

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险：以连霍高速郑州—商丘段为例

谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华*

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 河南省高校重点学科环境变化与水土污染防治开放实验室, 开封 475004)

摘要: 以连霍高速郑商段不同通车时间的湾刘断面(通车 11 a)和小王庄断面(通车 4 a)为研究对象, 按距离公路 0、5、15、25、35、50、100、200、300 和 1 500 m 采集土壤表层样品, 用原子吸收分光光度法测定土壤重金属(Cd、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Cr)含量, 采用美国环境保护署(US EPA)推荐的健康风险模型对其开展健康风险评价。结果表明, 公路通车运营时间越长, 土壤重金属含量和健康风险越严重; 随着离开公路路基距离的增加, 土壤重金属含量和健康风险呈偏态分布或 3 阶多项式分布, 峰值多出现在距路基 15~50 m 之间; 土壤重金属的 HQ 和 HI 均远远小于 1, 不存在非致癌健康风险; 各样点 CR_{Cr} 和 TCR 均略超过 US EPA 推荐的土壤治理标准(1×10^{-6}), 但低于一些专家提出的宽松标准($10^{-6} \sim 10^{-4}$), 存在致癌风险的可能性, CR_{Cr} 对 TCR 贡献率高达 97.83%, Cr 是最主要的致癌风险因子。

关键词: 路旁土壤; 重金属; 健康风险; 连霍高速; 通车时间

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3577-08

Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time: A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway

GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, MA Jian-hua

(1. Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Henan Open Laboratory for Key Subjects of Environmental Change and Water-Soil Pollution Control, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Two sample transects of Wanliu and Xiaowangzhuang on the Zhengzhou-Shangqiu section along the Lianyungang-Horgas highway were chosen to investigate the health risks of heavy metals (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni and Cr) in roadside soils. Wanliu transect was opened in 1994, and Xiaowangzhuang in 2001. Mixed topsoil samples (0-15 cm) were collected at 0, 5, 15, 25, 35, 50, 100, 200, 300 and 1 500 m from the highway. Concentrations of soil heavy metals were measured with the method of AAS. Based on the health risk models recommended by US EPA, noncarcinogen and carcinogen health risks of soil heavy metals were evaluated. The results showed that the heavy metal concentrations and the health risks increased with the increase in operation time, indicating that the operation time might play a decisive role in heavy metal accumulations in roadside soil. Both the heavy metal concentrations and their health risks showed skewed distribution or cubic polynomial distribution with the distance from the highway roadbed. The highest concentration and the highest health risk occurred between 15-50 m from the highway roadbed. HQ and HI at both sampling sites were lower than 1, which meant that there was no non-carcinogen risk. CR_{Cr} and TCR at both sample sites were beyond the standard suggested by US EPA, which meant there was possibly carcinogenic risk, but lower than the lenient standard raised by some other experts (10^{-6} - 10^{-4}). The contribution rate of CR_{Cr} to TCR reached 97.83%, and Cr was the major carcinogen risk factor.

Key words: roadside soils; heavy metals; health risk; Lianyungang-Horgas highway; operation time

自 1983 年美国环境保护署(US EPA)提出健康风险评价的概念与研究框架之后, 国内外学者首先对饮用水、粮食和蔬菜中的污染物暴露所致健康风险开展了大量研究。20 世纪 90 年代末, 一些学者开始借鉴健康风险评价理论与方法评估土壤重金属健康风险问题。Zimová 等^[1]研究了布拉格市儿童误食城市土壤重金属引起的健康风险; Gržetić 等^[2]研究了贝尔格莱德城市土壤中致癌和非致癌重金属对成人和儿童所造成的潜在健康风险; Lim^[3]、Chen^[4]

和张厚坚^[5]等分别对韩国、我国某废弃矿区和我国某铬渣污染场地的土壤重金属健康风险进行了评价; Lai 等^[6]对台湾省土壤修复前后重金属健康风险进行了对比研究; 刘庆^[7]、杨刚^[8]、车飞^[9]和郭

收稿日期: 2011-12-26; 修订日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171409); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20104103110001); 教育部和河南省共建河南大学项目(SBGJ090101)

作者简介: 谷蕾(1981~), 女, 博士研究生, 实验师, 主要研究方向为土壤环境污染与防治, E-mail: gulei1981@126.com

* 通讯联系人, E-mail: mjh@henu.edu.cn

广慧^[10]等对我国某些区域的农业土壤和城市土壤开展了重金属健康风险评价;王晓云等^[11]对我国某城市幼儿园地表灰尘开展了重金属健康风险评价.但从总体上看,目前健康风险评价主要集中于饮用水、粮食和蔬菜中的污染物暴露,而对土壤污染物暴露的案例研究仍然偏少,尤其是对不同通车时间的公路旁土壤(以下简称路旁土壤)重金属所致健康风险鲜见报道.

