

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响

高文华, 杜永芬*, 王丹丹, 高抒

(南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093)

摘要: 潮间带是典型的环境脆弱带和敏感带。为探明福建罗源湾潮间带的环境质量, 于 2009 年在该区开展了野外调查, 利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定了该区表层沉积物中重金属(Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn)浓度, 用潜在生态风险评价法评价了该区的环境质量。结果表明, 整个潮间带表层沉积物主要是粉砂和黏土质粉砂, 重金属元素(Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn)的平均含量分别为: 20.48、77.82、23.24、40.67、36.25、134.75、111.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 互花米草盐沼区表层沉积物中重金属含量明显高于光滩区; 与其它地区相比, 本区表层沉积物重金属含量明显高于福建海岸带土壤背景值, 但低于珠江口地区。主成分分析和相关分析表明, 工业排污和生活污水是本区重金属污染的主要来源, 而矿床开采以及有机质降解产生的内源释放也是该区重金属元素来源的主要途径之一。潜在生态风险评价显示, 研究区具中等程度的潜在生态危害风险; Ni 和 Co 是主要环境污染因子, Pb 的污染程度较低; 互花米草盐沼的潜在生态风险高于光滩区, 不同重金属的潜在生态危害程度顺序为 $\text{Ni} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Zn}$ 。

关键词: 重金属元素; 环境评价; 潮间带; 互花米草盐沼; 福建罗源湾

中图分类号: X145; X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)09-3097-07

Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast

GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, GAO Shu

(Key Laboratory of Coast and Island Development of Ministry of Education, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Intertidal flats represent a typical environmentally fragile and sensitive zone. In order to investigate the environmental quality of the intertidal zone in Luoyuan Bay, field survey was carried out in 2009. Contents of heavy metals (Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V and Zn) in the surficial sediment were measured using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES). Moreover, the impact on the environment quality was evaluated with the potential ecological risk method. The average contents of the heavy metals Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V and Zn in the surficial sediment were 20.48, 77.82, 23.24, 40.67, 36.25, 134.75 and 111.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The heavy metal contents in the *Spartina alterniflora* salt-marsh were apparently higher than those in the bare flat. Further, the heavy metal concentrations found in the present study were generally higher than the background values of the coastal regions of Fujian Province, but lower than those associated with the Pearl River estuary. According to principal component and correlation analyses, industrial wastewater, mineral exploration and degradation of organic matter were the main sources of heavy metals in the area investigated. The results of potential ecological risk evaluation indicated that the intertidal zone as a whole can be ranked as "moderate potential ecological risk". Ni and Co were the major pollutants among the metals in consideration; the pollution related to Pb was less significant. The level of potential ecological risk of the *Spartina alterniflora* salt-marsh was higher than that of the bare flat. The sequence of potential ecological risk for the heavy metals was $\text{Ni} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Zn}$.

Key words: heavy metals; environment quality assessment; intertidal flats; *Spartina alterniflora* salt-marsh; Luoyuan Bay (Fujian coast)

潮间带环境受陆地、海洋和人类活动等多重因素的影响, 是典型的环境脆弱带和敏感带。近年来, 随着沿海地区的发展, 潮间带环境受到不同程度的污染, 尤其是重金属污染。通过各种途径进入水环境的重金属, 经吸附、沉降等作用转移至沉积物中, 因此重金属在沉积物中的分布和迁移动态能够反映环境污染状况, 是生态环境质量评价的重要方面^[1,2]。例如, 通过对长江口及其邻近海域沉积物中

重金属分布特征分析所做的环境质量评价表明, 该区底质环境都受到了不同程度的污染, 其环境质量较差^[3,4]。类似的研究在渤海辽东湾和胶州湾等地

收稿日期: 2011-11-27; 修订日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(40906066); 中国博士后基金项目(20100471303); 江苏省博士后基金项目(0901016C); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 高文华(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海岸带陆海相互作用, E-mail: gaowenhua-666@163.com

* 通讯联系人, E-mail: duyongfen@nju.edu.cn

区也有开展^[5-7],结果显示这些区域的重金属主要受陆地岩石和土壤风化产物的控制,同时人为活动也对其产生一定影响. 也有学者对珠江口表层沉积物中重金属分布进行了探讨^[8],认为该区重金属主要受陆源污染物的影响. 目前国际上广泛使用的环境评价方法主要有地质累积指数法^[9]、潜在生态危害指数法^[10]、生物效应浓度法^[11],这些方法可以从不同角度定量评价河口海岸带地区的污染水平和潜在的生态风险,从而为河口生态系统健康评价奠定基础^[12].

