

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策

谭冰^{1,2}, 王铁宇^{1*}, 朱朝云¹, 李奇锋¹, 徐笠¹, 吕永龙¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000)

摘要: 洋河流域是北京官厅水库重要的入库水源, 通过对洋河流域万全段采集地表水和沉积物样品, 研究重金属空间特征及其生态风险, 结果表明, 地表水中所监测的 Cu、Ni、Cd、Zn、Cr、Pb、Hg、As 含量分别为 1.28~24.13、1.13~16.84、0.08~0.11、1.80~10.65、1.40~19.12、0.13~2.05、0.06~0.99、0.46~4.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 不同点位各重金属含量均低于国家Ⅳ类水质标准, 仅满足一般工业用水和农业灌溉用水要求。沉积物中 Cu、Ni、Cd、Zn、Cr、Pb、Hg、As 含量分别为 5.90~110.11、17.34~56.04、0.07~0.31、38.71~116.74、40.39~85.77、18.65~22.74、nd~0.047、0.85~9.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沉积物中各重金属平均潜在生态风险均表现为轻微等级, 但有部分点位 Cd、Hg 的潜在生态危害指数达到中等, 危害指数由高到低分别为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$ 。监测点重金属的累积生态风险由高到低分别为: $\text{YH-07} > \text{YH-03} > \text{YH-09} > \text{YH-02} > \text{YH-06} > \text{YH-04} > \text{YH-05} > \text{YH-01}$, 平均潜在生态危害累积指数处于轻微级别, 但点位 YH-07 潜在生态风险累积指数已达到中等级别。整个万全河段区域中, 风险较高区域集中在农业耕作较密集的 YH-02~YH-03 点位和人工化程度较高的 YH-07~YH-09 点位。基于研究结果, 提出了具体的重金属生态风险管理对策及建议, 并明确了农业耕作控制区、河道改造控制区以及洋河水源保护缓冲区等 3 个污染风险调控功能区。

关键词: 水体; 沉积物; 洋河流域; 潜在生态危害指数; 风险管理

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0719-08

Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River

TAN Bing^{1,2}, WANG Tie-yu¹, ZHU Zhao-yun¹, LI Qi-feng¹, XU Li¹, LÜ Yong-long¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to investigate heavy metals contamination status in Wanquan segment of Yanghe River, Zhangjiakou, 9 water and sediments samples were collected respectively for analyzing Cu, Ni, Cd, Zn, Cr, Pb, Hg and As, with water quality indicators determined at the same time. The potential ecological risk index (PERI) was then employed to evaluate potential ecological risk of heavy metals in sediments. Results indicated that the concentrations of Cu, Ni, Cd, Zn, Cr, Pb, Hg and As in water samples ranged from 1.28-24.13, 1.13-16.84, 0.08-0.11, 1.80-10.65, 1.40-19.12, 0.13-2.05, 0.06-0.99, 0.46-4.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, which are all below the national water quality standard for the demands of industrial use and agricultural irrigation. Principal component analysis (PCA) was conducted to reveal the relationship between water quality indicators and heavy metals pollution in water samples. Concentrations of Cu, Ni, Cd, Zn, Cr, Pb, Hg and As in sediments ranged from 5.90-110.11, 17.34-56.04, 0.07-0.31, 38.71-116.74, 40.39-85.77, 18.65-22.74, nd-0.047, 0.85-9.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The descending order of potential ecological risk intensity caused by different heavy metals was: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$, and the average value of each heavy metal was low, while middle-grade risk level of Cd and Hg were also found in several sites. Among all monitoring sites, the descending order of PERI of all target heavy metals was: $\text{YH-07} > \text{YH-03} > \text{YH-09} > \text{YH-02} > \text{YH-06} > \text{YH-04} > \text{YH-05} > \text{YH-01}$, and the average value reached slight grade, while middle-grade risk level was detected in YH-07. Sampling locations in YH-02-YH-03 and YH-07-YH-09 were found with relatively high ecological risk level because of agricultural and anthropogenic activities, respectively. Finally, three risk management regions were figured out and corresponding countermeasures for improving the environmental quality of the watershed were proposed based on the research results.

Key words: surface water; surface sediment; Yanghe River Watershed; potential ecological risk index; risk management

收稿日期: 2013-06-19; 修订日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171394); 国家科技基础性工作专项重点项目(2013FY111100); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-12)

作者简介: 谭冰(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域污染风险评价与生态修复, E-mail: tanbing2011@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangty@rcees.ac.cn

重金属具有稳定性、生物毒性及生物积累性,使得重金属污染成为研究水环境污染的热点^[1~3]. 水系中重金属不仅存在于水体中,大部分进入水体的重金属通常在吸附、絮凝、沉淀等因子作用下富集于沉积物中^[4],并易在环境条件发生变化时再悬浮和溶出形成二次污染^[5,6]. 因此,研究河流的重金属污染,不单单要关注其在水体中的含量分布,更要对水系重金属的汇及潜在次生污染源——沉积物中重金属的分布进行深入研究.

