

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价

李飞, 徐敏*

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 根据 2009 年 12 月海州湾海域 17 个站位的环境调查资料, 通过地统计学方法分析表层沉积物中 6 种重金属 (Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn) 的来源特征, 采用潜在生态风险指数法进行重金属风险评价。结果表明, 重金属分布格局整体呈西南高东北低、随离岸距离增大而减小的趋势; 陆源污染输入是海州湾海域重金属的重要污染来源; 有机碳含量、底质粒径和硫化物是影响重金属含量及其分布的重要因素; 风险评价显示海州湾沉积物重金属总体处于中等生态风险状况, 风险相对较高主要分布在龙王河口到临洪河口的近岸海域, 潜在生态风险指数 $Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn$, Cd 是主要的生态风险贡献因子。

关键词: 海州湾; 沉积物; 重金属; 来源特征; 污染评价

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1035-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.031

Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay

LI Fei, XU Min

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the investigation data from 17 sampling stations in the sea area of Haizhou Bay in 2009, the geo-statistics analysis was used to estimate the source characteristics of heavy metals in surface sediments, and the potential ecological risk index was applied to evaluate the status of the ecological risk. The contents of heavy metals showed a landward as well as northeastward increasing trend. The spatial distribution characteristics reflected that land-based inputs of pollution were the main sources of heavy metals. According to the analysis of Pearson correlation coefficients, the contents of organic carbon, sulfide and grain-size of sediments were important factors for the content and distribution of heavy metals. The results of potential ecological risk evaluation indicated that the Haizhou bay as a whole can be ranked as “moderate potential ecological risk”. The high risk zone was in the coastal waters between Longwang estuary and Linhong estuary. The sequence of the potential ecological risk posed by the metals was $Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn$. Cd was the major pollutant among the metals in consideration, while the pollution related to others was less significant.

Key words: Haizhou Bay; sediments; heavy metals; source characteristics; pollution assessment

沿海地区是人口和经济活动的集聚区, 随着沿海地区社会经济的快速发展, 大量污染物直接或间接排入近海, 使得近海生态环境压力不断加大。其中, 重金属因其特殊的物理化学、地球化学性质及毒性效应, 具有易蓄积、难降解、危害大等特征^[1]。进入海洋的重金属污染物通过吸附、沉降, 绝大部分均迅速地由水相转入固相, 迅速地结合到悬浮物和沉积物中。而结合到悬浮物中的重金属在被水流搬运过程中, 当其负荷超过搬运能力时, 也将最终转入沉积物中^[2]。在重金属污染物的输送和储存过程中, 海洋沉积物起着重要的作用, 且沉积物中重金属与水体相比, 具有丰度高、易于准确检测等特点。因此, 沉积物重金属具有重要的环境指示意义^[3]。

20 世纪 60 年代国内外学者就开始了对于全球沿岸海域中重金属的调查研究^[4], 近年来我国学者则相继开展了渤海^[5,6]、黄海^[6,7]、东海^[8]、南海^[9,10]海域的表层沉积物重金属污染调查研究。关于海州

湾海域的沉积物重金属分析研究主要集中于南侧临洪河口附近海域^[11~14]。海州湾地处东亚亚热带-暖温带过渡区, 拥有典型的海湾生态系统, 国家海洋局已于 2008 年 1 月批准建立海州湾国家级海洋特别保护区。随着沿海地区开发的加剧, 海州湾近岸海域生态环境压力和人类干扰强度也不断增大。本研究根据海州湾近岸海域沉积物环境调查, 采用地统计分析方法和潜在生态危害指数法分析探讨海州湾近岸海域表层沉积物重金属来源特征和污染状况, 以为区域重金属污染控制和生态风险管理提供参考。

收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373112)

作者简介: 李飞(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋资源与环境, E-mail: lifei086@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: xumin0895@njnu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

海州湾是典型的弧形岸线海湾,南、北两端分别以连云港东西连岛和日照岚山头为基岩岬角.北段(岚山头—兴庄河口)属于砂质平原海岸,潮间带狭窄;中段(兴庄河口—西墅)为淤泥质平原海岸,潮滩宽阔;南段(西墅—东西连岛)为基岩海岸,东西连岛通过人工大堤与陆域相接.海州湾西南侧陆域分布有连云港市区和赣榆县城,北部为岚山港区和2010年开始建设的赣榆港区.海州湾是传统的海洋水产养殖区,近年来随着江苏沿海开发战略的实施,海州湾沿岸城市化和工业化快速发展,港口建设、近岸滩涂围垦等人类活动进一步加大了海湾环境的压力.

