

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价

叶华香, 臧淑英*, 张丽娟, 张玉红

(哈尔滨师范大学地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘要: 采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定了扎龙湿地表层沉积物重金属的含量, 分析了其空间分布特征, 评价了其潜在生态风险, 并在此基础上探讨了重金属污染来源及环境影响因子。结果表明: ①扎龙湿地沉积物 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 的平均值分别 0.065、0.155、10.26、18.20、21.35、52.08 和 46.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均超过松嫩平原土壤背景值, 含量分布存在明显的差异性。从空间分布上看, 重金属含量北部高于南部, 东部高于西部, 核心区含量低, 其中东部重金属含量最高, 尤其是 Hg 和 Cd 分别为整个区域最小值的 20.8、32.4 倍, 存在明显的累积性。②潜在生态风险评价结果显示: 单个重金属潜在生态风险顺序为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn}$; 整个研究区综合潜在生态风险指数 (RI) 介于 76.9~473.5, 平均值 171.9, 属于中等生态危害, 并以东部潜在危害程度最大, 将作为今后重金属污染防治的重点区域。③除 Hg 和 Pb 之外, 各重金属含量间呈极显著正相关, 表明这些元素污染具有同源性。④有机质是扎龙湿地表层沉积物中重金属的主要环境影响因子, 但目前扎龙湿地盐碱化加剧, 沉积物中重金属释放风险加大, 应该引起当地政府及有关部门的高度重视。

关键词: 表层沉积物; 重金属; 空间分布; 潜在生态风险; 环境影响因子; 扎龙湿地

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1333-07

Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland

YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, ZHANG Yu-hong

(Key Laboratory of Geographical Resources and Environmental Remote Sensing, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: This study investigated the concentrations of heavy metals in the sediments of the Zhalong Wetland using ICP-MS, analyzed their spatial distributions, evaluated the potential ecological risk, and explored the pollution sources and environmental influencing factors. The results can be summarized as the followings: ①The concentrations of Hg, Cd, As, Cu, Pb, Zn and Cr were 0.065, 0.155, 10.26, 18.20, 21.35, 52.08 and 46.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, which were all above the soil background values of the Songnen Plain. Their spatial distributions were distinctly different. The concentration of heavy metals in the north was higher than that in the south, and the east was higher than the west. Particularly in the eastern region, the concentrations of Hg and Cd were 20.8 and 32.4 times the minimum values of the whole area. And in the core zone, the concentration was relatively low. ②The sequence of the potential ecological risk posed by the metals was $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn}$. The average potential ecological risk index (RI) of the Zhalong Wetland was 171.9 (ranged from 76.9-473.5), suggesting a moderate ecological risk. However, the potential ecological risk was extremely high in the east which should be treated as the major heavy metal pollution prevention site in the future. ③Except for Hg and Pb, the concentrations of all heavy metals were significantly correlated to each other, indicating that those heavy metals had homology. ④Organic matter was the major environmental influencing factor. However, the trend of land salinization in the Zhalong Wetland has been intensified, indicating a higher risk of heavy metal releasing from the sediments, to which the local authorities should pay enough attention.

Key words: surface sediments; heavy metal; spatial distribution; potential ecological risk; environmental influencing factors; Zhalong Wetland

因其难降解性和易累积性, 重金属是目前环境中重要的污染物^[1,2]。沉积物是湖沼生态系统的重要组成部分, 是底栖生物的主要活动场所和食物来源, 沉积物中的重金属不但可以被底栖生物直接吸收, 通过食物链进行传递, 而且还可以通过有机质的络合、氧化还原反应和 pH 的变化等过程重新进入上覆水, 对整个生态系统及人类健康带来威胁。大量研究表明, 沉积物既是重金属污染物的汇, 又是对

水质有潜在影响的次生污染源^[3~5]。重金属污染物一旦进入湖沼水体就会对湖沼生态造成潜在的长期影响, 已成为全球性的环境问题^[6,7]。受重金属污染

收稿日期: 2012-07-01; 修订日期: 2012-08-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030743); 黑龙江省高等学校科技创新团队建设计划项目(2010td10)

作者简介: 叶华香(1977~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为自然地理与生态环境, E-mail: yehuaxiang2008@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zsy6311@163.com