随着我国交通运输业的快速发展,路旁土壤重金属污染日趋严重.据报道,2006 年我国路旁土壤发生中度 Pb 污染的面积为 28 900 km², 占国土面积的 0.3%^[12]. 受到重金属污染的路旁土壤可通过摄入、扬尘吸入和皮肤接触等暴露途径进入人体,从而对人体健康带来危害.本文以连霍高速公路不同通车时间的郑州—开封段(郑开段)和开封—商丘段(开商段)路旁土壤为例,在土壤样品采集和重金属含量测定基础上,利用 US EPA 健康风险评价模型对其重金属多途径暴露所致的健康风险进行评价,旨在丰富土壤重金属健康风险评价研究案例,维护公路两侧常驻人群的健康,为路域生态环境的管理与修复提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2005 年 10~12 月在连霍高速郑开段(1994 年 12 月通车)的中牟县湾刘村和开商段(2001 年 12 月通车)的民权县小王庄附近布设土壤采样断面,分别用 WS 和 XS 表示(图 1). 采样断面与高速公路相垂直,地势开阔、平坦,路旁基本无防护林带,公路两侧均为农田.

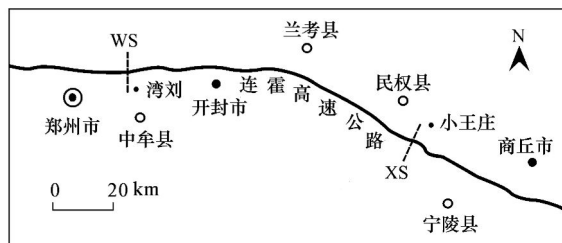


图 1 采样断面示意

Fig. 1 Location of the sample transects

在采样断面上,按距路基 0、5、15、25、35、50、100、200、300 和 1 500 m 对称布设采样点,其中距路基 1 500 m 的样点为对照样点.在监测样点上先画一条与公路平行、长约 50 m 的线段,并在线段上等距布设 5 个面积为 1 m² 的采样单元;然后在采

样单元内按“梅花形”布点采集 5 个土壤表层(0~15 cm)子样,每个子样约 100 g;最后将采集的 25 个子样充分混合后,按“四分法”舍弃多余样品,保留 1 kg 左右的土样.在对照样点上,选择地势平坦、土壤类型和利用方式与监测样点相同、面积较大的田块,按“蛇形”布点法布点采集 20 个子样,充分混合后按“四分法”获得 1 kg 左右的土样.本研究共采集土壤混合样品 40 个,其中对照样品 4 个.

在实验室,先将土样风干、磨碎,全部通过 1 mm 尼龙筛;然后从 1 mm 样品中多点取样约 10 g,用玛瑙研钵研磨,全部通过 0.149 mm 尼龙筛.采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解体系获得土壤重金属待测液.

1.2 重金属测定方法

土壤 Cr、Cu、Zn 和 Ni 的测定采用 AAS 法,Pb 和 Cd 的测定采用 GF-AAS 法.使用仪器是日本岛津 AA-6601F 型原子吸收分光光度计.在测定过程中,所有样品均由空白样、二次平行样和加标回收率进行质量控制.二次平行样的相对偏差均小于 5%,样品加标回收率在 96.4%~103.1%之间.

1.3 健康风险指数计算

1.3.1 暴露模型与参数

土壤重金属可通手-口直接摄入、皮肤接触和呼吸吸入 3 种暴露途径进入人体,各种途径的暴露量按下列公式计算^[5, 6, 13, 14]:

$$ADD_{ing} = \frac{c \cdot IngR \cdot CF \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (1)$$

$$ADD_{inh} = \frac{c \cdot InhR \cdot EF \cdot ED}{PEF \cdot BW \cdot AT} \quad (2)$$

$$ADD_{derm} = \frac{c \cdot SA \cdot CF \cdot SL \cdot ABS \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (3)$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{derm} 分别为摄入、吸入和皮肤接触途径的日均暴露量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; c 为土壤重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$; $IngR$ 为摄入土壤的频率, $mg \cdot d^{-1}$; $InhR$ 为呼吸频率, $m^3 \cdot d^{-1}$; CF 为转换系数, $kg \cdot mg^{-1}$; EF 为暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; ED 为暴露年限, a ; BW 为平均体重, kg ; AT 为重金属平均暴露时间, d ; PEF 为灰尘排放因子, $m^3 \cdot kg^{-1}$; SA 为暴露皮肤表面积, cm^2 ; SL 为皮肤黏着度, $mg \cdot (cm^2 \cdot d)^{-1}$; ABS 为皮肤吸收因子,无量纲.

参考 US EPA 健康风险评价方法^[13~16]、我国场地环境评价指南^[17]以及国内外相关研究成果^[1, 2, 5, 6, 8~11, 16~19],式(1)~(3)中的参数取值如下: $IngR$ 为 $100 mg \cdot d^{-1}$, $InhR$ 为 $20 m^3 \cdot d^{-1}$, PEF 为

$1.36 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, SA 为 1690 cm^2 , SL 为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, ED 为 30 a (成人农田耕作管理的年数), EF 为 $180 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ (农田耕作管理的时间按每年 6 个月, 每月按 30 d 计算), BW 为 55.9 kg, AT 为 5400 d (非致癌物)、12600 d (致癌物), CF 为 $1 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}$, ABS 为 0.001.

