

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

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

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO ₂ 的来源	刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)
广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映	廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性	于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)
白马泉风景区夏季大气 PM _{2.5} 中二次有机物的初步研究	代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性	乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究	王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨	薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价	郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析	黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究	崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)
春季盘溪水质日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究	肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价	郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究	徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验	王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征	李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性	李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析	张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价	敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价	刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算	姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析	赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究	潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中的随水迁移特征	邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究	田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)
新生态铁的混凝作用探索	杨雪, 张景成, 关小红 (1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究	岳婵媛, 缪恒峰, 任洪艳, 阮文权 (1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究	王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究	秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯玺 (1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物	张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)
掺氮 Ta ₂ O ₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究	赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)
O ₃ /H ₂ O ₂ 降解水中扑灭通效能研究	李绍峰, 孙楚 (1260)
Pr-N 共掺杂 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学	沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究	张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)
聚合铝铁对 A ² /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响	温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响	张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响	李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究	王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析	李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌	王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究	于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究	陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)
氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究	王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响	孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响	王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C连续标记法	聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析	王坚, 张旭, 李广贺 (1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究	孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究	黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响	马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究	袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式	兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化	方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析	杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)	

黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价

刘志杰^{1,2}, 李培英³, 张晓龙⁴, 李萍³, 朱龙海⁵

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 4. 烟台大学环境学院, 烟台 264005; 5. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100)

摘要: 对黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属含量变化区域分布特征进行了分析, 探讨了沉积环境对重金属分布的影响, 采用 Hakanson 潜在生态风险指数法综合评价了黄河三角洲滨海湿地沉积物中重金属污染状况和潜在风险程度。结果表明, 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物 Hg、Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的均值分别为 0.034、18.733、19.393、65.317、0.235 和 62.940 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。黄河三角洲滨海湿地重金属分布存在区域差异, 现行河口区重金属含量最高, 鲁北古代黄河三角洲区重金属含量次之, 废弃河口区为最低。重金属区域分布受水动力条件的影响显著, 黏土含量对重金属的富集和分布也起到一定控制作用。黄河三角洲滨海湿地表层沉积物质量状况良好, 综合污染指数为 0.10 ~ 4.14, 处于低污染状态, Cr 是主要污染因子, 均值为 0.63。6 种污染物的污染程度由高到低的顺序为 $\text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg}$ 。综合潜在生态风险指数介于 0.46 ~ 51.88 之间, 具有较低的潜在生态风险。6 种污染物潜在生态风险参数由大到小顺序为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Zn}$, Cd 是黄河三角洲的主要潜在生态风险因子。

关键词: 黄河三角洲; 滨海湿地; 表层沉积物; 重金属; 潜在生态风险

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1182-07

Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta

LIU Zhi-jie^{1,2}, LI Pei-ying³, ZHANG Xiao-long⁴, LI Ping³, ZHU Long-hai⁵

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China; 3. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 4. Environmental College, Yantai University, Yantai 264005, China; 5. College of Marine Geo-Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Characteristics of heavy metal distributions in surface sediments of different areas in the Yellow River Delta coastal wetland are analyzed, and the influences of sediment environment on heavy metal distributions are discussed. Heavy metal pollution and potential ecological risk in surface sediments of the Yellow River Delta coastal wetland are estimated by using Hakanson potential ecological risk (PER) factors method. The analyzed results indicate that the average contents of Hg, Cu, Pb, Zn, Cd and Cr are 0.034, 18.733, 19.393, 65.317, 0.235 and 62.940 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The heavy metal distributions vary with regional environment changes. The accumulating index of heavy metals in the current outfall area is the highest of the three regions assigned by author, the second is that of the ancient Yellow River Delta in the north of Shandong province, and the lowest is that of the abandoned delta. Heavy metal distributions in the Yellow River Delta coastal wetland are affected significantly by hydrodynamic system. In addition, the content of clay in surface sediments plays an important role in the distribution and accumulation of heavy metals. The results also suggest that the heavy metal pollution in the Yellow River Delta coastal wetland is in a low pollution level, with a comprehensive pollution index varying from 0.10 to 4.14. And element Cr is the major pollution factor and its average of single pollution index is 0.63. The order of pollution extents of six typical pollutants is $\text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg}$. The comprehensive potential ecological risk index is between 0.46 and 51.88, indicating a low potential ecological risk. The order of potential ecological risk parameter is $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Zn}$. Element Cd is also the major factor of potential ecological risks in the Yellow River Delta coastal wetland.