的水体,沉积物中重金属含量比水体中含量高数百倍乃至数十万倍,同时含量也呈现出较明显的分布规律;分析沉积物中的重金属比单纯的水质分析更具代表性,其测试方法也简单、可靠,因而水体沉积物重金属变化具有重要的环境指示意义^[8-10]。研究水体沉积物中重金属含量、空间分布特征和潜在生态风险不仅为水体中重金属污染的来源、现状和监测提供科学依据,而且对生物多样性和人类生存环境的保护具有深远的科学意义。

扎龙湿地是一个具有生态价值、经济效益、旅游和科研意义等功能的重要自然保护区。但随着工农业污水排放、水利工程的修建、水陆交错带垦殖以及过渡的土地开发利用等,目前扎龙湿地出现面积迅速萎缩、植被严重退化,湿地生态系统生产力急剧下降及水体严重污染等问题。2000年后,扎龙湿地的环境问题受到高度的重视,其中环境中的低含量、难降解重金属危害问题更成为研究的热点。

本研究以扎龙湿地沉积物为对象,根据重金属元素的环境地球化学行为特点,对沉积物中 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 元素含量进行测定,基于 GIS 地统计分析模块,分析重金属的空间分布特征,采用潜在生态危害指数法对扎龙湿地沉积物的重金属潜在生态危害进行评价,并在此基础上,探讨重金属的污染来源及环境影响因子,以期对扎龙湿地重金属污染防治和生态环境保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

扎龙湿地位于黑龙江省西部松嫩平原左岸乌裕尔河和双阳河下游湖沼苇草地带,地理坐标 $46^{\circ}52' \sim 47^{\circ}32'N, 123^{\circ}47' \sim 124^{\circ}37'E$,南北长 65 km,东西宽 37 km。地跨齐齐哈尔市的富裕县、泰来县、昂昂溪区、铁峰区和大庆市的林甸县,杜尔伯特蒙古族自治县等 6 个县区,总面积 2 100 km²,是我国北方同纬度地区保留最完整、最原始、最开阔的湿地生态系统。扎龙湿地是珍稀鸟类丹顶鹤的全球迁徙和繁殖的重要基地,1992 年,拉姆萨尔公约(Ramsar Convention)将扎龙列为国际重要湿地,是亚洲十大湿地之一,在世界珍稀水禽保护和繁育中占有极其重要地位^[11]。

1.2 样品采集与处理

本研究在每个功能区(实验区、缓冲区、生态旅游规划区和核心区)中划分若干个监测单元,结合地统计分析要求在监测单元中布设采样点,所布

设的点能代表监测区的环境质量。2010 年 7~8 月,用自制的蚌式抓斗采样器,采集 0~20 cm 表层沉积物,用塑料勺挖取芯部样品放入干净的聚乙烯塑料袋,共采集 271 个样品,同时进行 GPS 定位(图 1)。样品运回实验室冷冻干燥,剔除砾石、杂草等物,部分样品直接装入自封袋用于粒度分析,部分样品研磨过 20 目、60 目和 100 目筛,装入自封袋用于 pH 值、有机质和重金属的测定。

