

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)	

三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评估

敖亮, 单保庆*, 张洪, 唐文忠

(中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 调查三门峡库区河流型湿地沉积物中重金属含量和赋存形态, 通过污染指数评价沉积物生态潜在风险、表层重金属可交换态与碳酸盐结合态的质量分数评价其释放风险. 结果表明, 沉积物中重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量分别为 25.8 ~ 68.5、12.1 ~ 36.7、3.25 ~ 48.74、33.5 ~ 472.4、0.16 ~ 0.69 和 9.04 ~ 90.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 从三门峡库区上游至大坝坝前, 沉积物重金属含量呈显著增加趋势. 库区最大支流渭河入黄口下游沉积物中重金属 Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量高于上游. 典型污染支流宏农涧河河口沉积物重金属累积明显, 极有可能是该区域矿业发展的工业废水排放所致. 沉积物污染指数 (SPI) 平均值为 3.11, 介于 1.83 ~ 7.39 之间, 渭河入黄口下游沉积物重金属污染程度明显增加, 宏农涧河河口沉积物 SPI = 6.33, 处于中度风险. 污染河口表层沉积物重金属碳酸盐结合态和交换态所占金属总量的质量分数分别为 Cd 63.8% ~ 85.7%, Cu 6.58% ~ 22.62%, Pb 10.6% ~ 28.9%, Ni 1.56% ~ 3.02%. 支流污染物排放引起重金属累积, 三门峡流域下游沉积物生态风险增加, 河口表层重金属释放风险由大到小为 Cd > Pb > Cu > Ni. 此调查可为河流沉积物污染治理和原位修复提供了参考和依据.

关键词: 三门峡库区; 沉积物; 重金属分布; 赋存形态; 风险评估

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1176-06

Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir

AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, TANG Wen-zhong

(State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The survey for contents and fractions of heavy metal in sediments of riverine wetland in Sanmenxia Reservoir were carried out. Sediment pollution index was applied to assess the potential ecological risk and mass fraction of heavy metal in surface sediment was conducted for release risk assessment. The results showed that the total concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb ranged in 25.8-68.5, 12.1-36.7, 3.25-48.74, 33.5-472.4, 0.16-0.69 and 9.04-90.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The heavy metal contents in the sediments increased obviously from the upper reaches of reservoir to Sanmenxia dam. The concentrations of Ni, Cu, Zn, Cd, Pb in sediments were higher in lower reach located after Weihe River than those of the upstream. The Weihe River was the biggest branch of Yellow River, and heavy metals accumulated obviously in the sediments of typical polluted branch (Hongnongjian River), which might be attributed to the long-term discharge of industrial wastewater. The sediment pollution index (SPI) of Sanmenxia Reservoir ranged from 1.83 to 7.39, with an average value for 3.11. Sediment pollution aggravated in the downstream after Weihe River flowed in, and SPI reached 6.33 in Hongnongjian River mouth for medium risk. The exchangeable and carbonates fraction of Cd, Cu and Pb mass fractions in surface sediments accounted for 63.8%-85.7%, 6.58%-22.62% and 10.6%-28.9%, respectively. The pollutants discharge in branches caused heavy metal accumulation, ecological risk aggravation in lower reach of Sanmenxia basin. And the release risk followed the sequence Cd > Pb > Cu > Ni in surface sediment. The conclusions of this article supplied reference and basis for sediment pollution treatment and in situ remediation.

Key words: Sanmenxia Reservoir; sediment; heavy metal distribution; fractions; risk assessment

在我国北方地区, 为有效利用有限水资源, 河流闸坝大量修建, 形成大面积河流型湿地^[1]. 三门峡大坝始建于1960年, 湿地面积较大, 近年来水质监测数据表明重金属 Cd、Pb 和 Hg 含量超标, 平均浓度分别达到了 0.012、0.010 和 0.142 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2]. 由于黄河是多泥沙河流, 水体中重金属易于沉降并累积于沉积物中^[3], 目前针对三门峡库区湿地的研究主要集中在在水体质量恶化现状和源头污染源分析^[4, 5], 对于区域尺度上沉积物中重金属累积研究较少^[2, 6~8], 尤其缺乏对三门峡库区流域沉积物重

