

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农,张小玲,王迎春,刘伟东,杜佳,赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍,温天雪,王跃思,刘子锐,王丽,兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满,雷前涛,谈明光,李晓林,张桂林,刘卫,李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟,李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱,张洪海,杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗,李纯厚,徐娇娇,肖雅元,林琳,黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇,张鸿,何龙,沈金灿,柴之芳,杨波,王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川,沈立成,袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁,陶贞,高全洲,毛海若,姜光辉,焦树林,郑雄波,张乾柱,马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚,李彩梅,秦作栋,邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩,琚宜文,翟航,许亮,沈媛媛,纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红,叶淑君,吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁,高扬,林勇明,朱波,徐亚娟,于贵瑞,吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超,毕孟飞,李泽利,沙健,王玉秋,钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红,李义敏,周艺,卫安平,周广顺,肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌,李阳,孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞,李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚,李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟,李瑞娇,张念,赵峰,谢从新,张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧,毕春娟,韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波,孙荣国,王定勇,王小文,张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙,张忠民,赵霞,焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海,叶招莲,文颖频,毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇,刘伟京,张耀辉,徐军,唐敏,陈勇,白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳,陈复彬,赵慧,常自强,章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春,年永嘉,张静,张明,张磊,龚鹏飞,肖太民,李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦,王娟,郑天龙,刘建国,汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽,薛罡,高品,吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振,胡大龙,乔卫敏,陈冠翰,蒋玲燕,李震,麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰,向洪锐,陈春丽,周文斌,王佳佳,刘春英,曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒,孙家仁,吴兑,范绍佳,任明忠,吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰,王铁宇,李奇峰,张海燕,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎,高丽荣,田益玲,朱帅,张芹 (2281)
基于荧光传感器 F _{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍,汪钊,蔡强,欧文斌,孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春,梁文艳,赵远,李飞贞,曹敬灿,胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏,梅帅,曹有福,丁进锋,徐嘉杰,李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹,王丽华,郝春博,李璐,李思远,冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪,赵大勇,曾巾,余多慰,吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪,王佳,范晓蕾,罗生军,郭荣波,邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚,邓欢,肖勇,赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江,彭霞薇,李霞,孙雅君,冯红梅,江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳,陈国耀,姜珂,许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲,杨芸,徐卫红,王崇力,陈蓉,熊仕娟,谢文文,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲,仇少君,陈印平,赵西梅,刘京涛,陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利,赵彤,闫浩,黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊,杨晓洪,葛峰,王娜,焦少俊,叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举,崔孝强,阮震,赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒,特拉津·那斯尔,程永毅,詹江渝,杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉,杜永芬,王丹丹,高抒,高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威,蔡冠清,黄浩波,耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛,王龙昌,黄召存,贾会娟,冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君,杨智杰,翁发进,刘小飞,陈朝琪,林伟盛,王小红,陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦,张洪,李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价

张龙辉^{1,2}, 杜永芬^{1*}, 王丹丹¹, 高抒¹, 高文华¹

(1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093; 2. 集美大学水产学院, 厦门 361021)

摘要 为了解互花米草(*Spartina alterniflora*)对盐沼湿地环境的影响, 于 2010 年 7 月在江苏如东潮间带, 依据互花米草的有无及其长势设置站点, 对表层沉积物的 8 种重金属含量、粒度组成、总有机碳进行分析, 采用地累积指数法(I_{geo})和 Håkanson 潜在生态风险指数法进行污染评价。结果表明, 如东滩涂表层沉积物中 Pb、Cd、As、Hg、Cr、Cu、Ni、Zn 的平均含量低于海洋沉积物标准 I 类, 其中 Cd、Hg、Ni、Zn 的含量高于中国大陆沉积物-浅海粉砂背景值。整体上, 8 种元素在米草覆盖区平均含量均高于邻近光滩。地累积指数显示该盐沼带重金属为无污染状态, 而 Håkanson 潜在生态风险评价显示为低污染和中度污染的临界状态, 风险指数为低; 两方法均显示该区域污染以 Cd 和 Hg 最重。由海向陆随米草长势渐好(垂直岸线断面), As、Cu 及 Hg 元素的含量、地累积指数、潜在生态风险系数呈渐增趋势; 拓殖 1 年左右的米草斑块区内(平行岸线断面), 8 种元素在植被覆盖区的含量、污染程度及潜在生态风险均高于邻近无植被覆盖区。此外, 斑块分布区中, Cd、Cu 含量显著低于垂直断面的茂盛分布区。互花米草是大部分重金属污染物在沉积物中富集的重要驱动力之一, 且互花米草群落可阻滞污染物直接扩散入海, 因而降低生态危害。互花米草对重金属分布的影响与米草的拓殖年限、金属元素存在形态和来源有关。

关键词: 重金属; 互花米草; 盐沼湿地; 污染评价; 江苏如东

中图分类号: X55; X820.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2401-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.049

Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the *Spartina alterniflora* Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province

ZHANG Long-hui^{1,2}, DU Yong-fen¹, WANG Dan-dan¹, GAO Shu¹, GAO Wen-hua¹

(1. The Key Laboratory of Coast and Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To understand the ecological impact of *Spartina alterniflora* on the coastal wetland environment, field survey was carried out in July, 2010, over the intertidal areas of Rudong coast, Jiangsu province; sediment samples were collected from a series of stations with different conditions of vegetation cover and *S. alterniflora* growth. The contents of eight heavy metals, together with sediment composition and total organic carbon were analyzed to reveal the distribution patterns of the heavy metals. Environmental quality status was evaluated using both the index of geoaccumulation (I_{geo}) and the index of the Håkanson ecological risk. The analytical results showed that the average contents of Pb, Cd, As, Hg, Cr, Cu, Ni and Zn were below the standard for the Category I sediment quality, among which Cd, Hg, Ni and Zn exceeded the sediment background value of the region. On the whole, the contents of eight heavy metals in vegetation areas were higher than those associated with the adjacent bare flat areas. These data sets indicate a non-polluted condition in term of I_{geo} estimation; however, a critical state of low to moderate degrees of pollution and a low level of risk were deduced according to the index of the Håkanson potential ecological risk. Both indices suggested that the pollution level of Hg and Cd were the highest among the eight metals measured. Along the transection from seaward to landward, the contents of As, Cu and Hg, their indices of I_{geo} and Håkanson ecological risk all showed an increasing trend, in accordance with the condition of vegetation cover. Along the coastline with *S. alterniflora* being distributed in patchiness, all metal contents and their ecological risk level values for the marshes were higher than those for the unvegetated sediments nearby; moreover, except for Hg, other seven metals exhibited relatively low values than those in the shore-normal section with a better *S. alterniflora* growth. These findings indicate that *S. alterniflora* is one of important factors to enrich the heavy metal in tidal flat sediment. Thus, ecological risk of the heavy metal is reduced or blocked, due to the filtering effect of salt-marsh, which prevents metals from entering the open sea directly. The distribution of heavy metal is influenced by a combination of colonization time of vegetation, chemical form of metals and their origins.

