

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	《环境科学》征稿简则(4166)
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	编辑征稿通知(4172)

北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究

张伟^{1,2}, 张洪^{1*}, 单保庆¹

(1. 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; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 选取北运河源头区沙河水库为研究对象, 建立沙河水库沉积物年代学序列, 分析其中 6 种重金属 (Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn) 的时空分布特征, 并从重金属富集系数、与区域经济发展的关联分析等方面探讨其来源。研究表明, 沉积物 30 cm 深度处对应年代为建坝时间 1960 年。库心区沉积物 Pb 和 Mn 的含量比较恒定, 平均含量分别为 $30.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $735.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 重金属 Cr、Cu、Ni、Zn 则明显出现累积, 与北京市土壤背景值相比均超过 2 倍以上。1960 年至 80 年代中期, 沉积中 Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量随时间变化平缓, 平均含量依次为 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $36.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $31.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $121.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而从 80 年代中期至 2000 年, 其含量随时间呈明显增加趋势, 该期间 4 种重金属平均含量分别是 80 年代中期之前含量 1.4、2.1、2.8 和 4.3 倍, 累积现象严重。重金属含量的空间分布为水库中央含量及富集程度高于出、入水库口。对重金属的来源分析表明 Cr、Cu、Ni 和 Zn 主要是由人为源输入, 而 Mn 和 Pb 是由自然源输入的。

关键词: 北运河; 沙河水库; 沉积物; 重金属; 来源

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4284-07

Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River

ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Hong¹, SHAN Bao-qing¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Shahe Reservoir, in the upper reach of the North Canal River, was selected for researching on sediments heavy metals pollution. History of the sediments was build and six heavy metals (Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) were analyzed for distribution characteristics, the resources of heavy metals were also studied by sediments enrichment factor and the relationship between heavy metal contents and socio-economic development in this region. The results showed that the 30 cm depth of the sediments represented the year of 1960, the time when Shahe Dam was built. The average contents of Pb and Mn from Shahe Reservoir central sediments were $30.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $735.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. While Cr, Cu, Ni and Zn had a certain accumulation and their contents were all over 2 times higher respectively comparing to the background values of Beijing soil. From 1960 to mid-1980s, the contents of Cr, Cu, Ni and Zn had a slightly change and their average contents were $51.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $36.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $31.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $121.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. However, during the period of next 20 years, the contents of these four heavy metals were elevated and their average contents were 1.4, 2.1, 2.8 and 4.3 times comparing to the foremost 20 years, which indicated that the enrichment of heavy metals was obvious during that time. While for spatial distribution, the sediments from the center of the reservoir had higher contents of heavy metals than the sediments from the estuary of the reservoir. In terms of the sources of heavy metals in the sediments from Shahe Reservoir, it was recognized that Cr, Cu, Ni and Zn were influenced by anthropogenic activities while Mn and Pb were mainly originated from natural sources.

Key words: the North Canal River; Shahe Reservoir; sediment; heavy metal; source

水体沉积物中重金属因具有高毒性和累积性^[1]而一直广受关注。进入水体的重金属大部分被水中悬浮颗粒物所吸附并最终在水体沉积物中累积^[2], 当环境条件 (溶解氧、pH、氧化还原电位等) 改变, 沉积物中的重金属可能会释放出来而导致水体“二次污染”^[3], 从而对水生态系统以及人类的健康构成威胁^[4]。

随着社会经济的高速发展和城市化进程的加快, 我国一些主要城市的河流面临着严重的重金属污染问题^[5~10]。戴奇等^[6]研究上海 4 条典型城市河流发现其沉积物中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量均超出国

家标准, 其中 Cd 污染为强生态危害。唐阵武等^[7]则发现武汉市区和近郊区的 9 条城市河流沉积物中 Cd、Zn 富集严重。朱先芳等^[8]对北京北部城市河流研究发现 Cr 和 Zn 在表层沉积物中有较高的富集; 李莲芳等^[10]研究北京温榆河发现 80% 以上的表层沉积物样点均出现了重金属富集。

近年来, 北京的城市化进程十分迅速。据统计,

收稿日期: 2012-01-11; 修订日期: 2012-06-24

基金项目: 中国科学院对外合作重点项目 (GJHZ0908); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (20907067)