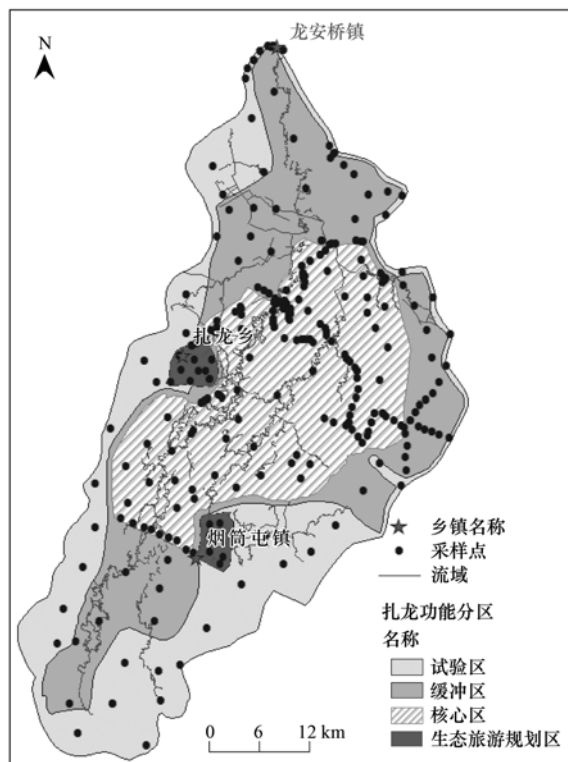


图 1 扎龙湿地采样点示意

Fig. 1 Sampling site of Zhalong Wetland

1.3 样品测试方法

沉积物重金属采用 CEM MARS 微波消解装置,用混酸($HNO_3-HCl-HF-H_2O_2$)进行消解^[12,13];利用美国 Agilent 7500cx 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。为保证分析的准确性,同步测定了平行样、空白样及沉积物标准物质(ESS-1),各元素含量的相对标准偏差 < 5%,各元素回收率在 92.2%~108.1%之间,符合美国 EPA 标准要求的 80%~120%的范围。

沉积物 pH 值按照沉积物与去离子水比 1:5 混匀,静置 30 min,用玻璃电极 pH 计测定;沉积物有机质采用重铬酸钾法测定;沉积物粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定。

1.4 数据分析与统计

数据经检查、剔除特异值等预处理后,采用

SPSS 17.0 软件对数据进行描述性统计分析, Shapiro-Wilk 检验法对重金属含量正态分布检验. 选取基于 ArcGIS 9.3 中 ARCMAP 为平台的地统计方法分析重金属空间分布特征.

1.5 评价方法

本研究采用了瑞典科学家 Hakanson^[14] 提出的潜在生态危害指数法对沉积物中重金属进行评价. 该方法从重金属生物毒性角度出发, 综合考虑土壤中重金属含量、种类以及水体对重金属污染的敏感度等, 定量划分和评价单个和多种重金属污染物的潜在生态危害程度, 比单纯采用重金属元素污染程度能更好地反映重金属元素的潜在危害. 其计算公式如下:

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

表 1 松嫩平原土壤背景值 c_n^i 和毒性系数 T_r^i

Table 1 Background value c_n^i in the soil on Songnen Plain and toxic-response factor T_r^i for different metals

项目	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn
$c_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.031	0.073	9.14	17.78	20.23	42.46	52.05
T_r^i	40	30	10	5	5	2	1

表 2 综合及单项潜在生态风险评价指数与分级标准

Table 2 General and individual indices and grade for ecological risk assessment

E_r^i	单项潜在生态 风险等级	RI	综合潜在生态 风险等级
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强	—	—

2 结果与分析

2.1 表层沉积物的环境参数性质

表 3 为扎龙湿地沉积物环境参数值. 从中得出, 沉积物 pH 值范围为 4.86 ~ 10.49, 平均值为 8.65, 属于强碱性土范畴^[19]; 有机质的含量在 0.092 1% ~ 16.19% 范围内, 平均值为 3.74%, 变异系数大, 为 91.96%, 表明有机质存在明显的空间差异; 沉积物黏土(<4 μm)、细粉砂(4 ~ 16 μm)、粗粉砂(16 ~ 64 μm)和砂粒(>64 μm)所占的百分比的平均值分别为 17.87%、17.41%、22.13% 和 42.58%, 中值粒径在 5.17 ~ 242.68 μm, 平均值为 64.3 μm, 总体而言属于砂粒.

2.2 表层沉积物重金属含量

扎龙湿地区表层沉积物重金属丰度值大小与全球

$$E_r^i = T_r^i c_f^i \tag{2}$$

$$c_f^i = c^i/c_n^i \tag{3}$$

式中, RI 为综合潜在生态风险指数; E_r^i 为单项潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数; c_f^i 为重金属的富集系数; c^i 为沉积物重金属 i 浓度实测值; c_n^i 为计算所需的参照值.

沉积物背景值的地区性很强, 不同的背景值计算出来的结果差异性很大. 迄今为止, 国内及国际上还没有一个关于河流、湖泊沉积物的环境质量标准, 目前多采用区域土壤环境背景值. 本研究采用黑龙江省松嫩平原土壤背景值^[15] 作为计算的参照值(表 1); 毒性响应系数表征重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度, 相关重金属的毒性系数见表 1; E_r^i 、RI 及潜在生态风险等级^[16~18] 见表 2.

