ISSN 0250-3301　CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷　第5期

Vol.37　No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第5期
2016年5月15日

目 次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 …… 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐珺,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京APEC期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 …… 周雪明,亓雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓朗,贺克斌,马永亮(1602)
利用SPAMS分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 …… 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气$PM_{2.5}$污染特征及来源解析 …… 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气$PM_{2.5}$的污染水平及来源解析 …… 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 …… 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 …… 陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 …… 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 …… 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
$CoCuMnO_x$光催化氧化多组分VOCs特性及其动力学 …… 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 …… 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 …… 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$示踪北京城区河流硝酸盐来源 …… 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 …… 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 …… 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 … 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究 …… 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 …… 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 …… 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 …… 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 …… 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 …… 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 …… 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水TOC输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 …… 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 …… 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于PCR-DGGE和拟杆菌(*Bacteroides*)16S rRNA的岩溶地下水粪便污染来源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 …… 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 …… 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 …… 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 …… 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 …… 董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 …… 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 …… 郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选 …… 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米Fe_3O_4磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 …… 钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气SBR处理养猪沼液的短程脱氮性能 …… 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤CO_2和N_2O排放通量的影响 …… 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解CH_4与N_2O浓度特征 …… 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原N_2O排放的影响 …… 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 …… 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 … 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 …… 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 …… 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 …… 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米TiO_2对土壤重金属释放及形态变化的影响 …… 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娴,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中Cr(Ⅵ)的还原动力学 …… 马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 …… 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 …… 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 …… 王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 …… 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旸,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 …… 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价

蔡怡敏[1,2],陈卫平[1],彭驰[1*],王铁宇[1],肖荣波[3]

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室,北京 100085; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 广东省环境科学研究院,广州 510045)

摘要:水源地周边土壤及河道沉积物的环境质量状况极大程度影响着河流饮用水安全. 为调查顺德水道水源地重金属空间分布特征及其污染来源,本研究采集了顺德水道周边表层土壤及其主要支流入河口沉积物,并测定各样品中 Cd、Zn、Pb、Cu、Ni、Cr 等 6 种重金属浓度,最后基于两种潜在生态风险评价方法对其生态风险进行评价. 结果发现,顺德水道表层土壤中 Zn、Cr、Pb、Cu、Ni 和 Cd 平均含量分别为 186.80、65.88、54.56、32.47、22.65 和 0.86 $mg\cdot kg^{-1}$,除 Cu、Ni 外其它重金属均超过顺德土壤背景值; 8 个主要支流入河口间表层沉积物中 6 种重金属元素平均含量依次为:Zn(312.11 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cr(111.41 $mg\cdot kg^{-1}$) > Pb(97.87 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cu(92.32 $mg\cdot kg^{-1}$) > Ni(29.89 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cd(1.72 $mg\cdot kg^{-1}$),除 Ni 之外其余均高于顺德土壤背景值. 主成分分析结果发现表层土壤中 Cr、Ni 含量主要受自然母质影响,Zn、Pb、Cu 和 Cd 主要来源于该地区制造业的废水排放; 沉积物中 6 种重金属均来源于外源输入,受顺德水道周边的工业活动影响. 基于环境生物可利用态的潜在生态风险评价结果发现顺德水道周边表层土壤中 Cd 呈现轻微的潜在生态危害,而入河口沉积物中 Cd 呈现中度的潜在生态危害,土壤和沉积物中 Zn、Pb、Cu 和 Ni 的潜在生态危害程度均表现为轻微. 由于基于环境生物可利用态的潜在生态风险评价充分考虑了土壤理化性质及重金属形态,其结果低于 Hakanson 潜在生态风险评价结果,可避免对重金属的潜在危害程度的高估.

关键词:土壤; 沉积物; 重金属; 环境生物可利用态; 潜在生态风险评价; 顺德水道

中图分类号: X52; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)05-1763-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.05.021

Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China

CAI Yi-min[1,2], CHEN Wei-ping[1], PENG Chi[1*], WANG Tie-yu[1], XIAO Rong-bo[3]

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: Environmental quality of soils and sediments around water source area can influence the safety of potable water of rivers. In order to study the pollution characteristics, the sources and ecological risks of heavy metals Zn, Cr, Pb, Cu, Ni and Cd in water source area, surface soils around the waterway and sediments in the estuary of main tributaries were collected in Shunde, and ecological risks of heavy metals were assessed by two methods of potential ecological risk assessment. The mean contents of Zn, Cr, Pb, Cu, Ni and Cd in the surface soils were 186.80, 65.88, 54.56, 32.47, 22.65 and 0.86 $mg\cdot kg^{-1}$ respectively, and they were higher than their soil background values except those of Cu and Ni. The mean concentrations of Zn, Cr, Pb, Cu, Ni and Cd in the sediments were 312.11, 111.41, 97.87, 92.32, 29.89 and 1.72 $mg\cdot kg^{-1}$ respectively, and they were higher than their soil background values except that of Ni. The results of principal component analysis illustrated that the main source of Cr and Ni in soils was soil parent materials, and Zn, Pb, Cu and Cd in soils mainly came from wastewater discharge of local manufacturing industry. The six heavy metals in sediments mainly originated from industry emissions around the Shunde waterway. The results of potential ecological risk assessment integrating environmental bioavailability of heavy metals showed that Zn, Cu, Pb and Ni had a slight potential ecological risk. Cd had a slight potential ecological risk in surface soils, but a moderate potential ecological risk in surfaces sediments. Because the potential ecological risk assessment integrating environmental bioavailability of heavy metals took the soil properties and heavy metal forms into account, its results of risks were lower than those of Hakanson methods, and it could avoid overestimating the potential risks of heavy metals.