作者简介: 张伟 (1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物污染化学, E-mail: zhangw084629@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hongzhang@rcees.ac.cn

2008 年北京国内生产总值是 1980 年的 75 倍, 同期城市聚居人口翻一番。人口的剧增与产业的迅速发展导致城市生活污水与工业废水大量排放, 而部分区域污水处理设施落后, 城市河流接纳了大量的污水, 加之区域干旱、天然径流缺乏, 使得河流污水补给的特征日益明显, 这必然会导致区域内城市河流沉积物中重金属的大量输入和累积。作为典型的城市污染输入的北运河源头区, 接收北京市昌平区和海淀区的污水, 其纳污量日益增加, 同时由于沙河闸的拦截作用, 上游河流携带的悬浮颗粒物在沙河水库累积, 其水体沉积物的重金属也有可能存在较大的风险。本研究利用沙河水库沉积柱建立沉积物的年代学序列, 分析沉积物中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 等 6 种重金属元素含量的分布特征, 评价其污染状况和生态风险, 并从重金属富集、含量的相关性及其与区域产业发展的关联等方面对其来源进行探讨, 以期为城市化区域重金属污染及风险的评估和控制提供科学依据和参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

沙河水库所在的北运河源头区属北运河水系 (图 1), 发源于燕山南麓的昌平、延庆、海淀一带, 是北运河水系重要支流之一。包含的流域面积 1125 km², 其中山区面积约占 75%。流域内 3 条主要支流东沙河、南沙河和北沙河在沙河水库相汇。沙河水库

库建于 1960 年, 水库总面积约 1.8 km², 总库容 2 045 万 m³。

北运河源头区地处温带大陆性季风气候, 多年平均降雨量为 602 mm, 而枯水年降雨量仅为 339 mm; 年内降雨量不均, 其中汛期 (6 ~ 9 月) 降雨量约占全年的 84%。近年来降雨量持续减少, 加之连续干旱, 年均蒸发量高达 1 815.5 mm。北运河源头区来水主要由雨水和污水组成, 1999 年 ~ 2005 年污水年均入库量约占来水总量的 55%。

1.2 样品采集与分析

为考察沙河水库沉积物重金属的污染特征, 共布置如图 1 所示 7 个采样点。其中 1、6、7 号采样点分别为水库出、入库口, 2 ~ 5 号采样点为水库中央库心区。2010 年 8 月 9 日用自重力柱状采样器 (UWITEC, 奥地利) 采集 7 根沉积柱。每根沉积柱按 9 mm 分层, 除含水率选用鲜样立即测定 (烘干法) 外, 其它土样经冷冻干燥 (温度 -50℃, 真空度 15 Pa) 后去除植物和贝类等残体研磨过 100 目筛备用。6 种重金属元素 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 及金属元素 Fe 的含量测定选用 Tessier 方法^[11], 即称取 0.200 g 干样于聚四氟乙烯管, 加入 6 mL 王水和 2 mL 氢氟酸, 经微波消解仪 (MARS X PRESS, CEM, USA) 消解, 再在 160℃ 下赶酸 2 h, 利用 ICP-OES (OPTIMA 2000DV, Perkin Elmer, USA) 和 ICP-MS (7500a, Agilent, USA) 进行定量测定。实验过程利用标准物质和平行样品进行质量控制, 各重金属回收率都在 80% ~ 120% 之间, 结果以均值表示。

1.3 数据处理及方法

采样点分布图用 ArcGIS 9.3 制作; 数据处理和统计分析在 SPSS 18.0 上进行; 数据制图在 Origin 7.5 上完成。

2 结果与讨论

2.1 库心区沉积物含水率特征及沉积速率估算

中央库心区 (2 ~ 5 号点) 因受水力条件、人为影响等干扰因素较小, 具有较为稳定的沉积环境, 故其沉积物含水率的垂直分布能反映水库颗粒物不同年代的沉积特征。由图 2 知, 水库中央库心区沉积物平均含水率范围为 35.0% ~ 92.4%, 且随深度增加整体呈下降趋势直至趋于稳定。在 0 ~ 30 cm 之间, 含水率随深度呈明显递减趋势, 且波动较大, 变异系数高达 34.0%; 而在 30 cm 以下, 含水率变化平缓且比较恒定, 其平均值为 35.7%, 变异系数仅为 1.8%。