Key words: Yellow River Delta; coastal wetland; surface sediments; heavy metal; potential ecological risk

滨海湿地处于陆海相互作用的敏感地带, 是人类社会经济活动最为频繁的地方。目前, 由于沿海城市化以及工农业的快速发展, 许多滨海湿地已成为工农业废水和生活污染水的承泄区^[1]。尽管滨海湿地通过物理、化学和生物作用过程可以对重金属等

有毒污染物进行吸收、固定和转化, 但当湿地沉积环

收稿日期: 2011-06-21; 修订日期: 2011-10-19

基金项目: 国家 908 专项 (908-01-ZH2); 国家海洋公益专项 (20100510)

作者简介: 刘志杰 (1977 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海岸环境演化、滨海湿地, E-mail: kittylzj@163.com

境遭受严重的污染并超过其承受能力的限度,重金属将从悬浮物或沉积物中重新释放,形成二次污染,甚至通过食物链威胁人类的生存^[2~4]. 因此,滨海湿地重金属污染有很重要的研究意义,已引起国内外学者的普遍关注^[5~17]. 国内外研究广泛涉及不同区域滨海湿地重金属的污染分布状况^[4~8]、重金属的累积特征^[9~12]以及环境质量评价等^[13~20].

黄河三角洲是世界上最年轻、最具特色的滨海湿地,受河海淡咸水双重影响,加之地貌、人为作用,发育了多种多样的湿地生态系统^[21]. 总体上黄河三角洲湿地可分为自然湿地和人工湿地两大类,其中自然湿地占主要地位,比例可达 73.5%,而浅海滩涂湿地又是自然湿地中的主要类型,约占自然湿地面积的 60% 以上^[22]. 近年来,随着黄河三角洲地区经济开发强度加大,人类活动产生的大量重金属污染物质通过河流进入海域,黄河三角洲滨海湿地生态环境发生较大的变化. 已有研究报道了黄河三角洲重金属污染状况^[8,23~25]. 前人的研究增加了对近、现代黄河三角洲重金属污染现状的了解,而对整个黄河三角洲滨海湿地不同区域重金属分布和潜在生态风险评价的研究不为多见. 本研究在综合分析黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布的基础上,利用 Hakanson 潜在生态风险指数法^[26]对重金属的污染状况进行了生态风险评价,以期为控制重金属污染,制定科学的治理措施提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域位置

黄河三角洲位于山东省北部,渤海湾的南岸和莱州湾西、南岸,大致呈西北-东南向,是由古代、近代和现代 3 个三角洲组成的联合体^[27]. 研究区域西北起自冀、鲁交界的大口河河口,东南至小岛河河口,行政隶属于山东省滨州市和东营市,大致经纬度范围为:117.6°~119.3°E,37.5°~38.3°N. 根据黄河三角洲的演变历史,选择 A 区、B 区和 C 区 3 个典型区作为主要研究区域(图 1). 其中 A 区为鲁北古代黄河三角洲滨海湿地, B 区为废弃河口滨海湿地, C 区为现行河口滨海湿地.

1.2 数据来源与方法

数据主要来源于2008年“黄河三角洲滨海湿地退化调查与研究”和“滨州贝壳堤岛与湿地系统保护区科考调查”,此外还收集了部分2005年“山东省海岸带调查”数据.2005年9月、2008年4月在A区共采集了10个断面,29个站位表层沉积物数

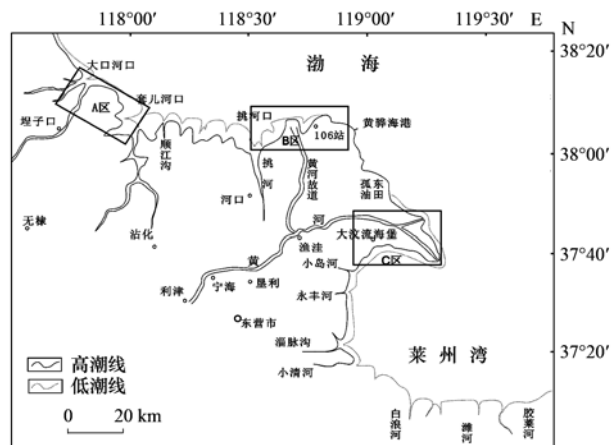


图1 研究区域位置示意

Fig. 1 Locations of study areas

据; 2008 年 7 月在 B 区采集了 5 个断面 14 个站位表层沉积物数据, 在 C 区采集了 5 个断面 12 个站位表层沉积物数据. 断面主要沿高潮滩、中潮滩和低潮滩布设, 沉积物取样厚度为 0 ~ 10 cm. 表层沉积物除进行了重金属测试 (Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg) 外, 还进行了沉积物粒度分析. 沉积物重金属测试主要采用了原子吸收分光光度法、无火焰原子吸收分光光度法和原子荧光光度法. 样品的制备、样品的预处理和分析均按文献 [28, 29] 中提供的标准方法进行. 沉积物粒度主要采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行分析. 分析过程内控样 20%, 仪器分析结果与标准值的误差均在允许范围内.