洋河发源于山西省阳高县和内蒙古兴和县,总流域面积约为14 600 km²,在河北怀来县与桑干河汇流入官厅水库,是北京官厅水库的重要水源. 洋河流域的河北张家口段周边分布有钢铁、热电、化工、印染等行业,是张家口市经济发展的中心,也是水资源开发利用程度较高的区域^[7,8]. 已有研究表明,洋河流域河道接纳的大量工业废水和生活污水,是造成官厅水库持续污染治理缓慢的关键原因^[9~12]. 万全县是张家口市下属行政县,种植业、化工、液压等是万全

县的特色经济支柱,已有报道指出由于大量农药化工企业的分布,该区域存在着一定程度的重金属污染^[13,14],本研究旨在调查洋河流域流经万全段的河流重金属污染特征,探讨该段流域水体、沉积物中铜(Cu)、镍(Ni)、镉(Cd)、锌(Zn)、铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)、砷(As)这8种重金属的分布特征及其来源,并评价其污染程度和潜在生态风险,从而提出流域重金属污染的控制措施和风险管理的对策建议,以期为官厅水库环境质量改善以及洋河流域和官厅水库的综合治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

样品在2012年5月进行采集,沿东西走向的洋河流域布点,在YH-01~YH-09点位分别采集水样和表层沉积物(YH-08点位由于河道已人工硬化,无法采集沉积物),采样点位置通过GPS定位,样点布设如图1所示.

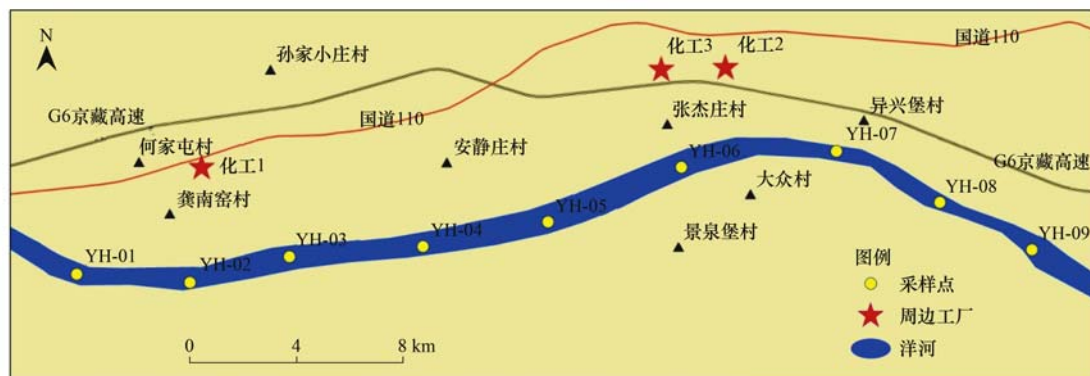


图1 洋河流域采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling site in Wanquan segment of Yanghe watershed

水样中重金属总量的分析:采集的水样现场经0.45 μm 微孔滤膜过滤,然后分为2部分,一部分加入硝酸经酸化处理($\text{pH} < 2$)置于1 L聚乙烯瓶中冷藏,用来测定除Hg外的其他重金属. 另一部分加入浓硫酸使水体酸化后,加入重铬酸钾,使水样呈现持久的橙色,密塞以防止Hg的挥发. 样品中Cu、Ni、Cd、Zn、Cr、Pb、As这7种重金属采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)技术测定,Hg采用原子荧光技术进行测定^[15]. 每批样品中均加入空白样,分析过程中加入标准物质进行质量控制,分析过程中的重复率为10%,各种金属元素的回收率均在85%~120%之间,符合质量控制要求.

沉积物中重金属总量的分析:表层沉积物置于塑料密封罐中保存,带回实验室后在室温下置于铝

箔上自然风干. 剔除样品中的有机残渣、植物根系、石块及其他可见杂质后,研磨过100目筛. 参照USEPA 3050建议的消煮方法以及国家标准对土壤前处理的相关方法和标准^[16,17],对Cu、Ni、Cd、Zn、Cr、Pb采用硝酸、高氯酸、氢氟酸混合消煮(硝酸:高氯酸:氢氟酸=5:3:3),ICP-OES、ICP-MS技术测定;对Hg和As的测定,加入适量1:1王水,沸水水浴消煮后用原子荧光技术进行测定. 使用国家标准物质中心提供的土壤成分分析标准样品(GSS-8)对消解过程进行质量控制,分析过程中的重复率为10%,各种金属元素的回收率均在90%~120%之间,结果符合质量控制要求^[18].