1.2 样品采集和分析

研究数据来源于2009年12月在海州湾开展的海洋环境调查,共采集17个表层沉积物样品,站位布设如图1所示.表层沉积物调查要素包括6种重金属(Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn)、有机碳、硫化物和底质粒径.表层沉积物现场采样和分析方法按文献[15]的相关技术规程进行.利用抓斗式采泥器采集5cm以内表层沉积物,用于分析有机物和硫化物的沉积物样品置于棕色玻璃瓶中,分析重金属的沉积物样品置于聚乙烯袋中,其中测定硫化物的沉积物样品现场加醋酸锌溶液固定.所有样品均冷藏保存.样品测试分析时,镉、锌、铬、铜、铅采用原子吸收分光光度法,砷采用原子荧光法,有机碳采用重铬酸钾氧化法,硫化物采用亚甲基蓝分光光度法,底质粒度采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪分析.

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 19.0 对调查数据进行统计分析,运用 Arcgis 9.3 对重金属空间分布和生态风险格局进行克里金法插值绘图.

1.4 生态风险评价方法

潜在生态风险指数法^[16]由瑞典学者 Hakanson 提出,该指数综合考虑了不同重金属含量及其毒性水平.计算公式为:

$$E_{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{1}$$

$$E_r^i = T_r^i C_{\text{表层}}^i / C_n^i \tag{2}$$

式中, E_{RI} 为多种重金属综合潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属*i*的潜在生态风险指数(表1); T_r^i 为重金属*i*毒性响应系数,反映了重金属的毒性水平,Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn的毒性响应系数值分别为30、

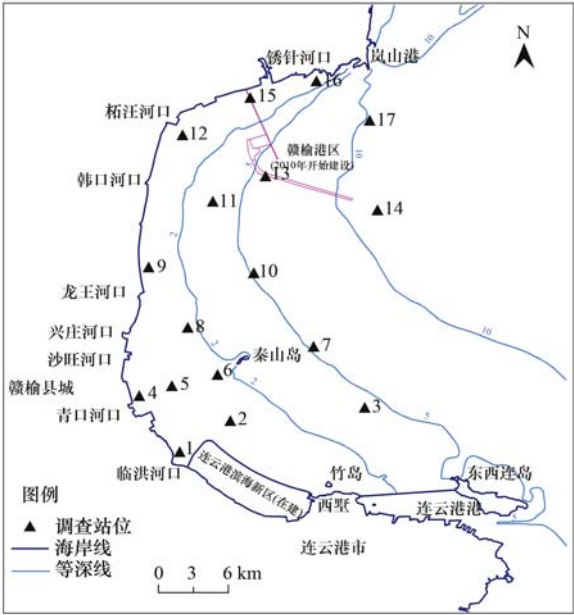


图1 研究区调查站位示意

Fig. 1 Distribution of the sampling stations

表1 重金属单项潜在生态风险指数(E_r^i)和潜在生态综合风险指数(E_{RI})的风险等级划分^[17]

Table 1 Risk levels of individual potential ecological risk coefficient (E_r^i) and risk index (E_{RI}) of the heavy metals

E_r^i	E_{RI}	潜在生态风险程度
<40	<105	低
40~80	105~210	中等
80~160	210~420	较重
160~320	≥420	严重
≥320	—	很严重

1) E_{RI} 等级划定根据调查重金属种类调整

10、5、5、2、1^[17]; $C_{\text{表层}}^i$ 为重金属*i*实测浓度值; C_n^i 为重金属*i*评价参照值,本研究采用沿海地区土壤中重金属背景值,Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn分别为0.042、7.38、15.02、11.40、60.11、47.15 mg·kg⁻¹^[18].