Key words: soil; sediment; heavy metals; environmental bioavailability; potential ecological risk assessment; Shunde waterway

河道沿岸土壤是水陆生态系统的过渡与缓冲区域,可通过物理、化学和生物作用截留多种污染物质,但持久性污染物如重金属则将长期滞留其中[1,2]. 水体沉积物作为水环境中重金属的主要蓄

收稿日期: 2015-10-01; **修订日期**: 2015-12-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(41401588); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-011-005)
作者简介: 蔡怡敏(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为生态风险评价,E-mail:ymcai_st@rcees.ac.cn
* 通讯联系人,E-mail:chipeng@rcees.ac.cn

积介质,可以反映水体长期受重金属污染的状况.河道沿岸土壤及沉积物中重金属污染不仅对河道周边及其水体动植物产生危害,同样地,可在一定条件下进入水体导致“二次污染”[3~6].而水源地周边土壤及河道沉积物的环境质量状况极大程度影响着河流饮用水安全.近年来,国内外学者对水环境重金属污染开展研究众多,但重点多为水体或河流沉积物中重金属的含量特征[3,7,8]、形态赋存[9~11]、来源分析[12,13]及污染评价[14]等,而对以河道沿岸土壤及河道沉积物相结合的重金属研究相对较少.

潜在生态风险评价法常用于评价水体、土壤、沉积物、街尘等介质中重金属对环境的风险.例如尚林源等[15]采用 Hakanson 潜在生态风险指数法对密云水库入库河流沉积物中的重金属的潜在生态风险进行评价,确定不同入库河流河段的风险等级,为水源地入库河流的污染物控制提供依据; Hu 等[16]通过潜在生态风险评价法对珠江三角洲地区不同土地类型下的土壤风险进行排序.近年来,有学者提出应以重金属的环境生物可利用态代替重金属总量,或基于重金属不同形态来评估其潜在生态风险[17,18].这类方法不仅评估污染物总量,同时考虑到不同区域中土壤性质对重金属迁移和生物可利用性的影响,其评价结果也更为合理.

顺德水道位于珠江三角洲平原中部,是顺德区的重要饮用水源地,河道周边分布一定量的工业企业和农业用地,其生产活动对顺德水道水质、周边土壤及沉积物环境构成潜在威胁.本研究以顺德水道周边表层土壤及 8 个主要河道支流入河口沉积物为对象,通过采样分析 Cd、Zn、Pb、Cu、Ni 和 Cr 这 6 种重金属含量,揭示两种介质中重金属污染的空间分布特征,分析土壤及沉积物中重金属污染物来源,对环境生物可利用态的重金属进行潜在生态风险评价,并与传统的 Hakanson 潜在生态风险评价结果进行对比,以期为河道周边土壤及沉积物重金属污染生态风险研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

顺德水道位于佛山市顺德区,是佛山市和广州市的重要饮用水源地.河道周边分布一定量的工业企业和农业用地,其生产活动对顺德水道水质、周边土壤及沉积物环境构成威胁.为研究顺德水道土壤和沉积物中重金属分布特征及其风险大小,沿河道东西走向共设置 51 个 0 ~ 20 cm 的表层土壤采样点,每一个土壤样品均由样点周围 100 m^2 范围内采集的 5 个土样混合而成.同时采集顺德水道 8 个主要支流入河口沉积物,自上游至下游依次为 A、B、C、D、E、F、G、H,如图 1.

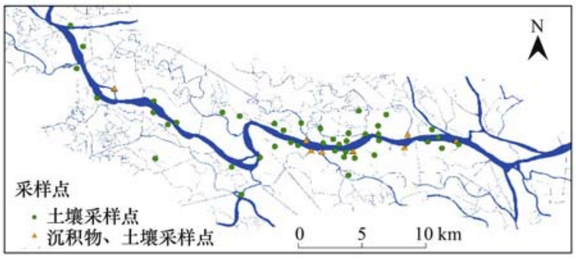


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品分析与测定

土壤、沉积物室内风干后磨细过 100 目尼龙筛,重金属参照 USEPA 3050 建议的消煮方法改进,以 HCl-HNO_3-HF-$HClO_4$ 湿法消解[17],Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 采用 ICP-OES 测定,Cd 采用石墨炉原子吸收测定.分析过程中用土壤标样 GSS-16 进行质量控制,同时进行空白和重复实验(重复率为 10%).实验中所用试剂均为优级纯,溶液配制用水均为超纯水,所有玻璃器皿均在 10% 硝酸溶液中浸泡过夜后洗净使用.各元素回收率在 93.58% ~ 110.98% 之间,符合质量控制标准.

土壤、沉积物理化性质采用常规方法测定:pH 测定采用电位法[19](水土比为 5∶1,DENVER UB-7 pH 计测定);有机碳采用 Vario ELⅢ元素分析仪测定(取 0.5 g 土壤,由 30 mL 1 mol·L^{-1} 盐酸溶液振荡 24 h,去除无机碳后测定).

1.3 数据处理

常规数理统计分析采用 SPSS 12.0 软件完成,主成分分析及相关性分析采用 R 3.2.0 软件完成,空间分布图通过 ArcGIS 9.3 及 Sigmaplot 12.0 软件制作.

1.4 评价方法

本研究分别采用 Hakanson 潜在生态风险指数法与基于环境生物可利用态的分层潜在生态风险评价法对研究区内土壤、沉积物进行重金属的总量及环境生物可利用态进行风险评价,比较两种评价方法的风险程度.