表 3 扎龙湿地区表层沉积环境参数性质 ($n = 271$)

Table 3 Physicochemical properties in surface sediments of Zhalong Wetland ($n = 271$)

项目指标	最小值	最大值	平均值	变异系数/%
pH 值	4.86	10.49	8.65	20.26
有机质/%	0.0921	16.19	3.74	91.96
砂粒/%	1.49	93.51	42.58	47.1
粗粉粒/%	1.93	52.34	22.13	33.6
细粉粒/%	2.04	44.38	17.41	44.8
黏土/%	2.20	44.26	17.87	44.5
中值粒径/ μm	5.17	242.68	64.3	84.3

页岩重金属元素丰度值大小 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 对比完全一致^[20]. 湿地区表层沉积物中重金属 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量范围分别为 0.010 ~ 0.208、0.022 ~ 0.713、2.99 ~ 22.04、9.99 ~ 48.60、16.43 ~ 29.07、30.10 ~ 76.32 和 24.10 ~ 68.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 0.065、0.155、10.26、18.20、21.35、52.08 和 46.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值均超过松嫩平原土壤背景值, 尤其是 Hg 和 Cd 平均含量均为背景含量的 2.1 倍(表 4). 与其它研究区相比, 扎龙湿地区表层沉积物中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量相对较低, 而 Hg、Cd 和 As 的含量介于这几个研究区含量之间; 从整体上看, 扎龙湿地沉积重金属含量与白洋淀及黄河三角洲滨

海湿地重金属含量较接近(表5).

扎龙湿地表层沉积物中 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 的变异系数分别为 47.2%、58.6%、

36.1%、16.5%、19.7%、13.5% 和 20.7%(表4), 变异系数均大于 10%,尤其是 Hg、Cd 和 As,其的变异系数均大于 30%,属于中等变异强度.

表 4 扎龙湿地表层沉积物重金属统计特征值($n=271$)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Zn	Cr
最小值	0.010	0.022	2.99	9.99	16.43	30.10	24.1
最大值	0.208	0.713	22.04	48.60	29.07	76.32	68.46
平均值	0.065	0.155	10.26	18.20	21.35	52.08	46.47
松嫩平原土壤背景值	0.031	0.073	9.14	17.78	20.23	52.05	42.46
变异系数/%	47.2	58.6	36.1	16.5	19.7	13.5	20.7

表 5 其它研究区表层沉积物重金属(Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn 和 Cr)含量平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

研究区	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Zn	Cr	文献
白洋淀湿地	0.044	0.260	11.09	23.70	23.80	69.20	68.60	[21]
黄河三角洲滨海湿地	0.034	0.235	—	18.733	19.393	65.317	62.940	[22]
扬子江	0.155	0.423	24.70	45.70	37.00	135.60	76.40	[23]
太湖	—	—	—	21.45	32.88	74.52	—	[24]
巢湖	0.085	0.175	4.10	30.30	26.50	76.90	64.70	[20]
滦河	0.179	0.147	5.148	45.98	22.11	75.52	71.47	[25]

2.3 表层沉积物重金空间分布

扎龙湿地沉积物重金属空间分布存在明显的差异性(图2). 从图2得出,Cd、As、Cu、Zn 和 Cr 的空间分布规律基本相同,主要分布于实验区和缓冲区的北部、西北、东部、东南以及西部的旅游生态区; Hg 主要分布于研究区的北部、东部以及西南;

Pb 主要分布于东北、东南及西部旅游生态区.

从研究区来看,在实验区和缓冲区的东部,重金属(除 Pb 外)含量达到全区域的最大值,尤其是 Cd 和 Hg 含量分别为整个区域最小值的 32.4 和 20.8 倍,表现出显著的累积效应,由此表明受人类活动影响剧烈. 其原因主要是林甸县造纸、机械、