2 结果与讨论

2.1 含量特征

表层沉积物中的重金属含量变化范围(表2)显示,沉积重金属含量最高值(As除外)集中分布在海州湾西南侧的青口河口附近(站位4和5),最低值(Cd、As除外)集中分布在海州湾东北侧(站位14),反映了表层沉积物重金属含量特征表现为西南高-东北低的趋势.重金属变异系数23.4%~38.8%,均小于40%,说明海州湾表层沉积物重金属整体空间变异程度较低.

表3列出了国内相关海湾研究中的表层沉积物

重金属含量. 与其他海湾相比,海州湾沉积物 Cd、Cr 含量较其他地区偏高,其中 Cd 含量高于莱州湾、胶州湾、兴化湾,Cr 含量高于莱州湾、胶州湾、泉州湾. 重金属 As、Cu、Pb、Zn 相对较低. 6 种重金属含量平均值均低于《中华人民共和国海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)一类标准值,表明海州湾海域沉积物质量整体较为清洁,但 Cd 和 Cr 富集程度相对较高.

表 2 调查海域表层沉积物中重金属含量统计特征

Table 2 Statistics values of heavy metals contents in surface sediments of investigated areas				
元素	最大值(站位) /mg·kg ⁻¹	最小值(站位) /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%
Cd	0.249(4 号)	0.096(11 号)	0.174 4	33.7
As	14.1(7 号)	3.9(16 号)	6.62	38.8
Cu	29.8(5 号)	10.9(14 号)	19.41	31.1
Pb	26.1(4 号)	11.8(14 号)	18.23	23.4
Cr	106.0(4 号)	38.6(14 号)	74.18	29.8
Zn	112.0(4 号)	37.4(14 号)	73.29	32.2

表 3 其它研究区表层沉积物重金属元素含量平均值¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Mean Cd, As, Cu, Pb, Cr and Zn concentrations in sediments of other study research areas/mg·kg ⁻¹							
调查海域	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn	文献
海州湾	0.1744	6.62	19.41	18.23	74.18	73.29	本研究
锦州湾	1.74	44.8	53.1	42.2	ND	305	[19]
莱州湾	0.081	13.1	13.3	20.2	57.1	59.4	[20]
胶州湾	0.0817	7.164	24.93	32.3	45.1	69.68	[21]
泉州湾	0.399	5.29	30.86	50.3	47.66	111.6	[22]
兴化湾	0.058	7.21	15.91	31.1	ND	83.9	[23]
海洋沉积物质量一类标准	0.5	20	35	60	80	150	[24]

1) ND 为未测定或无相关数据

2.2 来源和分布特征

通过重金属之间及其与环境因子的相关分析,可了解重金属之间的来源特点及其控制因素. 从表 4 可以看出,重金属 Cd、Cu、Pb、Cr、Zn 两两之间均表现出显著相关性,相关系数大部分达 0.7 ($P < 0.01$) 以上,表明这 5 种重金属来源相同或相似. As 与 Cd、Cr 相关性较弱,且与 Cu、Pb、Zn 无显著相关,表明 As 来源不同,这与其空间分布的特殊性相一致.

沉积物有机碳与 6 种重金属均呈显著正相关,其中与 Cd、Cr、Zn 的相关系数达 0.8 ($P < 0.01$) 以上,说明有机碳是决定海州湾表层沉积物重金属含量和分布的主要因子. 相关研究显示,重金属易通过吸附、阳离子交换及螯合反应与有机碳形成金属有机络合物^[25,26],同时有机质分解耗氧造成的还原条件也有利于有毒物质的沉积和积累^[1]. 硫化物与重金属 Cd、Cu、Cr、Zn 均呈显著正相关,重金属易与硫化物通过反应形成金属硫化物沉淀,是沉积物中有毒重金属的重要结合形态^[27],硫化物在一定程度上影响着重金属的分布. 重金属(除 Pb)均与底质粒径呈显著负相关,重金属空间分布整体表现出