1.4.1 Hakanson 潜在生态风险指数法

采用 Hakanson 潜在生态风险指数法[20]对重金属污染进行生态风险评价,该方法以土壤/沉积物中重金属的元素背景值为基准,结合重金属的生物毒

性(毒性响应因子)、环境效应(污染指数)计算其潜在生态风险系数,其生态风险等级判定依据见表1,评价公式如下:

$$\mathrm{RI} = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_i^n (T_r^i \times C_D^i / C_R^i)$$

式中,C_f^i 为重金属元素 i 的污染指数; C_D^i 为土壤中重金属元素 i 的实测含量; C_R^i 为参照值; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性响应因子; E_r^i 为重金属元素 i 的潜在生态风险系数; RI 为综合潜在生态风险指数.

1.4.2 基于环境生物可利用态的分层潜在生态风险评价法

大量研究表明土壤中重金属的形态与农作物对重金属的吸收量存在良好的相关性,其中水溶态重金属可直接被植物利用,被称为环境生物可利用态.与 Hakanson 潜在生态风险评价指数法相比,基于环境生物可利用态的分层潜在生态风险评价法引入“环境生物毒性响应系数(T_b^i)× 毒性响应因子(T_e^i)”代替“传统的毒性响应因子(T_r^i)”,对土壤及沉积物的生态风险评价采用分层方法,以重金属的环境生物可利用性进行潜在生态风险评价[17, 18, 21],定量计算重金属的潜在风险指数,并根据表1判定其生态风险等级,其评价公式如下[17, 18]:

$$\mathrm{RI} = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_b^i T_b^i \times T_e^i \times C_f^i)$$

$$= \sum_i^n \left(\sqrt{\frac{R_b^i}{P_b^i}} \times T_e^i \times \frac{C_D^i}{C_R^i} \right)$$

式中,T_b^i 为土壤重金属元素 i 的环境生物毒性响应系数; R_b^i 为样品中重金属元素 i 水溶态占总含量的质量分数,其中重金属元素 i 的水溶态含量参照文献[22],5 种重金属元素的水溶态预测模型如表2所示; P_b^i 为参照土壤的相应比值; T_e^i 为重金属元素 i 的毒性响应因子; 其余系数与 Hakanson 潜在生态风险指数法相同.

其中以广东省顺德地区背景值[23]为参照值, T_r^i、T_e^i 分别参照文献[18, 24],依次为:Cd(30,15)、Zn(1,1)、Pb(5,4)、Cu(5,2)、Ni(5,3)、Cr(2,11). 研究区内 pH 范围为6.5~7.5,均值7.0,有机碳质量分数范围为1.03%~1.93%,均值1.36%. 本研究中 Cr 含量[18]低于国家二级标准(200 mg·kg^{-1},pH: 6.5~7.5),且缺少其水溶态预测模型,因此仅考虑 Cd、Zn、Pb、Cu、Ni 这5种重金属元素的潜在生态风险评价.

表1　潜在生态风险指数等级划分表

Table 1　Classification of potential ecological risk index

单一重金属潜在生态风险系数(E_r^i)		综合潜在生态风险指数(RI)	
阈值区间	潜在生态危害程度	阈值区间	潜在生态危害程度
$E_r^i<40$	轻微	RI<150	轻微
$40\leq E_r^i<80$	中度	150≤RI<300	中度
$80\leq E_r^i<160$	强度	300≤RI<600	强
$160\leq E_r^i<320$	很强	RI≥600	很强
$E_r^i\geq 320$	极强		

表2　5 种重金属元素的水溶态含量预测模型[22]

Table 2　Predicting models for dissolved concentrations of Cd, Zn, Pb, Cu and Ni

元素	回归曲线1)	R^2
Cd	$\log_{10}(\mathrm{DM}) = (-0.47\pm0.02)\mathrm{pH} + (1.08\pm0.02)\log_{10}(\mathrm{TM}) - (0.81\pm0.05)\log_{10}(\mathrm{SOM}) + (3.42\pm0.11)$	0.884**2)
Zn	$\log_{10}(\mathrm{DM}) = (-0.55\pm0.04)\mathrm{pH} + (0.94\pm0.08)\log_{10}(\mathrm{TM}) - (0.34\pm0.12)\log_{10}(\mathrm{SOM}) + (3.68\pm0.31)$	0.618**
Pb	$\log_{10}(\mathrm{DM}) = (-0.37\pm0.04)\mathrm{pH} + (0.56\pm0.07)\log_{10}(\mathrm{TM}) + (1.81\pm0.22)$	0.347**
Cu	$\log_{10}(\mathrm{DM}) = (-0.21\pm0.02)\mathrm{pH} + (0.93\pm0.05)\log_{10}(\mathrm{TM}) - (0.21\pm0.02)\log_{10}(\mathrm{SOM}) + (1.37\pm0.14)$	0.611**
Ni	$\log_{10}(\mathrm{DM}) = (-1.05\pm0.09)\mathrm{pH} + (1.21\pm0.22)\log_{10}(\mathrm{TM}) - (0.85\pm0.21)\log_{10}(\mathrm{SOM}) + (7.02\pm0.62)$	0.727**

1)DM(水溶态重金属,mg·L^{-1}); TM(重金属总量, mg·kg^{-1}); SOM(有机质,以 C% 计); 2) ** 表示 $P<0.01$

2 结果与讨论

2.1 顺德水道周边表层土壤重金属含量及空间分布

顺德水道周边表层土壤中重金属元素含量的范围及平均值见表3,各重金属平均含量大小依次为: Zn(186.8 mg·kg^{-1}) > Cr(65.88 mg·kg^{-1}) > Pb(54.56 mg·kg^{-1}) > Cu(32.47 mg·kg^{-1}) > Ni(22.65 mg·kg^{-1}) > Cd(0.86 mg·kg^{-1}). 与史瑾瑾[25]在顺德乐从的研究对比,发现 Cd 和 Zn 元素含量较为接近,Pb、Cu 和 Ni 元素含量略低于其研究结果; 与刘子宁等[26]在顺德区的研究结果相比,Zn、Cu、Pb和Cr元素含量近似,而Cd元素含量高