罗源湾位于福建省东北部沿海,被罗源半岛和黄岐半岛环抱,是一个典型的半封闭海湾(图1). 作为福建省六大深水港湾之一,罗源湾是海水养殖和近海捕捞的重要场所. 20世纪80年代以来,港口建设、滩涂围垦及互花米草引种等人类活动的加剧使海湾环境发生了较大变化. 已有学者对罗源湾水域表层沉积物中重金属元素的含量和分布进行了研究^[13-15],而对潮间带重金属元素的地球化学特征以及环境质量评价研究还相对较少. 在本研究中,笔者在罗源湾马鼻镇附近潮间带设置了一个代表性断面(6个站位),对表层沉积物进行了一年4个季

节的采样和现场观察,拟通过对罗源湾潮间带沉积物中重金属元素分布特征分析,确定重金属污染物的来源,进而对重金属污染对该区环境质量的影响进行评价.

1 材料与方法

1.1 站位布设及样品采集

于2009年3月19~23日、6月28日~7月1日、9月23~28日及12月26~28日低潮位期间,在拟定的潮间带断面的6个站位(图1)进行了表层沉积物样品采集. 该采样断面覆盖了不同的潮滩环境类型,在本区潮间带具有代表性. 其中S1、S2和S3位于潮间带上部互花米草盐沼区域. 生长在盐沼内部的互花米草植株,较在边缘生长的相对粗壮且高大. 在生长茂盛的夏秋季节,S1站位的互花米草植株高度约为160~230 cm; S2和S3站位的植株高度约为130~160 cm. B1、B2和B3位于中下部光滩区域. 用一次性注射器改造的采样管插管采集表层沉积物(0~0.5 cm),每个站点采集4个重复样,充分混合后冷冻保存,用于重金属和粒度分析.

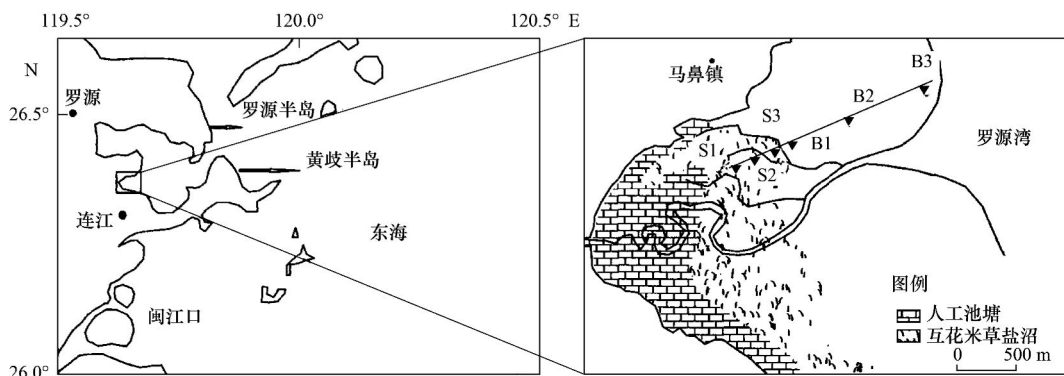


图1 研究区域与采样站位的分布示意

Fig. 1 Study area and sampling stations

1.2 重金属含量分析

重金属的前处理主要参考文献^[16]. 样品带回实验室后,置于烘箱内105℃恒温烘干,用玛瑙研钵研磨至样品可以完全过100目筛为止,然后用精度为0.0001 g的分析天平称取约0.125 g研磨样品至聚四氟乙烯烧杯内. 用适量去离子水润湿后,加3 mL HCl和2 mL HNO₃;在红外加热板上低温加热(80℃,约20 min),使其充分反应后,冷却15 min,加入5~8 mL HF和0.25 mL HClO₄,再次以80℃加热直至溶液蒸干且白烟冒尽时,往烧杯中一次加入1.75 mL HCl、0.25 mL H₂O₂、3 mL H₂O加盖微热2