Key words: heavy metals; *Spartina alterniflora*; salt-marsh wetland; ecological assessment; Rudong coast (Jiangsu)

海洋生态系统的重金属污染是一个全球性问题^[1-4]。作为生态系统的重要组成部分, 海岸盐沼湿地不仅是陆海相互作用最活跃的区域, 也是典型的环境脆弱带^[5]。经各种途径入海或着陆的各种污染物中, 重金属污染物是对环境和人体健康最具有威胁的污染物之一, 具有降解能力差、生物毒性及

收稿日期: 2013-09-25; 修订日期: 2014-01-08

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956504); 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(20100471282); 江苏省博士后基金项目(0901016C); 中央高校基本科研业务费专项(1117020914)

作者简介: 张龙辉(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水生生物的遗传与育种, E-mail: zhlonghui@163.com

* 通讯联系人, E-mail: duyongfen@nju.edu.cn

生物累积放大等特点^[6]。在沉积物环境中,受到流体力学作用、生物地球化学作用、水体理化条件及动植物活动等综合影响,使沉积物不但是重金属一个重要的汇,并且是上覆水体潜在的污染源^[5, 7, 8]。与上覆水相比,沉积物中的重金属含量较高,并且具累积性特征,因此被广泛用于环境评估^[9, 10]。

受人类活动(港口建设、滩涂养殖等)影响,湿地的急剧减少同样是全球性生态问题^[11, 12]。互花米草(*Spartina alterniflora*)原产美洲,作为生态工程种,于20世纪70~80年代引入中国沿海。由于其极强的适应性和繁盛能力,目前已在我国大部分海岸带形成了广阔的互花米草盐沼湿地^[13]。它在抗风阻浪、保滩护岸、促淤造陆的方面发挥重要作用同时,也改变了盐沼湿地的环境,如影响沉积物组成^[14]、有机质分布^[15]、底栖动物群落结构^[16, 17]、微生物多样性^[18]等。有关互花米草对重金属分布影响的报道——其地下部分对多种重金属的吸收和富集,具有净化环境功能——多集中在泥质沉积环境^[19~22],对于典型的砂/粉砂质平原海岸研究相对较少。

江苏潮滩是典型的粉砂淤泥质平原海岸,不仅是中国最大的湿地之一,也是互花米草引种的源发地之一。如今互花米草已经覆盖了潮间带的大部分区域,陆续取代土著盐蒿(*Suaeda glauca*)植被,改变了潮滩的原始地貌^[23~25]。本研究以位于黄海之滨的江苏如东潮间带(32°21'~32°30'N, 121°12'~121°27'E)为典型区域,结合互花米草的有无及其长势,对互花米草盐沼及邻近光滩区域的沉积物定量采样;对重金属、粒度、有机碳分布特征进行分析,并采用地累积指数法和Håkanson潜在生态危害指数法对该区域的污染状况进行评价,以深入了解互花米草在潮间带环境中的作用。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2010年7月9~11日,在如东潮间带沿垂直和平行于海岸线方向设置11站位(图1)。其中,S1、S2、S3、S4和S5分布于由海向陆的垂直断面上(S1位于互花米草扩展的最前沿光滩,仅有米草幼株零星分布;S2位于草区与光滩区交界处的米草区;S3和S4位于米草密集生长区;S5位于潮间带中上部互花米草与盐蒿滩过渡区的米草区域,该区域仅在大潮时才被潮水淹没),以研究互花米草

长势对重金属分布与的影响。S6~S11分布于与海岸线基本平行的互花米草斑块区,是互花米草与光滩的交错带,其中S6、S8和S10位于互花米草覆盖区内部,而S7、S9和S11位于米草紧邻的光滩区,以研究互花米草对重金属污染的影响。与垂直断面的米草相比,该区米草主要为拓殖1a左右的年轻植株,其形体矮小。

退潮后,在既定站位用内径为29 mm的注射器改造的采样管,插管采集未受扰动的沉积物,随机采集0~4 cm长度的4个平行样。样品以0~0.5、0.5~1、1~2、2~4 cm分层装入封口袋中,-20℃冷冻保存。各分层样品冷冻干燥后,经玛瑙研钵研磨至可以过100目尼龙筛,按比例取各层样品混合后用于分析重金属含量,其它用于分析总有机碳含量。粒度分析样品为0~0.5 cm表层样品。

1.2 重金属分析

沉积物重金属的分析主要参考文献[26]。Cr、Cu、Ni、Zn等元素的分析采用ICP-MS方法。称取0.2 g(精度为±0.000 1 g)沉积物样品于三角瓶中,加入10 mL王水,在电热板上加热微沸至有机物剧烈反应;冷却后,再加入2 mL超纯水和30%双氧水3 mL,然后加热至冒白烟,沉积物呈灰白色或淡黄色;冷却后,加30%双氧水1 mL,继续加热(95℃±5℃,约2 h)直到样品无变化;冷却后加入超纯水定容(至100 mL),离心后取上清液。测定时,稀释加内标Rh。

Pb和Cd的测定采用原子吸收分光光度法(flame atomic absorption spectrometry, FAAS)。准确称取样品0.2 g(精度为±0.000 1 g)于25 mL比色管中,少许水湿润,加入10 mL王水,过夜;沸水浴至样品中不再产生气泡,冷却至室温后,定容备用。Hg和As的测定采用原子荧光光度法(atomic fluorescence spectrometry, AFS),样品的预处理方法同ICP-MS。

质量控制:在分析潮间带表层沉积物重金属的同时,同步分析了水系沉积物标准物质GSD-5、GSD-3重金属含量(回收率80.46%~120.03%,相对标准偏差3.32%~13.36%),以检验和控制分析数据质量。

1.3 粒度分析

用Mastersizer 2000型激光粒度仪进行粒度分析。每个样品取约1.5 g于20 mL玻璃烧杯中,用0.6%六偏磷酸钠溶液浸泡24 h后,转移到1000 mL塑料烧杯中,超声振荡后测量。激光粒度仪测

