

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟及影响因子 ..... 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 ..... 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析 ..... 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组成及变化特征 ..... 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM<sub>2.5</sub> 中元素碳、有机碳的分布特征 ..... 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究 ..... 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 ..... 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 ..... 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 ..... 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 ..... 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 ..... 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 ..... 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 ..... 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 ..... 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 ..... 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 ..... 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 ..... 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 ..... 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 ..... 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 ..... 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 ..... 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 ..... 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 ..... 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 ..... 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 ..... 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 ..... 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 ..... 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 ..... 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 ..... 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 ..... 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 ..... 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 ..... 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 ..... 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 ..... 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 ..... 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 ..... 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 ..... 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 ..... 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 ..... 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 ..... 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 ..... 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 ..... 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 ..... 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌重金属耐性机制研究进展 ..... 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 ..... 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

# 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价

李一蒙<sup>1</sup>, 马建华<sup>1\*</sup>, 刘德新<sup>1</sup>, 孙艳丽<sup>2</sup>, 陈彦芳<sup>1</sup>

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 许昌学院城市与环境学院, 许昌 461000)

**摘要:** 用网格法采集开封城市表层土样 99 个, 测定其 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量. 分别采用污染负荷指数 (PLI) 和潜在生态风险指数 (RI) 评价土壤重金属污染和潜在生态风险程度, 应用 Kriging 空间插值法探讨土壤重金属污染和生态风险空间分布, 并对重金属的来源进行讨论. 结果表明, 开封城市土壤大部分发生了 Cd 重度污染, Zn 中度污染, Pb 和 Cu 轻度污染, 而 Ni、Cr 和 As 均没有污染. 土壤 Cd 存在极强生态风险, 其余元素均为轻微风险. 各样点 7 种重金属的平均 PLI 为 2.53, 总体上属于中度污染; 平均 RI 为 344.58, 属于很强生态风险. PLI 和 RI 空间分布相似, 高值区分布在东南部的老工业区和陇海铁路开封客、货站附近, 其次为老城区; 低值区位于北部和西部, 污染和生态风险较轻. 镉既是最主要的污染因子又是最主要的潜在生态风险因子, 其来源主要与化肥厂烟尘及污灌区表层土壤空气迁移、交通运输和燃煤等人类活动有关.

**关键词:** 开封市; 重金属; 城市土壤; 空间分布; 污染; 潜在生态风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1037-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.037

## Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China

LI Yi-meng<sup>1</sup>, MA Jian-hua<sup>1\*</sup>, LIU De-xin<sup>1</sup>, SUN Yan-li<sup>2</sup>, CHEN Yan-fang<sup>1</sup>

(1. Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Department of Urban and Environmental Science, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Ninety-nine topsoil (0-15 cm) samples were collected from Kaifeng City, China using the grid method, and then the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in the samples were measured by standard methods. Soil pollution levels and potential ecological risks of the heavy metals were assessed using the pollution load index (PLI) and potential ecological risk index (RI), respectively. Ordinary Kriging interpolation technique was employed to investigate the spatial distribution of PLI and RI of the city. The results showed that high pollution of Cd occurred in Kaifeng urban soils, and there was moderate pollution of Zn, slight pollution of Pb and Cu, and no pollution of Ni, Cr and As. Very high ecological risk was posed by Cd and low risk by other metals. The mean PLI of the 7 metals from all sample points was 2.53, which was categorized as moderate pollution. The average RI was 344.58 which represented a considerable ecological risk. PLI and RI shared a similar spatial distribution with high values centralized in the old industrial area in the southeast and railway stations for passengers and goods in the south of the city, followed by the old town within the ancient city wall, and low values located in the north and west areas. Cadmium was the main factor for both soil pollution and potential ecological risk primarily due to farmland topsoil in the eastern suburb of Kaifeng City with high Cd concentrations resulted from sewage irrigation deposited in the urban area by wind, human activities such as soot discharged from the chemical fertilizer plant of Kaifeng, transportation and coal combustion.

**Key words:** Kaifeng City; heavy metal; urban soil; spatial distribution; pollution; potential ecological risk

近几十年来,国内外学者对不同城市的土壤重金属分布<sup>[1~10]</sup>、来源<sup>[1, 3, 5, 11~16]</sup>与污染评价<sup>[5, 7, 9, 10, 13~24]</sup>等开展过不少工作,取得了一些重要研究成果. 这些研究表明,与城市所在地土壤背景值或郊区土壤相比,城市土壤中重金属含量(尤其是人为源重金属)明显偏高,发生了不同程度的污染,但各功能区的污染程度存在很大差异. 城市土壤是城市绿地最基本的立地条件,土壤重金属污染势必对城市绿地生态系统健康带来直接和潜在危害. 自从 1980 年 Håkanson<sup>[25]</sup>提出水体沉积物潜在生态风险评价方法以来,一些学者<sup>[14, 19, 26~29]</sup>将其引入城市土壤重金属潜在生态风险评价,但没有根据

参评重金属种类和毒性大小,科学地调整单项潜在生态风险指数 ( $E$ ) 和综合潜在生态风险指数 (RI) 的风险等级划分标准,完全照搬 Håkanson 分级标准,影响了评价结果的可靠性. 还有些学者<sup>[30, 31]</sup>虽然调整了  $E$  和 RI 的分级标准,但没有给出调整方法,具有一定的随意性,且彼此不甚一致. 本研究以河