1.3.2 土壤重金属健康风险评价方法

本研究的 6 种重金属都具有慢性非致癌健康风险, 其中 Ni、Cr 和 Cd 同时具有致癌风险^[19]. 土壤非致癌和致癌重金属的健康风险表征模型为^[11,18]:

$$HQ_i = \sum_{j=1}^3 \frac{ADD_{ij}}{RfD_{ij}} \quad (4)$$

$$HI = \sum_{i=1}^6 HQ_i \quad (5)$$

$$CR_i = \sum_{j=1}^3 ADD_{ij} \cdot SF_{ij} \quad (6)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^3 CR_i \quad (7)$$

式中, HQ_i 为非致癌重金属 i 的单项健康风险指

数; ADD_{ij} 为非致癌重金属 i 第 j 种暴露途径的日均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD_{ij} 为非致癌重金属 i 第 j 种暴露途径的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; HI 为 6 种重金属通过 3 种暴露途径所致的非致癌总风险指数. 当 HQ_i 或 $HI < 1$ 时, 表示非致癌健康风险可以忽略; 当其 > 1 时, 表示存在非致癌健康风险. CR_i 为致癌重金属 i 的单项健康风险指数; SF_{ij} 为致癌重金属 i 第 j 种暴露途径的致癌风险斜率系数, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; TCR 为 3 种致癌重金属通过 3 种暴露途径所致的致癌总风险指数. 各种暴露途径的 RfD 和 SF 参见表 1^[19]. 需要指出的是, 本研究中土壤 Cr 含量为总 Cr 含量, 而目前 US EPA 计划中尚无总 Cr 的 RfD 和 SF 参考值, 只有 Cr^{6+} 和 Cr^{3+} 的 RfD 参考值和 Cr^{6+} 的 SF 参考值 (42.00). 据研究^[2,22], 旱作土壤表层的氧化还原电位 (Eh) 一般大于 400 mV, 土壤中的 Cr^{3+} 大部分被氧为 Cr^{6+} , Cr^{6+} 占总铬的比例约 70%. 考虑到最大风险原则和预警作用, 故本研究采用 Cr^{6+} 的 RfD 和 SF 值.

表 1 重金属不同暴露途径的 RfD 和 $SF/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 1 Reference dose for non-carcinogen metals and slope factors for carcinogen metals/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

参数	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr	Cd
RfD_{ing}	0.30	3.50×10^{-3}	4.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	3.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}
RfD_{inh}	0.30	3.50×10^{-3}	4.00×10^{-2}	2.06×10^{-2}	2.86×10^{-5}	1.00×10^{-3}
RfD_{derm}	6.00×10^{-2}	5.25×10^{-4}	1.20×10^{-2}	5.40×10^{-3}	6.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
SF_{inh}	—	—	—	0.84	42.00	6.30

US EPA 风险计划中只有 Ni、Cd 和 Cr 的 RfD_{inh} 数据, 但有研究认为 Zn、Pb 和 Cu 的 RfD_{inh} 可以等同于其相应手-口摄入途径的 RfD_{ing} ^[19]. 另外, 由于 US EPA 只给出了 SF_{inh} 的参考值, 因此本研究只计算经呼吸暴露所导致的致癌风险^[19]. 在 US EPA 风险计划中, 将 CR_i 或 $TCR \leq 10^{-6}$ (即污染导致百万人中有一个癌症患者) 作为土壤治理的标准^[13~16]. 而另外一些专家^[7,9,18,19] 认为, 致癌风险在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 也是可以接受的.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属的含量与分布特征

从采样断面土壤重金属含量与分布 (表 2 和表 3) 可以看出, 不同重金属在公路两侧的分布形式基本上可以概括为 2 种类型. 一种是重金属含量随距离的增加先波动性增大至某个峰值, 然后再波动性减小至对照值 (偏态分布), 如土壤 Cr、Pb (XS, WS 北)、Ni (XS, WS 北)、Cu (XS) 和 Cd (WS 南, XS

北) 含量的空间分布, 含量峰值大多出现在离路基 15~50 m 之间, 而 WS 断面南侧 Cd 和 Cr 的含量峰值分别出现在距路基 100 m 和 200 m 处, XS 断面 Ni 的含量峰值出现 100 m 处. 这种异常情况可能与该距离处人类活动 (化肥和农药的使用) 有关, 不是普遍规律. 另一种分布形式是路基附近重金属含量较高, 随距离增加先减小后增大至某个峰值, 最后再逐渐减小至对照值 (3 阶多项式分布), 如土壤 Zn、Cu (WS)、Pb (WS 南) 和 Cd (WS 北, XS 南) 含量的空间分布, 含量峰值也大多出现在离路基 15~50 m 之间. 从总体上看, 路旁土壤 Cr、Ni 和 Pb 含量的空间分布属于第 1 种类型, Zn 属于第 2 种类型, Cd 和 Cu 的分布形式尚不能确定, 需要更多的研究案例. 这 2 种重金属空间分布形式与已有多数成果的结论相一致^[23~30].