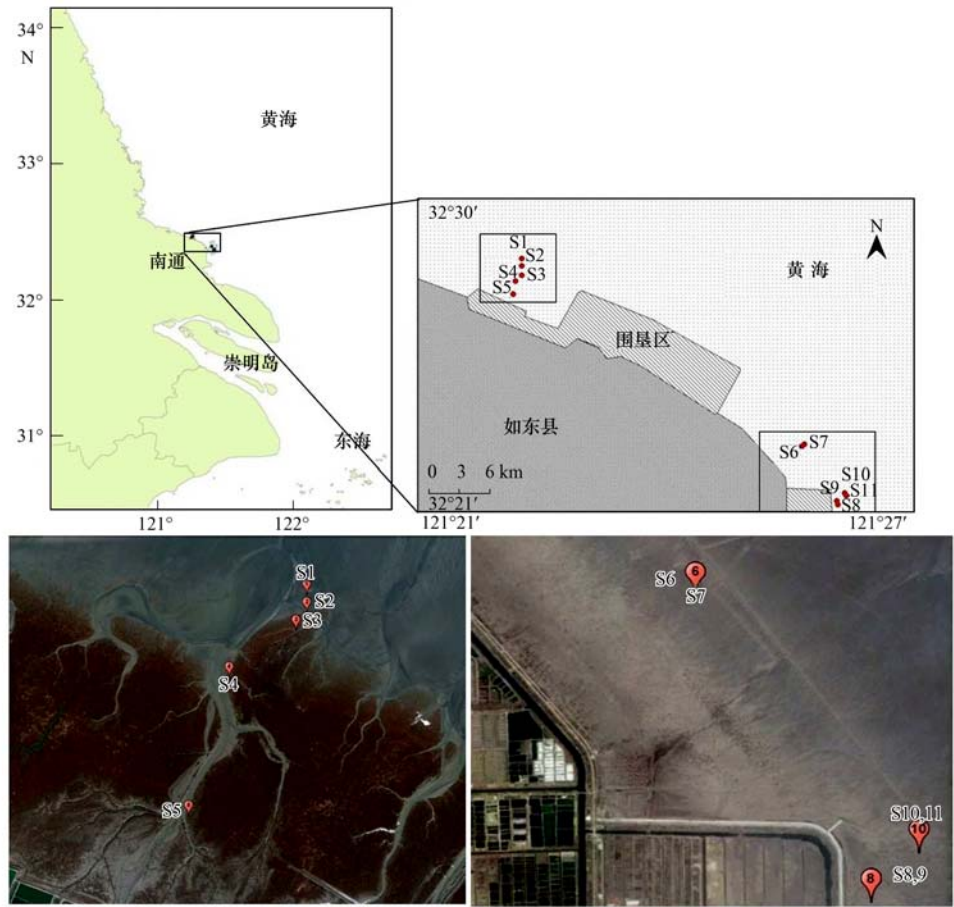


图 1 如东潮间带采样点分布

Fig. 1 Sampling sites over the intertidal flat of Rudong coast

量范围为 0.02 ~ 2 000 μm ，粒度分级 0.1 μm ，重复测量误差小于 3%。应用福克-沃德图算法^[27]的数学公式对 Mastersizer 2000 的分析结果进行计算，获得样品的粒度分布数据。沉积物类型根据 Link^[28]的分类方案，按照砂(<4 μm)、粉砂(4 ~ 8 μm)和黏土(>8 μm)的组分含量来命名。

1.4 总有机碳分析

采用重铬酸钾氧化-还原容量法测定样品中的总有机碳^[29]。

1.5 评价方法

地累积指数法(geoaccumulation index, I_{geo})^[9]由德国海德堡大学沉积物研究所 Müller 提出，是研究水系沉积物金属污染物的定量指数，用于评估人类活动对沉积物重金属的影响。 I_{geo} 计算公式为：

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (1.5 \times B_n)]$$

式中， I_{geo} 为地累积指数； C_n 为元素 n 在沉积物中的实测含量； B_n 为沉积物中 n 元素的地球化学背景值；1.5 为考虑成岩作用可能引起的背景值变动而设定的系数。根据 I_{geo} 数值的大小，可将沉积物中

重金属的污染程度划分为无、轻度、偏中度、中度、偏重、重、严重污染 7 个等级^[9]。

潜在生态风险指数评价法(the potential ecological risk index)^[10]由瑞典学者 Håkanson 提出，该方法其计算公式为：

$$C_f^i = C^i / C_n^i$$

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot C_f^i$$

式中， C_f^i 为某一污染物的污染系数； C^i 为表层沉积物中污染物的实测含量； C_n^i 为元素 i 元素的地球化学背景值； C_d 为沉积物中重金属元素的综合污染程度； T_r^i 为沉积物中元素 i 的毒性响应系数，主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度； E_r^i 为重金属元素 i 潜在生态风险系数；RI 为多种重金属元素的潜在生态风险指数。 C_f^i 、 C_d 值表征的污染程度有低、中、高污染 3 个等级， E_r^i 、RI 值相对应的潜在生态风险程度有低、中、较高、极

高这 4 个等级^[10].

本研究以中国大陆沉积物-浅海粉砂背景值(表 2)作为地球化学背景值,计算各元素的地累积指数、污染系数及潜在生态风险系数等.

1.6 统计分析

采用 SPSS 19.0 软件进行 8 种元素各空间数值正态性检验(K-S 检验)、单样本 *T* 检验(双侧),及重金属含量与平均粒径、黏土含量、总有机碳含量之间的相关分析(Pearson 相关,双尾检测其显著性水平).

2 结果与分析

2.1 沉积环境特征

粒度分析表明,如东潮间带表层沉积物主要由粉砂和砂组成,黏土含量低于 10% (表 1). 其中互花米草盐沼沉积物多为砂质粉砂,光滩区沉积物多为粉砂或粉砂质砂. 整个研究区域表层沉积物组成以粉砂最高,砂其次,黏土最少,分选程度为中. 在垂直岸线断面,粉砂含量由海向陆升高,砂的含量降低;互花米草滩的沉积物组分以粉砂最高;黏土含量在 S2 ~ S4 随米草生长渐好而升高,至米草和盐蒿过渡的 S5 又变小. 平行岸线断面,沉积物组成以砂含量最高,米草区的平均粒径略微大于光滩区,米草区的黏土和砂含量高于光滩区. 在垂直岸线断面, S1 ~ S5 沉积物的分选系数 S1 ~ S4 逐渐变大,在 S5 又变小.

