

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 ₁₀ 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 _{2.5} 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, 渭思思, 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 加载不同粒径磁性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 ₃ /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 ₂ 、CH ₄ 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 ₄ 和 N ₂ 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, 郭磊, 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子	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神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, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 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, 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)	

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^{1,2}, 鲍征宇¹, 陈国光², 雍太健², 朱意萍², 梁晓红²

(1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016)

摘要: 为了解华东(江苏省、上海市、浙江省和福建省)沿海滩涂表层沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 等重金属含量特征、来源及污染风险. 采用数理统计、相关性分析、因子分析等方法对华东沿海滩涂区表层沉积物 1906 件样品的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 等 7 种重金属进行了系统研究. 结果显示华东沿海滩涂区表层沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 等 7 种重金属总体含量不高, 其中江苏省沿海滩涂表层沉积物重金属总体含量较低, 上海、浙江沿海滩涂表层沉积物重金属总体含量较高; 上海、浙江沿海滩涂表层沉积物重金属除了自然成因, 受人为活动影响较大, 江苏沿海表层滩涂沉积物受人为活动影响相对较轻, 其中 Hg 在上海、浙江、福建滩涂受人为活动影响尤为严重, Cd、Cu 在上海、浙江滩涂受人为活动影响尤为严重. 采用海洋沉积物污染指数和平均沉积物质量基准商进行评价, 结果显示, 华东沿海滩涂区沉积物总体污染物生态风险较低, 江苏省和福建省滩涂生态风险较低, 上海市和浙江省滩涂生态风险相对较高.

关键词: 滩涂; 重金属; 生态风险评价; 华东沿海; 因子分析

中图分类号: X55; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4513-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701199

Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China

ZHANG Ming^{1,2}, BAO Zhen-yu¹, CHEN Guo-guang², YONG Tai-jian², ZHU Yi-ping², LIANG Xiao-hong²

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: To understand the heavy metals content such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn, as well as their distribution features in surface sediments of tidal flat areas of Eastern China, mathematical statistics, correlation analysis, factor analysis and other statistical methods are used. This study collected 1906 surface sediment samples of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn were collected as part of a systematic research effort. These results show that the coastal tidal flats zone of Eastern China contains surface sediment samples with heavy metal concentrations (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn) with is not high but has increased due to anthropogenic sources. The total content of heavy metals in Jiangsu province is low, however, in Shanghai and Zhejiang provinces relatively high heavy metal contents are present. In addition to natural causes, the heavy metal content in coastal sediment in Shanghai and Zhejiang is significantly affected by human activities, while Jiangsu coastal surface sediments has light impacts from human activities. Heavy metal contamination in coastal areas Shanghai, Zhejiang, and Fujian provinces is particularly serious including Hg, Cd, and Cu contamination. The results of an evaluation using the Marine Pollution Sediment Index and Mean Sediment Quality Guidelines show that in Eastern China, the overall sediment pollutant ecological risk is low for Jiangsu and Fujian provinces, however, the ecological risk for the tidal flats of Shanghai and Zhejiang provincial beaches is relatively high due to heavy metal concentrations.

Key words: tidal flat areas; heavy metals; ecological risk evaluation; Eastern China coastal area; factor analysis

我国人均耕地资源占有量小,随着城镇化加快,可利用土地资源越来越少,滩涂围垦在解决人地矛盾和提供自然资源方面发挥了巨大作用,自古以来我国就有围海造田的历史,尤其是建国以来,人口众多土地资源紧张的背景下,大面积的滩涂围垦作为一种缓解土地资源紧张的一种开发方式尤为重要^[1]. 但围垦也带来一系列生态问题^[2],滩涂地区是沿海陆源污染物和海上排污主要收纳场所^[3,4],引发了环境污染^[5],但前人研究多集中在河口区、养殖区等小区域范围的重金属污染和富营养化的问题^[6-17],对大区域沿海滩涂有毒有害元素分布特征及环境风险评价较少. 华东沿海滩涂总面积

11 056.48 km², 占我国滩涂面积一半左右,是我国重要后备土地资源,本文选择以华东沿海滩涂区(包括江苏、上海、浙江、福建三省一市的沿海滩涂)为研究区,依托华东沿海各省开展的沿海滩涂 1:25 万多目标区域地球化学调查表层滩涂沉积物数据,开展其表层滩涂沉积物中 Cd、Hg、Pb、As、Zn、Cu、Cr 等 7 种有毒有害元素含量特征及分布规律研究,并对华东沿海滩涂区重金属环境生态风险进

收稿日期: 2017-01-24; 修订日期: 2017-05-27

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011220053)

作者简介: 张明(1980~),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: zhangshao_007@163.com

行评价,以期为华东沿海滩涂合理开发利用,提供生态地球化学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区范围包括江苏省的盐城市、南通市,上海市,浙江省的嘉兴市、杭州市、绍兴市、宁波市、台州市、温州市,福建省的宁德市、福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市等沿海滩涂区(图1).

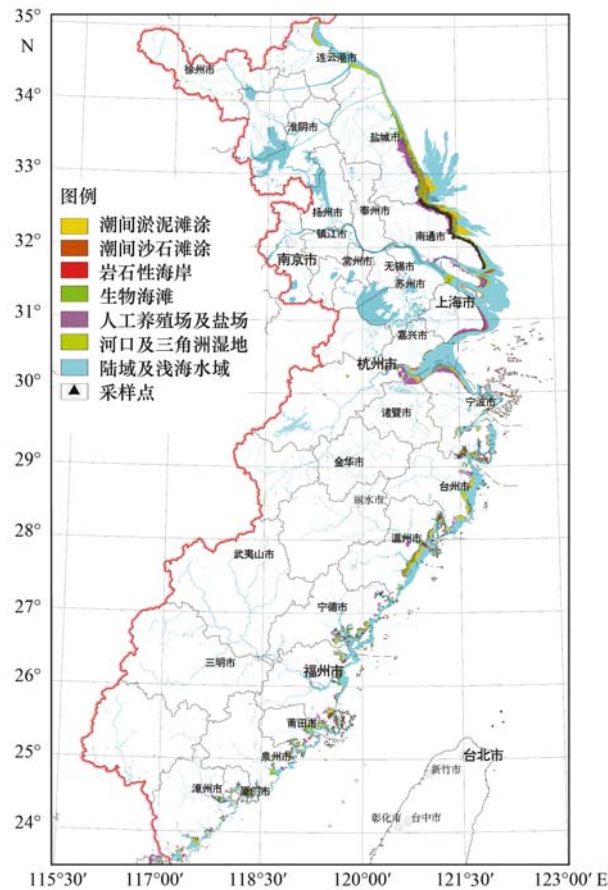


图1 采样点示意

Fig. 1 Map of the sampling points

1.2 样品采集

按照规范要求样品采集用 GPS 定位,用采样器均匀采集 0 ~ 20 cm 表层滩涂沉积物,同时去除石块、贝壳等杂物,样品湿重大于 3.0 kg^[18],共采集了表层滩涂沉积物样品 1 906 件,其中 2007 年江苏省地质调查研究院采集了江苏省沿海滩涂表层沉积物样品 1 199 件,2007 年上海市地质调查研究院采集了上海市滩涂表层沉积物样品 102 件,2004 年浙江省地质调查院采集了浙江省沿海滩涂表层沉积物样品 252 件,2005 年福建省地质调查研究院采集了福建省滩涂表层沉积物样品 353 件.