上述 2 种路旁土壤重金属空间分布形式都有力地证明: 土壤重金属的来源与公路交通关系密切. 国内外很多研究表明, 路旁土壤中的 Pb、Cd、Cu 和

表 2 WS 断面各样点土壤重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Heavy metal concentrations in roadside soils on Wanliu transect/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

WS	重金属	样点至路基距离 d/m									
		0	5	15	25	35	50	100	200	300	1 500
断面北侧	Pb	14.85	14.88	14.41	15.19	14.55	14.68	13.62	15.23	15.21	13.49
	Cd	1.34	1.06	1.02	1.53	1.37	1.83	1.45	1.18	1.27	1.05
	Ni	69.65	69.87	54.45	60.06	53.47	72.00	40.77	40.40	38.10	69.68
	Cu	87.44	83.82	66.00	69.70	75.60	86.34	76.50	65.78	65.70	59.96
	Zn	143.00	141.00	96.00	140.00	169.00	159.59	135.20	117.30	110.50	99.92
	Cr	49.61	55.03	58.20	54.86	62.01	66.65	61.70	56.70	48.60	68.45
断面南侧	Pb	15.50	14.24	13.23	16.14	13.18	13.69	15.22	14.66	14.05	14.47
	Cd	1.79	1.12	1.34	1.38	1.22	1.05	1.86	1.38	1.19	0.98
	Ni	122.44	57.60	39.99	39.15	61.47	74.06	30.61	45.75	42.69	75.44
	Cu	77.00	69.39	73.20	79.08	72.10	74.53	61.58	76.37	71.94	78.75
	Zn	120.15	75.60	91.14	122.85	82.00	159.47	114.40	120.90	80.31	114.06
	Cr	25.63	38.09	48.60	64.47	49.66	51.82	73.65	86.40	77.61	50.46

表 3 XS 断面各样点土壤重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Heavy metal concentrations in roadside soils on Xiaowangzhuang transect/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

XS	重金属	样点至路基距离 d/m									
		0	5	15	25	35	50	100	200	300	1 500
断面北侧	Pb	12.66	12.96	13.45	11.99	13.33	12.28	12.87	12.58	12.46	12.18
	Cd	0.97	1.02	0.94	1.05	1.27	1.13	1.09	0.93	0.98	0.95
	Ni	37.34	34.83	41.50	38.54	37.00	24.71	31.72	30.52	30.80	33.51
	Cu	44.91	47.59	50.89	50.57	45.60	35.07	34.45	34.69	30.86	29.75
	Zn	92.86	68.17	100.45	95.44	95.69	80.21	97.54	96.12	96.36	94.69
	Cr	35.70	44.07	44.86	49.26	55.00	45.08	49.41	41.05	40.55	39.66
断面南侧	Pb	12.06	12.28	12.81	13.51	12.60	12.10	12.27	11.20	10.87	11.74
	Cd	0.93	0.89	0.86	0.91	1.14	0.95	1.01	0.81	0.88	0.91
	Ni	30.17	34.53	33.37	35.18	31.33	32.14	36.87	33.62	33.03	36.90
	Cu	31.89	41.34	53.04	53.42	55.44	54.27	48.12	46.70	39.40	44.88
	Zn	100.37	82.89	98.46	104.22	102.79	103.02	92.73	95.54	95.51	96.60
	Cr	45.70	47.68	51.97	59.17	56.25	57.99	42.00	46.00	44.30	41.78

Zn 主要来自汽车尾气排放、轮胎和机件磨损,属于交通源重金属;土壤 Ni 和 Cr 除与成土母质有关外,也与交通运输有一定关系,属于混合源重金属^[26,28,29]。

通车时间对路旁土壤重金属积累可能具有重要影响,通车时间越长,路旁土壤重金属含量越高。通车 11 a(截至采样时间)的 WS 断面各个重金属平均含量都高于通车时间 4 a(截至采样时间)的 XS 断面。例如,WS 断面 Pb、Cd 和 Cu 的平均含量分别为 14.52、1.32 和 73.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 XS 断面分别为 12.41、0.98 和 43.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。另外,从表 1 和表 2 还可以看出,WS 断面重金属含量的峰值位置比 XS 断面要更远一些,WS 多出现在距路基 15~50 m 之间,而 XS 多出现在 15~35 m 之间,这可能与通车时间长短不同有关。

2.2 不同重金属的健康风险

2.2.1 土壤重金属非致癌风险

2 断面 6 种重金属 HQ 的空间变化见图 2。从中可见,2 断面各样点 6 种重金属的 HQ 均小于 1,不存在非致癌健康风险。2 断面均以 HQ_{Cr} 为最大,变化在 $1.62\times 10^{-2}\sim 5.46\times 10^{-2}$ 之间,平均为 3.29×10^{-2} ;以 HQ_{Zn} 为最小,变化在 $4.09\times 10^{-4}\sim 1.01\times 10^{-3}$,平均为 6.42×10^{-4} 。6 种重金属平均 HQ 的大小顺序为 $Cr(3.29\times 10^{-2})>Pb(6.94\times 10^{-3})>Ni(4.11\times 10^{-3})>Cu(2.63\times 10^{-3})>Cd(2.30\times 10^{-3})>Zn(6.42\times 10^{-4})$ 。

尽管 2 断面土壤重金属均不存在非致癌健康风险,但是不同通车时间对土壤重金属的 HQ 值仍有较大影响。WS 断面(运营 11 a)大部分样点的 HQ 值高于 XS 断面(运营 4 a)。WS 断面土壤 Cr、Pb、Ni、Cu、Cd 和 Zn 的平均 HQ 分别为 3.63×10^{-2} 、 7.48×10^{-3} 、 5.18×10^{-3} 、 3.30×10^{-3} 、 2.64×10^{-3} 、 7.18×10^{-4} ,而 XS 断面分别为 2.96×10^{-2} 、 6.39×10^{-3} 、 3.03×10^{-3} 、 1.96×10^{-3} 、 1.96