收稿日期: 2014-07-10; 修订日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171409, 41201211, 41301336); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (12JJD790023); 教育部和河南省共建河南大学项目 (SBGJ090101)

作者简介: 李一蒙 (1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用/覆被变化及其环境效应, E-mail: 535789791@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: mjh@henu.edu.cn

南省开封市城市土壤为例,在用网格法采集表层土壤样品的基础上,测定样品 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量,使用污染负荷指数法评价土壤重金属污染程度,在调整  $E$  和 RI 分级标准的基础上开展潜在生态风险评价,旨在为城市土壤重金属污染提供更多的研究案例,提出可操作性的潜在生态风险指数分级调整方法,同时也对开封城市绿地建设具有一定参考价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

开封是我国首批 24 座历史文化名城之一,已有 4 000 多年的建城史。位于河南省中东部的黄淮平原上,地势平坦,海拔高度在 70 m 左右。属于暖温带大陆性季风气候,年均降水量 636 mm,年均气温 14℃。成土母质为黄河冲积物,土壤类型主要是黄潮土。质地偏砂,多为粉壤土和砂壤土。据笔者测定,开封城市土壤平均 pH 值为 7.91,有机质平均含量为 37.2 g·kg<sup>-1</sup>,阳离子交换量平均为 7.76 cmol·kg<sup>-1</sup>。2012 年开封市建成区面积 94 km<sup>2</sup>,城区人口 85.57 万。累计接待国内外旅客 3 469 万人次,旅游收入占 GDP 的 12.46%。工业企业以化工、制药和有色金属加工为主。传统工业主要集中在城市东南部;近些年来,随着“郑(州)汴(开封)一体化”的推进,在城市西部逐渐形成了以现代工业、金融商贸、休闲娱乐为基本功能的汴西新区。

### 1.2 样品采集

利用 1:2.5 万开封市城区地图,按 500 m × 500 m 划分网格,其中有效网格(有绿地的网格)99 个。2011 年 3 月在每个网格中心附近选取绿地进行土壤样品采集,同时用 GPS 进行定位。每个样点上,首先在 4 m<sup>2</sup> 范围内按“梅花形”布设 5 个子样点,分别用不锈钢铲采集表层(0~15 cm)土壤子样;然后将 5 个子样充分混合,得到 500 g 左右土壤样品。

### 1.3 样品处理与重金属测定方法

在实验室,先将样品风干,拣出枯枝落叶、砖瓦块和垃圾等侵入体;然后用木棍将样品碾碎,全部通过 2 mm 尼龙筛;最后将其充分混合,从中多点(约 30 点)取样约 5 g,用玛瑙研钵进一步研磨,使之全部通过 0.149 mm 尼龙筛,备用。

土壤镍、总铬、铜和锌含量测定采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17139-1997、GB/T 17137-1997 和 GB/T 17138-1997),铅和镉含量测定采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,砷含量测定

采用原子荧光光度法(DB51/T 836-2008)。使用仪器主要有 AA-6601F 型原子吸收分光光度计(日本岛津)、X-Series II 型 ICP-MS(美国赛默飞世尔)和 KYS02 型原子荧光光度计(北京海光)。在测定过程中,所有样品均平行试验 2 次,并用国家标准土样(ESS-2,棕壤)进行回收试验。二次平行试验的相对偏差均在 5% 以内;标样 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 实测值的标准偏差分别为 0.28、0.002、1.55、0.54、1.14、0.53 和 1.19 mg·kg<sup>-1</sup>,回收率分别为 98.00%、100.00%、97.83%、100.98%、100.80%、101.79% 和 102.83%。

### 1.4 土壤重金属污染评价方法

采用污染负荷指数(pollution load index, PLI)<sup>[32]</sup>进行土壤重金属污染评价,计算公式为:

$$CF_i = \frac{c_i}{c_n} \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \cdots \times CF_n} \quad (2)$$

式中,CF<sub>*i*</sub>为重金属 *i* 的污染指数;*c<sub>i</sub>*为重金属 *i* 的含量实测值;*c<sub>n</sub>*为重金属 *i* 的背景值,本研究采用中国潮土背景值<sup>[33]</sup>。CF 的污染分级标准为:CF ≤ 1 为无污染(I),1 < CF ≤ 2 为轻度污染(II),2 < CF ≤ 3 为中度污染(III),CF ≥ 3 为重度污染(IV)<sup>[32]</sup>。关于 PLI 的污染分级标准,Tomlinson 等<sup>[32]</sup>最初将 PLI < 1 定为无污染,PLI > 1 为污染。之后有些学者<sup>[34]</sup>对其进行了进一步划分:PLI ≤ 1 为无污染,1 < PLI ≤ 2 为中度污染,2 < PLI ≤ 3 为强度污染,PLI ≥ 3 为极强度污染。鉴于文献[34]没有给出“轻度污染”等级,故本研究将其调整:PLI ≤ 1 为无污染(I),1 < PLI ≤ 2 为轻度污染(II),2 < PLI ≤ 3 为中度污染(III),PLI ≥ 3 为重度污染(IV)。