表 1 如东潮间带表层沉积环境粒度参数

Table 1 Grain-size parameters of the surficial sediment at the intertidal flat of Rudong coast

采样断面及站点		黏土/%	粉砂/%	砂/%	平均粒径/ μm	中值粒径/ μm	分选系数
垂直于岸线断面	S1	2. 12	21. 02	76. 87	92. 29	96. 70	2. 03
	S2	4. 57	57. 26	38. 17	47. 40	50. 51	2. 51
	S3	6. 56	65. 7	27. 74	36. 34	41. 95	2. 72
	S4	9. 01	70. 54	20. 45	26. 69	35. 04	3. 10
	S5	7. 84	72. 04	20. 12	30. 31	37. 21	2. 78
	断面平均 (S1 ~ S5)	6. 02	57. 31	36. 67	63. 38	52. 28	2. 63
	(S2 ~ S5)	6. 70	66. 39	26. 62	35. 19	41. 18	2. 78
平行于岸线断面	S6	4. 09	39. 97	55. 95	61. 41	68. 86	2. 45
	S7	3. 26	44. 97	51. 77	60. 25	64. 26	2. 20
	S8	2. 74	34. 47	62. 79	69. 95	76. 61	2. 16
	S9	3. 26	45. 65	51. 09	58. 20	63. 64	2. 25
	S10	3. 45	56. 84	39. 7	51. 83	53. 41	2. 19
	S11	3. 00	52. 65	44. 35	55. 89	57. 37	2. 15
	互花米草区 (S6, S8 & S10)	3. 43	43. 76	52. 81	79. 66	66. 29	2. 27
	光滩区 (S7, S9 & S11)	3. 18	47. 75	49. 07	75. 88	61. 76	2. 20
	断面平均	3. 30	45. 76	50. 94	77. 77	63. 98	2. 23
	S1 ~ S11 平均	4. 54	51. 01	44. 45	71. 23	58. 69	2. 41

2.2 有机碳分布特征

如东潮间带表层沉积物有机碳含量普遍较低(0.63% ~ 1.21%, 图 2). 在垂直岸线断面,表层沉积物有机碳含量由海向岸呈升高趋势,表明互花米草的生长促进了沉积物有机碳的累积,且生长年份越高促进作用也明显;在平行岸线断面,有机碳含量在米草区与邻近光滩的差异不明显. 在垂向分布,大多站位有机碳含量在 0 ~ 0.5 cm 表层最高,且随深度增加呈逐渐降低趋势.

2.3 重金属元素分布特征

研究区域沉积物 8 种元素含量见表 2. 8 种元素平均含量均低于海洋沉积物标准 I 类^[31], 其中 Cd、Hg、Zn 平均含量高于中国大陆沉积物-浅海粉砂背景值^[31], 其他元素低于中国大陆沉积物-浅海

粉砂背景值. 8 种元素在米草区的平均值高于光滩区平均值. 在垂直岸线断面, As、Hg 和 Cu 含量由海向陆呈现随米草长势渐好呈增加趋势, Hg 的最高含量是最低含量的 5 倍, Cd 和 Zn 含量先升高再降低, Cr 和 Ni 含量由海向陆变化不大. 在平行岸线断面, 米草区 8 种元素含量均高于光滩区. 两个断面相比, 斑块区 Cd、Cu 含量明显低于垂直断面的茂盛分布区.

2.4 重金属与黏土含量、平均粒径、有机碳的相关性

各元素之间的相关性见表 3. 除 Hg 和 As 外, 其它 6 种元素间显著正相关($P < 0.01$). 黏土含量与 Pb、Cu、Ni 呈显著正相关; 平均粒径与各元素含量呈负相关, 且与 Cu 呈显著负相关; 有机碳含量与 As、Cu 呈显著正相关.

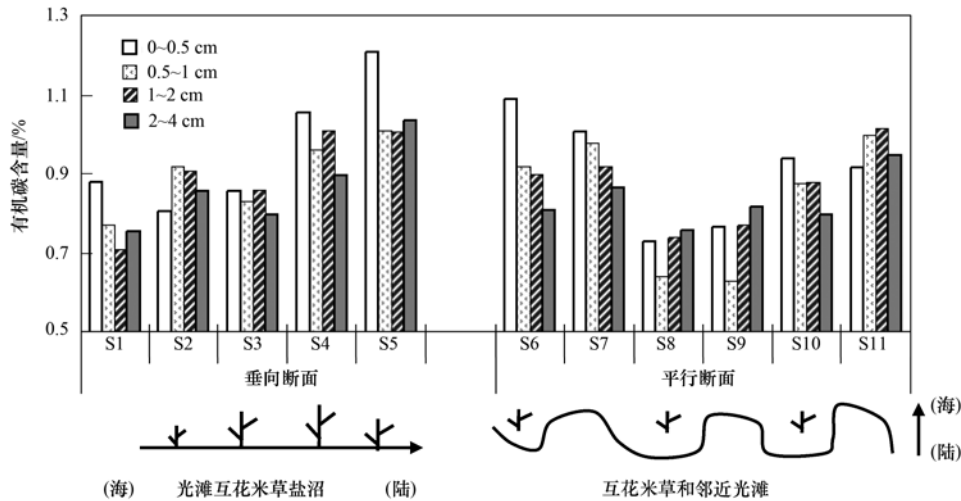


图 2 如东潮间带沉积物有机碳分布

Fig. 2 Distribution of organic carbon content in the intertidal flat of Rudong coast

表 2 如东潮间带表层沉积物重金属含量

Table 2 Heavy metal contents in the surficial sediments at the intertidal flat of Rudong coast

采样断面及站点		重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
		Pb	Cd	As	Hg	Cr	Cu	Zn	Ni
垂直于岸线断面	S1	7.03	0.130	4.87	0.014	55.02	6.15	95.03	25.34
	S2	6.29	0.171	5.80	0.039	53.21	8.24	110.15	25.65
	S3	7.80	0.167	7.03	0.040	63.74	10.70	92.43	28.98
	S4	8.04	0.120	7.29	0.040	55.07	10.09	79.59	26.66
	S5	6.98	0.120	9.98	0.070	61.30	12.32	91.45	28.22
	断面平均 (S1 ~ S5)	7.23	0.142	6.79	0.041	57.67	9.50	93.73	26.95
	(S2 ~ S5)	7.28	0.145	7.53	0.048	58.33	10.34	93.41	27.38
平行于岸线断面	S6	7.08	0.104	10.06	0.037	59.40	7.03	85.78	27.94
	S7	5.39	0.087	5.44	0.041	43.72	5.09	51.53	18.65
	S8	4.11	0.076	4.22	0.044	37.40	3.91	62.03	22.31
	S9	3.24	0.061	5.86	0.038	28.57	2.60	45.80	15.67
	S10	5.35	0.081	5.73	0.099	37.58	3.57	68.57	22.69
	S11	5.38	0.074	8.18	0.047	28.35	3.51	55.26	19.11
	互花米草区 (S6, S8 & S10)	5.52	0.087	6.67	0.060	44.79	4.84	72.61	24.32
	光滩区 (S7, S9 & S11)	4.67	0.074	6.49	0.042	33.55	3.73	50.86	17.81
断面平均		5.09	0.081	6.58	0.051	39.17	4.29	61.51	21.06
整个研究区均值 (S1 ~ S11)		6.06	0.108	6.68	0.046	47.58	6.66	76.15	3.74
整个研究区中值		6.29	0.104	5.86	0.040	53.21	7.03	79.59	5.64
中国大陆沉积物背景值		19	0.066	7.3	0.027	60	15	23	62
海洋沉积物标准 I 类		60.0	0.5	20.0	0.2	80.0	35.0	— ¹⁾	150.5

1) “—”表示没有相关数据

2.5 重金属污染评价

K-S 检验表明, 研究区域各站位 8 种元素含量、 I_{geo} 、 C_{f}^i 、 E_{r}^i 及各站位 C_{d} 、RI 服从正态分布 ($P > 0.05$); 单样本 T 检验表明, 上述各空间数值具有统计意义 ($P < 0.05$).