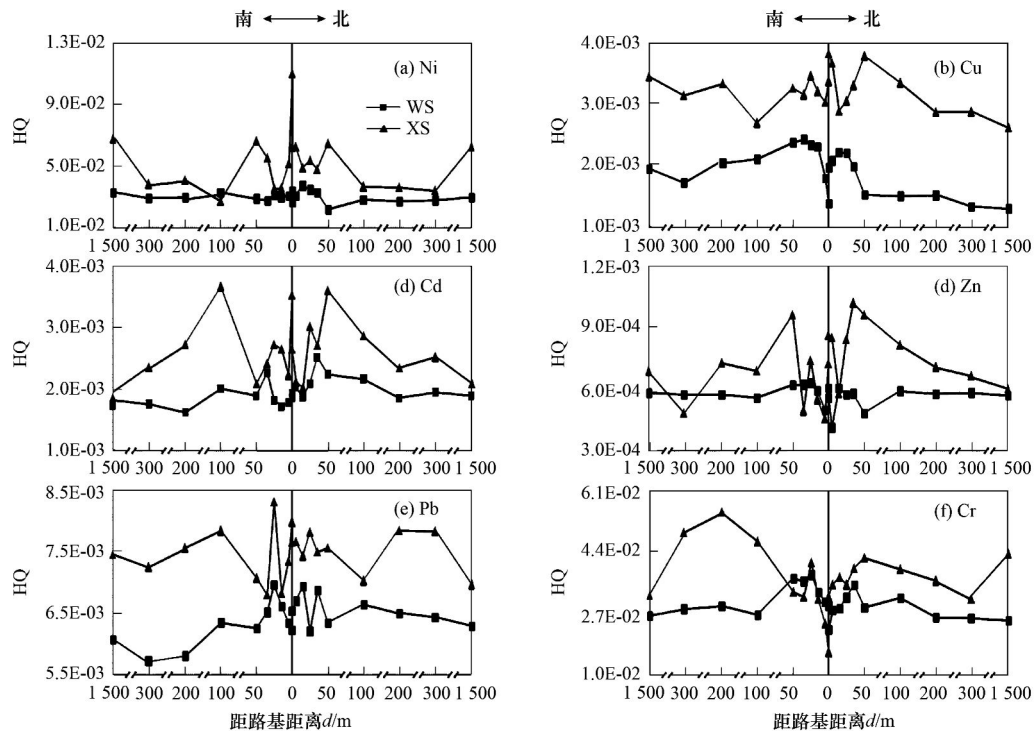


图2 研究断面土壤重金属非致癌单项风险指数

Fig. 2 HQ of soil heavy metals on the studied transects

$\times 10^{-3}$ 、 5.67×10^{-4} .

随着离开路基距离的增加,土壤 Pb、Cr 和 Cu 的 HQ 呈先增加后减少的趋势, HQ 峰值出现在距路基 25 ~ 200 m 之间,其中 WS 断面南侧的 HQ_{Cr} 和 HQ_{Cd} 峰值位置离路基较远,分别出现在距路基 200 m 和 100 m 处. 土壤 Zn、Cd 和 Ni 的 HQ 在路基处较高,随距离增加先减少后增加,在离路基 15 ~ 50 m 出现峰值,然后再逐渐减少.

2.2.2 土壤重金属致癌风险

2 断面各样点土壤 Cr、Ni 和 Cd 的 CR 值见图 3. 从中可见,土壤 Cr 的致癌风险最大,各样点的 CR_{Cr} 变化在 $1.21 \times 10^{-6} \sim 4.09 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 2.47×10^{-6} ; 所有样点 CR_{Cr} 均超出 US EPA 推荐的土壤治理标准(10^{-6}),但未超出有关专家所建议的可接受标准($10^{-6} \sim 10^{-4}$). 所以,2 断面土壤存在较明显的 Cr 致癌健康风险,必须加强 Cr 的风险管理和防范. 土壤 Cd 和 Ni 的致癌风险较小,不存在致癌风险,各样点的 CR_{Cd} 变化在 $5.75 \times 10^{-9} \sim 1.32 \times 10^{-8}$ 之间,平均为 8.17×10^{-9} ; 各样点的 CR_{Ni} 变化在 $2.34 \times 10^{-8} \sim 1.16 \times 10^{-7}$ 之间,平均为 4.35×10^{-8} .