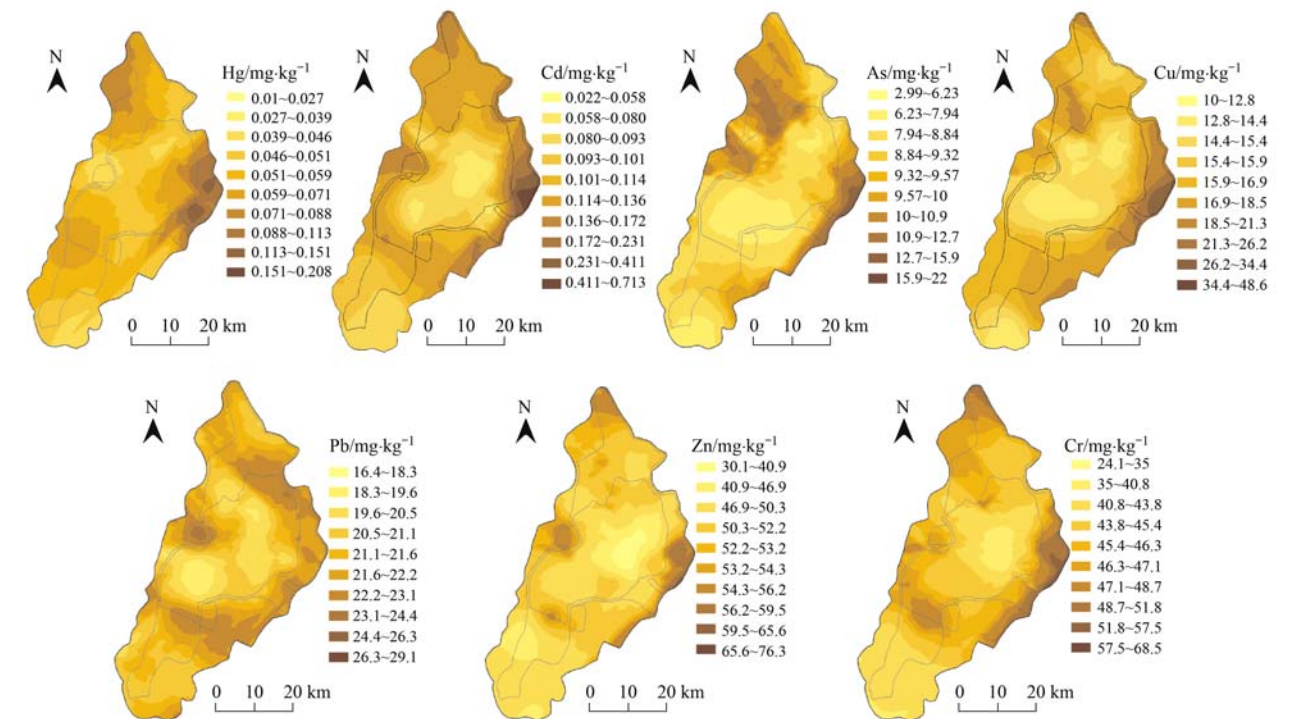


图 2 扎龙湿地表层沉积物重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in sediments of the Zhalong Wetland

化工等工业企业废水及生活污水直接或间接排入,以及此处大部分为耕地和盐碱地有关. 研究区的北部,Hg、Cd、As、Cu、Zn 和 Cr 含量也高,并且基本上西北高于西南. 其主要原因:一是乌裕尔河上游的城镇排放的工业废水、生活污水及乌裕尔河沿岸农业用水进入,此处水动力条件减弱,水流流速变慢,大量重金属沉降并富集到沉积物中;二是地形的影响,整个扎龙湿地的地形为东北向西南倾斜,导致西北地势高于西南;三是土地利用类型的影响,研究区的西北主要为耕地,化肥和农药的使用,带入了重金属,尤其是 Hg、As 和 Cu,而西南主要为芦苇沼泽,对重金属有吸收的作用. Pb 的空间分布主要受交通尾气的影响. 因研究区东有 301 国道,南有齐杜公路和滨州铁路,而西部为扎龙乡的旅游生态区.

2.4 生态风险评价

在目前的研究中,Hakanson 生态风险指数被广泛运用于评价沉积物重金属潜在生态危害. 采用此评价方法得出,扎龙湿地表层沉积物中 As、Pb、Cu、Zn 和 Cr 元素平均单项潜在生态危害系数(E_r^i)分别为 11.2、5.3、5.1、1.0 和 2.2,均小于 40,属于轻微生态危害;Hg 元素 E_r^i 值介于 12.9~268.4 之间,平

均值为 83.3,属于中等-很强生态危害;Cd 元素的 E_r^i 值介于 9.0~293.0 之间,平均值为 63.8,属于中等生态危害(表 6). 扎龙湿地表层沉积物中重金属的潜在生态风险程度大小顺序为: $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$. 从综合潜在生态风险分析,整个研究区的 RI 介于 76.9~473.5,平均值 171.9,属于中等生态危害.