2.5.1 地累积指数法评价

以中国大陆沉积物-浅海粉砂背景值(表 2)作为地球化学背景值, 获得的 8 种元素的地累积指数、各站位地累积指数(表 4). 8 种元素中, 只有

Cd 和 Hg 的平均地累积指数大于 0, 分别为 0.06 和 0.052, 为偏向无污染水平的轻度污染. 其它元素平均地累积指数小于 0, 属无污染水平. 研究区域的平均 I_{geo} 小于 0, 属无污染水平.

2.5.2 潜在生态风险评价

以中国大陆沉积物-浅海粉砂背景值为参比, 计算各元素的污染系数、潜在生态风险系数等. 8 种元素 Pb、Cd、As、Hg、Cr、Cu、Ni、Zn 的毒性系数 T_{r}^i 分别为 5、30、10、40、2、5、5、1^[9, 32]. 表 5

为各站位表层沉积物中 8 种重金属元素的单因子污染系数 C_f^i 及多因子污染指数 C_d .

表 3 如东潮间带表层沉积物各元素含量间及其与黏土含量、平均粒径、总有机碳的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient matrix between heavy metal contents and clay content, mean grain size & organic carbon in surface sediment over the Rudong tidal flat

	Pb	Cd	As	Hg	Cr	Cu	Zn	Ni
Cd	0.747 **							
As	0.470	0.105						
Hg	-0.154	-0.269	0.179					
Cr	0.876 **	0.810 **	0.407	-0.197				
Cu	0.828 **	0.764 **	0.515	-0.039	0.889 **			
Zn	0.742 **	0.907 **	0.228	-0.157	0.829 **	0.730 *		
Ni	0.867 **	0.764 **	0.446	-0.012	0.920 **	0.841 **	0.863 **	
黏土含量	0.653 *	0.464	0.520	0.168	0.602	0.853 **	0.395	0.604 *
平均粒径	-0.389	-0.302	-0.505	-0.432	-0.313	-0.641 *	-0.181	-0.355
有机碳含量	0.405	0.175	0.797 **	0.314	0.306	0.609 *	0.170	0.293

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

表 4 江苏如东潮间带表层沉积物中重金属地累积指数 I_{geo} ¹⁾

Table 4 The I_{geo} and their ecological levels of heavy metals over the intertidal sediments of Rudong coast, Jiangsu province

元素	垂直于岸线断面							平行于岸线断面(互花米草和邻近光滩: S6 和 S7, S8 和 S9, S10 和 S11)								
	S1	S2	S3	S4	S5	S1 ~ S5	S2 ~ S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S6 ~ S11	S6,8,10	S7,9,11
Pb	-2.02	-2.18	-1.87	-1.83	-2.03	-1.99	-1.98	-2.01	-2.4	-2.79	-3.14	-2.41	-2.41	-2.28	-2.40	-2.65
Cd	0.4	0.79	0.56	0.28	0.28	0.46	0.48	0.07	-0.18	-0.37	-0.69	-0.29	-0.41	0.06	-0.20	-0.43
As	-1.17	-0.92	-0.64	-0.59	-0.29	-0.72	-0.61	-0.12	-1.01	-1.37	-0.9	-0.93	-0.42	-0.76	-0.81	-0.78
Hg	-1.54	-0.06	-0.03	-0.004	-0.78	-0.48	-0.22	-0.13	-0.03	-0.1	-0.09	1.29	0.22	0.052	0.35	0.03
Cr	-0.71	-0.76	-0.5	-0.71	-0.55	-0.65	-0.63	-0.6	-1.04	-1.27	-1.66	-1.26	-1.67	-0.97	-1.04	-1.46
Cu	-1.87	-1.45	-1.07	-1.16	-0.87	-1.28	-1.14	-1.68	-2.15	-2.52	-3.11	-2.66	-2.68	-1.93	-2.29	-1.21
Ni	-0.45	-0.43	-0.26	-0.37	-0.29	-0.36	-0.34	-0.3	-0.89	-0.63	-1.14	-0.6	-0.85	-0.56	-0.51	-0.96
Zn	0.03	0.24	-0.01	-0.22	-0.02	0.00	0.00	-0.12	-0.85	-0.58	-1.02	-0.44	-0.75	-0.34	-0.38	-0.87
平均	-0.92	-0.59	-0.45	-0.57	-0.37	-0.58	-0.50	-0.61	-1.06	-1.18	-1.47	-0.91	-1.12	-0.84	-0.90	-1.22

1) I_{geo} 指数 ≤ 0 、0 ~ 1、1 ~ 2、2 ~ 3 分别表示无污染,轻度污染,偏中度污染和重度污染

表 5 如东潮间带表层沉积物中重金属单因子污染系数 C_f^i 及多因子污染程度 C_d ¹⁾

Table 5 The C_f^i and C_d of heavy metals in the surface sediments of each sampling site from Rudong tidal flats