WS 断面各样点土壤 Cr、Ni 和 Cd 的 CR 值基本上均高于 XS 断面,表明通车时间长短可能对路

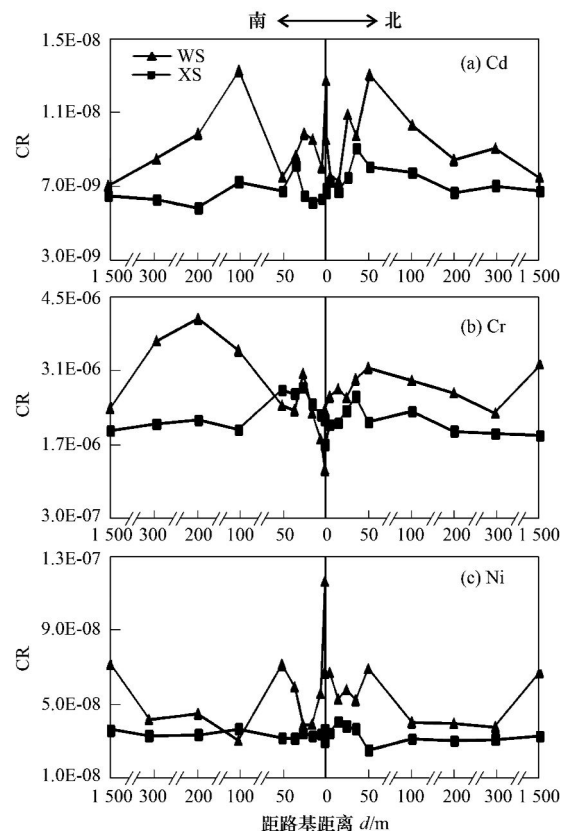


图3 研究断面土壤重金属单项致癌风险指数

Fig. 3 CR of soil heavy metals on the studied transects

旁土壤重金属致癌风险的高低具有决定性作用.

WS 断面各样点平均 CR_{Cr} 、 CR_{Ni} 和 CR_{Cd} 分别为 2.72×10^{-6} 、 5.48×10^{-8} 和 9.38×10^{-9} , 而 XS 断面分别为 2.22×10^{-6} 、 3.21×10^{-8} 和 6.97×10^{-9} .

土壤 Cr、Ni 和 Cd 的 CR 值的空间分布与其 HQ 相似, 随着离开路基距离的增加呈先增加后减少趋势, 多数样点的峰值出现在离路基 25 ~ 50 m 之间.

2.3 各样点重金属健康总风险

2.3.1 土壤重金属非致癌总风险

2 断面各样点土壤重金属的 HI 见图 4. 从中可见, 2 断面各个样点的 HI 均小于 1, 不存在非致癌风险. WS 断面大部分样点的 HI 大于 XS 断面相应样点, 同样表明通车时间对路旁土壤重金属非致癌风险可能具有重要影响. WS 断面的 HI 变化在 4.24×10^{-2} ~ 7.32×10^{-2} 之间, 平均为 5.56×10^{-2} ; XS 断面的 HI 变化在 3.69×10^{-2} ~ 5.23×10^{-2} 之间, 平均为 4.35×10^{-2} . 2 断面各样点土壤的 HQ_{Cr} 值对 HI 的贡献率变化在 37.75% ~ 74.62% 之间, 平均为 66.13%, 表明 Cr 是最主要的非致癌风险因子.

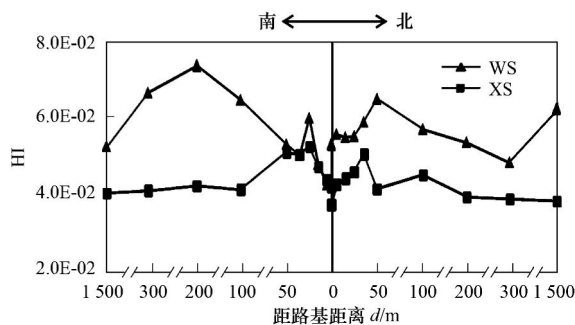


图 4 研究断面土壤重金属非致癌总风险指数

Fig. 4 HI of soil heavy metals on the studied transects

随着离开路基距离的增加, 土壤重金属 HI 呈先增加后减少的趋势. WS 断面南北两侧的 HI 峰值分别出现在距路基 200 m (主要是由于 Cr 含量的影响) 和 50 m 处; XS 断面分别出现在距路基 25 m 和 35 m 处.

2.3.2 土壤重金属致癌总风险

2 断面各样点 3 种致癌重金属的 TCR 见图 5. 从中可见, 2 断面各个样点 TCR 变化在 1.34×10^{-6} ~ 4.14×10^{-6} 之间, 比 US EPA 推荐标准稍高, 但未超出有关专家所建议的较宽松的标准, 表明存在致癌健康风险的可能性, 应引起高度关注. 2 断面各样点土壤的 CR_{Cr} 值对 TCR 的贡献率变化在 90.41% ~ 98.80% 之间, 平均为 97.83%, 表明 Cr 是最主要的致癌风险因子.

WS 断面大部分样点的 TCR 大于 XS 断面相应

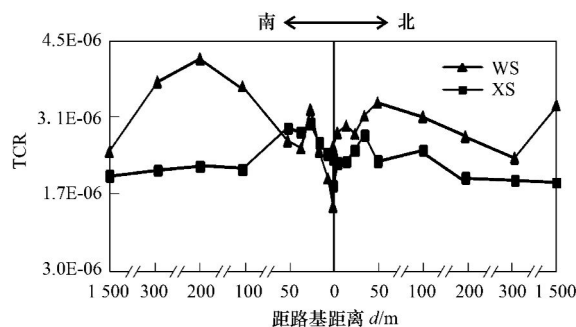


图 5 研究断面土壤重金属致癌总风险指数

Fig. 5 TCR of soil heavy metals on the studied transects

样点. WS 断面平均 TCR 为 2.78×10^{-6} , 而 XS 断面平均为 2.26×10^{-6} . 2 路段各样点 TCR 的空间分布形式与 HI 相似, 随离开路基距离的增加 TCR 也呈先增加后减少的趋势.