### 1.5 潜在生态风险评价方法

潜在生态风险采用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数(potential ecological risk index, RI)<sup>[25]</sup>进行评价,计算公式为:

$$RI_j = \sum_{i=1}^n E_j^i = \sum_{i=1}^n (T^i \times C_j^i) = \sum_{i=1}^n \left( T^i \times \frac{c_j^i}{c_i^i} \right) \quad (3)$$

式中,RI<sub>*j*</sub>为 *j* 样点多种重金属综合潜在生态风险指数;*E<sub>j</sub><sup>i</sup>*为 *j* 样点重金属 *i* 的单项潜在生态风险指数;*T<sup>i</sup>*为重金属 *i* 的毒性系数(*T<sup>Cd</sup>* = 30 > *T<sup>As</sup>* = 10 > *T<sup>Cu</sup>* = *T<sup>Ni</sup>* = *T<sup>Pb</sup>* = 5 > *T<sup>Cr</sup>* = 2 > *T<sup>Zn</sup>* = 1);*C<sub>j</sub><sup>i</sup>*为重金属 *i* 的污染指数;*c<sub>j</sub><sup>i</sup>*为 *j* 样点土壤重金属 *i* 的实测含量;*c<sub>i</sub><sup>i</sup>*为重金属 *i* 的参比值。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量分析

开封城市土壤重金属含量的箱线图见图 1。土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 6.31、1.05、53.11、36.40、23.87、36.71 和 164.03 mg·kg<sup>-1</sup>。其中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 含量分别是潮土背景值<sup>[33]</sup>的 1.51、1.67、2.28 和 10.2 倍，As、Cr 和 Ni 含量分别比背景值低 35%、20% 和 19%。各个重金属都出现了较多的极端异常值，表明城市土壤重金属含量受城市人类活动影响强烈，区域差异明显。

与国内主要省(区)会城市相比(表 1)，开封城市土壤平均 As 含量最低，Cr、Pb、Ni 含量比大多数

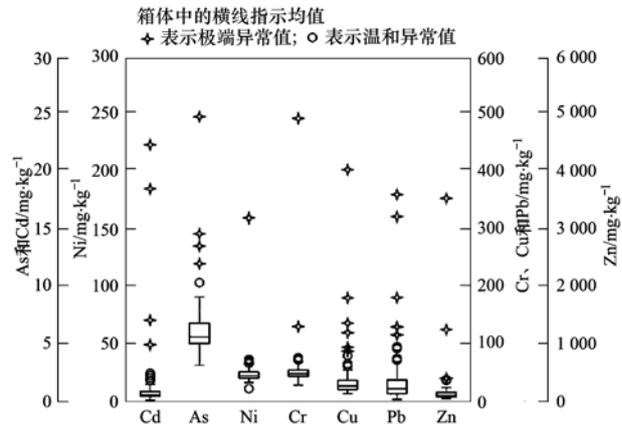


图 1 开封城市土壤重金属含量箱线图  
Fig. 1 Box plot of heavy metal concentrations in urban soils of Kaifeng

表 1 国内不同城市的土壤重金属含量比较<sup>1)</sup>

Table 1 Comparison of heavy metal concentrations in urban soils from different cities of China