min,再加入20 mL纯水定容至25 mL用于分析. 重金属元素Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn采用的Optima 5300DV型电感耦合等离子体发射光谱仪测试(ICP-AES,美国Perkin Elmer公司生产). 同时测定标准样和空白样,以判定测量结果的可靠性以及实验环境下的背景值. 此外,对沉积物中的有机质含量进行了测定,测定方法参照海洋监测规范重铬酸钾-硫酸氧化法^[17].

1.3 粒度分析

用Mastersizer 2000型激光粒度仪进行粒度分析. 每个样品取1~2 g置于容量为20 mL的玻璃烧

杯中,用分散剂(0.01 mol·L⁻¹六偏磷酸钠溶液)浸泡 24 h 后,转入容量为1 000 mL 的塑料杯中,超声振荡 15 s 后,测量 3 个周期. 激光粒度仪测量范围为 0.02 ~ 2 000 μm,获得 1/4 Φ 间隔分布的粒度数据,同时,仪器的质控要求重复测量的相对误差为 <3%^[18].

1.4 环境质量评价方法

采用瑞典科学家 Hakanson^[10] 提出的沉积物中重金属潜在生态危害评价方法,数学表达式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{c_i}{c_n^i}$$

式中,RI 为潜在生态危害指数; E_r^i 为某一污染物潜在生态危害指数; T_r^i 为污染物毒性响应参数; C_i^i 为

某一污染物的污染指数,又称富集系数; c_i^i 为沉积物中某一污染物的实测浓度; c_n^i 为沉积物中相应污染物的背景值. 沉积物背景值的地区性强,采用不同的背景值对计算潜在生态危害指数有较大的影响^[19],本研究采用福建省海岸带土壤背景值作为沉积物中相应污染物的背景值^[20]. 沉积物中重金属的背景参照值及毒性响应参数见表 1^[10,21].

依据重金属的潜在生态风险指数(E_r^i)可将沉积物中重金属污染状况划分为 5 个等级^[7];依据重金属的潜在生态综合风险指数(RI)可将沉积物中重金属污染程度划分为 4 个等级. 重金属的潜在生态风险指数(E_r^i),潜在生态综合风险指数(RI)与污染程度的具体关系见表 2.

表 1 沉积物中重金属背景参照值(c_n^i)及毒性响应参数(T_r^i)^[10,21]

Table 1 Baseline values (c_n^i) and toxicity coefficients (T_r^i) of heavy metals in sediment							
参数	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
$c_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	9.48	40.7	22.4	17.4	39	79.7	83.6
T_r^i	5	2	5	5	5	2	1

表 2 重金属潜在生态风险指数(E_r^i)和潜在生态综合风险指数(RI)与风险程度的关系

Table 2 Potential ecological risk coefficient (E_r^i) and risk index (RI) of the heavy metals, and their relationships with the associated risk level

潜在生态风险指数 E_r^i	潜在生态综合风险指数 RI	风险程度分级
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	低潜在生态风险
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中潜在生态风险
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	较重潜在生态风险
$160 \leq E_r^i < 320$	$600 \leq RI$	重潜在生态风险
$320 \leq E_r^i$	—	很严重潜在生态风险

1.5 数据分析

重金属含量与平均粒径、黏土含量之间的相关性以及重金属之间的相关性采用 Pearson 相关分析,采用双尾检测来确定其相关关系的显著性水平. 重金属的来源分析采用主成分分析方法. 以上分析均采用 SPSS 软件(16.0)完成.