1.3 分析测试

样品在自然条件下风干,每件样品过 20 目尼龙筛^[18],样品分析采用多目标区域地球化学规定的分析方法及质量监控方案^[19],测试 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 等 7 种元素,分析测试时间和实验室分别是 2007 年江苏省地质调查研究院测试应用研究所、2005 年福建省地质测试研究中心、2004 年中国地质科学院地球物理地球化学勘查中心实验室.

1.4 评价方法

海洋沉积物污染指数 (Marrine Pollution Sediment Index, MPSI) 是 Shin 等^[20]提出一种评价海洋沉积物重金属污染的方法,其引入了主成分分析 (PCA) 计算变量的权重,减少了人为主观分级影响,该方法在国内外被广泛应用于海洋沉积物污染评价.

公式如下:

$$MPSI = \frac{(\sum_{i=1}^n q_i w_i)^2}{100} \quad (1)$$

式中, q_i 指沉积物中第 i 种变量质量级别,质量级别

表 1 沉积物质量级别/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Sediment quality rating guidelines/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

质量级别	Cd	Pb	Zn	Cu	As	Cr	Hg
0 ~ 20	0.6	3.3	15.4	3	7	2	0.06
21 ~ 40	1	5	34	6	8	5	0.07
41 ~ 60	1.5	8	57	12	10.2	9.2	0.08
61 ~ 80	2.9	18.2	101.6	30.6	21	19.6	0.232
81 ~ 100	8	69	507	191	58	63	0.7

分级见表 1; w_i 指第 i 种变量对 MSPI 贡献率(通过主成分分析所得到的相对特征值和相对载荷的乘积得到),MPSI 分级见表 2.

Long 等^[21]提出平均沉积物质量基准商 (Mean Sediment Quality Guideline, MSQG-Q) 也称之为污染物生态风险评价指数. 具体公式如下:

$$MSQG-Q = \frac{\sum_{i=1}^n PEL-Q_i}{n} \quad (2)$$

$$PEL-Q_i = C_i/PEL_i \quad (3)$$

式中, n 指重金属种类; C_i 指第 i 种重金属实测含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); PEL_i 指第 i 重金属对生物产生影响的临界含量(见表 3); $MSQG-Q$ 指数分为 3 个评价水平: $MSQG-Q \leq 0.1$ 无影响,对生物具有极低负影响潜力; $0.1 < MSQG-Q < 1$ 中度影响,对生物具有中等水平负影响潜力; $MSQG-Q \geq 1$ 强烈影响,对生物具有高度负影响潜力。

表 2 沉积物污染指数及污染程度分级

Table 2 Classification and degree of pollution using the marine pollution sediment index

MPSI	沉积物污染程度
0 ~ 20	极清洁
21 ~ 40	清洁
41 ~ 60	一般
61 ~ 80	污染
81 ~ 100	极度污染

表 3 PEL 值

Table 3 Probable effect level (PEL) values for selected heavy metals

元素	Cd	Pb	Zn	Cu
临界值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4. 21	112	271	108
元素	As	Cr	Hg	
临界值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	41. 6	160	0. 7	

2 结果与讨论

2.1 滩涂沉积物重金属元素含量特征

华东沿海滩涂区表层沉积物中重金属元素含量参数见表 4,其含量分布见图 2(为了保持数据整体特征形态,作图时剔除了上海样品中 Cd 两个特高值 $1.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 江苏样品中 Cu 两个特高值 $281 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $370 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及上海的样品中 1 个特高值 $177 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 福建样品中 Hg 1 个特高值 $0.583 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和图 3. 为了便于对比分析,表 4 中还列出了国内外几个重要的河口三角洲、滩涂沉积物重金属含量和相关标准限量值。

表 4 华东沿海滩涂区表层沉积物中重金属元素含量特征¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Concentration distribution of heavy metals in the Eastern China intertidal zone/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

地区	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
全区	平均值	8.11	0.09	70.03	18.9	0.03	23.05	69.61
	含量范围	1.10 ~ 27.2	0.02 ~ 1.43	4.20 ~ 230.0	2.8 ~ 370.0	0.001 ~ 0.58	0.50 ~ 85.8	9.30 ~ 431.0
江苏	平均值	6.88	0.07	67.81	13.27	0.02	16.81	50.86
	含量范围	3.32 ~ 19.80	0.03 ~ 0.18	45.5 ~ 230.0	6.30 ~ 370.0	0.001 ~ 0.17	12.20 ~ 60.8	35.5 ~ 103.0
上海	平均值	8.59	0.19	81.94	29.62	0.06	26.25	91.01
	含量范围	4.61 ~ 27.2	0.07 ~ 1.43	59.4 ~ 184.0	12.4 ~ 177.0	0.02 ~ 0.31	15.1 ~ 72.2	53.6 ~ 431.0
浙江	平均值	11.96	0.14	92.47	34.74	0.06	29.71	109.3
	含量范围	3.67 ~ 19.32	0.08 ~ 0.28	22.75 ~ 145.4	11.30 ~ 88.7	0.02 ~ 0.22	15.10 ~ 64.02	45.40 ~ 171.9
福建	平均值	9.39	0.08	58.13	23.64	0.06	38.56	98.76
	含量范围	1.10 ~ 15.82	0.02 ~ 0.31	4.20 ~ 120.70	2.80 ~ 71.9	0.004 ~ 0.58	0.50 ~ 85.8	9.30 ~ 182.8
海洋沉积物标准 I ~ II ~ III 级 ^[22]	限量值	20 ~ 65 ~ 93	0.5 ~ 1.5 ~ 5.0	80 ~ 150 ~ 270	35 ~ 100 ~ 200	0.2 ~ 0.5 ~ 1.0	60 ~ 130 ~ 250	150 ~ 350 ~ 600
中国东部岩石 ^[23]	平均值	3	0.081	37	13.8	0.009 7	18.5	58
	含量范围	0.3 ~ 19	0.02 ~ 0.32	1.0 ~ 2 526	0.8 ~ 59	0.003 ~ 0.062	2.9 ~ 63	10 ~ 139
UCC ^[24]	平均值	4.8	0.09	92	28	0.05	17	67
东台滩涂 ^[27]	平均值	7.07	0.09	61.15	—	—	15.45	—
	含量范围	5.21 ~ 9.35	0.08 ~ 0.11	48.05 ~ 73.80	—	—	10.21 ~ 36.38	—
渤海湾潮间带 ^[28]	平均值	—	0.12	68.6	24	—	25.6	73
	含量范围	—	0.05 ~ 0.19	36.7 ~ 110	7.9 ~ 46.7	—	18.8 ~ 39.1	34.0 ~ 123
黑水河口 ^[29]	平均值	—	0.34	48	24	0.27	42	89
泰晤士河口 ^[30]	平均值	—	1.3	59	61	0.6	179	219
莱茵河口 ^[31]	平均值	—	45	1 240	600	23	800	2 900
印度东南海岸 ^[32]	平均值	—	11.13	4.23	40.19	—	26.16	198.6
	含量范围	—	4.5 ~ 17.34	BDL ~ 16.98	13.41 ~ 95.24	—	16.30 ~ 53.35	72 ~ 300

1) “—”表示该重金属文献中未报道,BDL 表示该重金属文献中未检出

由表 4 可知,华东沿海滩涂区表层沉积物中元素 As 的含量范围为 $1.10 \sim 27.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量

$8.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 各省(市)沿海滩涂区表层沉积物中元素 As 的含量表现为浙江省 > 福建省 > 上海市 > 江

苏省,尤以浙江省沿海滩涂表层沉积物中 As 的含量最高,平均值为 $11.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,江苏省沿海滩涂区表层沉积物中元素 As 的含量最低,平均为 $6.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 表 4 显示华东沿海及 3 省 1 市的沿海滩涂

区表层沉积物中 As 元素平均含量均低于海洋沉积物质量 I 级标准限量值^[22]; 虽然华东沿海沿海滩涂沉积物中的 As 含量总体偏低,但上海市和江苏省沿海滩涂中均存在少量样点 As 含量超标的现象(图 2).