| 城市                   | 重金属含量/mg·kg <sup>-1</sup> |        |       |        |       |        |       |
|----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                      | Cu                        | Zn     | Ni    | Pb     | Cd    | Cr     | As    |
| 北京 <sup>[18]</sup>   | 17.73                     | 92.9   | 24.00 | 23.30  | 0.13  | 61.00  | 7.60  |
| 上海 <sup>[9]</sup>    | 27.80                     | 99.36  | —     | 28.86  | —     | 87.72  | —     |
| 广州 <sup>[35]</sup>   | 11.00                     | 277.00 | 11.10 | 65.40  | 0.23  | 22.40  | 17.40 |
| 杭州 <sup>[36]</sup>   | 52.00                     | 206.90 | —     | 88.20  | 1.20  | —      | —     |
| 沈阳 <sup>[37]</sup>   | 41.60                     | 234.80 | —     | 116.76 | 1.10  | 67.90  | 13.39 |
| 贵阳 <sup>[24]</sup>   | 66.10                     | 243.00 | 38.90 | 79.50  | 0.98  | —      | 16.80 |
| 徐州 <sup>[2]</sup>    | 35.70                     | 144.10 | 34.30 | 43.30  | 0.54  | 78.40  | 39.80 |
| 长春 <sup>[16]</sup>   | 29.4                      | 90.0   | —     | 35.4   | 0.13  | 66.0   | 12.5  |
| 西安 <sup>[38]</sup>   | 94.98                     | 421.46 | —     | 230.52 | —     | 167.28 | 10.62 |
| 香港 <sup>[39]</sup>   | 23.3                      | 125.0  | 12.4  | 94.6   | 0.62  | 23.1   | —     |
| 南京 <sup>[40]</sup>   | 66.1                      | 162.6  | —     | 107.3  | —     | 84.7   | —     |
| 兰州 <sup>[41]</sup>   | 52.41                     | 184.22 | 38.22 | 42.72  | —     | 93.96  | 20.63 |
| 成都 <sup>[42]</sup>   | 42.0                      | 224.0  | —     | 76.9   | 0.36  | 60.0   | 11.0  |
| 郑州 <sup>[43]</sup>   | 27.61                     | 397.96 | 11.68 | 97.27  | 0.91  | 187.75 | —     |
| 乌鲁木齐 <sup>[44]</sup> | 44.03                     | 168.74 | —     | 55.17  | —     | 117.08 | —     |
| 呼和浩特 <sup>[45]</sup> | 30.07                     | 89.93  | 16.47 | 11.63  | —     | 54.75  | 6.40  |
| 哈尔滨 <sup>[46]</sup>  | 34.5                      | 108.6  | —     | 41.1   | 0.13  | —      | —     |
| 贵阳 <sup>[47]</sup>   | 58.78                     | 155.58 | —     | —      | —     | 83.01  | 20.51 |
| 太原 <sup>[26]</sup>   | 28.87                     | 86.08  | 29.76 | 26.29  | 0.21  | 73.69  | 10.96 |
| 合肥 <sup>[48]</sup>   | 38.6                      | 108.8  | 27.3  | 37.0   | 0.2   | —      | 10.8  |
| 重庆 <sup>[49]</sup>   | 24.63                     | 96.77  | 25.64 | 32.61  | 0.98  | 26.58  | 8.02  |
| 石家庄 <sup>[50]</sup>  | 27.39                     | 104.48 | 28.2  | 31.0   | 0.28  | 71.85  | 9.42  |
| 开封(本研究)              | 36.40                     | 164.03 | 23.87 | 36.71  | 1.05  | 53.11  | 6.31  |
| Mean                 | 39.61                     | 173.32 | 24.76 | 63.71  | 0.57  | 77.91  | 13.89 |
| SD                   | 18.79                     | 93.26  | 9.56  | 47.97  | 0.40  | 42.68  | 8.28  |
| Cv/%                 | 47.44                     | 53.81  | 38.62 | 75.30  | 71.51 | 54.78  | 59.63 |

1) “—”表示无数据,下同

城市低,Cd 含量比大多数城市高,而 Cu、Zn 含量处于中等水平。从统计的 23 个城市来看,7 种重金属含量的变异系数在 38.62% ~ 75.30% 之间,均属中等变异,这与不同城市的人类活动强度和土壤元素背景差异有关。

2.2 土壤重金属污染特征与空间分布

开封城市土壤各个重金属平均 CF 的大小顺序依次为: Cd(10.48) > Zn(2.28) > Pb(1.68) > Cu(1.51) > Ni(0.81) > Cr(0.80) > As(0.65),其中 Cd 属于重度污染,Zn 属于中度污染,Pb 和 Cu 为轻

度污染, Ni、Cr 和 As 没有发生污染. 从各个重金属不同污染级别样点数占总样点数的比例(表 2)来看, 绝大部分样点 As、Cr 和 Ni 的 CF 属于 I 级, 没有发生污染, I 级样点数分别占总样点数的 92.93%、91.92% 和 91.92%; 大部分样点 Zn、Cu 和 Pb 的 CF 属于 I 级和 II 级, II 级污染样点数分别占总样点数的 48.49%、42.42% 和 30.30%; 大部分样点 Cd 的 CF 属于 III 级和 IV 级污染, IV 级污染样点数占总样点数的 65.66%, Cd 是最主要的污染因子.

表 2 不同污染级别样点数占样点总数的百分数

Table 2 Percentages of sites at different pollution levels

| 评价指标 | in the total sample sites |       |       |       |
|------|---------------------------|-------|-------|-------|
|      | 不同污染级别样点比例/%              |       |       |       |
|      | 无污染                       | 轻度污染  | 中度污染  | 重度污染  |
| As   | 92.93                     | 7.07  | 0     | 0     |
| Cd   | 3.03                      | 11.11 | 20.20 | 65.66 |
| Cr   | 91.92                     | 7.07  | 1.01  | 0     |
| CF   |                           |       |       |       |
| Cu   | 45.46                     | 42.42 | 4.04  | 8.08  |
| Ni   | 91.92                     | 8.08  | 0     | 0     |
| Pb   | 50.51                     | 30.30 | 6.06  | 13.13 |
| Zn   | 26.26                     | 48.49 | 17.17 | 8.08  |
| PLI  | 38.39                     | 33.33 | 14.14 | 14.14 |

开封城市土壤 7 种重金属的平均 PLI 为 2.53, 属于中度污染. 由表 2 可见, 无污染样点数占 38.39%, II 级污染样点占 33.33%, III 级和 IV 级污染样点各占 14.14%.

为了全面反映开封城市土壤重金属 PLI 空间分布, 在 ArcGIS 10.0 支持下, 用普通克里格 (Ordinary Kriging) 空间插值技术<sup>[51]</sup> 得到图 2. 从中可见, PLI 的高值区位于开封市区的东南部, PLI 变化在 7.86~51.98 之间, 达到重度污染; 其次为老城区 (古城墙范围之内) 中偏北部和陇海铁路开封客、货站附近, PLI 变化在 2.03~9.02 之间, 达到轻度和中度污染; 西部和北部基本上没有被污染.