表 3　顺德水道表层土壤及表层沉积物重金属元素含量

Table 3　Heavy metal contents in surface soils and sediments of Shunde waterway

类型	统计值	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr	文献
表层土壤	最小值/mg·kg^{-1}	0.12	59.11	11.91	5.06	2.99	42.78	本研究
	均值/mg·kg^{-1}	0.86	186.8	54.56	32.47	22.65	65.88	
	最大值/mg·kg^{-1}	4.01	1408.3	324.75	99.6	42.78	100.86	
	变异系数/%	98.7	116.9	94.4	66.3	36.3	17.6	
沉积物	最小值/mg·kg^{-1}	0.65	136.82	29.80	40.22	17.62	63.76	本研究
	均值/mg·kg^{-1}	1.72	312.11	92.32	97.87	29.89	111.41	
	最大值/mg·kg^{-1}	2.18	481.84	163.70	236.03	39.64	321.61	
	变异系数/%	0.48	117.72	46.50	62.73	7.10	30.59	
表层土壤	顺德乐从	0.72	179.7	73.52	51.34	32.56	—	[25]
	顺德区	0.48	178.91	48.27	44.20	—	68.89	[26]
沉积物	佛山水道	3.76	503.61	236.09	192.31	—	317.04	[27]
二级标准/mg·kg^{-1}		0.40	250	50	100	80	200	GB 15618-2008
顺德背景值/mg·kg^{-1}		0.44	109.6	50.1	43.75	32.6	62	[23]

于其结果,这可能因为本研究采样点主要集中在河道周边.

在空间分布上(图 2),顺德水道周边表层土壤中 Zn 和 Pb 的含量空间分布相似,均表现为上游含量较高,沿河道水流方向由西向东逐渐降低;Cd 在全研究区域的含量分布较为均匀,且 54.9%