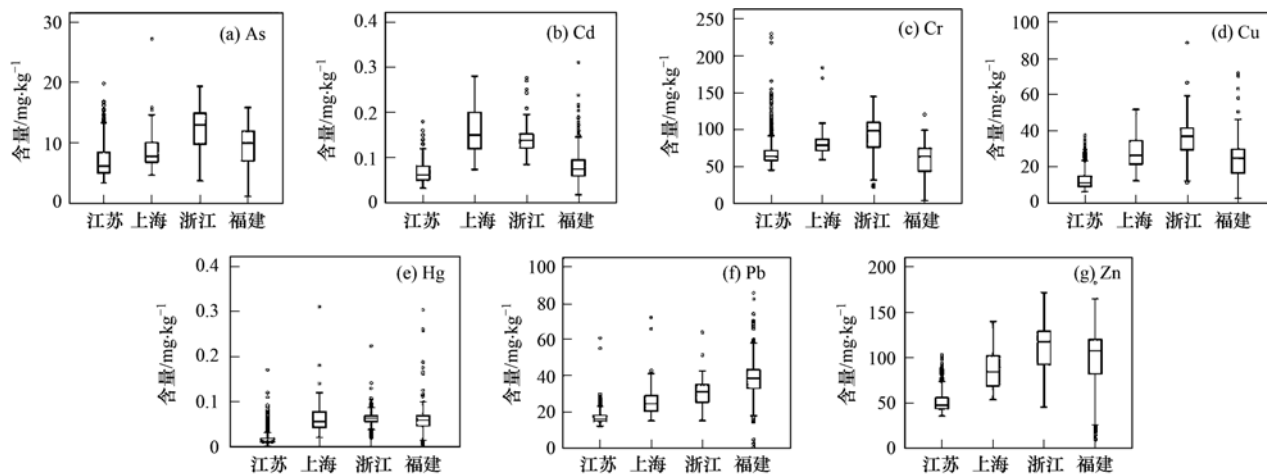


图 2 华东沿海滩涂沉积物中重金属元素含量分布箱图

Fig. 2 Boxplots of heavy metals concentrations in the Eastern China intertidal zone

由 As 在各省(市)沿海滩涂中的含量分布直方图可见(图 3),江苏省和上海市沿海滩涂表层沉积物中的 As 含量呈右偏的单峰分布,其峰值($6 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与各自的均值相当,高于中国东部岩石 As 平均含量^[23]和大陆上地壳(UCC) As 平均含量^[24],大致代表由区域岩石风化和迁移沉积的本底含量特征,而右偏(高值部分)部分则可能代表了污染叠加^[24],尤其是上海市沿海滩涂表层沉积物中存在的孤立的特高含量点($21.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)位于在浦东机场沿海东南河口滩涂区,已超过海洋沉积物质量 As 元素 I 级标准限量值^[22]. 浙江省沿海滩涂表层沉积物中 As 含量呈双峰分布,第一个峰值大致与江苏省和上海市沿海滩涂表层沉积物中 As 平均值相当,应该代表区域岩石风化和迁移沉积的本底含量特征;第 2 个峰值($14 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)代表了一组高值样品,尽管还处于国标海洋沉积物质量 As 元素 I 级标准限量值^[22]范围内,但在乐清湾和三门湾等港湾地区的人为和自然叠加应引起高度重视^[25]. 福建省沿海滩涂表层沉积物中的 As 含量呈略左偏(向低值部分偏斜)的单峰分布,其峰值约为 $11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这是由于背景值较高造成^[26].

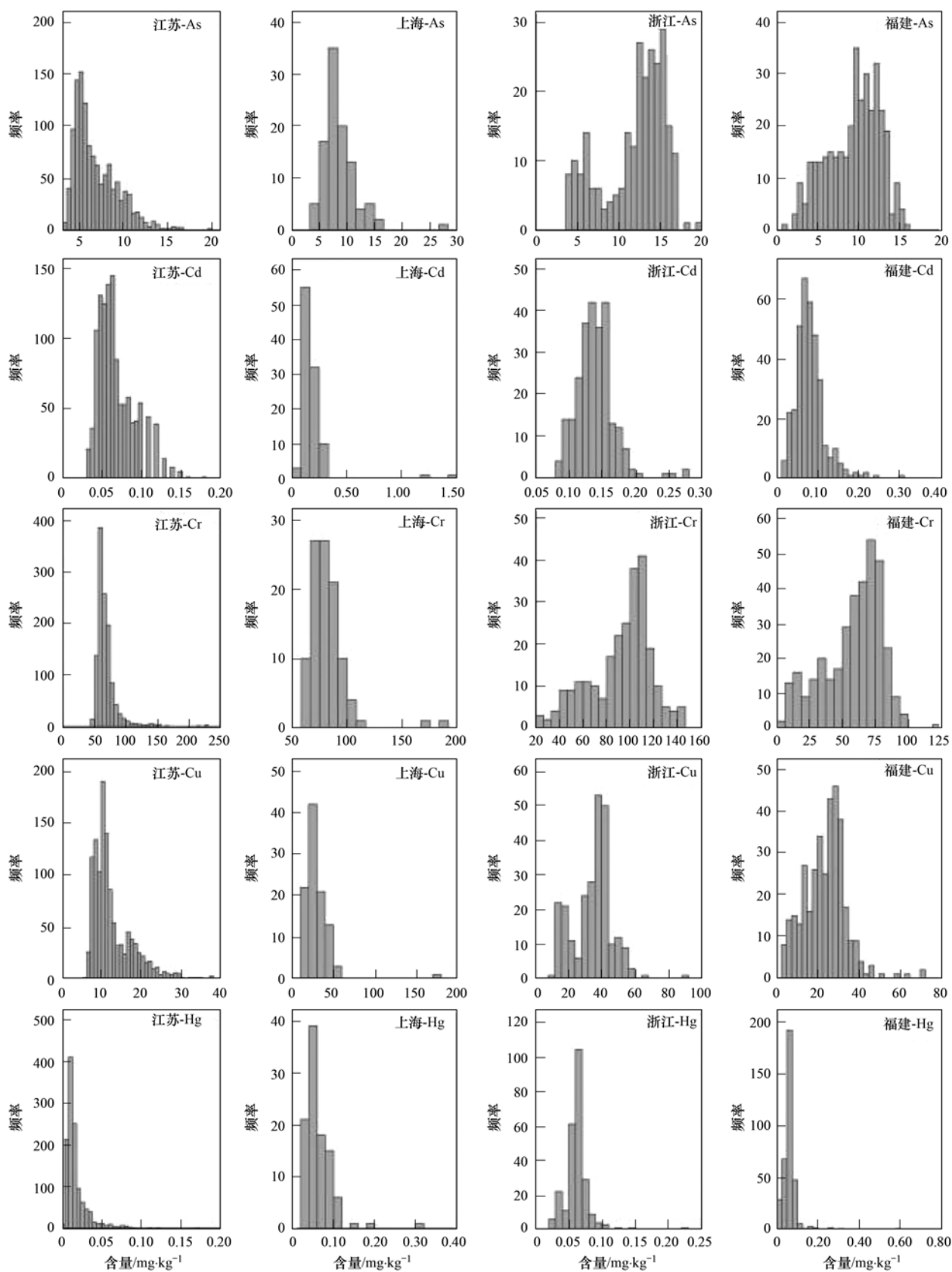
华东沿海滩涂区表层沉积物中元素 Cd 的含量范围为 $0.02 \sim 1.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中江苏省和福建省沿海滩涂表层沉积物中的 Cd 含量平均值略低于区域平均值,分别为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与苏北东台滩涂元