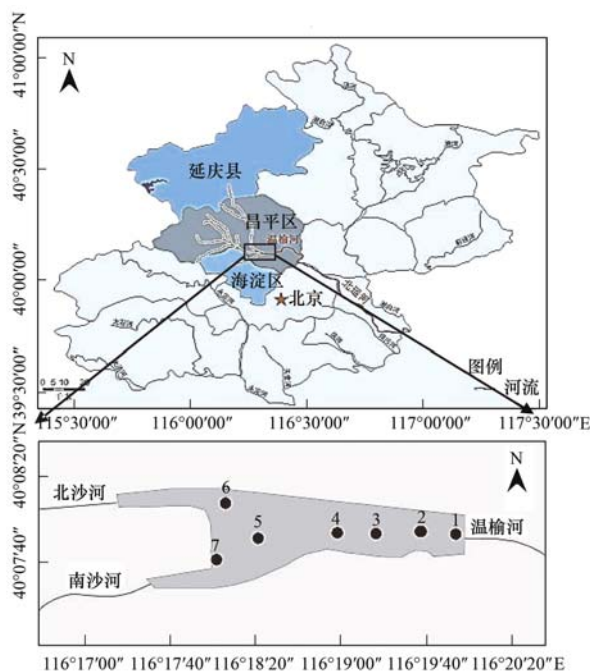


图 1 沙河水库沉积物采样点示意

Fig. 1 Distribution of sediments sampling sites in Shahe Reservoir

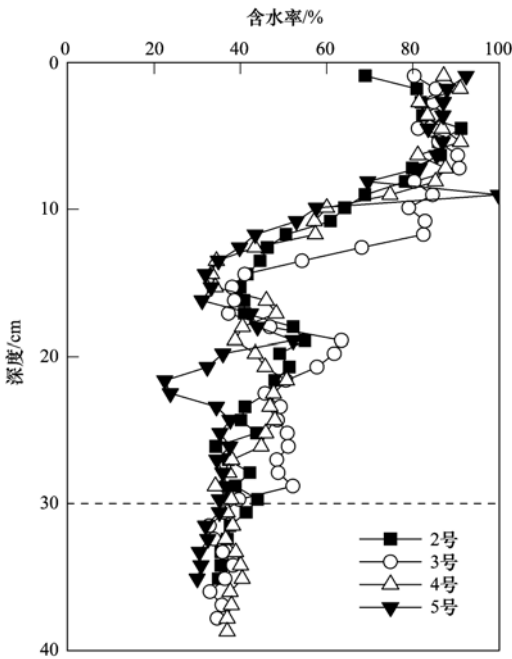


图2 沉积物中含水率垂直分布

Fig. 2 Distributions of water contents in the sediments

沙河水库是由河道改建的人工水库,建于1960年.河道位于北运河源头区,建坝前河道水流冲刷作用强,颗粒物不易在河道内沉降;建坝后,由于沙河大坝的拦截作用,河水流速趋缓,利于悬浮颗粒物在水库中沉积.建坝前由于河道的水流冲刷作用,沉积物含水率较为稳定;而建坝后水库具有较好的

沉积环境,水体中悬浮颗粒物不断累积在沉积物中使得沉积物含水率随着深度增加逐渐减小.利用这种建坝前后沉积环境改变而导致沉积物含水率变化模式可以建立沉积柱的年代学序列,进而粗略估算沙河水库颗粒物的沉积速率.从沉积柱的含水率的垂直分布特征(图2)来看,在30 cm以下沉积物含水率相对稳定,因此,可认为30 cm深度处对应时间为建坝时间(1960年).建坝至今共50年,沉积物的沉积厚度约为30 cm,由此估算沙河水库沉积物线性沉积速率为 $0.60\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$.一些研究结果表明^[12],国内主要湖泊如太湖、巢湖、滇池、洞庭湖等沉积物沉积速率在 $0.25\sim1.84\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间.九寨沟地处山区,与北运河源头区所处的地形相似,其湖泊沉积物的沉积速率约 $0.79\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[13],沙河水库沉积物的沉积物速率估算值($0.60\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$)与之相近,因此,可以利用沙河水库估算的沉积速率建立近似的沉积深度与年代的关系.