1.3 重金属污染潜在生态风险评价方法

沉积物重金属潜在生态风险评价采用瑞典科学家 Hakanson 提出的评价方法^[26]. 潜在生态风险指数评价方法包括 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 和 PCB 共 8 种污染物, 涵盖了重金属和典型有机污染物. 该方法考虑了沉积物中污染物的毒性及其在沉积物中的普遍的迁移转化规律, 通过污染物总量分析与区域背景值进行比较, 消除了区域差异及异源污染的影响, 已成为目前沉积物重金属污染质量评价应用广泛的一种方法^[13~20].

沉积物污染参数及潜在生态风险评价计算公式为:

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (1)$$

式中, C_i^t 为某一污染物的污染参数; C_i^s 为表层沉积物中污染物含量实测值; C_n^i 为全球工业化前沉积物中污染物含量, Hakanson 根据大量数据分析, 提出 PCB、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 含量分别取 0.01、0.25、1.0、15、50、70、90 和 175 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$$C_d = \sum C_i^i \quad (2)$$

式中, C_d 为多种污染物的综合污染指数.

$$E_{\tau}^i = T_{\tau}^i \times C_i^i \quad (3)$$

式中, E_{τ}^i 表示沉积物中单个污染物的潜在生态风险参数, T_{τ}^i 为某一污染物的毒性系数. 毒性系数反映了不同污染物的毒性水平和生物对不同污染物的敏感程度, 揭示了单个污染物对人体和水生生态系统的危害. PCB、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 的毒性响应参数分别为 40、40、30、10、5、5、2 和 1.

$$RI = \sum E_i^i \quad (4)$$

式中 RI 为沉积物综合潜在生态风险指数.

2 结果与分析

2.1 重金属区域分布特征及影响因素分析

(1) 重金属区域分布特征与水动力影响分析

黄河三角洲滨海湿地表层沉积物中 6 种重金属元素含量变化范围见表 1. Hg、Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的均值分别为 0.034、18.733、19.393、65.317、0.235 和 62.940 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 从污染物的变化范围可以看出, 除 Hg、Cd 元素含量变化较小之外, 其他污染物的含量变化范围较大, 说明不同污染物的富集程度在区域上有很大的差异. 从异常高值的站位分布

来看, Hg 元素异常高值含量为 0.25×10^{-6} , 出现在套儿河口附近, Zn 和 Cr 元素的高值区主要分布在 A 区的大口河岛和汪子岛高潮滩. 调查表明, 这与陆源排污有着密切联系. 漳卫新河沿岸的渔港、修造船厂及大量生产生活污水主要从大口河排入近海海域, 造成底质沉积物的污染. Hg、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 的元素含量在剔除个别站位的异常高值以外, 区域总体变化趋势为 C 区 > A 区 > B 区. C 区处于强淤进的河口区^[30], 河流径流作用大于海洋动力作用, 海岸不断向海淤长, 当径流携带大量的泥沙进入滨海区后, 由于水流平面扩散及海水顶托作用, 流速减缓, 大量泥沙迅速沉积, 重金属被沉积物吸附后也随之沉积. 水动力条件较强的 B 区处于强蚀退岸段^[30], 主要受风浪作用, 潮差较小、潮流较弱^[31], 沉积物被波浪簸选, 重金属也随悬沙被重新搬运. A 区潮滩宽广, 主要受波浪和潮流共同作用, 岸滩处于冲淤平衡相对稳定状态, 重金属含量总体较 C 区低, 但在大口河附近, 受工农业和生活排污影响, 高潮滩附近有明显重金属富集. 上述分析充分表明水动力条件对滨海湿地潮滩重金属的沿岸分布有重要的影响, 在水动力条件较弱的淤涨岸段, 重金属明显富集, 而在水动力条件较强的区域重金属含量普遍较低.