### 2.3 土壤重金属潜在生态风险评价

#### 2.3.1 关于潜在生态风险分级标准的调整

1980 年 Håkanson 研究了湖积物中 PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn 等 8 种污染物的潜在生态风险, 其毒性系数 ( $T$ ) 分别为 40、40、30、10、5、5、2 和 1, 根据污染物中最大毒性系数 ( $T^{PCB} = T^{Hg} = 40$ ) 和 8 种污染物的毒性响应系数之和 (133) 提出了  $E$  和 RI 的分级标准<sup>[25]</sup> (表 3). 据研究<sup>[25, 52, 53]</sup>,  $E$  值风险分级的第一级上限值由非污染的污染系数 ( $C=1$ ) 与参评污染物中最大毒性系数相乘得到, 其他风险级别的上限值分别用上级的分级值乘 2 得

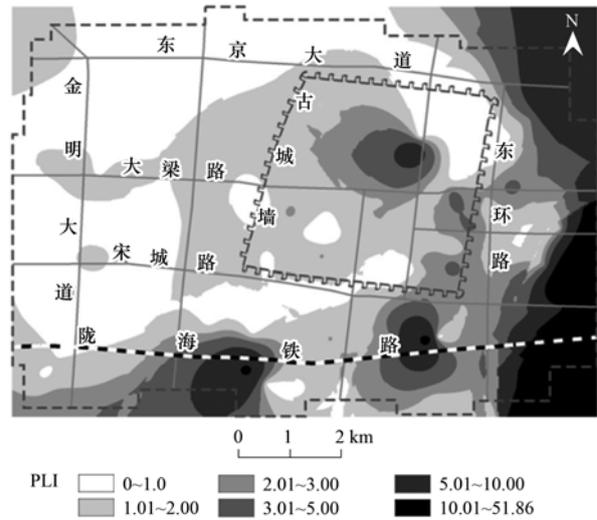


图 2 开封城市土壤重金属的 PLI 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil metal PLI in Kaifeng City

到. 本研究的 7 种重金属中, Cd 的  $T$  值最大 (30), 据此得到本研究  $E$  的第一级生态风险 (轻微风险) 分级标准为  $<30$ , 余者依次乘 2 得到 (表 3). 由式 (3) 可见, RI 的大小与参评污染物的种类和数量有关, 污染物的数目越多、毒性越强, RI 值就越大. 因此, 应用 RI 进行生态风险评价时, 必须根据参评污染物的种类和数量对其进行调整. 本文根据所研究的 7 种重金属对 RI 的分级标准做如下调整: 先根据 Håkanson 的第一级分级界限值 (150) 除以 8 种污染物的毒性系数总值 (133), 得到单位毒性系数的 RI 分级值 (1.13); 然后将单位毒性系数的 RI 分级值乘以本研究 7 种重金属的毒性系数总值 (58), 并取十位整数得到 RI 第一级界限值 ( $1.13 \times 58 = 65.548 \approx 70$ ); 其他级别的分级值分别用上级的分级值乘 2 得到 (表 3).

表 3 本研究的  $E$  和 RI 分级标准与 Håkanson 分级标准的比较

Table 3 Comparison of  $E$  and RI standards for different ecological risks with heavy metals between the Håkanson standards and this paper

| $E$        |            | RI         |            | 生态风险级别 |
|------------|------------|------------|------------|--------|
| Håkanson   | 本研究        | Håkanson   | 本研究        |        |
| $< 40$     | $< 30$     | $< 150$    | $< 70$     | 轻微风险   |
| 40~80      | 30~60      | 150~300    | 70~140     | 中等风险   |
| 80~160     | 60~120     | 300~600    | 140~280    | 较强风险   |
| 160~320    | 120~240    | $\geq 600$ | $\geq 280$ | 很强风险   |
| $\geq 320$ | $\geq 240$ | —          | —          | 极强风险   |

#### 2.3.2 土壤重金属潜在生态风险评价及 RI 空间分布

以中国潮土元素背景值<sup>[33]</sup> 作参比, 计算得到开封城市土壤 7 种重金属  $E$  值及各样点 RI 值, 并根据表 3 所列分级标准开展潜在生态风险评价 (表 4).

表 4 不同生态风险级别样点数占样点总数的百分数/%

Table 4 Percentages of sites at different risk levels in the total sample sites/%

| 评价指标        | 轻微风险     |       | 中等风险     |       | 较强风险     |       | 很强风险     |       | 极强风险     |       |
|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
|             | Håkanson | 本研究   |
| As          | 100      | 100   | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     |
| Cd          | 5.06     | 3.04  | 23.23    | 10.10 | 34.34    | 34.34 | 24.24    | 29.29 | 13.13    | 23.23 |
| Cr          | 100      | 100   | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     |
| <i>E</i> Cu | 98.99    | 97.98 | 1.01     | 1.01  | 0        | 1.01  | 0        | 0     | 0        | 0     |
| Ni          | 100      | 100   | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     |
| Pb          | 96.97    | 96.97 | 2.02     | 1.01  | 1.01     | 2.02  | 0        | 0     | 0        | 0     |
| Zn          | 98.99    | 98.99 | 1.01     | 1.01  | 0        | 0     | 0        | 0     | 0        | 0     |
| RI          | 52.53    | 11.12 | 31.31    | 34.34 | 8.08     | 34.34 | 8.08     | 20.20 | —        | —     |

开封城市土壤各个重金属平均 *E* 的大小顺序依次为: Cd(314.24) > Pb(8.34) > Cu(7.55) > As(6.50) > Ni(4.03) > Zn(2.27) > Cr(1.59). 土壤 Cd 的潜在生态风险程度很高, 达到较强、很强和极强生态风险的样点数分别占样点总数的 34.34%、29.29% 和 23.23%, 是最主要的生态风险因子. 其他重金属的生态风险较低, Cu、Pb 和 Zn 达到轻微生态风险的样点占样点总数的 96% 以上, 所有样点的 As、Cr 和 Ni 均属于轻微生态风险.