2.2 库心区沉积物中重金属含量垂直分布特征

水库的中央库心区(2~5号点)具有良好的沉积环境,其沉积物中重金属在垂直方向上的分布特征能说明重金属的分布情况,分布如图3所示.

库心区沉积物在垂直方向上对应不同年代的Pb和Mn的含量都比较稳定,2种重金属的变异系数均小于20%,且与北京市土壤背景值中相应的重金属含量(表1)较为接近. Pb的含量范围为20.31

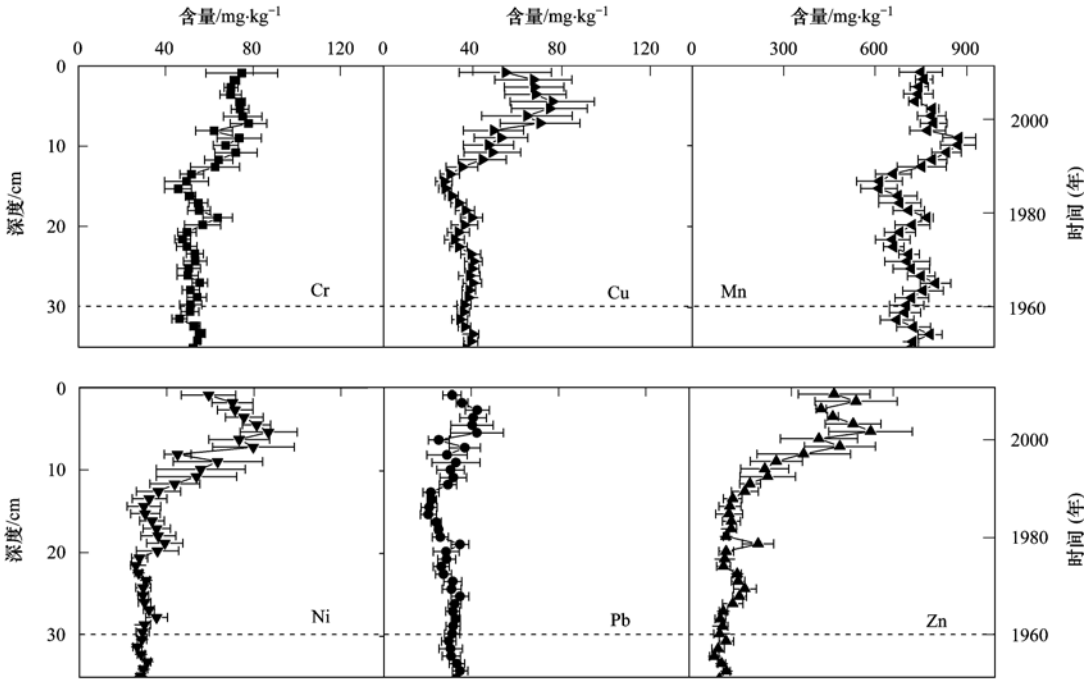


图3 沉积物中重金属垂直分布特征

Fig. 3 Distributions of heavy metals contents in the sediments

~42.73 mg·kg⁻¹,平均值为 30.6 mg·kg⁻¹,为北京市土壤背景值(24.6 mg·kg⁻¹)的 1.2 倍,其含量的变异系数为 19.6%; Mn 含量的变异系数为 18.6%,平均含量为 735.1 mg·kg⁻¹,为北京市土壤背景值的 1.3 倍。

重金属 Cr、Cu、Ni、Zn 在垂直方向上则明显出现累积,与北京市土壤背景值相比均超过 2 倍以上。Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量范围分别为 45.8 ~ 78.0 mg·kg⁻¹、26.9 ~ 75.9 mg·kg⁻¹、26.0 ~ 86.8 mg·kg⁻¹和 87.7 ~ 533.0 mg·kg⁻¹,含量的变异系数依次为 16.8%、32.4%、42.8%和 65.1%。

从不同时期的沉积物重金属含量来看,1960 年至 80 年代中期沉积中重金属含量随时间变化平缓,Cr、Cu、Ni 和 Zn 平均含量依次为 51.2 mg·kg⁻¹、36.0 mg·kg⁻¹、31.5 mg·kg⁻¹和 121.6 mg·kg⁻¹,分别为北京市土壤背景值的 1.7、1.9、1.2 和 2.1 倍;而从 80 年代中期至 2000 年,重金属含量随时间呈明显增加趋势,Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量依次增加 74.3 mg·kg⁻¹、75.9 mg·kg⁻¹、86.8 mg·kg⁻¹和