素 Cd 平均含量^[27]、中国东部岩石元素 Cd 平均含量^[23]、大陆上地壳(UCC)元素 Cd 平均含量^[24]相接近,应主要是区域岩石风化作用的结果;但浙江省和上海市沿海滩涂中的 Cd 含量相对较高,平均值分别为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,尤其是上海市,其沿海滩涂中 Cd 的最高含量达到 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,已接近海洋沉积物质量 Cd 元素 II 级标准限量值^[22]. 由 Cd 在各省(市)沿海滩涂中的含量分布直方图(图 3)可见,各省市沿海滩涂中 Cd 含量均呈右偏的单峰分布,也说明存在局部的一定程度的污染叠加^[25]. 华东各省(市)沿海滩涂中 Cd 含量总体不高,其平均含量远低于渤海湾^[28]、英国黑水河^[29]、泰晤士河口^[30]、莱茵河口^[31]和印度东南海岸^[32]沉积物 Cd 含量,可见华东地区沿海滩涂中 Cd 总体含量较低,只有个别点存在污染.

华东沿海滩涂区表层沉积物中元素 Cr 的含量范围为 $4.2 \sim 230.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量 $70.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中以福建省沿海滩涂中的 Cr 含量平均值最低,为 $58.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,略低于苏北东台滩涂^[27]和渤海湾^[28] Cr 含量平均值,浙江省沿海滩涂中的 Cr 含量平均值最高,为 $92.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,福建、上海、江苏滩涂中 Cr 含量平均值低于海洋沉积物质量 Cr 元素 I 级标准限量值^[22]和大陆上地壳(UCC)平均含量^[24],但均高于中国东部岩石平均含量^[22]. 由各省(市)沿海滩涂中 Cr 含量分布直方图(图 3)可见,江苏省和上海市沿海滩涂中 Cr 含量均呈右偏的单

峰分布,其右偏程度不大,表现为一些孤立高值点的叠加;而浙江省和福建省沿海滩涂中 Cr 含量呈左偏的单峰分布,这可能是由于浙江和福建沿海地区

花岗岩发育有关。华东各省(市)沿海滩涂中 Cr 含量高于英国黑水河^[29]、泰晤士河口^[30]和印度东南海岸^[32],低于莱茵河口^[31]沉积物 Cr 含量。



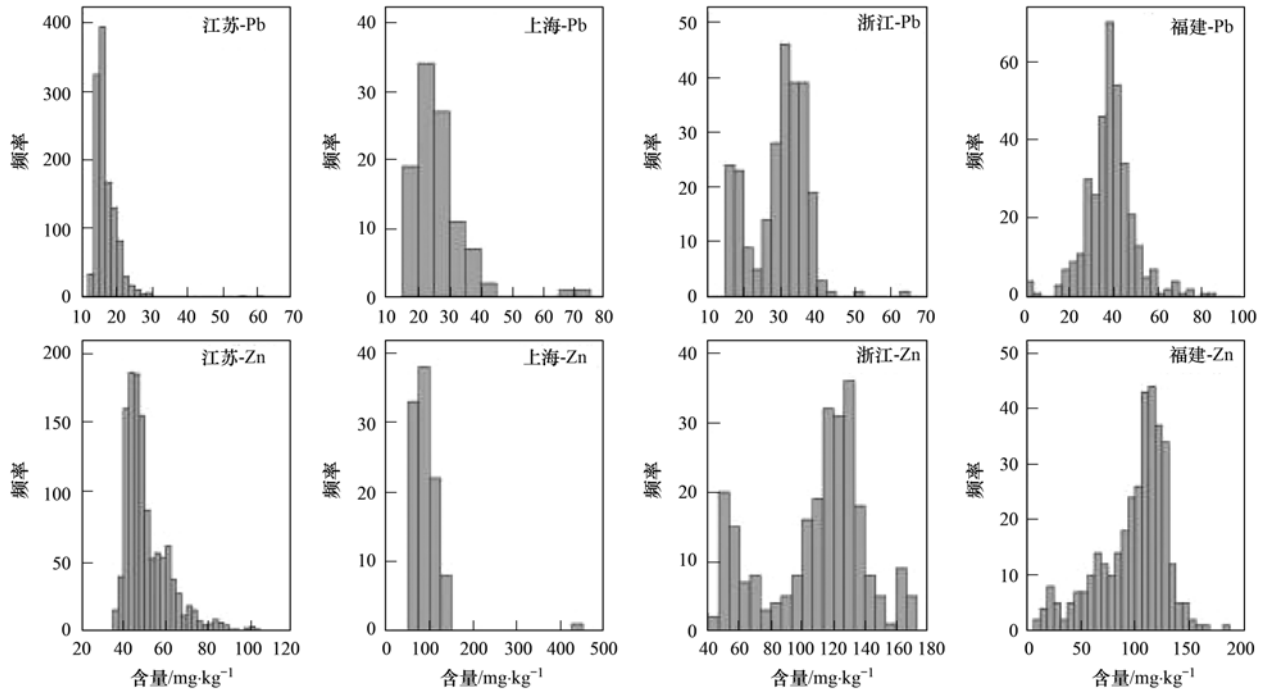


图3 华东沿海滩涂沉积物中重金属元素含量分布

Fig. 3 Histogram of concentrations of heavy metals in the Eastern China intertidal zone

华东沿海滩涂区表层沉积物中元素 Cu 的含量范围为 $2.8 \sim 370.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量 $18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但各省(市)沿海滩涂中 Cu 含量的差异较大(见图2), 以江苏省沿海滩涂中的 Cu 含量平均值最低, 为 $13.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大致与中国东部岩石平均含量^[23]相当; 浙江省沿海滩涂中的 Cu 含量平均值最高, 为 $34.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于渤海湾^[28]、英国黑水河口^[29]和大陆上地壳(UCC)^[24] Cu 平均含量, 接近国家海洋沉积物环境质量 Cu 元素 I 级标准限量值^[22], 但低于泰晤士河口^[30]、莱茵河口^[31]和印度东南海岸^[32] Cu 平均值含量。由各省(市)沿海滩涂中 Cu 含量分布直方图(图3)可见, 江苏省沿海滩涂中 Cu 含量呈右偏的单峰分布, 其右偏程度不大, 表现为孤立高值点的叠加, 峰值大致相当于中国东部岩石 Cu 平均含量^[23], 表现为区域岩石风化作用和个别高值污染的叠加; 浙江省和上海市沿海滩涂中 Cu 含量呈双峰分布, 其中浙江省的 Cu 含量第1个峰值与中国东部岩石 Cu 平均含量^[22]相当, 而第2个峰值为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 已超过国家海洋沉积物质量 Cu 元素 I 级标准限量值^[21], 高值样品已远超海洋沉积物质量 Cu 元素 III 级标准限量值^[22]; 上海的第1个峰和第2个峰值含量均大于浙江省的相应峰值含量, 但其第2个峰值的样品规模(样品数)要小得多。福建省沿海滩涂中 Cu 含量呈不对称的单峰分布, 峰值含量较高, 显示高的区域背景值^[26], 并局部