金属生态风险和释放风险的认识^[8]. 鉴于此, 本研究以三门峡库区河流型湿地为调查对象, 采集河流湿地沉积物, 分析重金属含量, 评价流域沉积物生态风险. 通过污染支流河口调查, 探讨排污条件下河流湿地重金属赋存形态和释放风险, 以期对流域污染

收稿日期: 2011-05-16; 修订日期: 2011-10-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07209-010, 2008ZX07209-006, 2008ZX07101-006); 国家自然科学基金项目 (20907067)

作者简介: 敖亮 (1983 ~), 男, 博士, 主要研究方向为流域水环境退化诊断和污染治理, E-mail: aoliang77777@163.com

* 通讯联系人, E-mail: bqshan@rcees.ac.cn

源管理和河流型湿地恢复提供依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

三门峡库区位于黄河中游(图1),从龙门(S1)到三门峡大坝,地处河南、山西、陕西三省交界(东经 $110^{\circ}21'31'' \sim 111^{\circ}20'$, 北纬 $34^{\circ}30' \sim 34^{\circ}50'$)。库区山体较高,河谷狭窄,黄河干流河道沟渠深且地势陡峻,属暖温带大陆性季风气候,有高山盆地特征,年均气温 $12.8 \sim 13.9^{\circ}\text{C}$,降水集中在7~9月,多年平均年降水量为 $513 \sim 638 \text{ mm}$ 。三门峡大坝始建于1960年,由于黄河泥沙含量大,大坝淤积严重,运行方式被迫三次改变以维持水库可利用性^[9]。直到1974年,大坝运行方式才进入稳定周期运行。年运行方式分为3个时期,包括春季蓄水(3~6月),雨季泄洪(7~10月),冬季蓄水(11月~次年2月)。大坝运行水位平均为 312.1 m ,入库总量 $45\,828 \text{ 亿 m}^3$,出库流量 $10\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[10]。库区支流宏农涧河位于河南省灵宝市,流经灵宝主城区,在豫灵镇辖区内汇入黄河干流。作为重要的黄金和有色金属产地,灵宝采矿业的兴起和人口增加导致大量工业废水,生产生活污水排放到宏农涧河中,多年监测数据显示,宏农涧河水体质量长期处于V类或劣V类,水质恶化严重^[11]。

1.2 采样和分析方法

本研究选取三门峡库区河流型湿地沉积物,于2009年7月进行采样,采样点分布如图1所示。从龙门(S1)到三门峡大坝前王官湿地(S20),依照河流型湿地分布规律和支流河口湿地分布特点,每隔约 10 km 设置一个采样断面,共计20个。每个采样断面设置平行采样点3~4个,利用自制采样器(管长 60 mm , 内径 60 cm)采集沉积物样品,采样深度为 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 。采样点S1~S11位于渭河入黄口上游,S12和S13位于渭河入黄口下游。S1是黄河进入三门峡库区的起始点;S12处于典型污染支流渭河入黄口上,大坝水位难以影响,洪水期淹没;S13位于渭河入黄口下游约 20 km 某河湾处,水流缓慢;S15位于黄河干流回水区末端;S16和S17处污染支流宏农涧河河口,灵宝市区下方,豫灵镇辖区内,受污染支流和干流流水长期影响;S20处库区自然保护区,距离三门峡大坝最近,常年受三门峡大坝水位调控,滩地面积随大坝水位升高而缩小,水位降低而增大,湿地总面积大,是黄河中游重要的白天鹅栖息地和观测区^[10]。