由于 Hg 和 Cd 是最主要的生态风险贡献因子,重金属单项潜在生态风险指数以 Hg 和 Cd 为重点进行分析. 综合潜在生态风险区域与 Hg 和 Cd 单项潜在生态风险区域具有极其明显的空间分布特征(图 3). RI 的空间分布与 Hg 单项潜在生态风险指数 $Er-Hg$ ($r=0.815, P<0.01$) 和 Cd 单项潜在生态风险指数 $Er-Cd$ ($r=0.864, P<0.01$) 分布基本一致. $Er-Hg$ 、 $Er-Cd$ 及 RI 潜在生态风险区域主要存在于湿地的实验区和缓冲区,尤其是实验区和缓冲区的东部,属于高生态风险,将作为今后扎龙湿地重金属污染防治的重点区域. 生态旅游规划区和核心区的小部分区域也存在生态风险,应该引起当地政府及有关部门的高度重视. 从总体上说,沉积物重金属生态危害程度为实验区>缓冲区>旅游生态区>核心区.

表 6 扎龙湿地表层沉积物单项潜在生态风险指数、综合潜在生态风险指数

项目	E_r^i							RI
	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn	
最小值	12.9	9.0	3.3	2.8	4.1	1.1	0.6	76.9
最大值	268.4	293.0	24.1	13.7	7.2	3.2	1.5	473.5
平均值	83.3	63.8	11.2	5.1	5.3	2.2	1.0	171.9

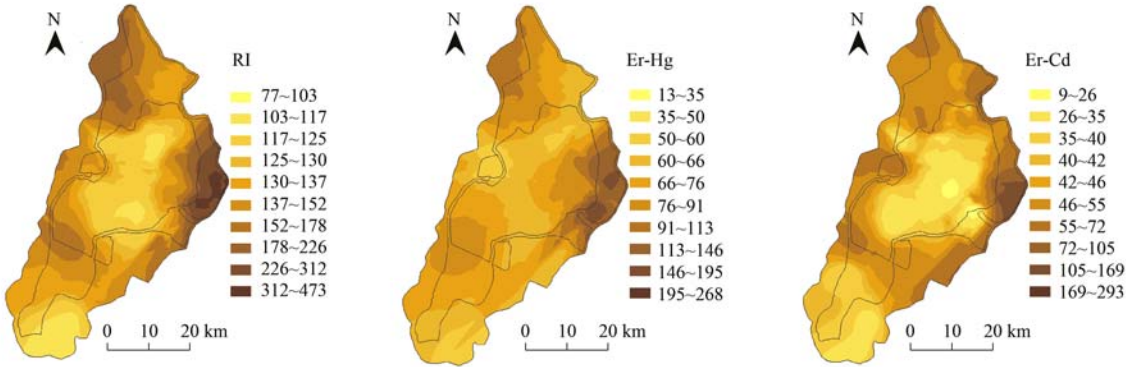


图 3 扎龙湿地表层沉积物中 Hg 和 Cd 的潜在生态风险指数 ($Er-Hg$ 、 $Er-Cd$) 及重金属综合潜在生态风险指数 (RI) 的水平分布

Fig. 3 Horizontal distribution of Hg and Cd single potential ecological risk indices ($Er-Hg$, $Er-Cd$) and heavy metal general potential ecological risk indices (RI) in surface sediments of the Zhonglong Wetland

2.5 相关性分析

2.5.1 沉积物重金属与环境因子相关性分析

通过对重金属元素与沉积物特征参数之间的

相关分析,可以确定重金属在沉积物中含量变化的控制因素. 扎龙湿地沉积物重金属与环境因子相关性分析结果如表 7. 可知,沉积物 pH 与重金

属元素(除 Cd 外)呈负相关,但无显著相关性;有机质与重金属元素均呈正相关,其中与 Hg、Cd、As、Cu、Zn 和 Cr 极显著相关($P < 0.01$),相关性系数分别为 0.818、0.714、0.667、0.679、0.612 和 0.623,与 Pb 显著相关($P < 0.05$),相关性系数为 0.215;重金属元素与粒度相关性低,只有 Hg

与黏土($< 4 \mu\text{m}$)显著正相关($r = 0.217$, $P < 0.05$),Zn 与砂粒($> 64 \mu\text{m}$)显著正相关($r = 0.211$, $P < 0.05$). 由此表明,有机质是扎龙湿地沉积物重金属含量主要影响因子. 随着扎龙湿地盐碱化的加剧,沉积物中有机质含量降低,沉积物中重金属释放的风险加大.