在采样同时对研究河段水质的常规参数指标进行监测,其中浊度由便携式浊度仪(HACH, 2100Q)

测得,水温、pH、溶解氧(DO)、电导率、氧化还原电位(ORP)、氟离子(F⁻)、氯离子(Cl⁻)含量由便携式多参数分析仪(HACH,HQ40d)测定。

1.2 数据处理

样点分布图用 ArcGIS 10 制作,数据处理和统计分析在 Excel 2010 和 SPSS 20.0 上进行。

1.3 沉积物中重金属污染评价

目前,沉积物中重金属污染的指数评价方法主要有内梅罗指数法,富集因子法,地累积指数法,潜在生态风险指数法等^[19~21],本研究采用潜在生态危害指数法来评估洋河流域万全段重金属的潜在风险和污染水平。潜在生态危害指数法是瑞典学者 Hakanson 于 1980 年建立的一套应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法^[22],在国内外应用广泛,评价效果较好^[23~26]。

单个重金属的潜在生态危害系数计算公式为: $E_i = T_i \times (C_i/B_i)$;多种重金属潜在生态风险危害累积指数计算公式为: $RI = \sum E_i = \sum T_i \times (C_i/B_i)$ 。式中, C_i 为沉积物中第*i*种重金属的实测含量, B_i 为重金属的评价参比值, E_i 为单个重金属的潜在生态危害系数, T_i 为单个污染物的毒性响应参数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度,RI 为多种重金属潜在生态风险危害指数,等于所有重金属潜在生态危害系数的总和。Cu、Ni、Pb 的毒性参数为 5,Zn 为 1,Cr 为 2,Cd 为 30,Hg 为 40,As 为 10^[22, 24]。

2 结果与讨论

2.1 洋河流域万全段水体中重金属分布

洋河流域万全段地表水重金属浓度及相应的国家地表水标准见表 1。其中,Ⅲ类水可用于饮用水源及渔业养殖,Ⅳ类水主要适用于一般工业用水及人体非直接接触的娱乐用水,Ⅴ类水主要适用于农业用水及一般景观。考虑到洋河水体整体功能多样,在万全段主要用于景观及农业灌溉,下游则汇入官厅水库,作为北京市工业水源以及潜在饮用水源。因此,本研究选用我国地表水环境质量标准的Ⅲ类和Ⅳ类作为评价标准。从表 1 可以看出,水体中各种重金属不论是平均值还是最大值浓度均低于Ⅳ类水质标准,符合一般工业用水和农业灌溉用水要求。所监测的 8 种重金属,除 Hg 外,也都低于Ⅲ类水质标准。洋河万全段有 67% 以上点位的 Hg 含量超过了水质Ⅲ类标准(0.10 μg·L⁻¹),最大值达 0.99 μg·L⁻¹。Hg 超标点主要集中在 YH-02 ~ YH-04 (0.17 ~ 0.99 μg·L⁻¹)、YH-07 ~ YH-09 (0.14 ~ 0.30 μg·L⁻¹)区域,洋河 YH-02 ~ YH-03 点位附近多为农田,是万全县农业集中地区,农业生产活动如施肥、灌溉、农药喷洒可能是造成该区域 Hg 含量超标的主要原因。而洋河 YH-07 ~ YH-09 段已进入张家口市内,毗邻交通干道,河道被人为地进行改造和拦截,作为市区景观用水,河道施工作业及交通排放可能是该段 Hg 的主要来源。

表 1 洋河地表水重金属含量统计/μg·L⁻¹

Table 1 Statistics of heavy metal concentrations in surface water from Wanquan segment of Yanghe watershed/μg·L ⁻¹								
样点	Cu	Ni	Cd	Zn	Cr	Pb	Hg	As
YH-01-W	2.19	8.38	0.08	2.19	3.48	0.29	0.09	1.10
YH-02-W	2.69	10.56	0.09	2.15	19.12	0.40	0.17	1.16
YH-03-W	2.70	4.68	0.08	3.29	2.56	0.13	0.76	0.92
YH-04-W	7.90	7.46	0.09	5.46	11.17	1.72	0.99	1.12
YH-05-W	24.13	16.84	0.09	10.65	18.53	2.05	0.07	0.46
YH-06-W	1.28	8.75	0.08	4.04	5.47	0.28	0.06	1.63
YH-07-W	2.14	1.39	0.08	2.06	1.54	0.39	0.28	0.67
YH-08-W	3.66	1.13	0.08	1.80	1.40	0.13	0.30	1.14
YH-09-W	16.37	13.76	0.11	2.81	18.45	0.69	0.14	4.22
均值	7.01	8.11	0.09	3.83	9.08	0.68	0.32	1.38
Ⅲ类地表水标准 ¹⁾	1 000	— ²⁾	5	1 000	50	50	0.1	50
Ⅳ类地表水标准	1 000	—	5	2 000	50	50	1	100
Ⅴ类地表水标准	1 000	—	10	2 000	100	100	1	100