有个别高值点的叠加。

华东沿海滩涂区表层沉积物中元素 Pb 的含量范围为 $0.50 \sim 85.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量 $23.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中以江苏省沿海滩涂中的 Pb 含量平均值最低, 为 $16.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与苏北东台滩涂^[27]和中国东部岩石 Pb 平均含量^[23]大致相当; 福建沿海滩涂中的 Pb 含量平均值最高, 为 $38.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于渤海湾沉积物 Pb 含量^[28], 与英国黑水河口沉积物 Pb 含量^[29]相当, 但远低于泰晤士河口^[30]和莱茵河口^[31]沉积物 Pb 含量。各省(市)沿海滩涂中 Pb 含量分布直方图表明(图3), 江苏省沿海滩涂中 Pb 含量呈略右偏的单峰分布, 其峰值大致相当于中国东部岩石平均含量^[23], 应主要反映了区域岩石风化、迁移沉积的结果, 污染叠加较弱; 上海市沿海滩涂中 Pb 含量除少量高值点外, 主要也呈略右偏的单峰分布, 但其峰值明显大于江苏省沿海滩涂, 可能反映较高的区域背景含量并伴随局部的污染叠加; 浙江省沿海滩涂中 Pb 含量呈双峰分布, 第1个峰值大致相当于中国东部岩石平均含量^[23], 是由岩石风化作用所导致, 而第2个峰值则代表了人为叠加后的分布。福建省沿海滩涂中 Pb 含量呈较好的对称分布, 反映了较高的背景含量之上的污染叠加, 从元素含量分布的箱式图也可看出(图2), 福建省沿海滩涂中存在较多的 Pb 含量离群高值样品。华东沿海滩涂区 Pb 总体含量不高, 但也有少量样品的 Pb 含量已超过海洋沉积物

质量 Pb 元素 II 级标准限量值^[21],这也表明华东沿海滩涂区确已存在一定程度的 Pb 污染.

华东沿海滩涂区表层沉积物中元素 Zn 的含量范围为 9.30 ~ 431.0 mg·kg⁻¹, 平均含量 69.61 mg·kg⁻¹,其中以江苏省沿海滩涂中的 Zn 含量平均值最低,为 50.86 mg·kg⁻¹,略低于中国东部岩石平均含量^[23];上海市、浙江省和福建省沿海滩涂中的 Zn 含量平均值较为接近,平均值介于 91.01 ~ 109.3 mg·kg⁻¹之间,大于渤海湾^[28]、英国黑水河口^[29]、大陆上地壳(UCC)平均含量^[24],但低于泰晤士河口^[30]和莱茵河口^[31]、印度东南海岸^[32].

各省(市)沿海滩涂中 Zn 含量分布直方图表明(图 3),江苏省沿海滩涂中 Zn 含量呈略右偏的单峰分布,其峰值偏小,高值部分叠加也较弱;上海市和浙江省沿海滩涂中 Zn 含量呈双峰分布,尤以浙江省

为典型,第 1 个峰值大致相当于中国东部岩石平均含量^[23]和大陆上地壳(UCC)平均含量^[24],是由岩石风化作用所导致,而第 2 个峰值则代表了人为叠加后的分布;福建省沿海滩涂中 Zn 含量则呈左偏的单峰分布,峰值较大,反映了较高的背景 Zn 含量.华东沿海滩涂区 Zn 的总体含量不高,但也有少量样品的 Zn 含量已超过海洋沉积物质量 Zn 元素 II 级标准限量值^[22],这也表明华东沿海滩涂区确已存在一定程度的 Zn 污染.

2.2 滩涂沉积物重金属相关关系分析

利用 SPSS Pearson 相关分析对华东沿海各省表层滩涂沉积物重金属进行了相关分析,结果显示(表 5). 各省表层滩涂沉积物重金属之间呈现显著正相关($P < 0.01$),说明各省表层滩涂沉积物重金属具有一定相似来源.

表 5 华东沿海滩涂区表层沉积物中重金属相关性系数¹⁾
Table 5 Correlation coefficients for heavy metals in the Eastern China intertidal zone

地区		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
江苏	As	1.000	0.482 **	0.370 **	0.160 **	0.117 **	0.643 **	0.613 **
	Cd		1.000	0.131 **	0.345 **	0.393 **	0.591 **	0.740 **
	Cr			1.000	0.040	0.157 **	0.374 **	0.329 **
	Cu				1.000	0.192 **	0.726 **	0.362 **
	Hg					1.000	0.380 **	0.548 **
	Pb						1.000	0.775 **
	Zn							1.000
上海	As	1.000	0.702 **	0.762 **	0.889 **	0.741 **	0.823 **	0.868 **
	Cd		1.000	0.622 **	0.805 **	0.670 **	0.668 **	0.802 **
	Cr			1.000	0.788 **	0.657 **	0.674 **	0.779 **
	Cu				1.000	0.839 **	0.810 **	0.980 **
	Hg					1.000	0.741 **	0.864 **
	Pb						1.000	0.788 **
	Zn							1.000
浙江	As	1.000	0.569 **	0.806 **	0.810 **	0.552 **	0.837 **	0.850 **
	Cd		1.000	0.585 **	0.687 **	0.720 **	0.684 **	0.656 **
	Cr			1.000	0.848 **	0.563 **	0.809 **	0.896 **
	Cu				1.000	0.593 **	0.846 **	0.915 **
	Hg					1.000	0.679 **	0.643 **
	Pb						1.000	0.894 **
	Zn							1.000
福建	As	1.000	0.480 **	0.885 **	0.752 **	0.288 **	0.607 **	0.831 **
	Cd		1.000	0.392 **	0.585 **	0.567 **	0.734 **	0.662 **
	Cr			1.000	0.777 **	0.227 **	0.481 **	0.845 **
	Cu				1.000	0.312 **	0.633 **	0.811 **
	Hg					1.000	0.521 **	0.424 **
	Pb						1.000	0.783 **
	Zn							1.000

1) * * 表示 0.01 水平显著相关

通过主成分分析和方差极大正交旋转,获得华东各省滩涂表层沉积物重金属元素在各主因子上载

荷(表 6),由各主因子的特征值百分比可知,前 2 ~ 4 个主因子已占变量间相关性的总信息量的 85%.

得到变量的因子组合特征如下(以因子载荷绝对值大于 0.5 的入选,由大到小排列).以绝对值由大到小排列.

江苏沿海表层滩涂沉积物 F1:As、Cd、Zn、Pb,

F2:Cu、Pb, F3:Hg, F4:Cr. 在江苏沿海表层滩涂沉积物中 As-Cd-Zn-Pb 均位于第 1 主因子,相关性系数都大于 0.48,具密切共生关系;Hg、Cr 与其他元素相关系数都小于 0.4,共生关系相对较弱.