2 结果与讨论

2.1 沉积环境特征

粒度分析显示,福建罗源湾潮间带沉积物组成相对稳定(表 3),主要为粉砂和黏土质粉砂;平均粒径为 7.18 Φ;砂、粉砂和黏土含量分别为 1.54%、70.76% 和 26.77%;同时,整个潮间带中有机质含量仅占 1.26%. 沉积物中的有机质含量在

互花米草盐沼区显著高于光滩区,其平均含量分别为 1.68% 和 1.41%. 互花米草盐沼区沉积物中的砂、粉砂和黏土含量分别为 0.34% ~ 2.34%、65.83% ~ 71.12% 和 26.57% ~ 29.33%;平均值分别为 1.68%、69.11% 和 27.36%;光滩区沉积物砂、粉砂和黏土含量变化分别为 1.14% ~ 1.83%、70.84% ~ 74.03% 和 24.83% ~ 27.37%,平均值分别为 1.41%、72.41% 和 26.18%. 统计结果显示互花米草盐沼区沉积物中砂和黏土含量高于光滩区;粉砂含量则低于光滩地区. 互花米草盐沼沉积物的平均粒径为 7.15 Φ,略低于光滩区沉积物的平均粒径(7.22 Φ). 由互花米草盐沼向光滩区推进过程中,沉积物的分选系数先增大后减小;表明互花米草盐沼区沉积物的分选程度逐渐变差,随着向光滩区的推移,其沉积物的分选程度又逐渐变好.

国内外许多研究^[22,23]表明,与光滩区沉积物相比,互花米草盐沼内的沉积物颗粒较细. 有学者^[22,24]认为,互花米草对悬沙具有很强的圈闭和富集作用,潮流携带的悬沙进入互花米草盐沼后会迅速发生沉降,随着向互花米草深处不断输运,沉降到地面上的沉积物粒径逐渐变小. 同时,互花米草由于根系发达、植株密度大、覆盖度高,因此圈闭的沉积物有粗有细,分选程度较差;光滩地区由于没有植被的影响,水动力作用相对较强,因此沉降下来的沉积物相对较粗.

表 3 福建罗源湾潮间带表层沉积物粒度参数

Table 3 Grain-size parameters of the surficial sediment at the intertidal flat of Luoyuan Bay, Fujian

潮间带区域	站位	有机质 /%	砂 /%	粉砂 /%	黏土 /%	平均粒径 / Φ	分选系数	偏态	峰态
互花米草盐沼(S)	S1	1.30	0.34	70.33	29.33	7.41	1.29	0.88	1.74
	S2	1.42	2.34	65.83	26.57	6.87	1.42	-0.15	2.00
	S3	1.40	2.33	71.12	26.85	7.20	1.44	-0.06	2.01
	S1 ~ S3 平均	1.37	1.68	69.11	27.36	7.15	1.38	0.23	1.92
光滩(B)	B1	1.14	1.83	70.84	27.37	7.24	1.42	0.19	1.96
	B2	1.14	1.14	74.03	24.83	7.17	1.37	0.46	1.88
	B3	1.17	1.33	73.10	25.87	7.21	1.35	0.49	1.85
	B1 ~ B3 平均	1.15	1.41	72.41	26.18	7.22	1.38	0.38	1.90
整个潮间带	S1 ~ B3 平均	1.26	1.54	70.76	26.77	7.18	1.38	0.30	1.91

2.2 重金属元素分布特征

各站位表层沉积物重金属元素含量见表 4. 整个潮间带的重金属元素 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn 的平均含量分别为:20.48、77.82、23.24、40.67、36.25、134.75、111.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 互花米草盐沼区域表层沉积物中重金属含量明显高于光滩区. 另

外,互花米草盐沼中 S1 站位重金属含量相对较高(除 Pb 和 Zn 外),S2 站位重金属含量普遍较低,S3 站位 Pb 和 Zn 含量最高,分别为 39.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 114.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 光滩区 B2 站位的重金属含量较低,B1 站位和 B3 站位的重金属含量普遍较高,表明在不同类型湿地上,边缘区重金属含量高于内部.