采样断面及站位分布		C_f^i								C_d
		Pb	Cd	As	Hg	Cr	Cu	Ni	Zn	
垂直于岸线断面	S1	0.37	1.97	0.67	0.52	0.92	0.41	1.10	1.53	7.49
	S2	0.33	2.59	0.80	1.44	0.89	0.55	1.12	1.78	9.48
	S3	0.41	2.54	0.96	1.17	1.06	0.71	1.26	1.49	9.90
	S4	0.42	1.82	1.00	1.50	0.92	0.67	1.16	1.28	8.77
	S5	0.37	1.82	1.23	2.58	1.02	0.82	1.23	1.47	10.55
	S1 ~ S5 平均	0.38	2.15	0.93	1.50	0.96	0.63	1.51	1.17	9.2
平行于岸线断面	S6	0.37	1.58	1.38	1.37	0.99	0.47	1.21	1.39	8.76
	S7	0.28	0.31	0.74	1.53	0.73	0.34	0.81	0.83	6.59
	S8	0.22	1.16	0.58	1.61	0.62	0.26	0.97	1.00	6.42
	S9	0.17	0.93	0.80	1.41	0.48	0.17	0.68	0.74	5.38
	S10	0.28	0.22	0.79	3.67	0.63	0.24	0.99	1.11	8.92
	S11	0.28	0.13	1.12	1.74	0.47	0.23	0.83	0.89	6.70
	互花米草区平均(S6, S8 & S10)	0.29	1.32	0.91	2.22	0.75	0.32	1.06	1.06	8.03
	光滩区平均(S7, S9 & S11)	0.25	1.13	0.89	1.56	0.56	0.25	0.77	0.82	6.22
	断面平均 S6 ~ S11	0.27	1.22	0.90	1.89	0.65	0.29	0.92	0.99	7.13
	研究区平均(S1 ~ S11)	0.32	1.64	0.91	1.71	0.79	0.44	1.03	1.23	8.09

1) 低污染: $C_f^i < 1$, $C_d < 8$; 中污染: $1 \leq C_f^i < 3$, $8 \leq C_d < 16$

从单个重金属元素来看,各元素的 C_i^i 大小顺序为 $Hg > Cd > Zn > Ni > As > Cr > Cu > Pb$, 其中 Hg 、 Cd 、 Zn 、 Ni 的平均 C_i^i 大于 1, 属中度污染. 在垂直岸线断面, Hg 、 Cd 、 Zn 、 Ni 属中度污染; As 、 Cr 、 Cu 、 Pb 为低污染($C_i^i < 1$), 由海向陆其 C_i^i 数值随互花米草长势渐好呈现变大趋势, Cd 、 Zn 、 Ni 、 Cr 的 C_i^i 由海向陆先增高再降低. 在平行岸线断面, 同样 Hg 、 Cd 、 Zn 、 Ni 为中度污染, As 、 Cr 、 Cu 、 Pb 为低污染; 米草区各元素的 C_i^i 普遍大于光滩区, 米草区各元素平均 C_i^i 高于光滩区, 即米草区各元素污染指数大于光滩区.

从综合污染程度来看, 整个研究区域内的 C_d 为 8.09, 为偏向于低污染的中度污染($C_d < 8$ 为低污染, $8 \leq C_d < 16$ 为中度污染). 在垂直岸线断面, 由海向陆 C_d 随互花米草长势渐好而逐渐增大, 污染程度由低污染增至中度污染. 平行岸线断面, 米草区各站位 C_d 均高于光滩区, 米草区污染程度为

中度污染, 光滩区为低污染.

如东潮间带表层沉积物各元素潜在生态危害系数 E_r^i 与总潜在生态风险指数 RI 见表 6. 从单个元素来看, Cd 和 Hg 属中度污染, 其他元素为低污染. 在垂直岸线断面, Cd 和 Hg 的平均 E_r^i 分别为 64.47 和 60.03, 为中度污染, 其他元素为低污染; Pb 、 As 、 Hg 和 Cu 的 E_r^i 由海向陆随米草长势渐好呈现逐渐增大趋势. 在平行岸线断面, Cd 和 Hg 为仍为中度污染, 其他元素为低污染; 米草区的各元素平均 E_r^i 大于光滩区, 且米草区域各元素 E_r^i 普遍大于光滩区, 即米草区各重金属元素的潜在生态危害高于光滩区. 整个研究区域潜在生态风险等级为低. 在垂直岸线断面, 离岸最远的光滩区 $S1$ 站位的 RI 明显小于离岸最近的 $S5$. 平行岸线断面, 米草区和光滩区的潜在危害等级均为低, 但米草区的 RI 大于光滩区, 即米草滩的潜在生态危害高于光滩区.

表 6 如东潮间带表层沉积物中各重金属潜在生态危害系数与总潜在生态风险指数¹⁾

Table 6 Ecological harm coefficient and ecological risk index of heavy metals in the sediment of Rudong tidal flats

采样断面及站位分布		E_r^i								RI 及潜在生态危害等级	
		Pb	Cd	As	Hg	Cr	Cu	Ni	Zn		
垂直于岸线断面	S1	1.85	59.23	6.67	20.76	1.83	2.05	5.51	1.53	99.34	低
	S2	1.66	77.61	7.95	57.60	1.77	2.75	5.58	1.78	156.69	中
	S3	2.05	76.12	9.63	58.73	2.12	3.57	6.23	1.49	156.98	中
	S4	2.12	54.68	9.99	59.84	1.84	3.36	5.79	1.28	138.91	低
	S5	1.84	54.69	12.30	103.32	2.04	4.11	6.13	1.47	185.91	中
	S1 ~ S5 平均	1.90	64.47	9.31	60.03	1.92	3.17	5.85	5.86	148.16	低
平行于岸线断面	S6	1.86	47.40	13.78	54.67	1.98	2.34	6.07	1.39	129.49	低
	S7	1.42	39.42	7.45	61.14	1.46	1.70	4.06	0.83	117.66	低
	S8	1.08	34.76	5.79	64.49	1.25	1.30	4.85	1.00	114.51	低
	S9	0.85	27.91	8.03	56.40	0.95	0.87	3.41	0.74	99.15	低
	S10	1.41	36.69	7.86	146.98	1.25	1.19	4.93	1.11	201.41	中
	S11	1.42	33.76	11.20	69.79	0.95	1.17	4.15	0.89	123.33	低
	互花米草区平均(S6, S8& S10)	1.45	39.61	9.14	88.71	1.49	1.61	5.29	1.16	148.47	低
	光滩区平均(S7, S9& S11)	1.23	33.76	8.89	62.44	1.12	1.24	3.87	0.82	113.38	低
	断面平均 S6 ~ S11	1.34	36.69	9.02	75.58	1.31	1.43	4.58	0.99	130.92	低
	整个研究区(S1 ~ S11)	1.60	49.31	9.15	68.51	1.56	2.22	5.16	1.23	138.76	低

1) 低潜在生态风险: $E_r^i < 40$, $RI < 150$; 中潜在风险: $40 \leq E_r^i < 80$, $150 \leq RI < 300$; 较重潜在生态风险 $80 \leq E_r^i < 160$, $300 \leq RI < 600$

比较而言,虽然两种方法获得的整体污染等级不同,但是其反映的环境趋势基本一致,无污染与低污染以及轻度污染与中度污染的数据组约占 70% (表 7). 并且污染评价略有差异的站位主要是互花米草分布区,主要是 Hg 、 Ni 和 Zn 这 3 种元素. 潜在生态风险指数评价法考虑了重金属污染对人体健康、生物生长的影响,引入了毒性响应系数 T_r^i , 不同重金属毒性各异. 而地累积指数法的评价较为保守. 两种方法结合使用,有助于更合理地反映研

究区域重金属污染状况.