1) 参考文献[27]; 2) 表示现行标准中暂无规定

2.2 洋河万全段水质环境指标与重金属污染的关系

利用便携式浊度仪和多参数分析仪监测洋河水质常规指标(表 2),可以看出,洋河万全段 pH 在

8.37 ~ 10.0 之间,一般地表水 pH 为 6 ~ 9,说明该河段水质偏碱性。水的电导率反映了含盐量多少,是水体纯净程度的一个重要指标。水越纯净,含盐

量越少,电导率越小. 9 个水样的电导率为 587 ~ 913 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,远远超过国家瓶装饮用水标准($\leq 10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[28],说明水中含盐量较高. DO 值为 7.79 ~ 14.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,全部高于 I 类地表水标准(7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Cl^{-} 与 F^{-} 能够在一定程度上反映重金属阳离子的含量以及水质状况. 国家对生活饮用水地表水水源中 Cl^{-} 的含量规定为小于 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而此段洋河水样全部高于该数值,为 251 ~ 897

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. F^{-} 含量在 0.17 ~ 3.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,除 YH-09 点外,其余各样点含量变化不大,均低于国家地表水环境质量标准中 I 类水质的规定值(1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),可能 YH-09 点处有 F^{-} 的意外排放. ORP 是水质中的一个重要指标,它虽然不能独立反映水质的好坏,但是能够综合其他水质指标来反映水生系统中的生态环境,与水温、pH 和 DO 都有一定的关系. 洋河水样中 ORP 变化不大,为 155 ~ 220 mV.

表 2 洋河万全段水质指标统计

Table 2 Statistics of water quality indicators in Wanquan segment of Yanghe watershed

样点	水温 /℃	浊度 /NTU	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	pH	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cl^{-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	F^{-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ORP /mV
YH-01	19.3	240	619	8.42	8.02	251	0.33	192
YH-02	18.1	354	847	8.42	7.79	390	0.45	194
YH-03	19.4	40	587	9.56	14.8	409	0.37	161
YH-04	19.7	+ ¹⁾	782	8.50	8.01	560	0.34	180
YH-05	22.4	+	664	8.44	7.71	468	0.17	157
YH-06	20.4	52	913	8.37	8.97	503	0.41	220
YH-07	22.1	58	648	8.94	10.4	704	0.37	172
YH-08	21.6	14	626	8.62	8.13	358	0.45	188
YH-09	23.0	100	827	10.0	14.3	897	3.19	155

1) “+”表示数值超过该仪器最大量程(1 000 NTU)

对洋河水体中常规水质指标与重金属含量进行主成分分析(图 2),其中主成分 1 和主成分 2 对应的方差累计贡献率分别为 38.48% 和 66.48%. 由图 2 可以看出金属 Pb、Zn 含量与水体浊度有一定关系,水体越浑浊,Pb 和 Zn 的含量越高,在 YH-04、YH-05 点处水体浊度超过仪表量程,而这两处 Pb、Zn 含量也较高(1.72 ~ 2.05 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、5.46 ~ 10.65 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),这说明 Pb 与 Zn 可能具有相同的来源,而且这种来源也与水体浑浊直接相关. Ni、Cu 和 Cr 含量之间也呈现一定的相关性,3 种重金属均在 YH-05 点处达到最大值,分别为 16.84、24.13、18.53 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在 YH-09 处也有较高含量,分别为 13.76、16.37、18.45 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,表明这 3 种重金属也可能具有相同来源. 而 As 的含量与 pH、DO 和 F^{-} 之间有较好的相关性,As 与 F^{-} 之间能够形成稳定的化合物,同时 As 的化合物易受氧化,所以与 DO 也存在一定的相关性. Cd、Hg 与其它任何指标均未表现出明显的相关性,这可能是由它们不同的来源引起的. 常规指标 ORP 与电导率因其影响因素较多,与水样中重金属含量没有表现出明显的相关性.