表 4 福建罗源湾潮间带表层沉积物重金属元素含量

Table 4 Heavy metal contents in the surficial sediments at the intertidal flat of Luoyuan Bay, Fujian

潮间带区域	站位	重金属元素含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
		Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
互花米草盐沼(S)	S1	21.33	80.81	24.24	41.98	37.10	139.93	113.58
	S2	20.91	79.12	23.71	41.26	36.65	136.33	109.08
	S3	21.06	79.79	23.79	41.32	39.13	137.83	114.41
	S1 ~ S3 平均	21.10	79.91	23.91	41.52	37.63	138.03	112.36
光滩(B)	B1	19.98	76.13	22.59	40.84	35.00	133.03	106.78
	B2	19.45	73.82	21.99	37.72	33.55	128.13	109.23
	B3	20.16	77.23	23.14	40.88	36.10	133.25	114.18
	B1 ~ B3 平均	19.86	75.73	22.57	39.81	34.88	131.47	110.07
整个潮间带	S1 ~ B3 平均	20.48	77.82	23.24	40.67	36.25	134.75	111.21

湿地沉积物对重金属的富集作用一方面可以通过细颗粒泥沙的粘附作用来进行,主要体现在重金属与沉积物粒径和沉积物中黏土含量之间的高度相关;另一方面也可以通过盐沼植被的生物化学过程将重金属吸附在根系附近,并通过向茎叶等组织输运重金属使其得到富集^[25~27]. 罗源湾潮间带表层沉积物粒径、黏土含量与重金属含量的相关分析表明(表 5),互花米草盐沼表层沉积物重金属含量与平均粒径和黏土含量之间的相关性非常差,表明该区域重金属并不是主要吸附在沉积物细颗粒部分而沉积下来的,而是通过互花米草植被对重金属的吸收和富集作用而沉积下来的;光滩区除 Ni 元素与平均粒径和黏土含量具有显著的相关关系外,其余重金属元素与平均粒径和黏土含量的相关性均不显著,然而与互花米草

盐沼相比较,光滩区重金属元素与平均粒径和黏土含量的相关性明显更高,说明光滩区重金属受细颗粒泥沙粘附作用的影响相对较大,同时互花米草对该地区的物质循环也造成了影响. 这进一步表明互花米草引种可以引起潮间带物质循环和生物地球化学的改变.

与其它地区(表 6)的比较表明,罗源湾潮间带表层沉积物重金属元素含量普遍高于福建海岸带土壤背景值以及中国浅海沉积物和花岗岩中重金属元素的含量,低于珠江口近岸沉积物中重金属的含量;然而,与长江口相比,当前研究区中 Cr 和 Cu 含量略低;与黄河口相比,Ni 含量明显较低;同时,Cr、Cu 和 Ni 的含量也明显低于世界页岩中重金属的含量. 由此表明,这里的沉积物重金属含量具有独特的区域性变化特征.

表 5 福建罗源湾潮间带表层沉积物中重金属元素含量与平均粒径、黏土含量的相关系数¹⁾

潮间带区域		相关系数						
		Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
互花米草盐沼(S)	平均粒径	-0.156	-0.020	0.023	0.093	-0.194	0.064	-0.283
	黏土含量	-0.284	-0.174	-0.168	0.008	-0.270	-0.068	-0.451
光滩(B)	平均粒径	0.358	0.334	0.234	0.655 *	-0.030	0.422	-0.159
	黏土含量	0.215	0.144	-0.130	0.585 *	0.208	0.297	-0.385

1) * 表示双尾检验在 0.05 水平下相关性显著

表 6 福建罗源湾潮间带表层沉积物与其它海湾近岸沉积物中重金属元素含量对比

潮间带区域	重金属元素含量/mg·kg ⁻¹							数据来源
	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	
互花米草盐沼	21.10	79.91	23.91	41.52	37.63	138.03	112.36	本研究
光滩区域	19.86	75.73	22.57	39.81	34.88	131.47	110.07	本研究
福建罗源湾潮间带	20.48	77.82	23.24	40.67	36.25	134.75	111.21	本研究
福建海岸带土壤背景值	9.48	40.7	22.4	17.4	39	79.7	83.6	[20]
珠江口	24	118	64	50	56	—	150	[28]
长江口	—	98.9	31.9	40.2	27	—	105.6	[28]
黄河口	—	63.7	21.5	71.3	21.6	—	71.3	[28]
中国浅海沉积物	12	60	15	24	—	—	65	[29]
花岗岩	7	22	30	15	15	88	60	[30]
世界页岩	19	90	45	68	20	130	95	[30]