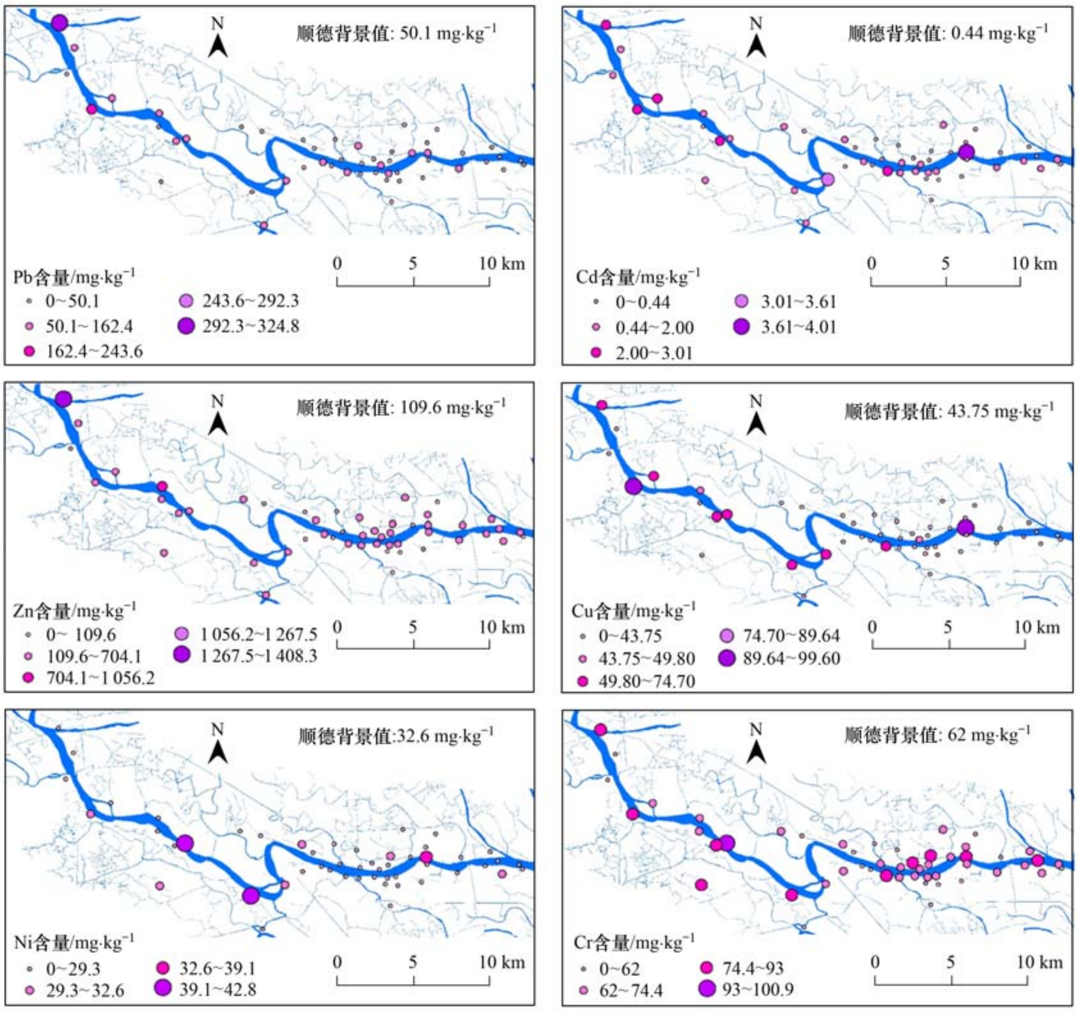


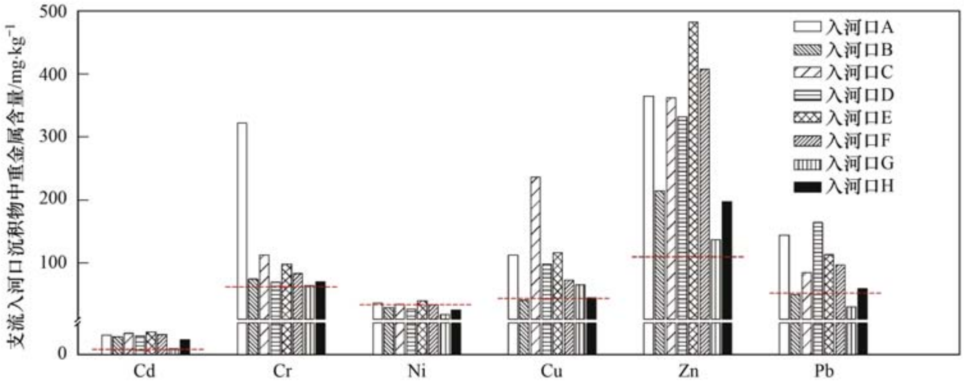
图 2　表层土壤各元素空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of heavy metals in surface soils along Shunde waterway

以上的采样点 Cd 含量高于背景值含量；Cu 和 Ni 的空间分布较为相似，高值均出现在顺德水道“S 型”回旋处，Cr 则在全区域分布均匀，Ni、Cr 这 2 种元素的分布与该区域深层土壤（150～200 cm）中 Ni 和 Cr 含量的分布相似[23]，说明表层土壤 Ni 和 Cr 这 2 种元素受人为干扰小，主要反映土壤母质的含量特征.

2.2 表层沉积物重金属含量及空间分布

支流入河口是连接河涌与主河道的关卡，污染物可随河涌水体进入河道，并在沉积物中累积，因此河道沉积物中重金属含量可以反映较长时期内随水体进入河道重金属的含量高低[28]. 顺德水道 8 个主要支流入河口表层沉积物中重金属含量如图 3 所示. 数据表明各入河口间表层沉积物中重金属平均含量从大到小依次为：Zn（312.11 $mg \cdot kg^{-1}$）> Cr（111.41 $mg \cdot kg^{-1}$）> Cu（97.87 $mg \cdot kg^{-1}$）> Pb（92.32 $mg \cdot kg^{-1}$）> Ni（29.89 $mg \cdot kg^{-1}$）> Cd（1.72 $mg \cdot kg^{-1}$）. 与利锋等[27] 2006 年在佛山水道沉积物的研究对比发现，本研究区内表层沉积物的 Cd、Zn、Pb、Cu 和 Cr 这 5 种元素均低于佛山水道沉积物的平均含量，这说明水源地沉积物重金属累积程度低于普通城市水网河道. 但与顺德区土壤背景值对比（表 3），沉积物中重金属元素均存在不同程度的累积.



图中虚线为各重金属元素在顺德区的背景值

图 3 顺德水道主要支流入河口表层沉积物重金属含量分布特征

Fig. 3 Distribution of heavy metals in sediments collected from the main river gates of Shunde waterway

从图 3 可以看出：各支流入河口沉积物中 6 种重金属含量差异明显. 位于上游的入河口 A 沉积物中 6 种重金属含量均超过 8 个入河口沉积物平均含量及顺德区土壤背景值，且 Cr 元素在 A 入河口沉积物中累积程度最高，约为背景值的 5.19 倍；处于中游的入河口 B、C、D 及 E 沉积物中 Cd、Cr 和 Ni 元素含量差异较小且与各支流入河口平均含量持平，而 Cu、Zn 和 Pb 含量差异明显且超过整体平均水平，其最大值分别为背景值的 5.39、2.85 及 3.27 倍；位于下游的入河口 F、G、H 沉积物中各重金属含量均低于或持平于上中游入河口中沉积物含量. Cd、Ni 在各支流入河口沉积物中含量差异较小，而 Cr、Cu、Zn、Pb 均表现为上中游含量较高而下游含量较低. 有学者在容桂工业区河涌沉积物的研究结果表明重金属污染物含量总体上下游小于上游[23]，本研究结果与其相似. 研究区中下游是广州与佛山市集中式引用水取水范围，受到水源地政策保护，其重金属污染源较少. 本研究结果表明顺德水道上游可能存在重金属排放源.

2.3 土壤、沉积物重金属来源分析

表层土壤各重金属相关性分析结果表明：Zn 与 Pb、Cu、Cr，Pb 与 Cu、Cr、Ni，Cu 与 Ni、Cr 及 Ni 与 Cr 呈正相关系（$P < 0.05$），Cd 与其他 5 种元素均呈极显著性正相关. 为减少变量维度，对顺德河道表层土壤、主要支流入河口表层沉积物中 6 种重金属进行主成分分析，结果如图 4 所示. 顺德河道周边表层土壤 6 种重金属含量数据方差被分为了 2 个因子，可解释总方差的 85%. 第一主成分因子中负荷较大的为 Cd、Cu、Zn 和 Pb，解释了总方差的 44%，这 4 种重金属代表外源污染；第二主成分因子为 Cr 和 Ni，这两种重金属累积程度较小，该主成分代表成土母质. 顺德表层土壤重金属含量的空间分布表明，土壤中 Zn、Pb 呈现上游至下游逐渐降低趋势，Cd 在全研究区内均存在不同程度的累积. 河道上游为龙江和乐从地区，是较为发达的制造业区，其家具、塑料建材、小家电及纺织服装产业均为顺德区支柱性产业. 这些制造工业污染源可能排放含有重金属的污水进入河涌，经地表水运移传输而污

染周边土壤. 同时,顺德道上游与北江干流相接,北江流域矿产资源丰富,有色冶金企业较多,其矿渣、尾矿及污废水易随雨水冲刷至下游,并在沿岸土壤沉积. Cd、Cu、Zn 和 Pb 作为典型的铅锌矿的组合元素出现伴生累积,也证实顺德水道土壤重金属元素可能来自上游的矿区[29]. 顺德水道河道宽敞,水网密布,故其航运较为发达,因此土壤中 Cd 和 Zn 也可能来源于水上运输及船只表面处理行业.