从不同 RI 风险级别样点数占样点总数的比例(表 4)来看, 轻微生态风险样点数占 11.12%, 中等和较强风险均占 34.34%, 很强风险占 20.20% 左右. 开封城市土壤重金属 RI 的空间分布(图 3)与 PLI 分布图(图 2)相似, 也是从西北向东南逐渐增大, 高值区出现在东南部的老工业区和陇海铁路客、货站附近, RI 变化在 558.48 ~ 6 927.20 之间, 处于很强生态风险; 其次为老城区, RI 大多变化在 282.57 ~ 430.27, 达到较强和很强生态风险; 低值

区位于市区西部和北部, 大部分属于中等生态风险.

### 3 讨论

城市土壤重金属的来源是多方面的, 但主要与城市人类活动有关, 如生活和建筑垃圾、燃煤烟尘、汽车尾气和轮胎磨损、工业粉尘、金属腐蚀等<sup>[1, 3, 5, 12-16, 54]</sup>, 这些人为源重金属粉尘和垃圾通过干湿沉降或堆放可导致土壤重金属含量增加<sup>[14, 55]</sup>. 进入土壤中的重金属在碱性条件下(开封城市土壤呈碱性反应), 多以难溶性化合物或单质金属形式存在, 很难发生垂直迁移, 随着时间的推移土壤重金属富集将越来越明显<sup>[56, 57]</sup>. 由于城市人类活动的强度和性质存在着空间差异, 所以不同城市功能区的土壤重金属污染和生态风险差别很大. 开封城市土壤重金属污染及生态风险高值区主要集中在东(南)部和陇海铁路开封客、货站附近, 主要与该区工厂较为集中和客货转运量大有关. 开封市东南部是传统的老工业区, 建设有火电厂、化肥厂、锅炉厂、仪表厂、空分厂、炼锌厂、碳素厂、联合收割机厂等等. 这些企业大多是解放初期建立的, 虽然近些年来进行了设备更新和工艺改进, 但长期的工业粉尘沉降对城市土壤重金属积累的效应依然存在. 陇海铁路开封客、货站建于 20 世纪 30 年代, 人流、车流和物流密集, 重金属粉尘产生量相对较大, 导致土壤重金属含量富集. 开封市老城区北部也有一些老工业企业, 如开封日用化工厂(现已搬迁)、化学试剂厂、塑料厂等, 这可能是该区域土壤重金属含量高于西部和北部的原因. 此外, 开封老城区历史悠久, 人口密集, 生活垃圾量大, 且居民生活长期以燃煤为主, 汽车数量不断增多, 也是其土壤重金属含量较高的原因之一.

开封城市土壤 Cd 污染和潜在生态风险最为严重的主要原因, 可能有两点: ①城市东南部的化肥厂排放的烟尘和废水中含有大量的 Cd. 据开封

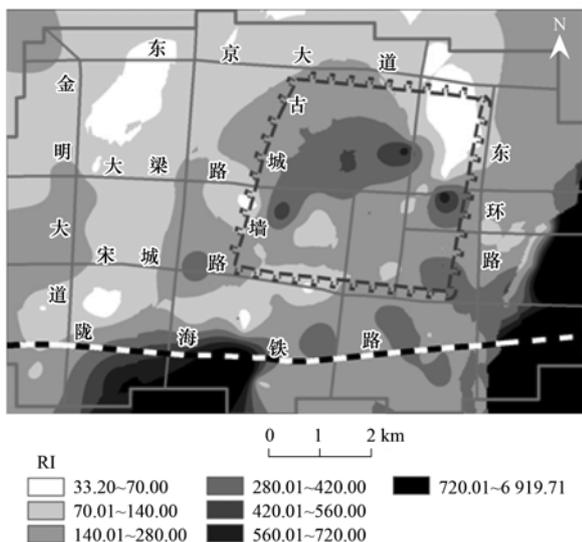


图 3 开封城市土壤重金属综合潜在生态风险分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil metal RI in Kaifeng City