3 讨论

盐沼湿地沉积物对重金属的富集作用,一方面是细颗粒泥沙的黏附作用,已有研究表明重金属含量与沉积物粒径和沉积物中黏土含量之间的高度相关^[20, 33]. 由于细颗粒物质有助于重金属的黏附,而互花米草促进细颗粒物质的沉降,因此间接增加了盐沼湿地对重金属的富集作用. 这种现象在本研究

表 7 各元素在 2 种评价方法(地累积指数法/潜在生态风险指数评价法)中的污染等级¹⁾

Table 7 Pollution level of each metal by two assessment methods										
地累积指数/潜在生态风险指数评价		重金属元素							整体	
		Pb	Cd	As	Hg	Cr	Cu	Ni		Zn
垂直于岸线断面	S1	无/低	轻度/中	无/低	轻度/低	无/低	无/低	无/中*	轻度/中	无/低
	S2	无/低	轻度/中	无/低	轻度/中	无/低	无/低	无/中*	轻度/中	无/低
	S3	无/低	轻度/中	无/低	无/中*	无/中*	无/低	无/中*	无/中*	无/中*
	S4	无/低	轻度/中	无/中*	无/中*	无/低	无/低	无/中*	无/中*	无/中*
	S5	无/低	轻度/中	无/中*	无/中*	无/中*	无/低	无/中*	无/中*	无/中*
断面平均 S1 ~ 5		无/低	轻度/中	无/低	无/中*	无/低	无/低	无/中*	无/中*	无/中*
平行于岸线断面	S6	无/低	轻度/中	无/中*	无/中*	无/低	无/低	无/中*	无/中*	无/中*
	S7	无/低	无/低	无/低	无/中*	无/低	无/低	无/低	无/低	无/低
	S8	无/低	无/中*	无/低	无/中*	无/低	无/低	无/低	无/中	无/低
	S9	无/低	无/低	无/低	无/中*	无/低	无/低	无/低	无/低	无/低
	S10	无/低	无/低	无/低	偏中/较高	无/低	无/低	无/低	无/中*	无/中*
	S11	无/低	无/低	无/中*	轻度/中	无/低	无/低	无/低	无/低	无/低
	断面平均 S6 ~ 11		无/低	无/中*	无/低	轻度/中	无/低	无/低	无/低	无/低
	米草区平均 S6, S8, S10		无/低	无/中*	无/低	轻度/中	无/低	无/低	无/中*	无/中*
光滩区平均 S7, S9, S11		无/低	无/中*	无/低	轻度/中	无/低	无/低	无/低	无/低	无/低
研究区平均 S1 ~ S11		无/低	轻度/中	无/低	轻度/中	无/低	无/低	无/中*	无/中*	无/中*

1) * 表示两种评价方法稍有偏差

结果中体现的较为明显,如在垂直断面上黏土含量和有机碳含量均表现自海向陆随互花米草长势渐好呈增加趋势;8种元素在沉积物中的含量与黏土含量都表现为正相关,并且 Pb、Cu、Ni 含量与黏土含量表现为显著相关.同时由于重金属在沉积物中的含量受其存在形式、来源、污染水平等多种因素的影响,因此其分布也表现为一定的差异.如, Hg 在土壤及沉积物中主要以 HgS 和 Hg⁰ 形式存在,而且沉积物中的汞向空气中释放^[33~35],使其分布与其它元素不同;相对其他元素, As 在互花米草植株地下部分含量远高于地上含量(约为 19 倍,除 Hg 没有数据外其它约为 2~4 倍)^[36],此外,土壤中的某些细菌、酵母等真菌可以使土壤中的砷甲基化而逸出气体砷^[37].这可能是 Hg 与 As 其它种元素相关系数较低的原因之一.

另一方面互花米草等盐沼植物本身对重金属具有吸附作用,由于其富集作用主要在其根系附近,随着植物根部腐烂,故而大部分重金属被滞留在沉积物中^[20, 34].为详细了解互花米草的作用,本研究垂直断面采样主要考虑互花米草的长势,平行断面主要考虑互花米草植株的有无.在分析的 8 种元素中, Pb、As、Cu、Hg 含量、地累积指数、潜在生态风险系数均表现出由海向陆方向随米草长势渐好含量逐渐增加的趋势;而在植物较为矮小的互花米草斑块分布区,互花米草区重金属浓度、污染程度、潜在生态风险均高于光滩区.该结果与罗源湾及泉

州湾的研究结果较为相近^[22, 38].互花米草群落在江苏如东同样促进了重金属污染物的富集,阻滞其入海进一步扩散,从而降低了对环境的危害.此外,在平行断面互花米草拓殖 1 年左右斑块的沉积物中, Cd、Cu 含量显著(ANOVA, $P < 0.05$)低于垂直断面的茂盛分布区,进一步表明互花米草对重金属影响与其拓殖年限有关,拓殖年限越高,越促进重金属富集.由于沉积物的理化条件对不同元素的富集影响不尽一致,因而不同元素含量变化表现略有差异.

研究区域基本没有大江、大河等淡水输入;但滩涂养殖业非常发达,附近有贝类(如蛤、蛏等)、海参、虾、蟹等经济动物繁养殖场.因此养殖过程中残饵、粪便、消毒液的排放等可能是重金属污染的重要来源之一,也是影响重金属分布的重要因素之一.携带污染物的水体沿潮沟顺流而下,潮沟上游宽阔,且受互花米草根系阻挡,水流缓慢,部分污染物被吸附或沉降;涨潮时潮沟下游污染物被带回上游并滞留一段时间,继而造成二次被吸附或沉降;退潮时,潮沟下游浸没时间较上游长,对污染物的稀释程度较大.加之近岸端互花米草相对茂盛,地下根系密集,形成层层阻隔.因此近岸的沉积物中重金属含量相对较高,随着向海推进其含量逐渐降低.进一步表明互花米草群落在阻滞重金属污染物扩散入海方面发挥重要作用.