表 4 顺德水道周边表层土壤、支流入河口表层沉积物重金属相关系数矩阵[1)]

Table 4 Matrix of Pearson' s correlation coefficients of heavy metals in surface soils and sediments samples collected from Shunde waterway

类型	重金属	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr
表层土壤	Cd	1	0.508**	0.710**	0.864**	0.487**	0.435**
	Zn		1	0.863**	0.515**	0.179	0.297*
	Pb			1	0.715**	0.307*	0.410**
	Cu				1	0.694**	0.680**
	Ni					1	0.765**
	Cr						1
沉积物	Cd	1	0.890**	0.769**	0.640*	0.602*	0.333
	Zn		1	0.838**	0.692**	0.797**	0.408
	Pb			1	0.553*	0.612*	0.516
	Cu				1	0.570*	0.375
	Ni					1	0.514
	Cr						1

1) ** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的; * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的

从表 4 可以看出顺德水道 8 个主要支流入河口沉积物中 Cd 与 Zn、Pb、Cu、Ni 呈正相关($P < 0.05$). 这说明沉积物中 Cd、Zn、Pb、Cu 和 Ni 的来源具有一定共性,可能是由村级工业园区排放废水,经由顺德水道周边河涌进入主河道,与流经矿区、携带大量重金属的上游河水混合并沉积在河道底部. Cr 与其他 5 种重金属间不呈相关性,且仅在支流入河口 A 处沉积物中含量较高,其余沉积物采样点中较少存在 Cr 富集,这说明顺德水道周边 Cr 的排放源较少,且集中于河道上游. 图4(b)为各支流入河口沉积物中 6 种重金属的主成分分析,分析表明只有一个主成分因子(可解释总方差的 68%),说明 6 种重金属元素主要来源于外源污染,可能来源于顺德水道周边的工业活动及北江上游的携带沉积作用.

2.4 潜在生态风险评价结果分析

对河道周边表层土壤及入河口表层沉积物的理化性质分析结果表明:顺德水道周边表层土壤的 pH 介于 6.17 ~ 7.99 之间,均值为 7.24,其有机碳质量分数约占 1.36%(范围为 0.691% ~ 2.816%); 入河口表层沉积物的 pH 范围为 7.11 ~ 7.78,均值为 7.45,有机碳含量略高于表层土壤,约为 1.54%(范围为 0.56% ~ 2.69%). 根据表 2 所列的预测模型计算 5 种重金属元素的水溶态含量,并以顺德元素背景值作为参比值,对顺德水道周边表层土壤及入

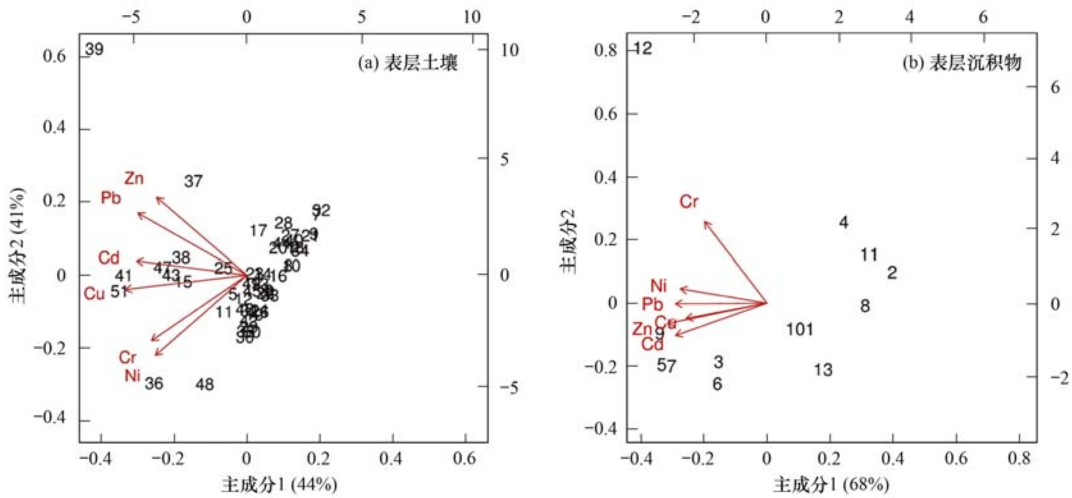


图 4 顺德河道表层土壤、支流入河口表层沉积物中 6 种重金属的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of heavy metals in surface soils and sediments samples collected from Shunde waterway

河口表层沉积物重金属的环境生物可利用态进行潜在生态风险评价. 表 5 为顺德水道周边表层土壤及入河口表层沉积物中各重金属的两种潜在生态风险评价结果.