2.3 重金属元素来源分析

通过对罗源湾潮间带表层沉积物各重金属污染物进行主成分分析,发现沉积物中 7 种重金属(7 个变量)所代表的全部信息可用 3 个主成分(其中,特征值:3.853 + 1.247 + 1.153 = 6.253; 累计贡献率:89.337%)来体现(表 7),故通过对前 3 个主成分的分析,基本上能够实现对数据所代表的大部分信息的分析。

表 7 主成分分析的因子载荷和累计方差

Table 7 Factor loading and accumulated variance based upon principal component analysis			
成分	PC1	PC2	PC3
Co	0.863	0.260	0.305
Cr	0.893	0.352	0.185
Cu	0.865	0.299	0.206
Ni	0.796	-0.027	-0.152
Pb	0.112	0.100	0.966
V	0.925	0.240	0.131
Zn	0.248	0.947	0.105
特征值	3.853	1.247	1.153
方差/%	55.046	17.814	16.477
累计方差/%	55.046	72.860	89.337

第 1 主成分的贡献率为 55.046%,在 Co、Cr、Cu、Ni 和 V 的含量上均有较高的正载荷。罗源湾周围有许多工业企业,例如钢铁厂、镍厂等等,这些工业企业通过排污口将污水排入海湾,对罗源湾表

层沉积物重金属含量造成很大影响。因此第 1 主成分代表着工业排污和生活污水对沉积物的重金属污染。从表 8 中重金属含量间的相关关系,可知 Co、Cr、Cu、Ni 和 V 含量之间具有较强的相关性,表明第 1 主成分主要决定着沉积物中重金属 Co、Cr、Cu、Ni 和 V 的来源。第 2 主成分的贡献率为 17.814%,在 Zn 上的正载荷较高,已有研究表明福建表层沉积物中具有普遍的 Zn 含量高值的现象^[31,32],主要是受沿岸散布的小型金属矿床的影响。因此第 2 主成分主要表征了采矿沉积物中重金属含量的影响。第 3 主成分的贡献率为 16.477%,在 Pb 上具有较高的正载荷。由于单质 Pb 在地壳中含量不大,主要存在于矿物中,且难降解、易与有机质结合,因此这个主成分主要表征了有机质降解产生的内源污染对沉积物重金属污染物含量的影响。

2.4 底质环境质量评价

罗源湾潮间带表层沉积物中各重金属的污染指数、潜在生态风险指数和潜在生态综合风险指数的评价分别见表 9 和表 10。重金属 Ni、Co、Cr 和 V 的污染程度较大,污染指数大小顺序是 Ni > Co > Cr > V > Zn > Cu > Pb, Ni 和 Co 是主要环境污染因子,其污染指数均大于 2,属于中污染水平; 污染程度较低的重金属元素是 Pb,其污染指数均小于 1,属于低污染水平。同时,从表 9 中可以发现,互花米草盐沼区

表 8 福建罗源湾潮间带表层沉积物中各重金属元素的相关系数¹⁾

Table 8 Correlation coefficients among the heavy metals in the surficial intertidal sediments of Luoyuan Bay, Fujian

	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
Co	1						
Cr	0.930 **	1					
Cu	0.880 **	0.909 **	1				
Ni	0.508 *	0.628 **	0.560 **	1			
Pb	0.367	0.298	0.294	0.063	1		
V	0.932 **	0.933 **	0.888 **	0.617 **	0.225	1	
Zn	0.459 *	0.558 **	0.490 *	0.256	0.260	0.448 *	1

1) ** 表示双尾检验在 0.01 水平下相关性显著; * 表示双尾检验在 0.05 水平下相关性显著

表 9 潮间带表层沉积物中各重金属的污染指数 (C_f^i)Table 9 Contaminated index (C_f^i) of heavy metals in the intertidal sediments