表 1 黄河三角洲滨海湿地重金属含量统计区域对比表 ($n=55$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Statistics of heavy metal contents in different regions of the Yellow River Delta coastal wetland ($n=55$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

统计参数	区域	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
平均值	A 区	0.036	16.888	18.702	74.011	0.247	63.534
	B 区	0.027	15.526	18.609	46.271	0.256	52.952
	C 区	0.034	21.016	22.665	70.367	0.268	70.040
	全区	0.034	18.733	19.393	65.317	0.235	62.940
标准偏差	A 区	0.051	8.287	6.124	44.164	0.125	31.952
	B 区	0.004	7.024	8.220	14.773	0.124	23.137
	C 区	0.006	2.345	5.737	10.120	0.079	6.836
	全区	0.030	7.428	6.567	31.837	0.112	25.602
最小值	A 区	0.018	1.400	7.490	14.000	0.076	25.030
	B 区	0.018	8.050	6.950	15.070	0.068	12.000
	C 区	0.027	16.200	13.500	48.680	0.063	62.600
	全区	0.018	1.400	6.950	14.000	0.063	12.000
最大值	A 区	0.250	40.260	31.150	205.230	0.490	168.500
	B 区	0.045	34.750	34.220	69.700	0.480	85.710
	C 区	0.043	24.160	30.570	83.240	0.360	90.040
	全区	0.250	40.260	34.220	205.230	0.490	168.500

(2) 重金属区域分布特征与黏土含量相关性分析

表 2 给出了黄河三角洲滨海湿地不同区域典型断面黏土含量, 可以看出 A 区沉积物黏土含量呈现分带性, 由高潮滩向低潮滩黏土含量增加; B 区

黏土含量低于 C 区和 A 区, 潮滩分带不明显; C 区黏土含量最高, 黏土含量由高潮滩向低潮滩逐渐减少. 重金属含量和黏土含量相关分析显示 (表 3), Zn、Cu 和 Pb 的富集情况与黏土含量的相关性较好, 且这 3 类重金属间也呈现两两相关, 主要由于它们

同属亲 Cu 元素,来源、运输、影响富集因素等方面有相似的地球化学行为. Cr 与黏土含量表现为弱相关, Cd 和 Hg 与黏土含量相关性较差,其中 Hg 与黏土含量及其他重金属之间的相关性最差. 对不同区域环境下的重金属含量数据进行了归一化处理,变化曲线图(图 2)显示, A 区中、低潮滩重金属含量明显高于高潮滩; B 区潮滩分带性不明显,重金属含

量变化规律性亦不明显,但从 D12 断面和 D13 断面重金属含量变化可以看出,重金属含量变化与黏土含量变化非常吻合; C 区由于沉积作用时间短,潮滩发育不典型,沉积特征较为复杂, Hg、Cu 和 Zn 的区域变化较 Pb、Cd、Cr 的变化不明显. 上述分析表明,沉积物黏土含量对重金属的富集和分布起到一定控制作用,这与前人研究结果相吻合^[19,23,32-36].

表 2 黄河三角洲滨海湿地不同区域典型断面黏土含量/%

位置	A 区					B 区				C 区		
	D2	D4	D6	D7	D8	D12	D13	D14	D16	D26	D27	D28
高潮滩	12.3	4.6	6.2	2.44	2.67	4.2	6.0	12.3	2.5	35.0	35.6	34.0
中潮滩	16.9	26.1	15.9	10.95	8.43	9.1	3.5	24.5	3.0	26.3	26.0	42.4
低潮滩	26.7	38.4	17.5	13.61	19.28	19.0	2.6	16.8	3.4	12.8	24.0	36.9