为研究排污条件下典型河口沉积物重金属污染状况,在黄河与宏农涧河交汇处,河口(S16)湿地中平行设置采样点3个采集柱状样品,每 5 cm 分层,混匀,采样深度 55 cm 。将所有沉积物样品封存于干净自封袋中,运回实验室自然风干。待样品完全干燥后,除去沙石,动植物残体等明显异物,用玛瑙研钵研细过筛。采用 HF-HClO_4 消煮方法测定沉积物中重金属含量(Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd)^[12]。称取 0.150 g 沉积物样品(过 100 目分样筛)于聚四氟消煮管中,加入 1 mL 高氯酸(HClO_4 , 优级纯)和 3 mL 氢氟酸(HF , 优级纯),于 300°C 下消煮完全,重金属形态分级则采用经典 Tessier 连续提取方法^[12,13]。所有液态样品利用体积分数5%的优级纯硝酸定容至 50 mL ,采用 ICP-OES 测定 Cu、Zn、Ni、Cr, ICP-MS 测定 Pb 和 Cd。重金属总量采用加标回收的方法进行质量控制,测定标准土样元素结果显示各个重金属总量平均回收率在 $85.3\% \sim 110\%$ 之间。测定结果分析在统计软件 SPSS 18.0 中进行。

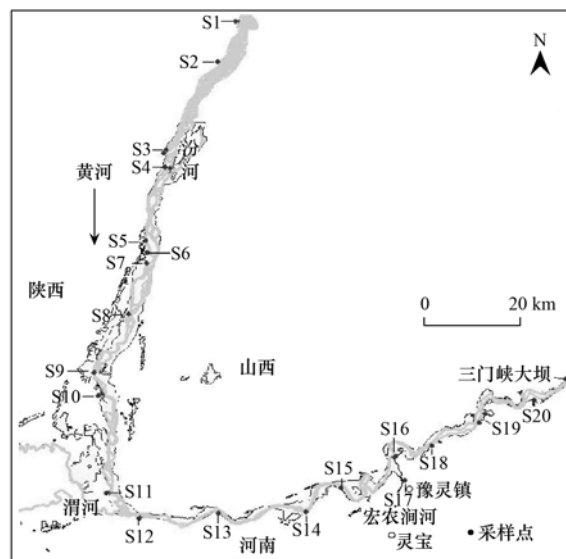


图1 三门峡流域河流型湿地沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites in riverine wetland of Sanmenxia Basin

1.3 评价方法

采用沉积物污染指数(SPI)评价三门峡流域河流型湿地中沉积物重金属生态风险^[14]。SPI综合多种重金属(Cr、Ni、Cu、Pb、Cd、Zn)沉积物实际测定浓度,利用公式(1)计算数值后,根据相关标准评价沉积物中重金属生态风险。生态风险分为5个等级,评价沉积物污染状态,分别为自然($\text{SPI} < 2$)、低风险($2 \sim 5$)、中度风险($5 \sim 10$)、高风险($10 \sim 20$)以及危险(> 20)^[14]。

$$SPI = \sum (C_n/B_n \times T_f) / \sum T_f \quad (1)$$

式中, C_n 表示实际测定含量, B_n 表示背景值含量, T_f 表示生态风险毒性. 重金属背景值含量来自三门峡沉积物背景调查, 分别为 Zn 60.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cr 67.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cu 21.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Ni 28.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb 20.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 Cd 0.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [5]. 6 种重金属毒性效应值 T_f 分别为 Zn(1)、Cr(2)、Cu(5)、Ni(2)、Pb(5) 和 Cd(300).

2 结果与讨论

2.1 库区河流型湿地重金属分布

三门峡库区河流型湿地重金属分布如图 2 所示, 测定结果显示库区河流型湿地重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 分别为 25.8 ~ 68.5、12.1 ~ 36.7、3.25 ~ 48.74、33.5 ~ 472.4、0.16 ~ 0.69、9.04 ~ 90.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 渭河入黄口下游沉积物中重金属含

量高于上游采样点, 典型污染支流河口沉积物重金属含量显著增加, 累积程度高于库区其他样点. Cr 平均含量为 51.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于环境背景值, 空间分布未出现明显变化. Ni 平均为 23.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 渭河入黄口下游明显增加, 宏农涧河口达到 31.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cu 在沉积物中平均含量为 25.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 略高于环境背景值, 自渭河口下游开始增加, 在宏农涧河河口出现含量最大值 48.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 平均含量为 0.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化范围在 0.16 ~ 0.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 渭河入黄口下游 Cd 含量高于上游, 宏农涧河河口 Cd 含量为 0.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是流域含量平均值的 2.03 倍; Pb 的沉积物含量在三门峡流域分布与 Cu、Cd 具有相同趋势, 平均为 28.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 9.04 ~ 90.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 间波动; 渭河入黄口上游, Pb 含量未超过 16 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 渭河入黄后, 下游地区 Pb 含量显著增高,