3 讨论

3.1 路旁土壤重金属不同空间分布的原因

路旁土壤不同重金属出现不同空间分布, 可能与不同重金属所赋存的颗粒物大小有关. 有研究表明^[31], 在汽车所排放的烟尘颗粒物中粒径 $> 9 \mu\text{m}$ 的颗粒占 40%, 粒径在 $1 \sim 9 \mu\text{m}$ 之间的颗粒占 20%, 粒径 $< 1 \mu\text{m}$ 的颗粒占 40%. 对于主要赋存在较小颗粒物上的重金属来说, 由于汽车行驶造成的路面空气湍流等原因, 不易在路基处沉降, 而在离开路基一段距离后, 因空间动力条件的减弱发生大量沉降, 从而出现偏态分布形式, 重金属所赋存的颗粒物粒径越小, 其峰值位置离路基越远. 与此相反, 如果重金属主要赋存在较大颗粒物上, 那么则易在近路基处发生沉降, 随后实现一个大、中、小颗粒物的混合沉降区, 从而出现 3 阶多项式分布形式^[26]. 过去某些研究^[27,29,30], 由于采样断面太短等原因, 所得出的路旁土壤重金属含量在道路两侧呈指数下降的结论, 并不完全符合客观实际.

3.2 土壤 Cr 健康风险较高的原因及其来源

如前所述, 2 断面土壤 Cr 的平均非致癌风险占非致癌总风险的 66.13%, 土壤 Cr 的平均致癌风险占致癌总的 97.83%, Cr 是最主要的健康风险因子. 土壤 Cr 健康风险高于其他重金属的原因并不是含量高的缘故. 据文献^[32], 河南省潮土 Cr 的背景值为 $66.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而研究路段 4 个对照样中有 3 个样品的土壤 Cr 含量低于背景值 (表 2 和表 3), 另一个也仅略高于背景值 ($68.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 土壤 Cr 健康风险高于其他重金属的原因, 主要是由于 Cr 呼吸

暴露途径的 SF 值远大于 Ni 和 Cd, 而其呼吸、摄入和皮肤接触暴露途径的 RfD 值远小于 Zn、Pb、Cu 和 Ni (表 1) 的缘故。Cd⁶⁺ 具有很强的致癌风险, 其 SF 为 42.00, 分别是 Ni 和 Cd 的 SF 值的 50 倍和 6.67 倍; 其非致癌风险也较强, 其 RfD 值均小于或远小于其他重金属。由式(4)~(6)可以看出, RfD 对 HQ 和 HI 的贡献是负的, 而 SF 对 CR 和 TCR 的贡献是正的, 因此出现了 Cr 健康风险高于其他重金属的现象。当然, 这种现象是在重金属含量一定范围内出现的。可以预见, 随着时间的推移, Pb、Cd、Cu 和 Zn 等交通源重金属在土壤中积累会不断增加, 其健康风险必将超过 Cd 等混合源重金属。

另外, 在计算土壤 Cr 的 HQ、HI、CR 和 TCR 过程中, 用 Cr⁶⁺ 的 RfD 和 SF 代替了总 Cd 的 RfD 和 SF (原因见前述), 这也会在一定程度上凸显 Cr 的健康风险。就致癌风险来说, 如果按土壤 Cr⁶⁺ 含量占总 Cr 含量的 70% 计, WS 和 XS 断面平均健康风险分别为 1.90×10^{-6} 和 1.55×10^{-6} , 也超过了 US EPA 的推荐标准。因此, 用 Cr⁶⁺ 代替总 Cr 并不是导致土壤 Cr 健康风险较高的主要原因。

从表 2 和表 3 可以看出, 2 断面土壤 Cr 在公路两侧基本上呈偏态分布, 说明其来源一定与交通活动有关。很多研究表明^[24,26,27], 路旁土壤中的 Cr 除与交通运输有关外, 还与土壤母质有关, 是混合源重金属。汽车尾气烟尘中, 以及轮胎和刹车衬里磨损产生的微粒中都含有 Cr^[30,33], 它们通过空气迁移和干、湿沉降可进入路旁土壤, 从而导致土壤 Cr 污染。

4 结论

(1) 通车时间越长其路旁土壤重金属含量越高。通车时间 11 a 的湾刘断面两侧 300 m 范围内各样点土壤 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Ni 的平均含量分别为 14.59、57.18、74.00、121.02、1.35 和 56.25 mg·kg⁻¹, 而通车 4 a 的小王庄断面分别为 12.46、47.56、44.35、94.35、0.99 和 33.73 mg·kg⁻¹。路旁土壤重金属含量的空间分布形式要么随距离的增加呈偏态分布(如 Cr、Ni 和 Pb)要么呈 3 阶多项式分布(如 Ni), 含量峰值多出现在距路基 15~50 m 之间。

(2) 两个研究断面路旁土壤 6 种重金属的 HQ 和 HI 均小于 1, 短期内不会对居民健康产生非致癌风险。HQ_{Cr} 值对 HI 的贡献率平均为 66.13%, Cr 是最主要的非致癌风险因子。

(3) 两个研究断面路旁土壤各个样点的 CR_{Cr} 和 TCR 均超出 US EPA 推荐标准, 但未超出相关专家的宽松标准, 表明存在重金属致癌健康风险的可能性, 应引起高度关注。各样点 CR_{Cr} 对 TCR 的贡献率平均高达 97.83%, Cr 也是最主要的致癌风险因子。

