *et al.* Role of sediment resuspension in the remobilization of particulate-phase metals from coastal sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(7): 2282-2288.
- [39] Cantwell M G, Burgess R M, Kester D R. Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(24): 5328-5334.
- [40] Bokuniewicz H, McTiernan L, Davis W. Measurement of sediment resuspension rates in Long Island Sound [J]. *Geomarine Letters*, 1991, **11**(3-4): 159-161.
- [41] 原野. 基于声学方法的中国近海沉积物和悬浮颗粒物动力过程观测研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
Yuan Y. Observations of suspended sediment dynamics in Chinese coastal seas by acoustic instruments [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [42] 陈可可. 非稳态条件下东海内陆架泥质沉积物中硫和铁的早期成岩作用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
Chen K K. Unsteady diagenesis of sulfur and iron in the East China Sea inner shelf muds [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [43] Vershinin A V, Rozanov A G. The platinum electrode as an indicator of redox environment in marine sediments [J]. *Marine Chemistry*, 1983, **14**(1): 1-15.

## CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin .....	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China .....	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM <sub>10</sub> Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province .....	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> Measurements During Summer and Fall in Changzhou .....	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou .....	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China .....	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China .....	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn .....	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China .....	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics .....	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin .....	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer .....	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China .....	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu .....	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China .....	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China .....	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios .....	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances .....	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water .....	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions .....	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites .....	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation .....	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor .....	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System .....	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature .....	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System .....	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /Fe(III) EDTA .....	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province .....	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment .....	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil .....	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 .....	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing .....	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary .....	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation .....	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China .....	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert .....	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields .....	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock .....	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil .....	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features .....	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex .....	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products .....	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste .....	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste .....	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models .....	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)