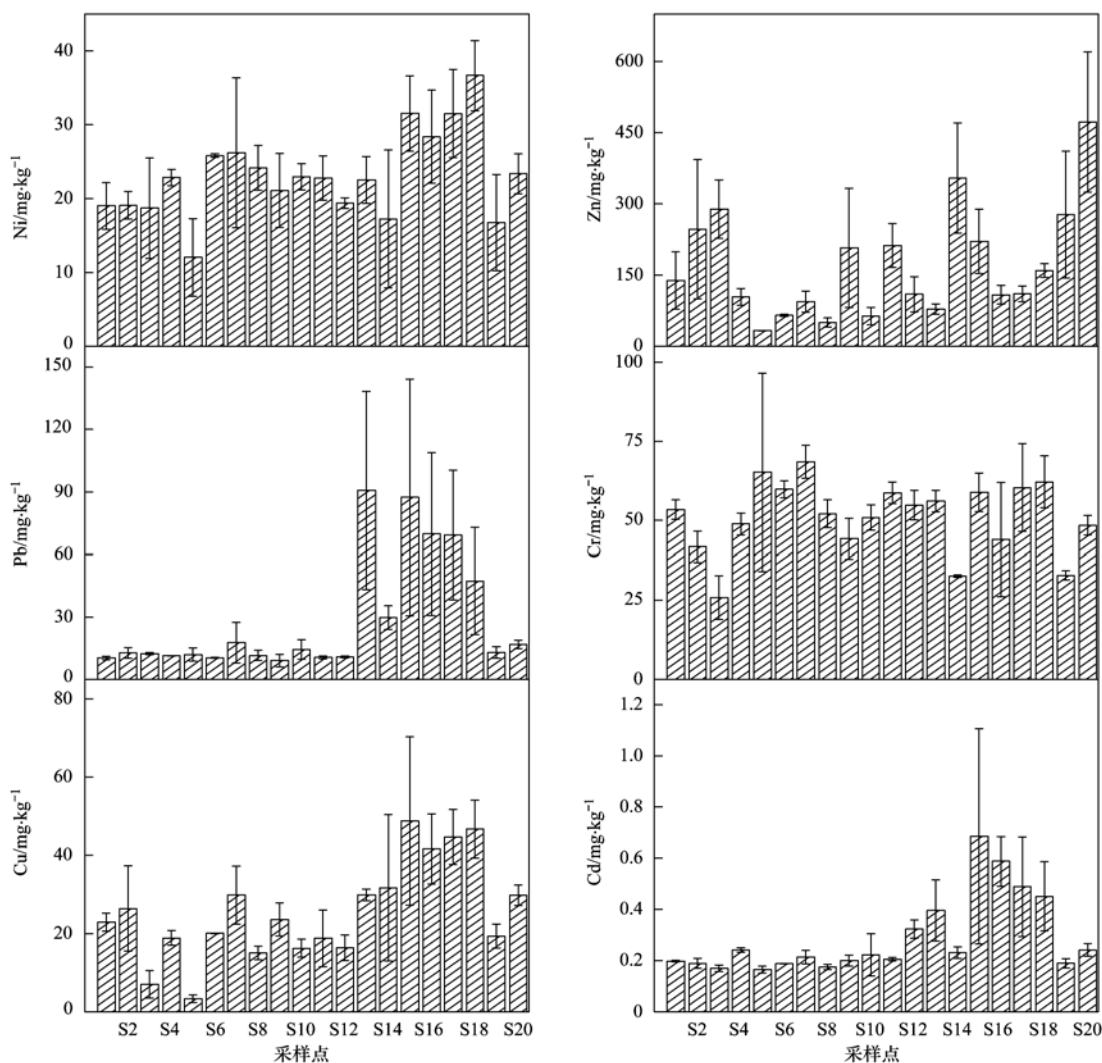


图 2 三门峡库区重金属空间分布

Fig. 2 Heavy metals distribution in Sanmenxia Reservoir basin

达到最高含量 $90.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而后略有降低但仍然明显高于上游; 宏农涧河河口沉积物中 Pb 含量为 $69.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是流域 Pb 平均含量的 2.46 倍。