站 位	污染指数 C_f^i						
	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
S1	2.25	1.99	1.08	2.41	0.95	1.76	1.36
S2	2.21	1.94	1.06	2.37	0.94	1.71	1.30
S3	2.22	1.96	1.06	2.37	1.00	1.73	1.37
B1	2.11	1.87	1.01	2.35	0.90	1.67	1.28
B2	2.05	1.81	0.98	2.17	0.86	1.61	1.31
B3	2.13	1.90	1.03	2.35	0.93	1.67	1.37
$\sum$	12.96	11.47	6.23	14.02	5.58	10.14	7.98

表 10 潮间带表层沉积物中各重金属的潜在生态风险指数 (E_r^i) 和潜在生态综合风险指数 (RI)Table 10 Potential ecological risk coefficients (E_r^i) and risk indices (RI) of heavy metals in intertidal sediments

站 位	潜在生态危害指数 E_r^i							RI
	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	
S1	11.25	3.97	5.41	12.06	4.76	3.51	1.36	42.32
S2	11.03	3.89	5.29	11.86	4.70	3.42	1.30	41.49
S3	11.11	3.92	5.31	11.87	5.02	3.46	1.37	42.06
B1	10.54	3.74	5.04	11.73	4.49	3.34	1.28	40.16
B2	10.26	3.63	4.91	10.84	4.30	3.22	1.31	38.46
B3	10.63	3.80	5.16	11.75	4.63	3.34	1.37	40.68
$\sum$	64.82	22.94	31.13	70.11	27.89	20.29	7.98	245.16

重金属污染明显高于光滩区,各个站位污染的严重顺序为 S1 > S3 > S2 > B3 > B1 > B2。表 10 显示,福建罗源湾潮间带表层沉积物中重金属对海洋生态系统的潜在生态危害属于中等程度。各个重金属的潜在生态危害程度顺序为 Ni > Co > Cu > Pb > Cr > V > Zn, Ni 是主要潜在生态风险因子。同样,互花米草盐沼区的潜在生态风险高于光滩区,各个站位的潜在生态风险高低顺序为 S1 > S3 > S2 > B3 > B1 > B2。

3 结论

(1) 罗源湾潮间带表层沉积物主要是粉砂和黏土质粉砂,整个潮间带表层沉积物中重金属元素 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn 的平均含量分别为: 20.48、77.82、23.24、40.67、36.25、134.75、111.21 mg·kg⁻¹; 重金属元素含量大小顺序为: V >

Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > Co。互花米草盐沼区表层沉积物重金属元素含量和有机质含量明显高于光滩区。互花米草对该区的生物地球化学循环造成了一定的影响。

(2) 与其它地区沉积物重金属含量相比,罗源湾潮间带表层沉积物重金属元素含量普遍高于福建海岸带土壤背景值和花岗岩平均值,但低于珠江口重金属元素含量,表现出独特的区域性特征。

(3) 主成分分析以及相关分析显示,工业排污和生活污水是该区重金属污染物的主要来源,同时,采矿以及有机质降解产生的内源污染对该区表层沉积物中重金属的含量也造成一定影响。

(4) 采用潜在生态风险评价对罗源湾潮间带进行环境质量评价,结果表明,本区具中等程度的潜在生态风险, Ni 和 Co 是主要环境污染因子, Pb 的污

染程度较低;互花米草盐沼的潜在生态风险高于光滩地区,各种重金属的潜在生态危害程度顺序为 $Ni > Co > Cu > Pb > Cr > V > Zn$.

致谢: 国家海洋局第三海洋研究所王爱军博士在采样站位设计及野外工作中给予大量帮助;南京大学海岸与海岛重点实验室汪亚平教授协助进行了粒度分析,谢文静、李婧、闵凤阳、吴晓东、叶长江参加了野外采样;南京大学分析中心陶仙聪工程师在样品测试中提供了帮助,谨此致谢。

参考文献:

- [1] 张修峰,梅雪英,童春富,等. 长江口岛屿沙洲湿地陆向发育过程中表层沉积物氮营养盐的变化[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1116-1121.
- [2] 孟翊,刘苍宇,程江. 长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(3): 37-43.
- [3] 盛菊江,范德江,杨东方,等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2405-2412.
- [4] 孟翊,刘苍宇,程江. 长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(3): 37-43.
- [5] 胡宁静,石学法,黄朋,等. 渤海辽东湾表层沉积物中金属元素分布特征[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(3): 380-388.
- [6] 王红晋,叶思源,杜远生,等. 胶州湾东部和青岛前海表层沉积物重金属分布特征及其对比研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (4): 81-86.
- [7] 张乃星,曹丛华,任荣珠,等. 胶州湾外海洋倾倒区表层沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1315-1320.
- [8] 杨蕾,李春初,田向平. 珠江磨刀门河口表层沉积物中重金属含量及其分布特征[J]. 生态环境, 2006, **15**(3): 490-494.
- [9] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment to logical approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-986.
- [11] Long E R, Morgan L G. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the national status and trends program[J]. NOAA Technical Memorandum NOSOMA, 1990, **52**: 8-60.
- [12] 王丽萍,周晓蔚,郑丙辉,等. 长江口及毗邻海域沉积物生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2008, **28**(5): 2191-2198.
- [13] 林建杰. 福建罗源湾海区表层沉积物重金属的含量与分布[J]. 台湾海峡, 2008, **27**(3): 362-366.
- [14] 钦佩,谢民,仲崇信. 福建罗源湾海滩互花米草盐沼中 18 种金属元素的分布[J]. 海洋科学, 1989, (6): 23-27.
- [15] 曲洪霞,董树刚,汤志宏,等. 罗源湾多介质中重金属的分布特征与评价[J]. 海洋环境科学, 2009, **28**(3): 293-308.
- [16] 秦樊鑫,段婷婷. 测定土壤中重金属 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 前处理方法[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2005, **23**(2): 81-83.
- [17] 国家质量技术监督局. 海洋监测规范 第五部分: 沉积物分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] 程鹏,高抒,李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J]. 沉积学报, 2001, **19**(3): 449-455.
- [19] 贾振邦,梁涛,林健枝,等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, **33**(4): 485-492.
- [20] 刘用清. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用[J]. 海洋环境科学, 1995, **14**(2): 68-73.
- [21] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- [22] Netto S A, Lana P C. Influence of *Spartina alterniflora* on superficial sediment characteristics of tidal flats in Paranagua Bay (south-eastern Brazil) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, **44**(5): 641-648.
- [23] Wang A J. Impact of human activities on depositional process of tidal flat in Quanzhou Bay of China[J]. Chinese Geographical Science, 2007, **17**(3): 265-269.
- [24] 王爱军,陈坚,李东义. 互花米草对福建泉州湾海岸湿地沉积环境影响[J]. 海洋工程, 2008, **26**(4): 60-69.
- [25] 于文金,邹欣庆. 灌河口潮滩重金属累积特征及污染评价[J]. 地球化学, 2007, **36**(4): 425-433.
- [26] Sundby B, Vale C, Cacador M I, et al. Metal-rich concretions on the roots of salt-marsh plants: mechanism and rate of formation [J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(2): 245-252.
- [27] Cacador M I, Madureira M J, Vale C. Effects of plant roots on salt-marsh sediment geochemistry [A]. In: Flemming B W, Delafontaine M T, Liebezeit G (eds.). Muddy Coast Dynamics and Resource Management [C]. Amsterdam: Elsevier Science, 2000. 197-204.
- [28] 王贵,张丽洁. 海湾河口沉积物重金属分布特征及形态研究[J]. 海洋地质动态, 2002, **18**(12): 1-5.
- [29] 崔毅,辛福言,马绍赛,等. 乳山湾沉积物重金属污染及其生态危害评价[J]. 中国水产科学, 2005, **12**(1): 82-89.
- [30] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 108.
- [31] 张群英,郭锐. 福建兴化湾表层沉积物中重金属含量的分布[J]. 台湾海峡, 1989, **8**(2): 122-126.
- [32] 林峰,许清辉,杨春瑾. 闽江口悬浮物和表层沉积物中镉铅铜锌的分布[J]. 台湾海峡, 1989, **8**(3): 195-200.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人