表 5　两种潜在生态风险评价方法结果对比

Table 5　Comparison of the results obtained with the two potential ecological risk assessment methods

评价方法	介质	项目	E_r^i					RI
			Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	
Hakanson 潜在生态风险评价	表层土壤	min	8.45	0.54	1.19	0.58	0.46	13.23
		average	58.87	1.70	5.45	3.71	3.47	73.20
		90%	148.94	2.64	11.42	7.47	4.90	176.53
		max	275.17	12.85	32.41	11.38	6.56	306.93
	沉积物	min	44.56	1.25	2.97	4.60	2.70	58.87
		average	117.99	2.85	9.21	11.19	4.58	145.82
		90%	143.79	3.92	14.94	17.34	5.70	184.83
		max	149.76	4.40	16.34	26.97	6.08	185.14
基于生态环境可利用态生态风险评价	表层土壤	min	5.21	0.32	1.08	0.23	0.07	7.92
		average	26.69	1.39	3.65	1.41	1.88	34.96
		90%	67.12	2.27	5.97	2.65	3.61	79.28
		max	102.50	7.55	12.54	3.95	6.80	114.53
	沉积物	min	14.42	0.79	2.02	1.67	0.62	19.52
		average	46.57	2.06	5.30	3.78	1.54	59.25
		90%	64.83	2.89	7.96	5.80	2.14	83.62
		max	67.94	3.51	8.11	8.33	2.56	90.45

两种评价方法结果均表明：Pb、Cu、Zn、Ni 的潜在生态风险危害程度均表现为轻微(如表 5)；入河口表层沉积物的平均综合潜在生态风险指数(RI)高于河道周边土壤，其均值均低于 160，表现为轻微污染. 顺德水道表层土壤中 Cd 元素基于 Hakanson 潜在生态风险评价的单项生态风险系数均值的危害等级表现为中度，最大值则达到很强；而基于环境生物可利用态的潜在生态风险评价均值的危害等级则表现为轻度，最大值为强度(见表 5). 入河口沉积物 Cd 元素的危害等级亦表现为 Hakanson 法高于环境可利用态法，前者表现为强度，后者为中度. 两种评价方法中 Cd 元素对该区域综合潜在生态风险指数 RI 的贡献率均超过 70%，说明 Cd 是造成区域重金属污染综合潜在生态风险最主要的因素.

将两种评价方法结果对比可知：Cd、Cu、Ni 基于环境生物可利用态的潜在风险系数均值约为 Hakanson 潜在风险系数均值的 33% ~54%，而 Zn、Pb 则为 58% ~82%. 5 种重金属基于环境生物可利用态的潜在生态风险系数均小于 Hakanson 潜在生态风险系数. 由于 Hakanson 潜在生态风险考虑的是重金属总量对环境的风险，而基于环境生物可利用态的潜在生态风险评价法考虑了土壤的理化性质及重金属形态，因此该评价方法可避免过高估计重金属的生态风险. 此外本研究采用经验公式估算水溶态重金属含量，如有条件可使用实测值代替，其评价结果将更准确.

3　结论

(1)顺德水道沿岸表层土壤中重金属平均含量从大到小依次为：Zn(186.8 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cr(65.88 $mg\cdot kg^{-1}$) > Pb(54.56 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cu(32.47 $mg\cdot kg^{-1}$) > Ni(22.65 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cd(0.86 $mg\cdot kg^{-1}$)；而各支流入河口间表层沉积物中重金属的含量则表现为：Zn(312.11 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cr(111.41 $mg\cdot kg^{-1}$) > Pb(97.87 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cu(92.32 $mg\cdot kg^{-1}$) > Ni(29.89 $mg\cdot kg^{-1}$) > Cd(1.72 $mg\cdot kg^{-1}$). 顺德水道周边表层土壤中 Cr、Ni 含量主要受自然母质影响；Cd、Cu、Zn 和 Pb 元素间相关性较强，可能主要受该地区制造业废水及上游北江矿区的影响，同时 Cd 和 Zn 还可能来源于水上运输及船只表面处理行业污水排放；入河口沉积物中 6 种重金属元素均存在外源输入，可能受顺德水道周边的工业活动及上游矿区的影响.

(2)对土壤及沉积物中重金属潜在生态风险评价结果表明：基于环境生物可利用态的潜在生态风险结果低于 Hakanson 潜在生态风险评价结果. 前者充分考虑了土壤理化性质及重金属形态，可避免高估重金属的潜在危害程度. 两种评价结果中除 Cd 元素外其余 4 种元素的潜在生态危害程度均表现为轻微，Cd 元素是区域重金属综合潜在生态风险的主要影响因素.

参考文献：

[1] 于洋，高宏超，马俊花，等. 密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价[J]. 环境科学，2013，**34**(9)：3572-3577.

[2] 张家泉，李秀，张全发，等. 大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价[J]. 环境科学，2015，**36**(1)：194-201.

[3] 杨阳，周正朝，张福平，等. 沣河沿岸土壤重金属分布特征及来源分析[J]. 干旱区研究，2014，**31**(2)：237-243.

[4] 张菊，陈诗越，邓焕广，等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. 生态学报，2012，**32**(10)：3144-3153.

[5] 贾英，方明，吴友军，等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学，2013，**33**(1)：147-153.

[6] 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.

[7] 李珊珊，单保庆，张洪. 滏阳河河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J]. 环境科学学报，2013，**33**(8)：2277-2284.

[8] 王铁宇，罗维，吕永龙，等. 官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J]. 环境科学，2007，**28**(2)：225-231.

[9] Chen Z L，Liu P F，Xu S Y，*et al*. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai coastal zone[J]. Science in China Series B：Chemistry，2001，**44**(S1)：197-208.

[10] 梁夏天. 北京官厅水源地重金属分布与形态特征研究[D]. 北京：首都师范大学，2014. 22-37.

[11] 敖亮，单保庆，张洪，等. 三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价[J]. 环境科学，2012，**33**(4)：1176-1181.

[12] Qu W C，Kelderman P. Heavy metal contents in the Delft canal sediments and suspended solids of the River Rhine：multivariate analysis for source tracing[J]. Chemosphere，2001，**45**(6-7)：919-925.