据统计, 渭河是黄河三门峡库区最大的污染支流, 其污水排放量居各支流首位, 同时含有大量重金属^[11]。污水进入黄河干流, 极易造成下游地区水体中重金属含量增加, 水体中重金属吸附到泥沙颗粒中, 随水流迁移到下游地区, 当水流速度减缓时, 悬浮物沉降到河床中引起重金属在沉积物累积, 造成河流湿地生态风险增加。监测公报显示污染支流宏农涧河河口水质污染常年处于劣 V 类状态, 水体发黑、发臭, 主要超标污染物为 COD 和重金属 Cd、Pb。研究表明, 重金属 Cd 和 Pb 的排放主要来自采矿、冶炼、电镀、染料等工业产生的“三废物质”, 而 Cu 的排放主要来自于生活污水^[17]。灵宝作为全国第二大黄金生产县, 工业中有色金属采选业占据绝对控制地位, 特别是黄金采选业和铅的冶炼业更是整个工业经济的支柱产业, 近些年铅、镁、硫铁等矿产开采选冶也逐步崛起, 这些行业均属于高资源依赖型和高环境污染行业, 产生大量含有重金属的工业废水^[11]。同时, 灵宝地区污水厂的建设难以满足工业和人口发展的需求, 仍旧存在大量工业和城市生活污水的直接排放。因此, 宏农涧河河口沉积物重金属的严重污染极有可能是由于金矿废水、大量工业废水和相关城市生活污水排放所致。据历年入黄纳污调查统计, 2002 年类似宏农涧河污染严重的入库支流有 19 条, 厂矿企业直接入库排污口有 24 个, 库区工业和城市污水的持续排放不仅污染水体, 还可

能引起河口沉积物重金属累积, 给库区生态风险和安全带来严重威胁^[18]。

2.2 沉积物生态风险评估

库区河流型湿地中沉积物重金属生态风险评估结果显示(图 3): SPI 平均值为 3.11, 在 1.83 ~ 7.39 之间变化, 处轻度或中度风险。库区上游部分样点 $\text{SPI} < 2$ 表明重金属含量处自然状态, 未被污染。另一部分样点 $5 > \text{SPI} > 2$, 表明沉积物受到轻微污染。自渭河入黄口下游, 沉积物重金属生态风险明显增加, 重点污染支流宏农涧河河口沉积物 SPI 值增加到 6.33, 达到中度风险状态, 对生态环境有可能带来危害。沉积物生态风险增加可能导致重金属污染向食物链和人类器官中迁移^[19], 宏农涧河河口附近豫灵镇已经发现重金属 Pb 在人类头发中累积, 然而 2004 年重金属平均浓度评价显示其 SPI 值为 5.89, 处于中度风险状态^[4]。另一方面, 实验证实沉积物生态风险的增加导致两栖类存活比例的降低, 引起底栖生物物种多样性降低, 给生态系统带来直接危害^[20]。不同的生态风险带来物种结构的直接变化, 然而生态风险评价并不能完全反映沉积物风险, 仅对其沉积物的可能潜在风险和群落结构做了评估, 对上覆水体的内源释放却难以估算^[21]。同时, 重金属向生态系统的迁移和对环境水体贡献作用具有直接关系, 需进一步进行重点区域调查分析, 探讨其在水文条件改变下的释放风险^[22]。