市环境监测站长期监测,化肥厂排污河道(化肥河)中 Cd 含量在 2005 年以前均超过我国农田灌溉水质标准,利用该河污水形成的污灌区(1962 年开始灌溉)土壤发生了严重 Cd 污染,Cd 平均含量为  $1.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[58]</sup>,远超过其潮土背景值( $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和我国土壤环境质量二级标准( $\leq 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。化肥厂排放的含镉气溶胶以及化肥河污灌区表层土壤可随空气迁移进入市区东南部,通过干湿沉降使该区土壤发生严重的镉污染和潜在生态风险。②除工业污染外,化石燃料燃烧和交通运输也是城市土壤 Cd 的重要来源之一<sup>[3, 5, 14, 54, 59]</sup>。开封市是典型的燃煤型城市,随着工业发展和人口数量增加,原煤消耗量和汽车拥有量逐年增加,含镉气溶胶排放量也呈增加趋势,这可能是城市土壤 Cd 污染较严重和生态风险较高的另一个原因。陇海铁路开封客、货站交通流量大,货物种类繁多(尤其是金属原材料和机械设备),从而出现土壤 Cd 污染和生态风险峰值区。

#### 4 结论

(1)开封市表层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 6.31、1.05、53.11、36.40、23.87、36.71 和  $164.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 含量高于我国潮土表土背景值,As、Cr 和 Ni 低于全国潮土表土背景值。

(2)开封城市土壤大部分样点发生了 Cd 重度污染,Zn 中度污染,Pb 和 Cu 轻度污染;而 Ni、Cr 和 As 均没有污染。各样点 7 种重金属的平均 PLI 为 2.53,总体上属于中度污染。东南部老工业区土壤重金属污染最为严重,达到重度污染;老城区和陇海铁路开封客、货站附近为中度或重度污染,西部和北部基本上没有发生污染。

(3)开封城市土壤各个重金属平均  $E$  的大小顺序依次为: Cd (314.24) > Pb (8.34) > Cu (7.55) > As (6.50) > Ni (4.03) > Zn (2.27) > Cr (1.59),7 种重金属平均 RI 为 344.58,属于很强生态风险。RI 的空间分布与 PLI 相似,高值区主要在东南部的老工业区和火车客、货站附近,其次为老城区,均达到很强风险;西部和北部大部分属于中等风险。

(4)镉既是开封城市土壤最主要的污染因子又是最主要的潜在生态风险因子,其来源比较复杂,不仅来自于化肥厂烟尘排放及其污灌区表层土壤空气迁移,还与交通运输和燃煤等人类活动有关。

#### 参考文献:

- [1] Lee C S L, Li X D, Shi W Z, *et al.* Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 45-61.
- [2] Wang X S, Qin Y. Spatial distribution of metals in urban topsoils of Xuzhou (China): controlling factors and environmental implications [J]. *Environmental Geology*, 2006, **49**(6): 905-914.
- [3] Fong F T, Chee P S, Mahmood A A, *et al.* Possible source and pattern distribution of heavy metals content in urban soil at Kuala Terengganu Town Center [J]. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 2008, **12**(2): 458-467.
- [4] Mashal K, Al-Qinna M, Ali Y. Spatial distribution and environmental implications of lead and zinc in urban soils and street dusts Samples in Al-Hashimeyeh Municipality [J]. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2009, **3**(2): 141-150.
- [5] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **174**(1-3): 455-462.
- [6] Maas S, Scheffler R, Benslama M, *et al.* Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(6): 2294-2301.
- [7] Ali S M, Malik R N. Spatial distribution of metals in top soils of Islamabad City, Pakistan [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **172**(1-4): 1-16.
- [8] Li X Y, Cao Y J, Qi L, *et al.* The distribution characteristics of heavy metals in Guiyang urban soils [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2012, **31**(2): 174-180.
- [9] 柳云龙,章立佳,韩晓非,等.上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J].*环境科学*, 2012, **33**(2): 599-605.
- [10] 樊新刚,米文宝,马振宁,等.宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J].*环境科学*, 2013, **34**(5): 1887-1894.
- [11] Davis H T, Aelion C M, McDermott S, *et al.* Identifying natural and anthropogenic sources of metals in urban and rural soils using GIS-based data, PCA, and spatial interpolation [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2378-2385.
- [12] De Moura M C S, Moita G C, Neto J M M. Analysis and assessment of heavy metals in urban surface soils of Teresina, Piauí State, Brazil: a study based on multivariate analysis [J]. *Comunicata Scientiae*, 2010, **1**(2): 120-127.
- [13] Carr R, Zhang C S, Moles N, *et al.* Identification and mapping of heavy metal pollution in soils of a sports ground in Galway City, Ireland, using a portable XRF analyser and GIS [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2008, **30**(1): 45-52.
- [14] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China