[13] 胥焘，王飞，郭强，等. 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. 环境科学，2014，**35**(4)：1502-1508.

[14] 谢文平，王少冰，朱新平，等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. 环境科学，2012，**33**(6)：1808-1815.

[15] 尚林源，孙然好，汲玉河，等. 密云水库入库河流沉积物重金属的风险评价[J]. 环境科学与技术，2011，**34**(12H)：344-348.

[16] Hu Y N，Liu X P，Bai J M，*et al*. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. Environmental Science and Pollution Research，2013，**20**(9)：6150-6159.

[17] Wang M E，Bai Y Y，Chen W P，*et al*. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing，China[J]. Environmental pollution，2012，161：235-242.

[18] 李泽琴，侯佳渝，王奖臻. 矿山环境土壤重金属污染潜在生态风险评价模型探讨[J]. 地球科学进展，2008，**23**(5)：509-516.

[19] Roychand P，Marschner P. Respiration in a sand amended with clay-effect of residue type and rate[J]. European Journal of Soil Biology，2013，**58**：19-23.

[20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research，1980，**14**(8)：975-1001.

[21] Weeks J M，Comber S D W. Ecological risk assessment of contaminated soil[J]. Mineralogical Magazine，2005，**69**(5)：601-613.

[22] SauvéS，Hendershot W，Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils：dependence on pH，total metal burden，and organic matter [J]. Environmental Science & Technology，2000，**34**(7)：1125-1131.

[23] 国土资源部中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集——广东省珠江三角洲经济区[M]. 北京：地质出版社，2011.

[24] 徐争启，倪师军，庹先国，等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术，2008，**31**(2)：112-115.

[25] 史瑾瑾. 顺德乐从地区土壤重金属地球化学特征及污染评价[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2014. 24-40.

[26] 刘子宁，朱鑫，窦磊，等. 珠江三角洲典型肝癌发病区土壤重金属富集特征分析及生态风险测度[J]. 土壤通报，2011，**42**(2)：471-476.

[27] 利锋，韦献革，余光辉，等. 佛山水道底泥重金属污染调查[J]. 环境监测管理与技术，2006，**18**(4)：12-14，18.

[28] Chabukdhara M，Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments：a chemometric and geochemical approach[J]. Chemosphere，2012，**87**(8)：945-953.

[29] 吴雪芳，岑况，赵伦山，等. 顺德地区土壤重金属污染生态地球化学调查与物源识别[J]. 物探与化探，2015，**39**(3)：595-601，605.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 5

May 15, 2016

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015: Pollution Process and Emissions Variation ······ XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, *et al.* (1593)

Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC ······ ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, *et al.* (1602)

Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry ······ LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, *et al.* (1609)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Lanzhou City ······ WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, *et al.* (1619)

Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles $PM_{2.5}$ in Southwest Suburb of Chengdu in Spring ······ LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, *et al.* (1629)

Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region ······ LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, *et al.* (1639)

Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources ······ CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)

Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing ······ HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, *et al.* (1653)

Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing ······ WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, *et al.* (1662)

$CoCuMnO_x$ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis ······ MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, *et al.* (1670)

Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication ······ ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, *et al.* (1677)

Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region ······ SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, *et al.* (1685)

$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers ······ ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, *et al.* (1692)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin ······ WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, *et al.* (1699)

Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region ······ CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, *et al.* (1707)

Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China ······ WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, *et al.* (1717)

Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network ······ FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)

Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake ······ ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, *et al.* (1734)

Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors ······ REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, *et al.* (1742)

Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province ······ WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, *et al.* (1754)

Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China ······ CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, *et al.* (1763)

Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou ······ CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, *et al.* (1771)

Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River ······ HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (1779)

Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors: An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing ······ WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)

Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province ······ HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, *et al.* (1798)

Tracing the Fecal Contamination Sources Based on *Bacteroides* 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater: Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example ······ ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, *et al.* (1805)

Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River ······ LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, *et al.* (1814)

Formation of Halogenated By-products in Co^{2+} Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process ······ LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, *et al.* (1823)

Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile ······ DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, *et al.* (1831)

Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process ······ DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)

Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System ······ CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, *et al.* (1845)

Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters ······ GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)

Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment ······ LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, *et al.* (1858)

Magnetic Fe_3O_4 Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge ······ QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)

Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor ······ SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, *et al.* (1873)

Effect of Irrigation Patterns on Soil CO_2 and N_2O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain ······ GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, *et al.* (1880)

Characteristics of Dissolved CH_4 and N_2O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring ······ HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, *et al.* (1891)

Effect of Stimulated N Deposition on N_2O Emission from a *Stipa krylovii* Steppe in Inner Mongolia, China ······ YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, *et al.* (1900)

Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism ······ CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, *et al.* (1908)

Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China ······ GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, *et al.* (1915)

Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates ······ SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, *et al.* (1923)

Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing ······ ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, *et al.* (1931)

Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang ······ LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, *et al.* (1938)

Effect of Nano-TiO_2 on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil ······ ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, *et al.* (1946)

Reduction Kinetics of Cr(Ⅵ) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic ······ MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)

Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of *Acidithiobacillus* Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil ······ SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, *et al.* (1960)

Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom *Skeletonema costatum* ······ HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, *et al.* (1968)

Rhizospheric Mechanisms of *Hemerocallis middendorfii* Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems ······ WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)

Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source ······ ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, *et al.* (1986)

Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting ······ LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, *et al.* (1993)

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976年8月创刊）

2016年5月15日　第37卷　第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 5　May 15, 2016

主　　管	中国科学院
主　　办	中国科学院生态环境研究中心
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
主　　编	欧阳自远
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
出　　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京399信箱）

Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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
Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
Domestic		All Local Post Offices in China
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：120.00元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行