表 7 扎龙湿地沉积物重金属与沉积物理化指标相关性¹⁾ ($n = 271$)

Table 7 Correlation matrix of geochemical characters and heavy metal contents in sediments of the Zhalong Wetland ($n = 271$)

重金属	pH	有机质	粒度			
			$< 4 \mu\text{m}$	$4 \sim 16 \mu\text{m}$	$16 \sim 64 \mu\text{m}$	$> 64 \mu\text{m}$
Hg	-0.026	0.818 **	0.217 *	0.113	0.033	0.021
Cd	0.043	0.714 **	-0.027	0.012	-0.089	0.034
As	-0.06	0.667 **	0.063	0.024	0.086	-0.125
Cu	-0.088	0.679 **	0.058	0.121	0.014	-0.131
Pb	-0.097	0.215 *	0.122	-0.031	-0.025	0.052
Zn	-0.136	0.612 **	0.113	0.086	-0.122	0.211 *
Cr	-0.155	0.623 **	-0.024	0.015	0.143	0.117

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

2.5.2 沉积物重金属元素间的相关性

在研究区域内,沉积物中各元素含量及其之间的比率具有相对的稳定性,当沉积物来源相同或相似时,各个元素具有显著的相关性^[26,27]. 扎龙湿地沉积物重金属元素间相关性分析结果如表 8. 从中可以看出,Cd、As、Cu、Zn 和 Cr 两两元素间相关性高,并且均呈极显著相关($P < 0.01$),相关性系数均

大于 0.5,尤其是 Cd 和 Cu、As 和 Cu、Cr 和 Zn 相关性系数均分别为 0.789、0.706、0.957,由此表明这 5 种金属元素来源相同或相似;Pb 与 Cd、As、Cu、Zn、Cr 相关性弱,其中与 As、Cu 无显著相关,说明 Pb 与这几种元素来源不同;Hg 与其它几种重金属元素存在显著相关性,但相关性系数较低,均低于 0.4,由此表明 Hg 来源较为复杂.

表 8 扎龙湿地沉积物重金属元素间相关性¹⁾ ($n = 271$)

Table 8 Correlation matrix between heavy metals in sediments of the Zhalong Wetland ($n = 271$)

	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Zn	Cr
Hg	1						
Cd	0.398 **	1					
As	0.254 *	0.568 **	1				
Cu	0.350 **	0.789 **	0.706 **	1			
Pb	0.253 *	0.263 *	0.172	0.139	1		
Zn	0.274 *	0.628 **	0.498 **	0.522 **	0.251 *	1	
Cr	0.391 **	0.646 **	0.471 **	0.501 **	0.265 *	0.957 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

3 结论

(1) 扎龙湿地表层沉积物中 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量范围分别为 0.010 ~ 0.208、0.022 ~ 0.713、2.99 ~ 22.04、9.99 ~ 48.60、16.43 ~ 29.07、30.10 ~ 76.32 和 24.10 ~ 68.46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且其平均值均超过松嫩平原土壤背景值;受人为活动影响,实验区和缓冲区沉积物中大部分重金属元素含量较高,其中位于实验区和缓冲区的东部的沉积物中表现出多元素复合污染特征.

(2) 研究区 7 种重金属元素均存在明显的空间

差异性,除 Pb 和 Hg 外的重金属元素空间分布规律基本相似. 从总体上看,整个研究区中,重金属含量北部高于南部,东部高于西部,核心区含量低,并且呈现出以核心区为中心向周围逐渐增加的趋势.