2.3 洋河流域万全段表层沉积物中重金属分布

洋河流域万全段河道沉积物中各重金属含量及相应参比标准如图 3 所示. 由于国内目前缺少关于

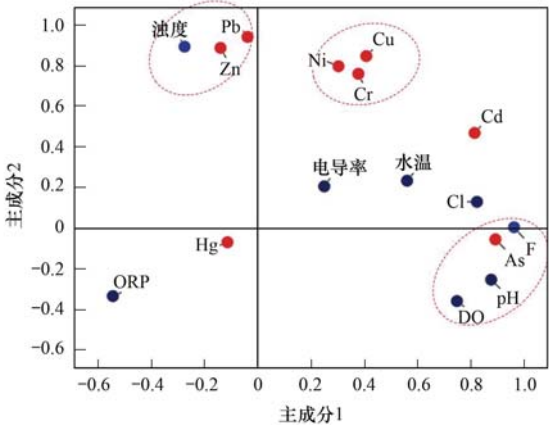
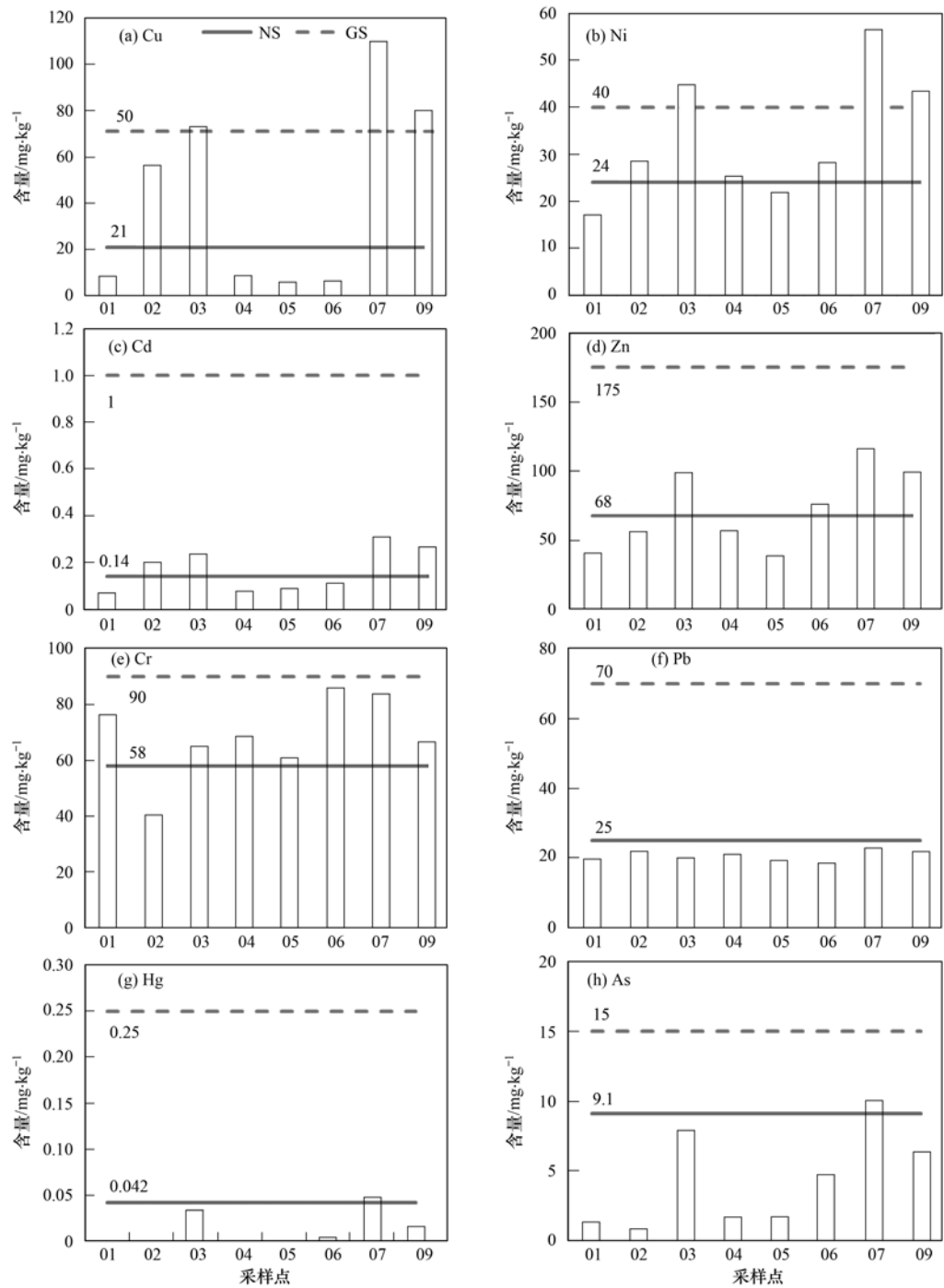


图 2 洋河万全段常规指标与重金属含量主成分分析图

Fig. 2 Loading plots of the heavy metals and water quality indicators in rotated space defined by two components