533.0 mg·kg⁻¹,该期间 4 种重金属平均含量分别是 80 年代中期之前含量的 1.4、2.1、2.8 和 4.3 倍,累积现象严重。

2.3 表层沉积物中重金属空间分布

为分析沙河水库沉积物的重金属的污染状况,对水库表层(0~5 cm)沉积物中 6 种重金属含量进行统计,如表 1 所示。

与北京市土壤背景值(表 1)相比,水库中央库心区表层沉积物中 6 种重金属均呈现不同程度的累积,以 Cu、Zn 为例,其平均含量分别高达 68.1 mg·kg⁻¹和 456.6 mg·kg⁻¹,分别为北京市土壤背景值的 3.6 倍和 7.9 倍。水库中央库心区表层沉积物中各重金属平均含量均高于出、入水库口的含量,其原因可能是由于两者水力条件的不同导致沉积物所处的沉积环境不同造成的。相比于水库口,库心区因水流速度缓慢、水交换能力弱而更有利于悬浮颗粒物沉积,而颗粒物对水体中重金属具有较高吸附性,从而使得库心区的表层沉积物中重金属含量要高于出入水库口。

表 1 表层沉积物重金属含量分布、北京市土壤背景值/mg·kg⁻¹

Table 1 Heavy metals contents of the surface sediments and the background values of Beijing soil/mg·kg ⁻¹							
水库位点	项目	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
出库口(1 号)	含量	11.58 ~ 43.97	14.2 ~ 38.2	446.7 ~ 590.6	9.1 ~ 23.2	13.2 ~ 19.2	56.8 ~ 119.5
	均值	23.71	21.03	534.55	13.47	16.03	69.38
北沙河入库口(6 号)	含量	54.1 ~ 78.2	51.5 ~ 115.7	602.8 ~ 808.8	41.2 ~ 76.8	13.1 ~ 37	100 ~ 842.9
	均值	63.54	84.62	688.44	66.46	30.34	399.86
南沙河入库口(7 号)	含量	39.8 ~ 51.7	27.9 ~ 35.2	499.5 ~ 549.2	23.9 ~ 32.6	27.7 ~ 40.7	61.9 ~ 166.4
	均值	44.02	31.35	523.40	28.15	31.80	122.08
库心区(2~5 号)	含量	69.81 ~ 74.97	54.68 ~ 393	731.25 ~ 788.97	59.30 ~ 86.84	31.15 ~ 42.73	387.13 ~ 532.98
	均值	72.53	68.07	752.56	74.14	38.88	456.55
北京市土壤背景值 ^[14]		29.8	18.7	571	26.8	24.6	57.5

北沙河入库口表层沉积物中 Cu、Zn 含量分别为 84.6 mg·kg⁻¹、399.9 mg·kg⁻¹,分别为北京市土壤背景值的 4.5 倍、7.0 倍,也是南沙河入库口表层沉积物中 Cu、Zn 含量的 2.7 倍、3.3 倍。分析其原因可能是水动力对北沙河入库口的影响大于对南沙河入库口,同时也可能是上游入库支流接收不同行业排放的废水的类别或总量的差异造成的。

2.4 重金属的来源分析

沉积物中重金属来源大体上分为自然源、人为源两类,前者主要来自于岩石淋溶、矿物风化等天然的地球化学过程,后者则主要来自于人类生活、生产等活动带来重金属的排放^[15]。研究不同年代沉积物中重金属的输入与研究区域人类生产、生活之间的关联性,可以推断不同种类重金属的可能的

来源。

判断沉积物中总金属的来源的方法有很多,计算沉积物中不同重金属的富集系数^[16,17](Enrichment factor,EF),不仅可以说明重金属的污染程度,也可以间接地区分重金属是来自自然源还是人为源。由于 Fe 在地壳中丰度高(占地壳元素总量的 4.75%),在中性和碱性环境中溶解度低、不易迁移,并且其生物利用度也很低、性质较为稳定,因此选择 Fe 作为富集系数法的参比元素^[18]用于沉积物中重金属富集系数的计算,结果如图 4 所示。