(3) Hakanson 潜在生态危害评价表明,扎龙湿地表层沉积物重金属总体呈轻微-强生态危害,其中研究区的南部及大部分核心区属轻微危害,北部、东部及小部分西部属中等-强危害,以东部潜在危害程度最大;各种重金属元素中 Hg 和 Cd 危害程度最大,As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 均为轻度生态危害. 从总体上看,沉积物重金属生态危害程度为实验区 > 缓

冲区 > 旅游生态区 > 核心区。

(4) 扎龙湿地沉积物重金属含量受 pH 及粒度的影响小, 而受有机质影响大, 目前扎龙湿地沉积物有机质的含量在 0.092 1% (16.19% 范围内, 平均值为 3.74%, 存在明显的空间差异性。元素间相关性分析表明, Cd、As、Cu、Zn 和 Cr 这些元素污染具有同源性, 而 Pb 与这几种元素来源不同; Hg 与其它几种重金属元素存在显著相关性, 但相关性系数较低, Hg 来源较复杂, 有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Rajkumar K, Sivakumar S, Senthilkumar P, *et al.* Effects of selected heavy metals (Pb, Cu, Ni, and Cd) in the aquatic medium on the restoration potential and accumulation in the stem cuttings of the terrestrial plant, *Talinum triangulare* Linn [J]. *Ecotoxicology*, 2009, **18**(7): 952-960.
- [2] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 61-68.
- [3] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 437-444.
- [4] Feng H, Kirk C J, Lwiza H, *et al.* Distribution of heavy metal and PCB contaminants in the sediments of an urban estuary: the Hudson River [J]. *Marine Environmental Research*, 1998, **45**(1): 69-88.
- [5] 田林锋, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖沉积物重金属稳定性及潜在生态风险性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(4): 885-894.
- [6] 卢少勇, 焦伟, 金相灿, 等. 滇池内湖滨带沉积物中重金属形态分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(4): 487-492.
- [7] 乔永民, 黄长江. 汕头湾表层沉积物重金属元素含量和分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2009, **31**(1): 107-116.
- [8] 范成新, 朱育新, 吉志军, 等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(3): 235-241.
- [9] 程永前, 蒋大和, 马红梅, 等. 常州市河流重金属污染评价[J]. *环境保护科学*, 2007, **33**(2): 76-78.
- [10] Von Steiger B, Webster R, Schulin R, *et al.* Mapping heavy metals in polluted soil by disjunctive kriging. *Environmental Pollution* [J], 1996, **94**(2): 205-215.
- [11] 吴长申. 扎龙国家级自然保护区-自然资源研究与管理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1999. 1-20.
- [12] Dauvalter V, Rognerud S. Heavy metal pollution in sediments of the Pasvik River drainage [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(1): 9-18.
- [13] 胡珊珊, 钱秀芳. 微波消解技术在土壤重金属元素测定中的应用[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **33**(4): 363-366.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [15] 刘兴久, 赵雅玲. 松嫩平原区域土壤中 8 种重金属元素的背景值及其相关因素[J]. *东北农学院学报*, 1987, **18**(2): 113-118.
- [16] 徐信, 支崇远, 陈玲. 花溪水库表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(3): 76-78.
- [17] 王健康, 高博, 周怀东, 等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1693-1699.
- [18] 汤洁, 陈初雨, 李海毅, 等. 大庆市建成区土壤重金属潜在生态危害和健康风险评价[J]. *地理科学*, 2011, **31**(1): 117-122.
- [19] 奚旦立, 孙裕生. 环境监测[M]. (第三版) 北京: 高等教育出版社, 2004. 264-267.
- [20] 陈富荣. 巢湖沉积物镉等重金属地球化学分布、赋存特征及危害性研究[J]. *安徽地质*, 2009, **19**(3): 200-203, 189.
- [21] Su L Y, Liu J L, Christensen P. Spatial distribution and ecological risk assessment of metals in sediments of Baiyangdian wetland ecosystem [J]. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(5): 1107-1116.
- [22] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 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[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1182-1187.
- [23] Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2575-2585.
- [24] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [25] Liu J L, Li Y L, Zhang B, *et al.* Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water [J]. *Ecotoxicology*, 2009, **18**(6): 748-758.
- [26] Galley F A, Lloyd O L L. Grass and surface soils as monitors of atmospheric metal pollution in central Scotland [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1985, **24**(1): 1-18.
- [27] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 256-259.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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