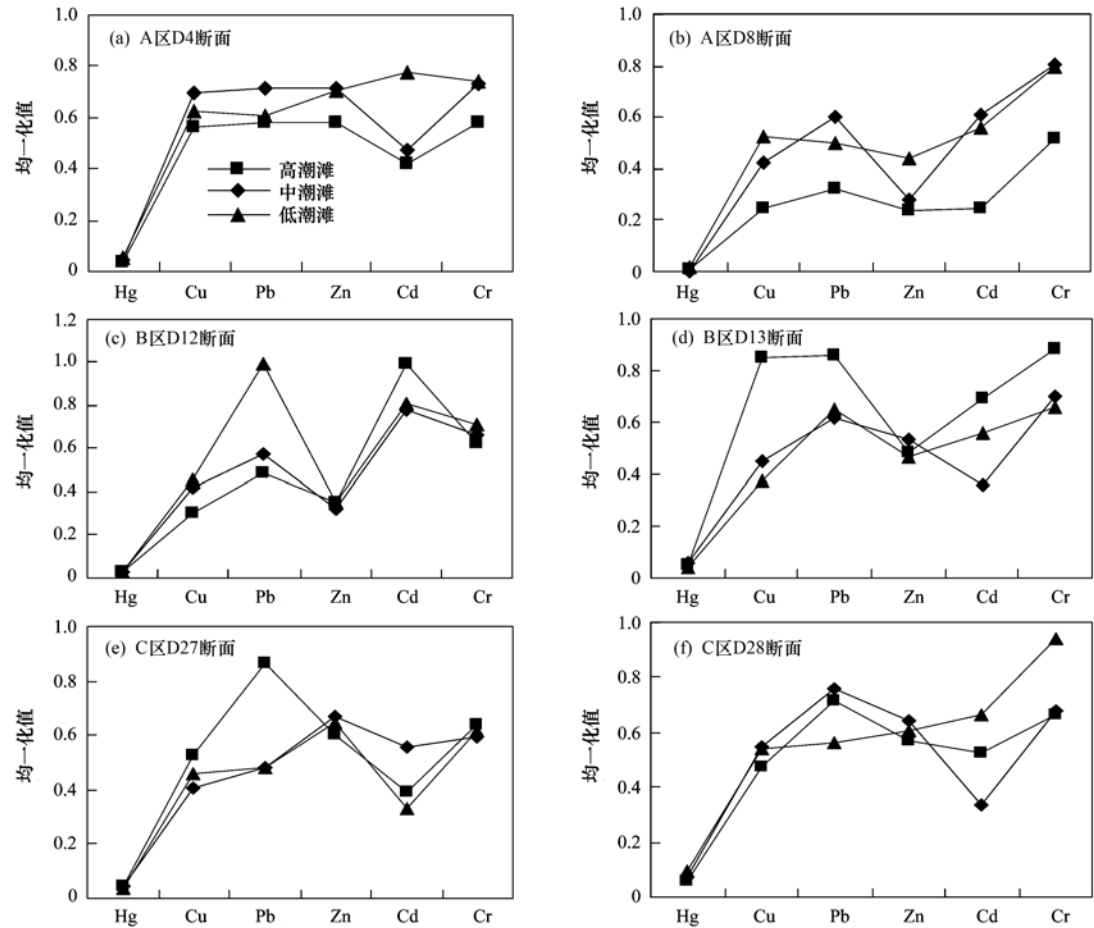


图 2 黄河三角洲滨海湿地重金属含量变化

Fig. 2 Variety diagram of heavy metal contents in the Yellow River Delta coastal wetland

2.2 潜在生态风险评价

根据公式(1)~(4),计算得到黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属污染指数及潜在生态风险指数(表 4 和表 5). 需要指出的是,由于未调查 PCB 有机污染物,所调查的污染因子少于 Hakanson 风险

评价因子的总数,故根据马德毅等^[14]研究成果和各污染因子所占权重值对综合污染指数和综合污染潜在生态风险指数进行了调整. 单污染物污染参数和单污染物潜在风险参数仍采用 Hakanson 给出的污染程度标准^[26]. 单污染物的污染程度: $C_i^t < 1$ 为低污

表 3 黄河三角洲滨海湿地重金属和黏土含量相关分析¹⁾ (n = 42)

Table 3 Correlation analysis between heavy metals and clay contents in the Yellow River Delta coastal wetland (n = 42)

	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	黏土
Hg	1						
Cu	0.021	1					
Pb	-0.101	0.793 **	1				
Zn	0.081	0.764 **	0.553 **	1			
Cd	-0.030	0.609 **	0.575 **	0.422 **	1		
Cr	-0.005	0.873 **	0.773 **	0.643 **	0.760 **	1	
黏土	-0.053	0.449 **	0.410 **	0.506 **	0.139	0.367	1

1) * * 表示两者在 0.01 置信水平上相关

染; $1 \leq C_i^i < 3$ 为中污染; $3 \leq C_i^i < 6$ 为较高污染; $C_i^i \geq 6$ 为很高污染. 调整后的综合污染程度: $C_d < 6$ 为低污染; $6 \leq C_d < 12$ 为中污染; $12 \leq C_d < 24$ 为较高污染; $C_d \geq 24$ 为很高污染. 单污染物潜在风险程度: $E_r^i < 40$ 为低生态风险, $40 \leq E_r^i < 80$ 中生态风险, $80 \leq E_r^i < 160$ 较高风险, $160 \leq E_r^i < 320$ 高风险, $E_r^i \geq 320$ 很高风险. 调整后的综合潜在风险程度: $RI < 94$ 低潜在风险, $94 \leq RI < 188$ 中潜在风险, $188 \leq RI < 376$ 较高潜在风险, $RI \geq 376$ 很高潜在风险.