2.3 支流河口沉积物污染和形态分析

通过重金属赋存形态来判断沉积物在环境条件改变时产生二次污染释放的可能性, 评估沉积物重

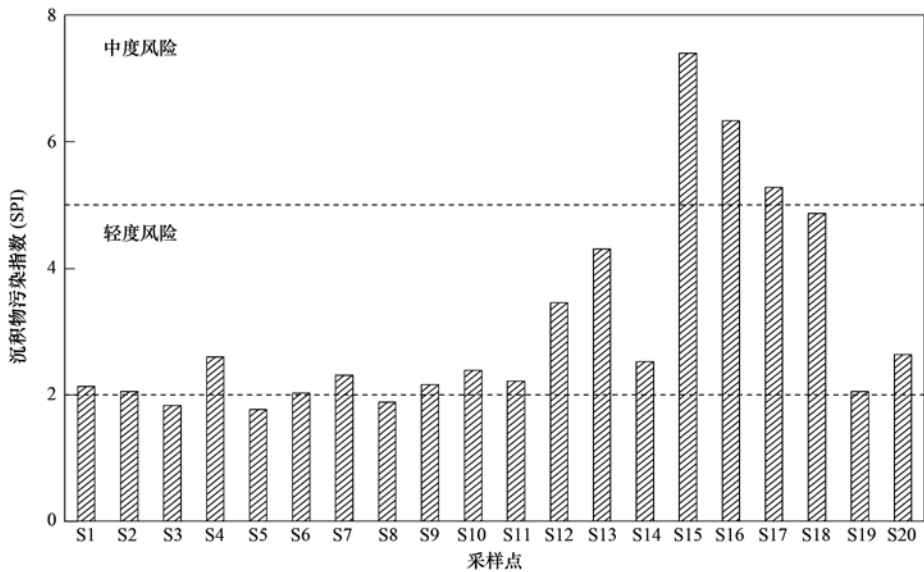


图 3 三门峡库区河流湿地沉积物风险指数 (SPI) 分布

Fig. 3 SPI distribution in sediment of riverine wetland in Sanmenxia Reservoir

金属释放风险^[21]. 宏农涧河河口 (S16) 沉积物中重金属形态分级测定 (如图 4) 表明, Cd 总量平均含量为 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随沉积物深度增加而增加, 5 cm 处重金属含量为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 50 cm 处出现最大值 $1.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cu 沉积物总量平均含量为 $74.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 从 5 cm 处 $57.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 40 cm 处最大值 $105.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Pb 平均含量为 $63.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 30 cm 处出现最大值 $88.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Ni 总量平均含量为 $38.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在河口地区随沉积物深度变化不明显, 但都超过环境背景值. 相应地, 可交换态重金属含量分别为 Cd $0.09 \sim 0.49$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 0, Pb 0, Ni $0.02 \sim 0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 碳酸盐结合态分别为 Cd $0.213 \sim 0.655 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $5.75 \sim 17.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $6.1 \sim 28.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni $0.48 \sim 0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 铁锰氧化结合态分别为 Cd $0 \sim 0.130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $13.7 \sim 25.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $16.2 \sim 39.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni $8.80 \sim 12.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 有机结合态分别为 Cd $0 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $2.42 \sim 4.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $4.85 \sim 18.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni $2.95 \sim 3.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 残留态分别为 Cd $0.08 \sim 0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $8.09 \sim 63.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $3.33 \sim 11.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni $20.6 \sim 30.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