表 6 华东沿海滩涂区表层沉积物中重金属因子载荷

Table 6 Factor loading of heavy metals in the Eastern China intertidal zone

元素	江苏				上海		浙江		福建		
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F3
As	0.859	0.072	-0.138	0.328	0.766	0.532	0.876	0.289	0.901	0.260	0.122
Cd	0.782	0.207	0.358	-0.129	0.301	0.891	0.375	0.841	0.231	0.854	0.302
Cr	0.150	0.037	0.094	0.958	0.881	0.293	0.885	0.301	0.965	0.130	0.087
Cu	0.118	0.980	0.080	-0.033	0.674	0.703	0.850	0.407	0.768	0.467	0.056
Hg	0.145	0.100	0.949	0.087	0.561	0.682	0.319	0.876	0.114	0.313	0.941
Pb	0.596	0.690	0.195	0.283	0.693	0.542	0.802	0.487	0.385	0.809	0.237
Zn	0.755	0.261	0.464	0.178	0.653	0.719	0.882	0.404	0.782	0.526	0.186
特征值	2.333	1.565	1.316	1.163	3.129	2.932	3.938	2.214	3.159	2.061	1.092
特征值百分比/%	33.322	22.359	18.805	16.614	44.700	41.891	56.251	31.624	45.127	29.443	15.602

上海沿海表层滩涂沉积物 F1:Cr、As、Pb、Cu、Zn、Hg,F2:Cd、Zn、Cu、Hg、Pb、As. 在上海沿海滩涂表层沉积物中重金属元素在 F1、F2 因子中都显示了较高因子载荷,相关系数都大于 0.60,这说明该地区滩涂表层沉积物中重金属具有密切共生关系,具有相似地球化学行为特征.

浙江沿海表层滩涂沉积物 F1:Cr、Zn、As、Cu、Pb,F2:Cd、Hg. 在浙江沿海滩涂表层沉积物中明显分为两个元素组合特征,即 Cr-Zn-As-Cu-Pb 相关性系数都大于 0.80,具密切共生关系;Cd-Hg 相关性系数为 0.72,具密切共生关系.

福建沿海表层滩涂沉积物 F1:Cr、As、Zn、Cu, F2:Cd、Pb、Zn, F3:Hg. 在福建沿海滩涂表层沉积物中存在 3 个元素组合,即 Cr-As-Zn-Cu 相关性系数都大于 0.75,具密切共生关系;Cd-Pb-Zn 相关性系数都大于 0.65,具密切共生关系;Hg 与其他元素相关系数较小,共生关系相对较弱.

2.3 滩涂沉积物重金属来源初步判别

富集因子法被广泛应用于研究和鉴别重金属污染源,区分自然和人为的贡献^[33,34],但是其背景值选择尤为重要,江苏海域为黄海,而上海、浙江、福建海域为东海,因此为了更加准确判别其重金属来源,分别选择黄海和东海沉积物含量为其参比元素背景值^[35],结合前人大量研究,本次选择 Al (Al₂O₃)作为参比元素^[36,37].

$$EF = \left[\frac{C_n/C_{Al}}{B_n/B_{Al}} \right]$$

式中,C_n为样品某重金属元素含量,单位mg·kg⁻¹,

C_{Al}为样品 Al (Al₂O₃)含量,单位%;B_n为参比重金属元素含量,单位mg·kg⁻¹,B_{Al}为参比 Al (Al₂O₃)含量,单位%.

理论上,EF>1 即可认为沉积物中重金属受到人为污染的影响,但是考虑参比元素校正误差及不确定性^[38],结合前人研究认为 EF>1.1 可以表示沉积物中重金属受到人为活动影响^[38,39].

依据表层滩涂沉积物重金属 EF>1.1 情况(表 7),江苏沿海表层滩涂沉积物中重金属受人为影响大小顺序为 Cr>Hg>Cd>As>Cu>Zn>Pb. 上海沿海表层滩涂沉积物中重金属受人为影响大小顺序为 Cd>Hg>Cu>Zn>Pb>Cr>As. 浙江沿海表层滩涂沉积物中重金属受人为影响大小顺序为 Cd>Hg>Cu>Zn>As>Cr>Pb. 福建沿海表层滩涂沉积物中重金属受人为影响大小顺序为 Hg>Pb>Cu>Cd>Zn>As>Cr.

上海、浙江表层滩涂沉积物重金属人为影响较大,90%以上站点都显示 Cd、Hg 受到人为活动影响,80%以上站点 Cu 受到人为活动影响. 福建沿海滩涂表层沉积物中 80%以上站点 Hg 受到人为活动影响,45%上站点 Pb、Cu 受到人为活动影响. 江苏沿海表层沉积物中 36.70%以上站点 Cr 受到人为活动影响,其他重金属元素受人为活动影响较轻.

从上述分析可知,上海、浙江沿海滩涂表层沉积物重金属除了自然成因,受人为活动影响较大,江苏沿海表层滩涂沉积物受人为活动相对较轻. 其中 Hg 在上海、浙江、福建滩涂受人为活动影响尤为严重,Cd、Cu 在上海、浙江滩涂受人为活动影响尤为严重.

表 7 华东沿海滩涂区表层沉积物中重金属富集系数

Table 7 Concentration coefficient of heavy metals in the Eastern China intertidal zone

富集系数	地区	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
EF > 1.1	江苏	126	146	443	92	192	26	34
	上海	11	101	17	86	96	23	36
	浙江	95	248	81	227	247	15	159
	福建	6	40	3	162	295	191	30
EF ≤ 1.1	江苏	1 073	1 053	756	1 107	1 007	1 173	1 165
	上海	91	1	85	16	6	79	66
	浙江	157	4	171	25	5	237	93
	福建	347	313	350	191	58	162	323

2.4 滩涂沉积物重金属污染评价

通过主成分分析求取了华东沿海滩涂重金属 PCA 结果见表 8, 第一个因子主要元素为 As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn, 第二因子主要元素为 Cr. 根据 MPSI 公式求取了华东沿海滩涂区表层土壤 MPSI 指数.

从 MPSI 分析结果来看, 华东沿海滩涂区总体污染较轻(表 9); MPSI 指数在 0 ~ 20 的极清洁样品占总样品的 16.05%; MPSI 指数在 21 ~ 40 清洁样品占总样品的 63.85%; MPSI 指数在 41 ~ 60 实物一般样品占总样品的 20.04%, 而其中占总样品

17.47% 的 MPSI 指数在 41 ~ 50; MPSI 指数大于 61 的污染样品只有 1 件.