(4) 通车时间较长的湾刘断面的土壤重金属平均非致癌和致癌总风险均高于通车时间较短的小王庄断面。随着离开公路路基距离的增加, 土壤重金属的非致癌和致癌总风险均呈不规则偏态分布。湾刘断面南北两侧的 HI 和 TCR 峰值分别出现在距路基 200 m 和 50 m 处; 小王庄断面分别出现在距路基 25 m 和 35 m 处。

(5) 本研究只分析了路旁土壤 6 种重金属的健康风险, 而实际上土壤中还存在其他很多毒性很强的交通源重金属(如 As、Hg 等)和有机污染物(如 PAHs、POPs 等), 并且只计算了吸入暴露途径的致癌健康风险, 因此本研究的计算结果要低于实际健康风险。另外, 本研究仅布设了两个采样断面, 虽然采取了沿道路 50 m 范围内多点采样来避免采样误差, 但断面数量仍然偏少, 今后应开展更多的案例研究。

参考文献:

- [1] Zimová M, Ďuriš M, Spěvácčková V, *et al.* Health risk of urban soils contaminated by heavy metals[J]. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 2001, **14** (3): 231-234.
- [2] Gržetić I, Ghariani R H A. Potential health risk assessment for soil heavy metal contamination in the central zone of Belgrade (Serbia)[J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2008, **73**(8-9): 923-934.
- [3] Lim H S, Lee J S, Chon H T, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, **96**(2-3): 223-230.
- [4] Chen G L, Li D W, Liu J, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment in the vicinity of the abandoned pyrite smelting slag[J]. *Disaster Advances*, 2010, **3**(4): 362-366.
- [5] 张厚坚, 王兴润, 陈春云, 等. 典型铬渣污染场地健康风险评价及修复指导限值[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(7): 1445-1450.
- [6] Lai H Y, Hseu Z Y, Chen T C, *et al.* Health risk-based assessment and management of heavy metals-contaminated soil sites in Taiwan[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, **7**(10): 3595-3614.
- [7] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的县域土壤重金属健康风险评价——以浙江省慈溪市为例[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(3): 63-64.
- [8] 杨刚, 伍钧, 孙百晔, 等. 雅安市耕地土壤重金属健康风险

- 评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(增刊): 779.
- [9] 车飞, 于云江, 胡成, 等. 沈抚灌区土壤重金属污染健康风险初步评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1439-1443.
- [10] 郭广慧, 宋波. 城市土壤重金属含量及其对儿童健康风险的初步评价——以四川省宜宾市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(8): 946-952.
- [11] 王晓云, 马建华, 侯千, 等. 开封市幼儿园地表灰尘重金属积累及健康风险[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 583-593.
- [12] 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 922-930.
- [13] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund, Vol. I: Human health evaluation manual[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [14] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund, Vol. I: Human health evaluation manual[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1991.
- [15] U. S. EPA. 2008. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund Sites[S]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002.
- [16] U. S. EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I: Human health evaluation manual (part E, Supplemental guidance from dermal risk assessment) interim[S]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2004.
- [17] 姜林, 王岩. 场地环境评价指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. 45-47.
- [18] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 548-554.
- [19] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [20] 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 等. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. 安全与环境学报, 2008, **8**(4): 152-156.
- [21] HJ/T 25-1999, 工业企业土壤环境质量风险评价基准[S].
- [22] 徐非, 谢争. 污染土壤中六价铬的测定[J]. 环境监测管理与技术, 2008, **20**(5): 42-43.
- [23] Chow T J. Lead accumulation in roadside soil and grass[J]. Nature, 1970, **225**(5229): 295-296.
- [24] Motto H L, Daines R H, Chilko D M, *et al.* Lead in soils and plants: its relation to traffic volume and proximity to highways[J]. Environmental Science and Technology, 1970, **4**(3): 231-237.
- [25] Lagerwerff J V, Specht A W. Contamination of roadside soil and vegetation with cadmium, nickel, lead, and zinc[J]. Environmental Science and Technology, 1970, **4**(7): 583-586.
- [26] Turer D G, Maynard B J. Heavy metal contamination in highway soils. Comparison of Corpus Christi, Texas and Cincinnati, Ohio shows organic matter is key to mobility[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2003, **4**(4): 235-245.
- [27] Van Bohemen H D, Van De Laak W H J. The influence of road infrastructure and traffic on soil, water, and air quality[J]. Environmental Management, 2003, **31**(1): 50-68.
- [28] Wang X S, Qin Y, Chen Y K. Heavy metals in urban roadside soils, Part 1: effect of particle size fractions on heavy metals partitioning[J]. Environmental Geology, 2006, **50**(7): 1061-1066.
- [29] Sutherland R A, Tolosa C A. Variation in total and extractable elements with distance from roads in an urban watershed, Honolulu, Hawaii[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, **127**(1-4): 315-338.
- [30] 马建华, 谷蕾, 李文军. 连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累及潜在风险[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 894-899.
- [31] 宋吉明, 侯春芳. 汽车尾气中的铅在公路旁水稻叶片中的积累[J]. 环境保护科学, 1985, **11**(1): 40-42.
- [32] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 93-256.
- [33] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway[J]. Science of the Total Environment, 1999, **235**(1-3): 143-150.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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