自 1960 年沙河水库建坝以来,Pb 和 Mn 含量的变化相对稳定(图 3),其富集系数基本维持在 1.0 左右(图 4),与北京市土壤背景值较为接近,这说明自建坝以来沙河水库沉积物中的这 2 种重金属主要

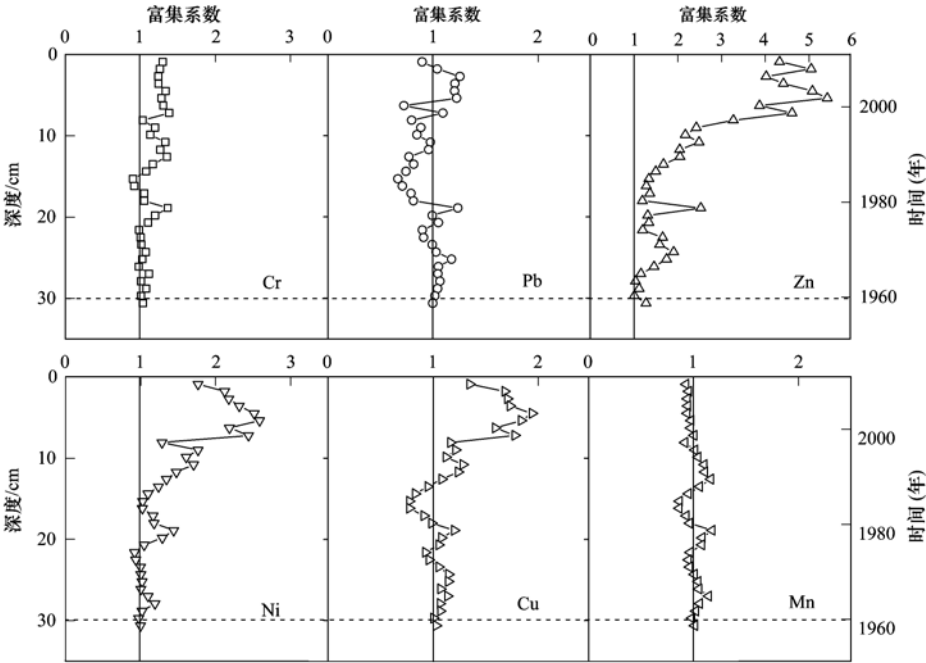


图4 沉积物中重金属富集系数
Fig. 4 Enrichment factors of heavy metals in the sediments

来源于自然风化过程,即主要是自然源输入的. 而对 Cr、Cu、Ni 和 Zn 这 4 种重金属元素来说,自 60 年代至 80 年代中期,其含量随时间变化平缓,4 种重金属富集系数均在 1.0 左右,与背景值较为接近;80 年代中期至 2000 年,Cr、Cu、Ni 和 Zn 富集系数均大于 1.0,存在明显的富集,其中 Zn 的富集系数在 2000 年以后甚至超过了 5.0,富集现象十分严重. 4 种重金属的富集系数随着时间的变化依然有增大趋势,这表明这 4 种重金属主要是人为源输入且输入强度依然在加大. 杜臣昌等^[19]研究结果表明巢湖西部湖区 Cu、Zn 等污染物的人为污染贡献量显著增加是自 1980 年开始的,这个时间节点与本研究得到的结论是基本一致的.

为了解区域社会经济发展过程与城市河流重金属污染贡献,对 6 种重金属沉积历史与区域的 GDP 及人口发展变化作关联分析. 由于获取研究区域 1960 年至 1993 年社会经济发展数据存在一定难度,而研究区域的第二、三产业产值、总产值及人口(1993 年至 2008 年)与北京市相应产值及人口呈正相关($k > 0$,见表 2)、且线性拟合效果较好($R^2 > 0.9$),即研究区域与北京市第二、三产业产值和总产值发展及人口增长趋势具有同步性. 因此选用北京三大产业及人口发展变化同重金属进行聚类分析.