河流沉积物重金属的相关标准,本研究参照了全国水系沉积物平均值(以 NS 表示)^[29, 30]以及全球工业化以前沉积物中最高背景值(以 GS 表示)^[22]等参比值. 从图 3 可以看出,相对于 NS 值,除 Pb 外,其余重金属均有不同程度的富集,该河段 50% 以上点位有 Cr、Ni、Cu、Cd、Zn 的富集,其中元素 Cr 富集的比例高达 87.5%. 在重金属富集的点位中,Cu、Cd、Ni 的富集倍数相对较高,分别在 2.70 ~ 5.24 倍,1.43 ~ 2.21 倍和 1.06 ~ 2.36 倍之间. 此外部分点位的 Cu (56.66 ~ 110.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 Ni



1) Ni 的 NS 值为文献[31]中 I 类标准值

图 3 沉积物中各重金属含量

Fig. 3 Concentrations of heavy metals in surface sediments

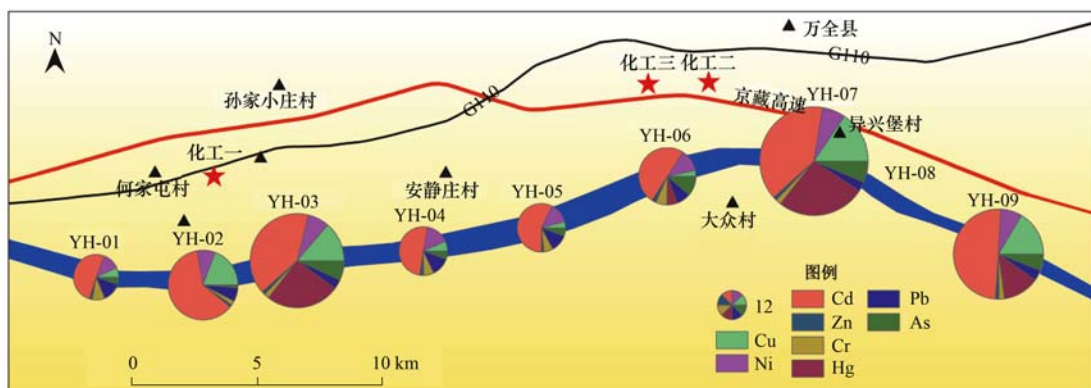
(43.58 ~ 56.64 mg·kg⁻¹) 的含量已经超过了对应的 GS 值(分别为 50 mg·kg⁻¹和 40 mg·kg⁻¹)。重金属富集段主要集中在洋河 YH-02 ~ YH-03 点位以及 YH-07 ~ YH-09 点位之间,呈现与水体相似的趋势。可以证明,水体较高浓度的重金属,已经通过沉降和吸附,蓄积到沉积物,成为水体次生污染的重要溯源。

2.4 洋河流域万全段沉积物中重金属潜在生态风险

本研究应用潜在生态危害指数法,以全国水系沉积物平均值作为参比,进行生态风险评价,并分析其空间分布特征(图 4)。各重金属的平均生态危害系数 E_i 在 1.08 ~ 36.43 之间,均表现出轻微潜在生态风险等级,各重金属的平均污染指数由高到底分别为 Cd > Cu > Hg > Ni > As > Pb > Cr > Zn。其中 Cd

表现出较高的潜在生态风险(15.00 ~ 66.43),在 YH-02、YH-03、YH-07、YH-09 点位 Cd 的潜在风险已经达到中等污染的水平($40 < E_i < 80$),而在 YH-07 点位 Hg 的潜在生态危害系数也为中等级别($E_i = 44.76$). 从潜在生态风险危害累积指数 RI 可以看出,该河段重金属平均潜在生态风险处于轻微级别($RI = 75.67 < 150$). 监测点 8 种重金属的累积生态风险由高到低分别为:YH-07 > YH-03 > YH-09 > YH-02 > YH-06 > YH-04 > YH-05 > YH-01. 在

YH-07 点重金属的潜在累积生态风险已达到中等级别($150 \leq RI = 169.33 < 300$). 各点位中,潜在生态风险累积指数的主要贡献因子为 Cd(39.23% ~ 61.34%),在 YH-03、YH-07 点 Hg 也有较高的贡献率(25.49% ~ 26.43%). 整个研究河段区域中,YH-02 ~ YH-03 点位附近的农业集中区和 YH-07 ~ YH-09 点位附近过高的人为干预区均具有较高的累积风险指数,其中点位 YH-07 潜在生态风险累积指数达到中等级别.