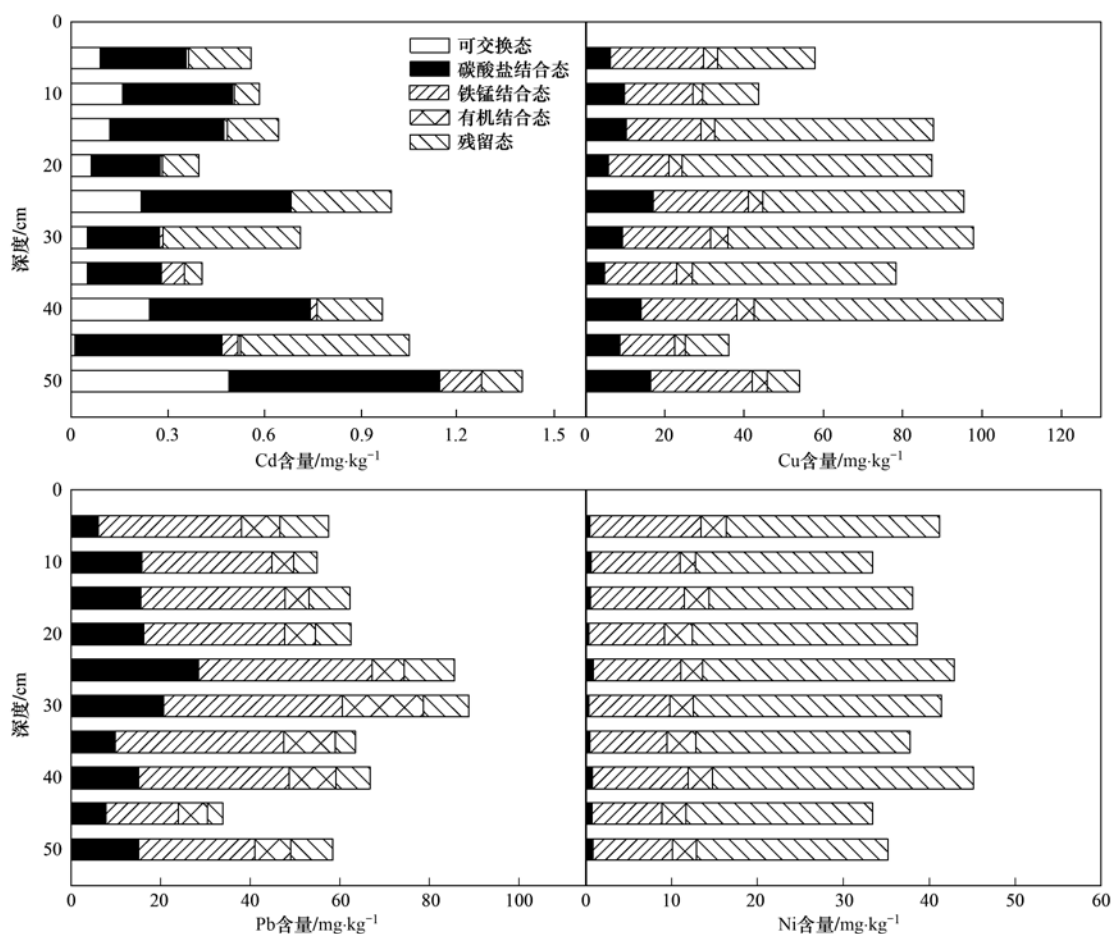


图 4 宏农涧河河口沉积物柱样重金属赋存形态

Fig. 4 Fractions of heavy metal in sediment core of Hongnongjian River

表层重金属 (0 ~ 20 cm) 赋存形态中可交换态和碳酸盐结合态所占质量分数决定了沉积物重金属释放风险^[24]. 通过计算发现宏农涧河河口沉积物中这 2 种形态所占质量分数分别为 Cd $63.8\% \sim 85.7\%$, Cu $6.58\% \sim 22.62\%$, Pb $10.6\% \sim 28.9\%$, Ni $1.56\% \sim 3.02\%$; 根据文献^[24]提出的沉积物重金属释放风险评价方法, Cd 处于高释放风险, Cu 处于低和中度

释放风险, Pb 处于中度释放风险, Ni 处于低释放风险. 在库区水文调控或者洪水季节到来时, 沉积物中重金属极有可能向环境水体释放, 对库区水体产生二次污染.

深层重金属的累积与历史污水长时间排放密不可分, 含有重金属废水持续排放可能导致了河口重金属的累积. 重金属不易降解和迁移, 随时间推移在

深层沉积物中增加,然而重金属形态改变可能与水文条件的变化有直接联系,需要进一步对沉积物-水界面进行研究来证实^[23]。支流污染河口重金属总量随深度增加而增加,深层污染较表层累积明显,释放风险较高,4种重金属释放风险的顺序由高到低为 $Cd > Pb > Cu > Ni$ 。