南部沉积物组成粒径较小海域重金属含量高,北部粒径较大海域重金属含量普遍较高. 沉积物细颗粒物质表面积大,因而较易富集重金属,而粗颗粒物质则含量相对较少,反映了沉积物粒度的组成也是影响重金属含量及其分布的重要因素. 硫化物与有机碳之间的相关性反映了硫化物的含量受到有机质的影响^[27],底质粒径与有机碳的显著负相关,进一步表明两者对沉积物重金属的影响具有一致性.

海州湾沉积物重金属空间分布存在明显的差异性(图 2). 重金属整体分布趋势表现为西南高东北低,随着离岸距离增加逐步减少,反映了海州湾西南侧的陆源污染输入是海州湾海域重金属的重要污染来源.

As 的分布整体表现为中部高,南北两侧低的分布趋势,高值区分布在秦山岛东侧的海州湾中部海域. 已有沉积物相关调查研究^[28,29]中显示出 As 分布规律不明显,其分布特征受陆源影响不显著. 李玉等^[30]在胶州的调查研究表明 As 与 Al 表现较为显著相关性,而 Al 分布不易受到人类活动的影响^[31],常作为参照元素用以分析重金属的富集程度. 结合已有相关研究和海州湾 As 的空间分布特

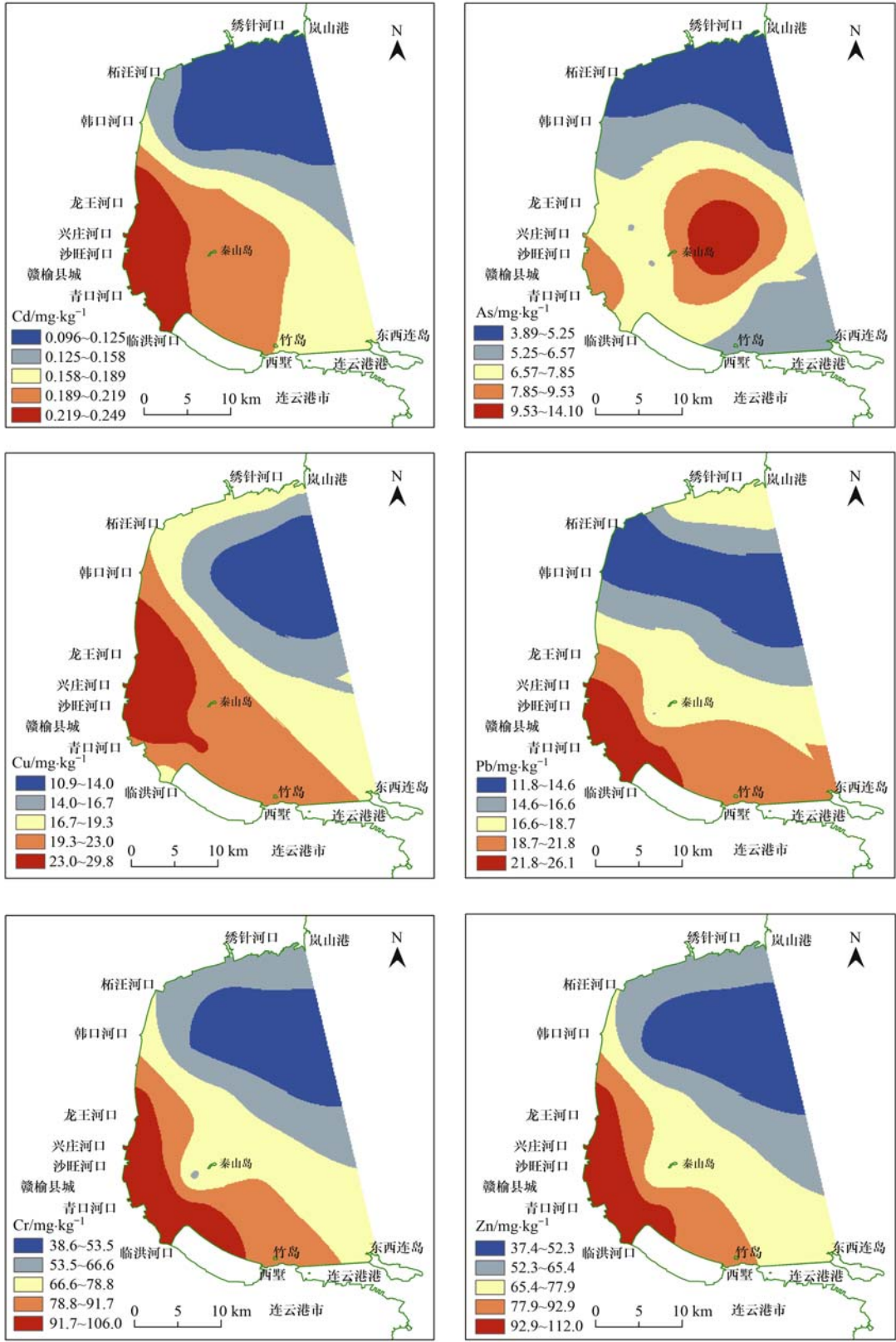


图 2 重金属含量平面示意

Fig. 2 Distribution patterns of heavy metals in surface sediments

点,As 的分布可能主要是受到区域地质背景含量的控制影响. 除 As 外,表层沉积物 Cd、Cu、Pb、Cr、

Zn 空间分布总体表现为海州湾西南部分浓度高,东北部分浓度低,高值区均出现在海州湾西南侧近岸

表 4 沉积物中各重金属元素之间及其与有机碳、硫化物、底质粒径的相关分析矩阵¹⁾

Table 4	Pearson correlation coefficients among heavy metals, organic carbon, sulfide and grain-size of sediments								
	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn	有机碳	硫化物	底质粒径
Cd	1								
As	0.598 *	1							
Cu	0.727 **	0.284	1						