分析结果表明,黄河三角洲不同区域重金属质量分数总体较 Hakanson 提出的全球工业化前沉积物中相应污染物的背景值低. 从单个污染物污染参数来看, 仅个别站位 Hg (1.00)、Zn (1.17)、Cd (1.00)、Cr(1.87) 和 Cr(2.48) 为中度污染, 主要集

中在 A 区的大口河岛和汪子岛附近以及 B 区植被覆盖高潮滩,其他污染因子均处于低污染状态,这与重金属的分布规律表现一致. 6 种污染物的污染程度由高到低的顺序为 $Cr > Cu > Zn > Cd > Pb > Hg$. Cr 是黄河三角洲滨海湿地主要重金属污染因子,变化范围为 0.02 ~ 2.48,均值为 0.63. 全区综合污染指数变化范围 0.10 ~ 4.14,均值为 1.93,根据评价指标,处于低污染水平. 从区域差异来看,C 区综合污染指数最高,均值为 2.08, A 区综合污染指数却最低,均值为 1.81. 从各区综合污染指数变化范围来看,A 区变化最大,C 区变化最小. 根据滨州无棣环境监测站对鲁北企业集团直排口、马颊河、德惠新河、漳卫新河等入海点源污染物入海情况进行的调查统计,其排海废水量为 $2.207 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,造成了沿岸及周围环境的污染^[37].

表 4 黄河三角洲滨海湿地沉积物重金属污染指数

Table 4 Index of heavy metal pollution in the sediments of the Yellow River Delta coastal wetland

研究区域	项目	单个污染物的污染参数						综合污染指数
		Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	
A 区	均值	0.14	0.27	0.19	0.35	0.37	0.57	1.81
	范围	0.07 ~ 1.00	0.00 ~ 0.81	0.01 ~ 0.45	0.03 ~ 1.17	0.01 ~ 1.00	0.02 ~ 1.87	0.10 ~ 3.43
B 区	均值	0.12	0.39	0.28	0.30	0.20	0.69	2.00
	范围	0.07 ~ 0.21	0.16 ~ 0.70	0.10 ~ 0.49	0.09 ~ 0.44	0.07 ~ 0.48	0.13 ~ 2.48	1.13 ~ 4.14
C 区	均值	0.03	0.09	0.09	0.06	0.10	0.15	2.08
	范围	0.10 ~ 0.20	0.31 ~ 0.74	0.14 ~ 0.44	0.25 ~ 0.48	0.06 ~ 0.36	0.34 ~ 1.00	1.43 ~ 2.72
全区	均值	0.13	0.35	0.24	0.34	0.28	0.63	1.93
	范围	0.07 ~ 1.00	0.00 ~ 0.81	0.01 ~ 0.49	0.03 ~ 1.17	0.01 ~ 1.00	0.02 ~ 2.48	0.10 ~ 4.14

表 5 给出黄河三角洲滨海湿地不同区域的 6 种主要污染物的单因子潜在生态风险参数和综合潜在生态风险指数. 从综合潜在生态风险指数来看,变化范围为 0.46 ~ 51.88,均值为 16.85,整个区域具有较低的潜在生态风险. 不同区域由高到低的顺序为 A 区 > C 区 > B 区. 6 种污染物潜在生态风险参数由大到小顺序为 $Cd > Hg > Cu > Cr > Pb > Zn$. Cd 的潜在风险参数最高为 30.00,均值 8.26,是黄河三角洲的主要潜在生态风险因子,其次为 Hg,均值为

5.40,套儿河附近最高值为 40.00. 一般而言,重金属的主要来源大致有 3 个,即天然风化产物、市区的工业和生活排污及河流径流输入^[38]. 研究表明,A 区和 B 区污染物质主要受工业、养殖和生活排污影响^[23,37],而 C 区污染物质主要为河流径流输入为主.