为减小变量之间不同数量级带来的影响,先将

数据标准化后再进行聚类分析,结果见图 5. 当聚类距离选为 10~15 时,可以将各重金属元素分为两大类,即第一类为 Cr、Cu、Ni 和 Zn 等 4 种重金属,与三大产业 GDP 及人口关系密切;第二类为 Pb 和 Mn,与三大产业 GDP 及人口关系相对疏远. 由此可推测区域社会经济发展对区域水体沉积物内的 Cr、Cu、Ni 和 Zn 输入有一定的贡献,及这 4 种重金属可能主要是由人为源输入的;而 Mn 和 Pb 与流域社会经济发展无明显关系,推断应该是自然源输入的.

表 2 研究区域与北京社会经济线性关系¹⁾

Table 2 Linear relationship of the socio-economy between study area and Beijing				
项目	总产值	第二产业产值	第三产业产值	人口
k	0.26	0.22	0.28	1.42
R^2	0.98	0.98	0.97	0.98

1) $y = kx + b$, x 和 y 为北京市和研究区域相应变量, k 和 b 为常数; 1993~2010 年数据来源北京统计年鉴

研究北京三大产业 GDP 及人口变化的历史(图 6)可以看出,60 年代到 80 年代中期,各产业的 GDP 发展缓慢,即区域的社会经济发展比较落后,此时 6 种重金属的含量(图 3)及富集系数(图 4)都处于相对较低水平. 自 80 年代中期以后,三大产业迅猛发展,各产业 GDP 数值呈指数增长,Pb 和 Mn 的含量和富集系数依然保持稳定,但 Cr、Cu、Ni 和 Zn 等 4 种重金属元素的含量及富集系数相对 80 年代中期

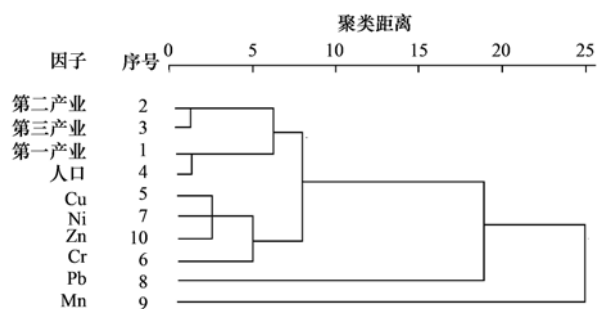


图5 聚类分析的树形图

Fig. 5 Horizontal plot of cluster analysis

之前增加了数倍,这说明该区域内的人类生产、生活活动对重金属尤其是 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的有一定程度的贡献,也表明了水体沉积物中 Cr、Cu、Ni 和 Zn 等 4 种重金属主要是人为源输入的。

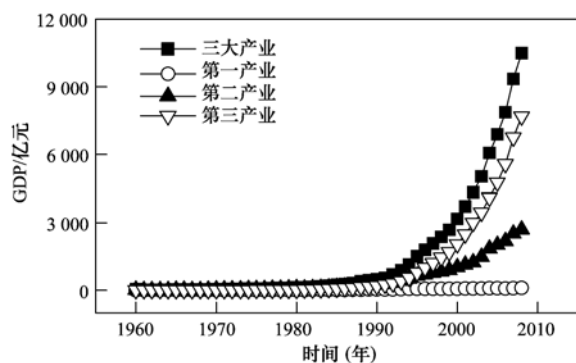


图6 北京市三大产业 GDP 发展变化

Fig. 6 Changes of the three major industrial GDP development of Beijing

自 20 世纪 80 年代以来,北运河上游源头区人口增加及人类生产活动如采矿及金属冶炼加工、废弃物焚烧及处置、电子及皮革行业废水排放、化肥农药生产及使用等工农业生产过程^[20,21]的加剧,导致大量含重金属污染物的农田径流(化肥流失、水土流失)、工业废水、畜禽养殖废水和生活污水排放,致使城市河流污染日趋严重。而水体悬浮颗粒物是河流污染物的主要载体,最终在河口、库湾等缓流水体沉积^[22~24],从而使得沙河水库 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量呈明显增加趋势。

2000 年至 2010 年,沙河水库周边相关化工、电子产业废水排放的处理及控制、大量污水处理设施的兴建及应用,在一定程度上降低了污染物的排放强度,使北运河源头区 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量(图 3)有了明显降低,说明这些治理措施初见成效。但这些重金属的富集系数(图 4)仍然较大,其含量高于北京市土壤背景值数倍(表 1),即表明沙河水库