Pb	0.715 **	0.434	0.611 **	1					
Cr	0.890 **	0.507 *	0.771 **	0.890 **	1				
Zn	0.889 **	0.473	0.817 **	0.893 **	0.986 **	1			
有机碳	0.861 **	0.613 **	0.501 *	0.760 **	0.846 **	0.806 **	1		
硫化物	0.702 **	0.135	0.662 **	0.439	0.683 **	0.697 **	0.487 *	1	
底质粒径	-0.830 **	-0.525 *	-0.518 *	-0.473	-0.634 **	-0.620 **	-0.722 **	-0.436	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

处. 这与调查海域西南侧陆域人类活动较为密集, 入海河流带来的陆源污染输入有关, 且海州湾水动力较弱, 细粒沉积物吸附的重金属含量较高. 除 As 外, 表层沉积物 Cd、Cu、Pb、Cr、Zn 在调查海域东北部(站位 11、13、14)明显低于其他海域, 这与该海域水动力较强, 底质颗粒主要以大颗粒物质为主, 重金属富集程度较低有关.

2.3 生态风险评价

根据潜在生态风险指数法进行评价显示, 单要素潜在生态风险指数 $Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn$ (表 5). 其中重金属 As、Cu、Pb、Cr、Zn 在所

有站位的重金属潜在生态风险指数均低于 40, 属于低生态风险; 重金属 Cd 的潜在生态风险指数为 68.86 ~ 177.86, 属于中等-严重生态风险. 综合潜在生态风险显示, 研究区 E_{RI} 介于 90.00 ~ 216.13, 平均值为 151.99, 总体处于中等生态风险状况. 生态风险要素 E_{R-Cd} 和综合潜在生态风险 E_{RI} 的空间分布如图 3 所示. 由于 Cd 是主要的生态风险贡献因子, E_{R-Cd} 和 E_{RI} 的空间分布基本一致. 海州湾潜在生态风险表现从西南向东北递减的分布趋势, 风险相对较高主要分布在龙王河口到临洪河口的近岸海域.