此外,从表 4 和表 5 也可以明显看出,黄河三角洲滨海湿地表层沉积物中 Cd、Hg、Cu、Cr、Pb、Zn 的污染程度与其潜在的生态危害程度的顺序均不一

表 5 黄河三角洲滨海湿地沉积物重金属潜在风险评价结果

Table 5 Assessment results of heavy metal potential ecological risk in sediments of the Yellow River Delta coastal wetland

研究区域	项目	单污染物潜在风险参数						综合潜在风险指数
		Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	
A 区	均值	5.74	1.33	0.96	0.35	11.14	1.14	17.46
	范围	2.88~40.00	0.00~4.03	0.05~2.23	0.03~1.17	0.30~30	0.04~3.74	0.46~51.88
B 区	均值	4.98	1.95	1.42	0.30	5.97	1.39	16.00
	范围	2.88~8.30	0.81~3.48	0.50~2.44	0.09~0.44	2.04~14.40	0.27~4.96	9.18~23.78
C 区	均值	5.59	2.28	1.40	0.37	5.75	1.30	16.69
	范围	4.03~7.89	1.57~3.72	0.71~2.18	0.25~0.48	1.89~10.80	0.68~2.00	10.76~23.58
全区	均值	5.40	1.75	1.20	0.34	8.26	1.25	16.85
	范围	2.88~40.00	0.00~4.03	0.05~2.44	0.03~1.17	0.30~30.00	0.04~4.96	0.46~51.88

致,这是因为有些污染元素(如 Pb 和 Hg)虽然污染程度较高,但其具有亲颗粒性,容易被细颗粒悬浮物迁移,进入沉积物中矿化埋藏使它们毒性降低,从而其潜在生态风险程度也降低.因此,只有把各污染物在沉积环境中的累积程度与其对湿地生态系统的潜在生态风险程度相结合,才能全面反映沉积环境的质量状况^[20].

上述分析表明,黄河三角洲滨海湿地重金属综合污染程度与综合潜在生态风险程度均较低,从整个区域来看未达到环境污染程度,但局部区域单污染物浓度较高.本研究统计分析结果(表 1)与 2001 年李任伟等^[23]研究结果比较表明,黄河三角洲滨海湿地表层沉积物中 Hg、Cu 和 Pb 的污染程度变化不大,而 Zn、Cr 和 Cd 的污染程度却有所增加.因此,加强黄河三角洲滨海湿地生态环境保护不容忽视.

3 结论

(1)黄河三角洲滨海湿地重金属分布上表现出明显的区域差异,现行河口区重金属含量最高,鲁北古代黄河三角洲区重金属含量次之,废弃河口区为最低.

(2)区域水动力条件和沉积物物质组成对湿地重金属的分布有重要的影响.在水动力条件较弱的淤涨岸段,重金属明显富集,而在水动力条件较强的区域重金属含量普遍较低.沉积物黏土含量对重金属的富集和分布起到一定控制作用.

(3)黄河三角洲滨海湿地表层沉积物总体质量状况良好,综合污染程度处于低污染状态,潜在生态风险程度较低.综合潜在风险指数均值鲁北古代黄河三角洲区最高,现行河口区次之,废弃河口区最低.Cr 和 Cd 分别是区域主要重金属污染因子和潜在生态风险因子.

致谢:感谢中国海洋大学范德江教授的指导和帮助.

参考文献:

[1] 叶思源,丁喜桂,袁红明,等.我国滨海湿地保护的地质问题与研究任务[J].海洋地质前沿,2011,27(2):1-7.

[2] 何文珊.中国滨海湿地[M].北京:中国林业出版社,2008.32-33.

[3] 王永红,张经,沈焕庭.潮滩沉积物重金属累积特征研究进展[J].地球科学进展,2002,17(1):69-77.

[4] 刘峰,王海亭,王德利.莱州湾滨海湿地沉积物重金属的空间分布[J].海洋科学进展,2004,22(4):486-492.

[5] Pardue J H, DeLaune R D, Smith C J, et al. Heavy metal concentrations along the Louisiana coastal zone [J]. Environment International, 1988, 14(5): 403-406.

[6] Attrill M J, Thomesm R M. Heavy metal concentrations in sediment from the Thames estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(11): 742-744.

[7] Li Q S, Wu Z F, Chu B, et al. Heavy metals in coastal wetland sediments of the Pearl River estuary, China [J]. Environmental Pollution, 2007, 149(2): 158-164.

[8] Bai J H, Huang L B, Yan D H, et al. Contamination characteristics of heavy metals in wetland soils along a tidal ditch of the Yellow River Estuary, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(5): 671-676.