虽然地累计指数和潜在生态评价均表明 8 种元

素中 Hg 和 Cd 具有一定程度的污染(轻度/中等),但是整个研究区域内的重金属污染程度相对较低,尽管潜在生态风险评价中其多因子污染指数为中,其数值仅为 8.09,略微高于低污染水平(小于 8 为低污染;大于等于 8 小于为中等污染),潜在危害程度为低。此外,两种方法评价中略微存在差异的站位主要来自互花米草滩的部分元素(Hg、Ni 和 Zn)。很可能这些重金属的分布模式是互花米草盐沼中内部环境异质性的体现。已有研究表明潮滩微地貌元素影响生物分布,如芦苇植株之间(植株 5 cm 半径之外)小型生物底栖生物丰度(尤其是海洋线虫)高于芦苇根周^[39]。由于生物活动会影响沉积物的理化性质,而后者会间接影响重金属的空间分布。这些工作有待于在后续的研究中给予重视。

4 结论

(1) 如东潮间带表层沉积物主要是粉砂和砂,总有机碳含量较低。所分析的 8 种元素含量均低于海洋沉积物标准 I 类,其中 Hg、Cd 和 Zn 的含量高于中国大陆沉积物-浅海背景值。除 Hg 和 As 外,其它 6 种间元素显著相关,Pb、Cu、Ni 与黏土含量显著相关,As、Cu 与有机碳含量显著相关。互花米草区的重金属含量高于光滩区。

(2) 地累计指数和潜在生态评价均表明,测定的 8 种元素中以 Hg 和 Cd 在该区域的污染相对较为重;地累计指数表明研究区域重元素污染程度为无污染,潜在生态风险指数评价法则处于为低污染和中度污染的临界值,生态风险为低。两种方法评价结果基本一致,略有差异的区域主要为互花米草植被区。

(3) 由海向陆随互花米草长势渐好(垂直岸线断面),As、Cu 及 Hg 的含量、地累积指数、潜在生态风险系数呈渐增趋势。拓殖一年左右的米草斑块区内(平行岸线断面),互花米草覆盖区 8 种元素含量、污染及生态风险均高于邻近无植被覆盖区。斑块分布区 Cd、Cu 含量显著低于垂直断面的茂盛分布区。

(4) 互花米草是大部分重金属污染物在沉积物富集的重要驱动力之一,其植株通过阻滞污染物直接入海扩散,降低生态危害。互花米草对重金属的影响程度与米草的拓植年限、金属元素存在形态和来源有关。

致谢:感谢南京大学研究生刘运令、欧志吉、李润祥、赵秧秧、陆驰、李瑾协助野外工作,南京

大学分析中心的陶仙聪老师协助样品分析。

参考文献:

- [1] Boran M, Altynok I. A review of heavy metals in water, sediment and living organisms in the Black Sea [J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2010, **10**(4): 565-572.
- [2] Christophoridis C, Dedepsidis D, Fytianos K. Occurrence and distribution of selected heavy metals in the surface sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment using pollution indicators [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(2-3): 1082-1091.
- [3] Gargouri D, Azri C, Serbaji M M, et al. Heavy metal concentrations in the surface marine sediments of Sfax Coast, Tunisia [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **175**(1-4): 519-530.
- [4] Ahmad M K, Islam S, Rahman M S, et al. Heavy metals in water, sediment and some fishes of Buriganga River, Bangladesh [J]. International Journal of Environmental Research, 2010, **4**(2): 321-332.
- [5] Hongyi N, Wenjing D, Qunhe W, et al. Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(8): 1053-1058.
- [6] Kalantzi I, Shimmield T M, Pergantis S A, et al. Heavy metals, trace elements and sediment geochemistry at four Mediterranean fish farms [J]. Science of the Total Environment, 2013, **444**: 128-137.
- [7] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. GeoJournal, 1981, **5**(5): 417-432.
- [8] Santos Bermejo J C, Beltrán R, Gómez Ariza J L. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel river (Southwest Spain) [J]. Environment International, 2003, **29**(1): 69-77.
- [9] Muller G. Index of geoaccumulation in Sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969, **2**: 108-118.
- [10] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [11] 洪劲财, 闵建. 如东沿海的滩涂资源及开发利用[J]. 现代渔业信息, 2003, **18**(10): 24-26.
- [12] 任美镠, 许廷官, 朱秀文. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [13] 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.
- [14] 陈中义, 李博, 陈家宽. 米草属植物入侵的生态后果及管理对策[J]. 生物多样性, 2004, **12**(2): 280-289.
- [15] Gao J, Bai F, Yang Y, et al. Influence of *Spartina Colonization* on the supply and accumulation of organic carbon in tidal salt marshes of Northern Jiangsu Province, China [J]. Journal of Coastal Research, 2011, **28**(2): 486-498.
- [16] Xie W J, Gao S. The macrobenthos in *Spartina alterniflora* salt

- marshes of the Wanggang tidal-flat, Jiangsu coast, China [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(8): 1158-1166.
- [17] Chen H, Li B, Hu J, *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* invasion on benthic nematode communities in the Yangtze Estuary [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, **336**: 99-110.
- [18] Nie M, Yan J H, Fu X H, *et al.* Population variation of invasive *Spartina alterniflora* can differentiate bacterial diversity in its rhizosphere [J]. Plant Ecology, 2010, **209**(2): 219-226.
- [19] 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.
- [20] 王爱军, 陈坚, 李东义, 等. 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.
- [21] Wang Y, Zhou L, Zheng X, *et al.* Influence of *Spartina alterniflora* on the mobility of heavy metals in salt marsh sediments of the Yangtze River Estuary, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(3): 1675-1685.
- [22] 高文华, 杜永芬, 王丹丹, 等. 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[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3097-3103.
- [23] 张秀玲. 米草属引种中国海岸带的利弊分析[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(11): 1878-1883.
- [24] 徐国万, 卓荣宗. 我国引种互花米草的初步研究(I) [A]. 见: 南京大学学报(米草研究的进展——22 年来的研究成果论文集) [C]. 南京: 南京大学学报, 1985. 212-225.
- [25] 吴小根, 王爱军. 人类活动对苏北潮滩发育的影响[J]. 地理科学, 2005, **25**(5): 614-620.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 225-225.
- [27] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, **27**(1): 3-26.
- [28] Link A G. Textural classification of sediments [J]. Sedimentology, 1966, **7**(3): 249-254.
- [29] GB 17378. 5-1998. 海洋监测规范 第 5 部分: 沉积物分析[S].
- [30] GB 18668-2002 海洋沉积物质量[S].
- [31] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [32] 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.
- [33] Wang Y P, Gao S, Jia J J, *et al.* Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China [J]. Marine Geology, 2012, **291-294**: 147-161.
- [34] 方凤满, 王起超. 土壤汞污染研究进展[J]. 土壤与环境, 2000, **9**(4): 326-329.
- [35] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 436-456.
- [36] 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.
- [37] 常思敏, 马新明, 蒋媛媛, 等. 土壤砷污染及其对作物的毒害研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2005, **39**(2): 161-166.
- [38] 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.
- [39] 袁兴中, 陆健健. 潮滩微地貌元素-“生物结构”与小型底栖动物的空间分布[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(6): 124-126.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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