表 5 重金属潜在生态风险指数

Table 5	Potential ecological risk indices of heavy metals						
项目	E_r^i						E_{RI}
	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn	
最大值	177.86	19.11	9.92	11.45	3.53	2.38	216.13
最小值	68.86	5.27	3.63	5.18	1.28	0.79	90.00
均值	124.55	8.96	6.46	8.00	2.47	1.55	151.99

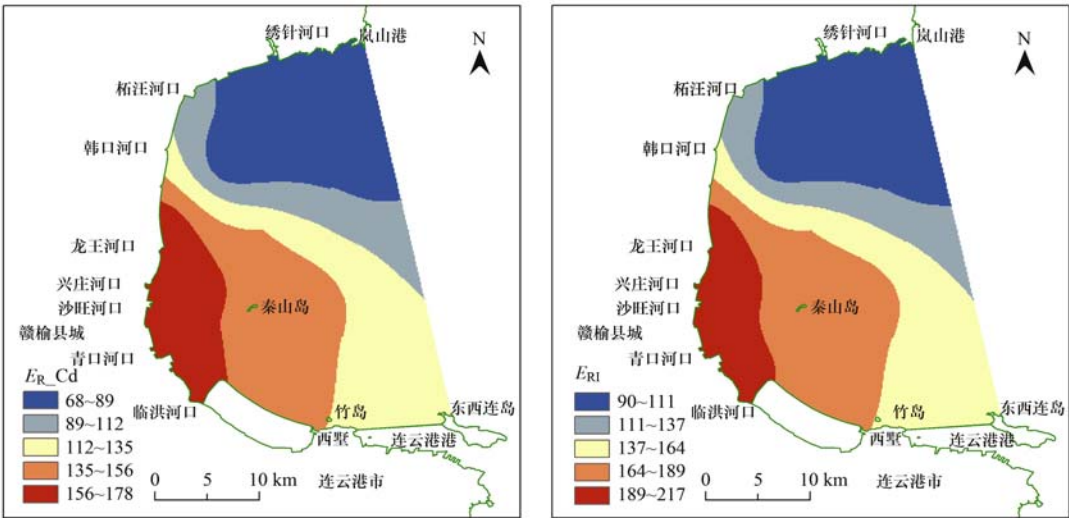


图 3 重金属 E_{R-Cd} 和 E_{RI} 示意

Fig. 3 Distribution patterns of E_{R-Cd} and E_{RI} in surface sediments of Haizhou Bay

3 结论

(1) 海州湾表层沉积物重金属 Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn 的含量平均值分别为 0.1744、6.62、19.41、18.23、74.18、73.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。6 种重金属含量平均值均低于海洋沉积物质量一类标准值,表明海州湾海域沉积物质量总体较为清洁,但 Cd 和 Cr 富集程度相对较高。表层沉积物重金属含量特征表现为西南高-东北低的趋势,空间变异程度较低。

(2) 元素间相关分析表明,重金属 Cd、Cu、Pb、Cr、Zn 具有同源性,As 来源较为特殊,可能受到区域地质背景影响。有机碳是决定海州湾表层沉积物重金属含量和分布的主要因子。沉积物粒度和硫化物也是影响重金属含量及其分布的重要因素。重金属整体分布趋势表现为西南高东北低,随着离岸距离增加逐步减少,反映了海州湾西南侧的陆源污染输入是海州湾海域重金属的重要污染来源。

(3) 综合潜在生态风险显示,研究区 E_{RI} 平均值为 151.99,总体处于中等生态风险状况。潜在生态风险指数 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$, Cd 是主要的生态风险贡献因子。风险相对较高主要分布在龙王河口到临洪河口的近岸海域。

参考文献:

- [1] 田金,李超,宛立,等. 海洋重金属污染的研究进展[J]. 水产科学, 2009, **28**(7): 413-418.
- [2] 丁喜桂,叶思源,高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, **21**(8): 31-36.
- [3] 张丽洁,王贵,姚德,等. 近海沉积物重金属研究及环境意义[J]. 海洋地质动态, 2003, **19**(3): 6-9.
- [4] 陈静生,邓宝山,陶澍,等. 环境地球化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [5] 陈江麟,刘文新,刘书臻,等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. 海洋科学, 2004, **28**(12): 16-21.
- [6] Luo W, Lu Y, Wang T, *et al.* Ecological risk assessment of arsenic and metals in sediments of coastal areas of northern Bohai and Yellow Seas, China [J]. *AMBIO*, 2010, **39**(5-6): 367-375.
- [7] He Z, Song J, Zhang N, *et al.* Variation characteristics and ecological risk of heavy metals in the south Yellow Sea surface sediments [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **157**(1-4): 515-528.
- [8] Lin S, Hsieh I J, Huang K M, *et al.* Influence of the Yangtze River and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments [J]. *Chemical Geology*, 2002, **182**(2): 377-394.
- [9] 甘居利,贾晓平,李纯厚,等. 南海北部陆架区表层沉积物中重金属分布和污染状况[J]. 热带海洋学报, 2003, **22**(1): 36-42.
- [10] 张远辉,杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报(中文版), 2005, **27**(4): 161-166.
- [11] 张存勇,冯秀丽,陈斌林. 海州湾南部近岸柱状样沉积物重金属污染[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, **28**(5): 37-43.
- [12] 陈秀开,田慧娟,刘吉堂,等. 海州湾近海水、沉积物及贝类体内重金属的含量和分布特征[J]. 检验检疫学刊, 2009, **19**(5): 6-11.
- [13] 李玉,冯志华,李谷祺,等. 连云港近岸海域沉积物中重金属污染来源及生态评价[J]. 海洋与湖沼, 2010, **41**(6): 829-833.
- [14] 张瑞,张帆,刘付程,等. 海州湾潮滩重金属污染的历史记录[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1044-1054.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, GB 17378-2007. 海洋监测规范[S]. 2007.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [17] 徐争启,倪师军,虞先国,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.
- [18] 陈邦本,胡蓉卿,陈铭达. 江苏海涂土壤环境元素的自然背景值[J]. 南京农业大学学报, 1985, (3): 54-60.
- [19] 张玉凤,宋永刚,王立军,等. 锦州湾沉积物重金属生态风险评价[J]. 水产科学, 2011, **30**(3): 156-159.
- [20] 胡宁静,石学法,刘季花,等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响 [J]. 海洋科学进展, 2011, **29**(1): 63-72.
- [21] Chen Z X, Dong J P, Li S Q, *et al.* Distribution pattern of heavy metals in the surface sediments of the Jiaozhou Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2005, **7**(2): 41-56.
- [22] 李云海,陈坚,黄财宾,等. 泉州湾沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 931-938.
- [23] 蔡榕硕,白娅舒. 兴化湾表层海水和沉积物中重金属含量的时空变化特征[J]. 台湾海峡, 2011, **30**(3): 316-323.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, GB 18668-2002. 海洋沉积物质量[S]. 2002.
- [25] Soares H M V M, Boaventura R A R, Machado A A S C, *et al.* Sediments as monitors of heavy metal contamination in the Ave river basin (Portugal): multivariate analysis of data [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **105**(3): 311-323.
- [26] Borg H, Jonsson P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, **32**(1): 8-21.
- [27] 刘景春,严重玲,胡俊. 水体沉积物中酸可挥发性硫化物(AVS)研究进展[J]. 生态学报, 2004, **24**(4): 812-818.
- [28] 廉雪琼. 广西近岸海域沉积物中重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2002, **21**(3): 39-42.
- [29] 刘芳文,颜文,黄小平,等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. 热带海洋学报, 2003, **22**(5): 16-24.
- [30] 李玉,俞志明,宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 137-141.
- [31] 刘恩峰,沈吉,朱育新,等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 113-119.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行