沉积物中的重金属污染和累积现象依然严重,也存在一定程度的生态风险^[25],因此北京城市污水排放控制和沉积物重金属治理有还需进一步加强和提高。

3 结论

(1)库心区沉积物 Pb 和 Mn 的含量都比较稳定,平均含量分别为 $30.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $735.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与北京市土壤背景值接近;重金属 Cr、Cu、Ni、Zn 在垂直方向上则明显出现累积,与北京市土壤背景值相比均超过 2 倍以上。水库中央库心区表层沉积物重金属含量及富集程度高于出、入水库口。

(2)1960 年至 80 年代中期,沉积中重金属含量随时间变化平缓,Cr、Cu、Ni 和 Zn 平均含量依次为 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $36.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $31.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $121.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而从 80 年代中期至 2000 年,重金属含量随时间呈明显增加趋势,该期间 4 种重金属平均含量分别是 80 年代中期之前的 1.4、2.1、2.8 和 4.3 倍,累积现象严重。

(3)通过从沉积物富集系数、与区域人口、经济发展的关联分析可推断沙河水库沉积物中 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的来源主要是由人为源输入,而 Mn 和 Pb 是由自然源输入的。

参考文献:

- [1] Arnason J G, Fletcher B A. A 40 + year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA [J]. Environmental Pollution, 2003, **123** (3): 383-391.
- [2] Chen C W, Kao C M, Chen C F, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan [J]. Chemosphere, 2007, **66**(8): 1431-1440.
- [3] 孟红明, 张振克. 石梁河水库沉积物中重金属的累积污染研究 [J]. 环境科学研究, 2008, **21**(3): 44-50.
- [4] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments [J]. Water Research, 2003, **37**(4): 813-822.
- [5] 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.
- [6] 戴奇, 李双, 周忠良, 等. 上海城区河道底栖动物群落特征与沉积物重金属潜在生态风险 [J]. 生态学杂志, 2010, **29** (10): 1985-1992.
- [7] 唐阵武, 岳勇, 程家丽. 武汉市中小河流沉积物重金属污染特征及其生态风险 [J]. 水土保持学报, 2009, **23**(1): 132-136.
- [8] 朱先芳, 唐磊, 季宏兵, 等. 北京北部水系沉积物中重金属的研究 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(12): 2553-2562.

- [9] Zhang C X, Qiao Q Q, Piper J D A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 3057-3070.
- [10] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(2): 289-297.
- [11] Tessiera A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [12] 朱金格, 胡维平, 胡春华. 太湖沉积速率分布演化及其淤积程度健康评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(6): 703-706.
- [13] 陈盼, 唐亚, 乔雪, 等. 山地灾害和人类活动干扰下九寨沟下季节海的沉积变化 [J]. *山地学报*, 2011, **29**(5): 534-542.
- [14] 葛晓立, 刘晓端, 潘小川, 等. 密云水库水体的地球化学特征 [J]. *岩矿测试*, 2003, **22**(1): 44-48.
- [15] Frignani M, Bellucci L G. Heavy metals in marine coastal sediments: assessing sources, fluxes, history and trends [J]. *Annali di Chimica*, 2004, **94**(7-8): 479-486.
- [16] Loska K, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry [J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 159-165.
- [17] Rubio B, Nombela M A, Vilas F. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**(11): 968-980.
- [18] 张云, 张宇峰, 胡忻. 南京不同功能区街道路面积尘重金属污染评价与源分析 [J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(11): 1376-1381.
- [19] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东, 等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价 [J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(1): 59-66.
- [20] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metal [J]. *Nature*, 1988, **333**(6169): 134-139.
- [21] Ratha D S, Sahu B K. Source and distribution of metals in urban soil of Bombay, India, using multivariate statistical techniques [J]. *Environmental Geology*, 1993, **22**(3): 276-285.
- [22] 刘博, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟 [J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(5): 52-61.
- [23] 刘永伟, 毛小苓, 孙莉英, 等. 深圳市工业污染源重金属排放特征分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **6**(2): 279-285.
- [24] 黄治平, 张克强, 徐斌, 等. 猪场废水灌溉农田土壤重金属污染及风险评价 [J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(9): 132-137.
- [25] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3496-3502.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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