潜在生态危害等级划分标准为:单个重金属的潜在生态危害系数 $E_i \leq 40$,轻微; $40 \leq E_i \leq 80$,中等; $80 \leq E_i \leq 160$,强; $160 \leq E_i \leq 320$,很强; $E_i \geq 320$,极强;多种重金属潜在生态风险危害累积指数: $RI < 150$,轻微; $150 \leq RI \leq 300$,中等; $300 \leq RI \leq 600$,强; $RI \geq 600$,很强

图 4 沉积物中重金属潜在生态风险指数的空间分布

Fig. 4 Potential ecological risk index of heavy metals in sediments

2.5 洋河流域万全段重金属风险管理对策及建议

从以上分析可以看出洋河万全段重金属污染多集中在 YH-02 ~ YH-03 段的农业耕作集中区,以及 YH-07 ~ YH-09 段的人为改造程度较高的城市化区域. 针对这一现象,综合考虑该河段水体及沉积物中重金属超标状况及风险评价结果,以及流域产业布局,划分了三大风险管理区域,包括农业耕作重点控制区、河道改造重点控制区,以及洋河水源保护缓冲区,并提出了相关管理对策(图 5).

农业耕作重点控制区:不合理的农药、化肥使用可能是引起该段河道中重金属含量较高的原因,沿河农民如不能主动转变意识,科学使用农药、化肥以及地膜等农资产品,将是洋河水质安全的长期隐患. 因此,应在政府测土配方施肥、调整农业结构、改良农资环境等政策的引导下,合理使用农资产品,特别是放弃高毒、高残留农药,放弃含 Cd、Hg、Cu 等重金属元素较高的化肥、地膜等农资,推广使用有机肥和发酵农家肥,规范农药、化肥的使

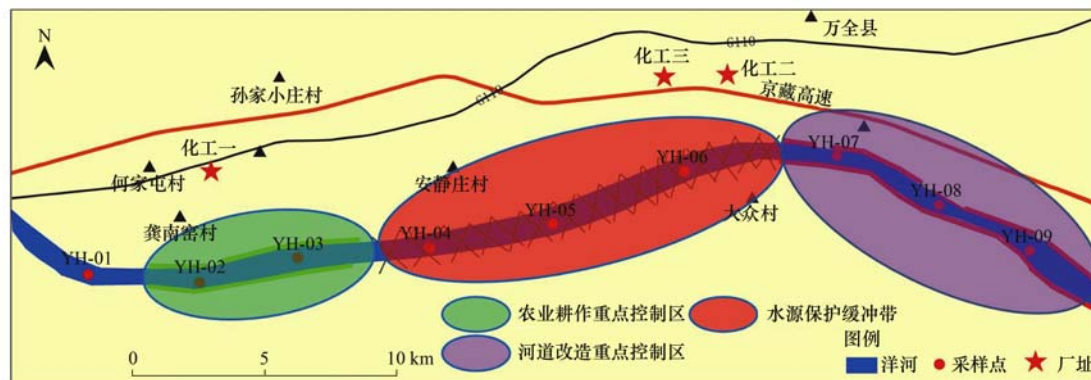


图 5 洋河万全段管理区域划分

Fig. 5 Division of risk management region in Wanquan segment of Yanghe watershed

用,最大限度地减少农业生产对环境的污染。

河道改造重点控制区:河道改造是城市化进程中不可避免的选择,但同时也会对当地生态环境造成重大的不可逆的破坏。因此,施工单位、环境保护部门及当地政府三方须做到排放-监测-监管各环节无死角、高效率。施工单位应尽最大力度保护河道环境,做到建筑垃圾实时清理,定点堆积,及时运输处理等。环保部门应定期监察,动态监测水质、土壤环境指标,同时还要在周边居民及施工人员中间展开调研,确保及时获取可能或潜在的环境污染信息。政府在此过程中应总体把关施工单位、环境保护部门工作,及时听取各部门意见,做出相应预案,同时对各单位工作进行监管,以保证河段施工中排放、监测、监管部门各司其职,相互配合,最大可能地减少对河道生态环境的破坏。

洋河水源保护缓冲带:水源保护缓冲带位于两段重点控制区之间,该河段重金属潜在生态风险为轻微级别,但由于上下游皆为高风险区域,因此该河段极易受到扰动。在对河段加强监测力度的同时,应注意该河段水体和沉积物中重金属含量的动态变化,以便及时采取措施,防控水体污染与风险。

3 结论

(1)洋河水体所监测的 8 种重金属含量均低于国家Ⅳ类水质标准,满足一般工业用水和农业灌溉用水要求。仅部分点位的 Hg 含量超过水质Ⅲ类标准,考虑到元素 Hg 具有较高毒性,该河段已不能应用于饮用水源及渔业养殖。