3 结论

(1) 针对北方典型河流型湿地三门峡库区河流湿地沉积物质量调查和评价研究发现:三门峡库区流域湿地重金属累积在渭河入黄口下游累积,以 Cu 、 Cd 、 Pb 污染累积最为明显;典型污染支流宏农涧河河口重金属污染严重,累积明显,其主要来源于该区域采矿业的繁荣带来的含有重金属废水的排放。

(2) 流域重金属生态风险评价显示其生态风险基本处于轻度和中度风险状态,渭河入黄口下游生态风险明显增加,宏农涧河河口 SPI 达到中度风险。

(3) 沉积物重金属 Cd 以碳酸盐结合态为主, Cu 以残留态和铁锰氧化物结合态为主, Pb 的赋存形态以碳酸盐结合态和铁锰氧化结合态为主, Ni 的赋存形态以残留态和铁锰氧化结合态为主。表层释放风险评价表明库区重金属具有较高释放风险,其顺序由高到低为 $Cd > Pb > Cu > Ni$ 。

参考文献:

- [1] 吴光红,刘德文,丛黎明. 海河流域水资源与水环境管理[J]. 水资源保护, 2007, **23**(6): 80-83.
- [2] 刘茹,屠新武. 黄河三门峡库区水质评价与演变势分析[J]. 西北水力发电, 2005, **21**(1): 55-59.
- [3] Olde Venterink H, Vermaat J E, Pronk M, *et al.* Importance of sediment deposition and denitrification for nutrient retention in floodplain wetlands [J]. *Applied Vegetation Science*, 2006, **9**(2): 163-174.
- [4] 盛奇,胡永华,胡广. 三门峡盆地土壤元素异常区环境问题研究[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(17): 8087-8090.
- [5] 盛奇,王恒旭,胡永华. 黄河流域河南段土壤背景值与基准值研究[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(18): 8647-8650.
- [6] 王绿洲. 黄河壶口-三门峡段渔业水域重金属污染及模糊数学评价[J]. 水利渔业, 2007, **27**(1): 71-73.
- [7] 王勇泽,李诚,孙树青,等. 黄河三门峡段水环境健康风险评价[J]. 水资源保护, 2007, **23**(1): 28-30, 70.
- [8] 李群,黄锦辉,田凯. 黄河三门峡库区段水污染物排放总量控制研究[J]. 环境与开发, 2000, **15**(4): 14-16.
- [9] Wu B S, Wang G Q, Xia J Q. Case study: delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanmenxia Dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 2007, **133**(5): 482-494.
- [10] 毛战坡,彭文启,周怀东. 三门峡水库运行方式对库区湿地生态系统影响研究[J]. 水利发展研究, 2005, **5**(9): 12-17.
- [11] 邢永强,章煜. 河南省灵宝市地质灾害特征、分布情况与防治对策[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2006, **25**(5): 372-376.
- [12] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [13] 邵秘华,王正方. 长江口水体中重金属形态交换过程的研究[J]. 环境科学, 1995, **16**(6): 69-72.
- [14] Singh M, Müller G, Singh I B. Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanisation of the Ganga Plain, India [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2002, **141**(1-4): 35-54.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [16] 李晨. 三门峡水库环境影响回顾与评述[J]. 人民黄河, 1991, (1): 66-72.
- [17] 王永华,刘振宇,刘伟,等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(4): 501-506.
- [18] 张婧,王淑秋,谢琰,等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2413-2418.
- [19] López I R, Kalman J, Vale C, *et al.* Influence of sediment acidification on the bioaccumulation of metals in *Ruditapes philippinarum* [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(9): 1519-1528.
- [20] Shin P K, Lam W K C. Development of a marine sediment pollution index [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(3): 281-291.
- [21] Lin C Y, He M C, Zhou Y X, *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment of the Second Songhua River, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **137**(1-3): 329-342.
- [22] Tessier A, Campbell P G C. Partitioning of trace metals in sediments: relationships with bioavailability [J]. *Hydrobiologia*, 1987, **149**(1): 43-52.
- [23] Singh K P, Mohan D, Sigh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges, India [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [24] 张洪,单保庆. 六叉河小流域多水塘沉积物中镉含量历史变化趋势分析[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(1): 1-5.

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