[9] Callaway J C, Delaune R D, Patrick W H Jr. Heavy metal chronologies in selected coastal wetlands from northern Europe [J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 36(1): 82-96.

[10] Weis D A, Callaway J C, Gersberg R M. Vertical accretion rates and heavy metal chronologies in wetland sediments of the Tijuana estuary [J]. Estuaries and Coasts, 2001, 24(6A): 840-850.

[11] 陈振楼,许世远,柳林,等.上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积[J].地理学报,2000,55(6):641-650.

[12] 全为民,李春鞠,沈盎绿,等.崇明东滩湿地营养盐与重金属的分布与累积[J].生态学报,2006,26(10):3324-3331.

[13] Nobi E P, Dilipan E, Thangaradjou T, et al. Geochemical and geo-statistical assessment of heavy metal concentration in the sediments of different coastal ecosystems of Andaman Islands, India [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(2): 253-264.

- [14] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价 [J]. 中国环境科学, 2003, **23**(5): 521-525.
- [15] 王爱军, 叶翔, 李团结, 等. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价 [J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1306-1314.
- [16] 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.
- [17] 于文金, 邹欣庆. 江苏新洋港潮滩湿地重金属元素 Pb、Cu、Zn、Cr 分布特征及污染评价 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(12): 2088-2094.
- [18] 周秀艳, 李宇斌, 王恩德, 等. 辽东湾湿地重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 环境科学与技术, 2004, **27**(5): 60-62.
- [19] 王伟力, 耿安朝, 刘花台, 等. 九龙江口表层沉积物重金属分布及潜在生态风险评价 [J]. 海洋科学进展, 2009, **27**(4): 502-508.
- [20] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口海域表层沉积物污染及其潜在生态风险评价 [J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 389-393.
- [21] 张晓龙, 李培英, 刘月良, 等. 黄河三角洲湿地研究进展 [J]. 海洋科学, 2007, **31**(7): 81-85.
- [22] 崔保山, 刘兴土. 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策 [J]. 地理科学, 2001, **21**(3): 250-256.
- [23] 李任伟, 李禾, 李原, 等. 黄河三角洲沉积物重金属、氮和磷污染研究 [J]. 沉积学报, 2001, **19**(4): 622-629.
- [24] 王天巍, 蔡崇法, 李朝霞, 等. 道路边际土壤重金属分布格局的神经网络模拟-以现代黄河三角洲为例 [J]. 生态学报, 2009, **29**(6): 3154-3162.
- [25] 凌敏, 刘汝海, 王艳, 等. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤重金属空间分布特征及生态学意义 [J]. 海洋湖沼通报, 2010, (4): 41-46.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 成国栋, 薛春江. 黄河三角洲沉积地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1997. 108-109.
- [28] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋化学调查技术规程 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006. 74-102.
- [29] GB 17378. 5-1998, 海洋监测规范第 5 部分: 沉积物分析 [S].
- [30] 尹延鸿. 现代黄河三角洲海岸的冲淤及造陆速率 [J]. 海洋地质动态, 2003, **19**(7): 13-18.
- [31] 李为华, 李九发, 戴志军, 等. 黄河三角洲飞雁滩表层沉积物对水动力的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, **26**(1): 17-21.
- [32] 梁涛, 陈岩, 张朝生, 等. 利用网格采样法比较潮间带沉积物不同粒度区域重金属含量特征 [J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 421-427.
- [33] 鲍永恩, 符文侠. 辽东湾北部沉积物对重金属集散的控制作用 [J]. 海洋学报, 1994, **16**(3): 139-142.
- [34] 方圣琼, 胡雪峰, 徐巍, 等. 长江口潮滩沉积物的性状对重金属累积的影响 [J]. 环境化学, 2005, **24**(5): 586-589.
- [35] 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.
- [36] 黄家祥, 殷勇, 徐军, 等. 苏北灌河口潮间带表层沉积物重金属空间分布特征及其环境效应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, **27**(5): 23-32.
- [37] 中国海洋大学, 滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区管理局. 滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区科学考察报告 (内部) [R]. 2008. 12-13.
- [38] 和转, 胡毅, 陈坚. 九龙江河口区表层沉积物重金属元素分布特征及其沉积环境 [J]. 台湾海峡, 2009, **28**(4): 455-459.

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ ¹⁵ N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River	 CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period	 GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area	 WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta	 LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment	 WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow	WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《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4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 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