(2)表层沉积物中重金属相对于全国水系沉积物均值有一定程度富集,其中 Cu、Cd、Ni 的富集倍数相对较高,而 Cr 在该河段存在普遍富集。

(3)该河段重金属平均潜在生态风险为轻微等级,但部分点位 Cd、Hg 已达到中等污染水平。潜在生态风险的平均累积指数也处于轻微级别,但在人工改造程度较高的点位(YH-07)达到中等程度。从自然河段区至农田耕作区,再进入河道人为改造区,各重金属的风险指数及多种重金属累积风险指数逐渐升高,沿水流方向表现出两端高、中间低的趋势。

(4)针对洋河万全段重金属高风险多集中在 YH-02 ~ YH-03 段以及 YH-07 ~ YH-09 段这一空间特征,结合河道周边产业布局,提出农业耕作重点控制区、河道改造重点控制区、洋河水源保护缓冲带 3 个风险管理功能区,以及转换农资产品使用方式、加强施工监管等应对措施。

参考文献:

- [1] 陈静生,刘玉机. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [2] 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.
- [3] Wang X L, Li Y. Distribution and fractionation of heavy metals in long-term and short-term contaminated sediments [J]. *Environmental Engineering Science*, 2012, **29**(7): 617-622.
- [4] Forstner U, Wittmann G T W. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 110-112.
- [5] Bertin C, Bourg A C M. Trends in the heavy metal content (Cd, Pb, Zn) of river sediments in the drainage basin of smelting activities [J]. *Water Research*, 1995, **29**(7): 1729-1736.
- [6] Lin J G, Chen S Y. The relationship between adsorption of heavy metal and organic matter in river sediments [J]. *Environment International*, 1998, **24**(3): 345-352.
- [7] 陈伟. 官厅水库流域上游张家口市点源污染调查分析[J]. *水资源保护*, 2004, **20**(1): 46-48.
- [8] Wang T Y, Lu Y L, Luo W, et al. Heavy metal and pesticide residues in soils around the Guanting Reservoir and environmental risk assessment [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, **22**(4): 57-61.
- [9] 梁涛,王浩,丁士明,等. 官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J]. *地理科学进展*, 2003, **22**(1): 38-44.
- [10] 李俊杰,李静洁. 张家口市洋河、桑干河流域水环境健康风险评价[J]. *中国环境监测*, 2008, **24**(5): 92-95.
- [11] 庞博,王铁宇,吕永龙,等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 379-384.
- [12] Luo W, Lu Y L, Giesy J P, et al. Effects of land use on concentrations of metals in surface soils and ecological risk around Guanting Reservoir, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, **29**(6): 459-471.
- [13] 朱朝云,王铁宇,徐笠,等. 农药企业场地土壤重金属污染状况及风险评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, **23**(4): 67-72.
- [14] Xu L, Luo W, Wang T Y, et al. Status and fuzzy comprehensive assessment of metals and arsenic contamination in farmland soils along the Yanghe River, China [J]. *Chemistry and Ecology*, 2011, **27**(5): 415-426.
- [15] US EPA Method 200. 8. Determination of Trace Elements in Waters and Wastewaters by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [EB/OL]. <http://www.epa.gov/sam/pdfs/EPA-200.8.pdf>.
- [16] US EPA Method 3050B. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils [EB/OL]. <http://www.epa.gov/sam/pdfs/EPA-3050b.pdf>.
- [17] GB/T 22105.1-2008, 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法[S].

- [18] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [19] 邓代永, 孙国萍, 郭俊, 等. 典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1700-1706.
- [20] Chandia C, Salamanca M. Long-term monitoring of heavy metals in Chilean coastal sediments in the eastern South Pacific Ocean [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, **64**(10): 2254-2260.
- [21] Hu B Q, Li G G, Li J, *et al.* Spatial distribution and ecotoxicological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the southern Bohai Bay, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(6): 4099-4110.
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [23] 程岩, 刘月, 李富祥, 等. 鸭绿江口及毗邻浅海沉积物重金属富集特征与潜在生态风险比较[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(5): 516-525.
- [24] 范文宏, 张博, 张融, 等. 锦州湾沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(1): 54-58.
- [25] Lin C Y, He M C, Liu X T, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of toxic trace elements in the Xi River, an urban river of Shenyang city, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(5): 4321-4332.
- [26] Sharmad T, Bidhendi G R N, Karbassi A R, *et al.* Historical changes in distribution and partitioning of natural and anthropogenic shares of heavy metals in sediment core from the southern Caspian Sea [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **67**(3): 799-811.
- [27] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [28] GB 17323-1998, 瓶装饮用纯净水[S].
- [29] 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国各类沉积物化学元素平均含量[J]. 物探与化探, 1995, **19**(6): 468-472.
- [30] 鄢明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [31] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammopolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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

国内外公开发行人