江苏省 1 199 个件滩涂表层沉积物样品有 1 196 件 MPSI 指数在 0 ~ 40 之间为极清洁级、清洁级, 只有 3 件 MPSI 指数在 41 ~ 50 之间; 上海市 102 件滩涂表层沉积物有 74 件(占样品 72.55%) MPSI 指数在 21 ~ 40 之间为清洁级, 27 件(占样品 26.47%) 为一般级, MPSI 指数在 41 ~ 60 之间, MPSI 指数大于 61 污染样品只有 1 件; 浙江省 252 件滩涂表层沉积物有 75 件(占样品 29.76%) MPSI 指数在 21 ~ 40 之间为清洁级, MPSI 指数在 41 ~ 60 之间一般级样

表 8 通过 PCA 计算的华东沿海滩涂表层沉积物中重金属的分重结果¹⁾

Table 8 Calculated weighting for selected variables for the PCA found in the Eastern China intertidal zone surface sediments

主成分	特征值	相对特征值	变量	载荷	相对载荷	分重
1	4.506	0.829	As	0.839	0.168	0.14
			Cd	0.774	0.155	0.129
			Cu	0.779	0.156	0.13
			Hg	0.792	0.159	0.132
			Pb	0.845	0.17	0.141
			Zn	0.951	0.191	0.158
			总计	4.98	1	
2	0.932	0.171	Cr	0.744	1	0.171
总计	5.438	1				1

1) 分重 = 相对特征值 × 相对载荷

表 9 华东沿海滩涂表层沉积物的重金属污染指数

Table 9 Metal contamination index for sediments in the Eastern China intertidal zone

MPSI 污染分级 质量分级指数	极清洁 ≤ 20	清洁 21 ~ 40	一般		污染 61 ~ 80	极度污染 81 ~ 100
			41 ~ 50	51 ~ 60		
总体样品数量	306	1 217	333	49	1	
百分比/%	16.05	63.85	17.47	2.57	0.05	
江苏样品数量	265	931	3	0		1 196
百分比/%	22.10	77.65	0.25			
上海样品数量		74	17	10	1	102
百分比/%		72.55	16.67	9.80	0.98	26.47
浙江样品数量		75	158	19		
百分比/%		29.76	62.70	7.54		
福建样品数量	41	137	155	20		
百分比/%	11.61	38.81	43.91	5.67		

品为 177 件(占样品 70.24%);福建省 353 件滩涂表层沉积物有 41 件(占样品 11.61%)为极清洁级,137 件(占样品 38.81%)为清洁级,175 件(占样品 49.58%)样品为一般级,其中 MPSI 指数在 41~50 之间样品数为 155 件。

从 MPSI 指数分布范围来看,江苏省滩涂沉积物污染程度最低,99.75% 样品的 MPSI 指数都小于 40,浙江省滩涂沉积物污染程度最高,只有 29.76% 样品从 MPSI 指数小于 40。

从 MSG-Q 分析结果来看,华东沿海滩涂区沉积物总体污染物生态风险较低(表 10),无污染物生态风险 $MSG-Q \leq 0.1$ 样品有 22 件(占样品 1.15%),中度污染物生态风险 $0.1 < MSG-Q < 1$ 样品 1 884 件(占样品 98.85%),而其中在中-低度污染物生态风险 $0.1 < MSG-Q < 0.5$ 样品有 1 881 件(占样品 98.69%),未出现 $MSG-Q \geq 1$ 的重度污染物生态风险样品。

江苏省 1199 件滩涂表层沉积物中有 1 182 件样品

(占样品 98.58%)的 MSG-Q 在 0.1~0.25 之间,17 件样品(占样品 1.42%)的 MSG-Q 在 0.25~0.50 之间,只有 2 件样品的 MSG-Q 在 0.5~1.0 之间。

上海市 102 件滩涂表层沉积物有 62 件样品(占样品 61.39%)的 MSG-Q 在 0.1~0.25 之间,39 件样品(占样品 38.61%)的 MSG-Q 在 0.25~0.50 之间,只有 1 个样品的 MSG-Q 在 0.5~1.0 之间。

浙江省 252 件滩涂表层沉积物有 65 件样品(占样品 25.79%)的 MSG-Q 在 0.1~0.25 之间,187 件样品(占样品 74.21%)的 MSG-Q 在 0.25~0.50 之间。

福建省 332 件滩涂表层沉积物有 22 样品(占样品 6.23%)的 MSG-Q ≤ 0.1 ,158 件样品(占样品 45.04%)的 MSG-Q 在 0.1~0.25 之间,172 件样品(占样品 48.73%)的 MSG-Q 在 0.25~0.50 之间。

从 MSG-Q 分析结果来看,江苏省和福建省滩涂生态风险较低,上海市和浙江省滩涂生态风险相对较高。

表 10 华东沿海滩涂表层沉积物的生态风险评价指数

Table 10 Mena Sediment Quality Guideline for sediments in the East China intertidal zone

生态影响分级 MSG-Q 分级	无影响 ≤ 0.1	中度影响			强烈影响 ≥ 1
		0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	
总体样品数量	22	1 468	413	3	
百分比/%	1.15	77.02	21.67	0.16	
江苏样品数量		1 182	17	2	
百分比/%		98.58	1.42	0.17	
上海样品数量		62	39	1	
百分比/%		61.39	38.61	0.99	
浙江样品数量		65	187		
百分比/%		25.79	74.21		
福建样品数量	22	159	172		
百分比/%	6.23	45.04	48.73		

3 结论

(1)华东沿海滩涂表层沉积物 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 等 7 种重金属总体含量不高,但局部存在人为污染高值点;江苏省重金属总体含量较低,上海和浙江重金属含量相对较高。

(2)华东沿海各省滩涂表层沉积物 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 等 7 重金属元素金属具有一定相似来源,但其重金属组合特征各异。

(3)上海、浙江沿海滩涂表层沉积物重金属除了自然成因,受人为活动影响较大,江苏沿海表层滩涂沉积物受人为活动相对较轻。其中 Hg 在上海、浙江、福建滩涂受人为活动影响尤为严重,Cd、Cu 在上海、浙江滩涂受人为活动影响尤为严重。

(4)从 MPSI 和 MSG-Q 分析结果来看,华东沿海滩涂区表层沉积物重金属总体污染较轻,生态风险较低,江苏省滩涂表层沉积物环境质量最好,上海市和浙江滩涂表层沉积物质量较差;江苏省和福建省滩涂表层沉积物生态风险较低,上海市和浙江省滩涂生态风险相对较高。

致谢:华东沿海各省地质调查院在采样和实验方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 张长宽,陈君,林康,等.江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(2):206-212.
Zhang C K, Chen J, Lin K, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(2): 206-212.
[2] Wu J H, Fu C Z, Lu F, et al. Changes in free-living nematode community structure in relation to progressive land reclamation at

- an intertidal marsh[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, **29**(1): 47-58.
- [3] 于瑞莲, 王荔娟, 胡恭任, 等. 泉州湾潮间带表层沉积物中酸可提取相重金属[J]. *环境化学*, 2009, **28**(5): 739-743.
- Yu R L, Wang L J, Hu G R, *et al.* Distribution of acid-leachable heavy metals in intertidal sediments from Quanzhou bay [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, **28**(5): 739-743.
- [4] 杨妙峰, 郑盛华, 林永青, 等. 三沙湾溪邛村滩涂养殖区沉积物质量状况及风险评价[J]. *福建水产*, 2015, **37**(3): 202-210.
- Yang M F, Zheng S H, Lin Y Q, *et al.* Status and risk assessment of sediment samples on the mud-flat culture areas of Xipi village in Sansha Bay [J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2015, **37**(3): 202-210.
- [5] Bai J H, Xiao R, Cui B S, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River estuary, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 817-824.
- [6] Lee S V, Cundy A B. Heavy metal contamination and mixing processes in sediments from the Humber estuary, eastern England [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, **53**(5): 619-636.
- [7] 康勤书, 周菊珍, 吴莹, 等. 长江口滩涂湿地重金属的分布格局和研究现状[J]. *海洋环境科学*, 2003, **22**(3): 44-47.
- Kang Q S, Zhou J Z, Wu Y, *et al.* Distribution and research situation of heavy metals in tidal wetlands of Changjiang estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, **22**(3): 44-47.
- [8] 丘耀文, 朱良生. 海陵湾沉积物中重金属污染及其潜在生态危害[J]. *海洋环境科学*, 2004, **23**(1): 22-24.
- Qiu Y W, Zhu L S. Heavy metals pollution and their potential ecological risk in the sediment of Hailing Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2004, **23**(1): 22-24.
- [9] 李取生, 楚蓓, 石雷, 等. 珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1442-1426.
- Li Q S, Chu B, Shi L, *et al.* Heavy metal distribution in tidal wetland soils and its effect on reclamation in the Pearl River estuary [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1442-1426.
- [10] 陈斌林, 贺心然, 王童远, 等. 连云港近岸海域表层沉积物中重金属污染及其潜在生态危害[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(3): 246-249.
- Chen B L, He X R, Wang T Y, *et al.* Heavy metals pollution and potential ecological risk in sediment of Lianyungang sea area [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, **27**(3): 246-249.
- [11] 左平, 刘长安, 赵书河, 等. 米草属植物在中国海岸带的分布现状[J]. *海洋学报*, 2009, **31**(5): 101-111.
- Zuo P, Liu C A, Zhao S H, *et al.* Distribution of *Spartina* plantations along the China's coast [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **31**(5): 101-111.
- [12] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 等. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(6): 2019-2027.
- Yao R J, Yang J S, Chen X B, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation of soil quality in coastal reclamation region of North Jiangsu province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42**(6): 2019-2027.
- [13] 武银华. 滩涂 NP 有机物富营养化的研究与分析[J]. *辽宁化工*, 2010, **39**(12): 1254-1257, 1262.
- Wu Y H. Research and analysis on NP organic matter eutrophication of marsh [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2010, **39**(12): 1254-1257, 1262.
- [14] 张博, 郑青松, 赵耕毛, 等. 基于 GIS 和地统计学的滩涂增养殖区沉积物重金属污染评价[J]. *海洋环境科学*, 2011, **30**(3): 376-379.
- Zhang B, Zheng Q S, Zhao G M, *et al.* Pollution assessments on heavy metals in sediment in inter-tidal aqua-farm area based on GIS and geostatistics [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, **30**(3): 376-379.
- [15] 吴建兰. 长江入海口北支沿海滩涂养殖区底泥重金属污染特征及趋势评价[J]. *四川环境*, 2012, **31**(4): 76-80.
- Wu J L. Assessment on heavy metal pollution and its change in the sediment of the aquatic culture zone on coastal mudflat along the north branch of Yangtze River estuary [J]. *Sichuan Environment*, 2012, **31**(4): 76-80.
- [16] 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 等. 江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2401-2410.
- Zhang L H, Du Y F, Wang D D, *et al.* Distribution patterns and pollution assessments of heavy metals in the spartina alterniflora salt-marsh wetland of Rudong, Jiangsu province [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2401-2410.
- [17] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, **33**(1): 67-72.
- Liu G M, Lü Z Z, Yang J S, *et al.* Quality evaluation of soil in land along Bohai sea coast by principal component analysis and GIS [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, **33**(1): 67-72.
- [18] 中国地质调查局. DD2005-01 多目标区域地球化学调查规范 (1:250000) [Z]. 2005.
- China Geological Survey. DD2005-01 Specification of multi-purpose regional geochemical survey (1:250000) [Z]. 2005.
- [19] 张勤. 多目标地球化学填图中的 54 种指标配套分析方案和分析质量监控系统[J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(3): 292-297.
- Zhang Q. A complete set of analytical schemes and analytical data monitoring systems for determinations of 54 components in multi-purpose geochemical mapping [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(3): 292-297.
- [20] Shin P K S, Lam W K C. Development of a marine sediment pollution index [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(3): 281-291.
- [21] Long E R, MacDonald D D, Severn C G, *et al.* Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, **19**(10): 2598-2601.
- [22] GB 18668-2002, 海洋沉积物质量[S].
- GB 18668-2002, Marine sediment quality[S].
- [23] 迟清华, 鄯明才. 中国东部岩石地球化学图[J]. *地球化学*, 2005, **34**(2): 97-108.
- Chi Q H, Yan M C. Lithogeochemical map in the eastern part of China [J]. *Geochimica*, 2005, **34**(2): 97-108.
- [24] Gaschnig R M, Rudnick R L, McDonough W F, *et al.* Onset of oxidative weathering of continents recorded in the geochemistry of

- ancient glacial diamictites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, **408**: 87-99.
- [25] 夏学齐, 陈骏, 廖启林, 等. 南京地区表土镉汞铅含量的空间统计分析[J]. *地球化学*, 2006, **35**(1): 1-5.
- Xia X Q, Chen J, Liao Q L, *et al.* Spatial statistics for cadmium, mercury and lead contents in topsoil of Nanjing[J]. *Geochimica*, 2006, **35**(1): 1-5.
- [26] 林才浩. 福建沿海土壤地球化学分类及基准值研究[J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(3): 347-354.
- Liu C H. Research of geochemical classification of soils and geochemical baseline in coastal zone of Fujian province [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(3): 347-354.
- [27] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 苏北滨海滩涂区土壤重金属含量及其时空变异研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1810-1820.
- Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Contents and spatio-temporal variability of soil heavy metals in the coastal mud-flat area of North Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1810-1820.
- [28] Gao X L, Li P M. Concentration and fractionation of trace metals in surface sediments of intertidal Bohai Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(8): 1529-1536.
- [29] Emmerson R H C, O'Reilly-Wiese S B, Macleod C L, *et al.* A multivariate assessment of metal distribution in inter-tidal sediments of the Blackwater estuary, UK[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, **34**(11): 960-968.
- [30] Attrill M J, Thomes R M. Heavy metal concentrations in sediment from the Thames estuary, UK[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, **30**(11): 742-744.
- [31] Banat K, Förstner U, Müller G. Experimental mobilization of metals from aquatic sediments by nitrilotriacetic acid [J]. *Chemical Geology*, 1974, **14**(3): 199-207.
- [32] Magesh N S, Chandrasekar N, Roy D V. Spatial analysis of trace element contamination in sediments of Tamiraparam estuary, Southeast coast of India [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, **92**(4): 618-628.
- [33] 徐刚, 刘健, 孔祥淮, 等. 近海沉积物重金属污染来源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2012, **28**(11): 47-52.
- Xu G, Liu J, Kong X H, *et al.* Analysis of sources of heavy metal pollution in near-shore sediments [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, **28**(11): 47-52.
- [34] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 945-951.
- [35] 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.
- [36] 张慧娟, 刘云根, 梁启斌, 等. 阳宗海沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(S1): 353-359.
- Zhang H J, Liu Y G, Liang Q B, *et al.* Pollution evaluation and source identification of heavy metals in sediments of Yangzong hai [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(S1): 353-359.
- [37] 王丹, 孟鑫, 张洪, 等. 梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(6): 1901-1909.
- Wang D, Meng X, Zhang H, *et al.* Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Liangzi Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(6): 1901-1909.
- [38] Boës X, Rydberg J, Martinez-Cortizas A, *et al.* Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2011, **46**(1): 75-87.
- [39] 燕婷, 刘恩峰, 张恩楼, 等. 抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 50-58.
- Yan T, Liu E F, Zhang E L, *et al.* The spatio-temporal variations of heavy metals in the sediment of Lake Fuxian and the contamination assessment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 50-58.

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 ₁₀ 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 _{2.5} 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)
Physiochemical 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 ₃ /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 ₂ and CH ₄ 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)