- [J]. *Microchemical Journal*, 2010, **94**(2): 99-107.
- [15] Malik R N, Jadoon W A, Husain S Z. Metal contamination of surface soils of industrial city Sialkot, Pakistan: a multivariate and GIS approach [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2010, **32**(3): 179-191.
- [16] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, **108**(1): 27-38.
- [17] Peter E, Adeniyi G. Spatial relationships of urban land use, soils and heavy metal concentrations in Lagos Mainland Area [J]. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2011, **15**(2): 391-399.
- [18] Wang M, Markert B, Chen W, *et al.* Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(10): 5889-5897.
- [19] Hu Y A, 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.
- [20] Simon E, Vidic A, Braun M, *et al.* Trace element concentrations in soils along urbanization gradients in the city of Wien, Austria [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(2): 917-924.
- [21] Al Obaidy A H M, Al Mashhadi A A. Heavy metal contaminations in urban soil within Baghdad City, Iraq [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2013, **4**(1): 72-82.
- [22] Salah E, Turki A, Noori S. Heavy metals concentration in urban soils of Fallujah City, Iraq [J]. *Journal of Environment and Earth Science*, 2013, **3**(11): 100-113.
- [23] 马建华, 李灿, 陈云增. 土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响——以开封市为例[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(4): 743-750.
- [24] 曹益金, 李晓燕, 王干珍, 等. 贵阳市城区土壤重金属累积现状研究[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(2): 484-489.
- [25] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [26] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [27] 汤洁, 陈初雨, 李海毅, 等. 大庆市建成区土壤重金属潜在生态危害和健康风险评价[J]. *地理科学*, 2011, **31**(1): 117-122.
- [28] 崔邢涛, 栾文楼, 牛彦斌, 等. 唐山城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. *中国地质*, 2011, **38**(5): 1379-1385.
- [29] 管后春, 李怀远, 彭苗枝, 等. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *中国地质*, 2013, **40**(6): 1949-1958.
- [30] 徐清, 张立新, 刘素红, 等. 表层土壤重金属污染及潜在生态风险评价——包头市不同功能区案例研究[J]. *自然灾害学报*, 2008, **17**(6): 6-12.
- [31] 陈秀瑞, 卢新卫, 杨光, 等. 西安市区表层土壤重金属风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2012, **25**(2): 41-46.
- [32] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of pollution index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [33] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国科学出版社, 1990.
- [34] 汤洁, 天琴, 李海毅, 等. 哈尔滨市表土重金属地球化学基线的确定及污染程度评价[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(10): 2408-2413.
- [35] Cai Q Y, Mo C H, Li H Q, *et al.* Heavy metal contamination of urban soils and dusts in Guangzhou, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(2): 1095-1106.
- [36] Lu S G, Bai S Q. Contamination and potential mobility assessment of heavy metals in urban soils of Hangzhou, China: relationship with different land uses [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **60**(7): 1481-1490.
- [37] Li X Y, Liu L J, Wang Y G, *et al.* Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China [J]. *Geoderma*, 2013, **192**: 50-58.
- [38] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [39] Li X D, Lee S L, Wong S C, *et al.* The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129**(1): 113-124.
- [40] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Concentrations and chemical speciations of Cu, Zn, Pb and Cr of urban soils in Nanjing, China [J]. *Geoderma*, 2003, **115**(1-2): 101-111.
- [41] Wang B, Xia D S, Yu Y, *et al.* Magnetic records of heavy metal pollution in urban topsoil in Lanzhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(3): 384-395.
- [42] 施泽明, 倪师军, 张成江, 等. 成都市城市土壤中重金属的现状评价[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, **32**(4): 391-395.
- [43] 楚纯洁, 马建华, 朱玉涛. 不同级别城镇土壤重金属污染状况比较分析——以郑州市、中牟县和韩寺镇为例[J]. *地球与环境*, 2009, **37**(4): 395-404.
- [44] 刘玉燕, 刘敏. 乌鲁木齐城市土壤性质及污染研究[J]. *干旱区研究*, 2007, **24**(1): 66-69.
- [45] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [46] 张久明, 迟凤琴, 宿庆瑞, 等. 哈尔滨市城市土壤重金属空间分布特征及相关分析[J]. *东北农业大学学报*, 2010, **41**(7): 56-61.

- [47] 余菲,肖玲,康苗苗. 贵阳市中心城区土壤重金属污染现状及其评价[J]. 城市环境与城市生态, 2011, **24**(3): 5-8.
- [48] 李增福,朱继业,王腊春. 合肥市城市土壤重金属元素含量及空间分布特征[J]. 城市环境与城市生态, 2009, **22**(3): 24-27.
- [49] 汪嘉利,李章平,杨志敏,等. 重庆市主城区土壤重金属的污染特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, **29**(5): 31-35.
- [50] 崔邢涛,栾文楼,郭海全,等. 石家庄城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 现代地质, 2011, **25**(1): 169-175.
- [51] 王劲峰. 空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 76-84.
- [52] Fernández J A, Carballeira A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, **40**(4): 461-468.
- [53] 马建华,王晓云,侯千,等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 2011, **30**(3): 486-495.
- [54] 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.
- [55] Zechmeister H G, Riss A, Hanus-Illy A. Biomonitoring of atmospheric heavy metal deposition by mosses in the vicinity of industrial sites[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2004, **49**(1-3): 461-477.
- [56] Baker D E. Copper: soil, water, plant relationships [J]. Federation Proceedings, 1974, **33**(5): 1188-1193.
- [57] 夏增禄,李森照,穆从如,等. 北京地区重金属在土壤中的纵向分布和迁移[J]. 环境科学学报, 1985, **5**(1): 105-112.
- [58] 韩晋仙,马建华,魏林恒. 污灌对潮土重金属含量及分布的影响——以开封市化肥河污灌区为例[J]. 土壤, 2006, **38**(3): 292-297.
- [59] Sánchez-Martin M J, Sánchez-Camazano M, Lorenzo L F. Cadmium and lead contents in suburban and urban soils from two medium-sized cities of Spain: influence of traffic intensity [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **64**(2): 250-257.

## CONTENTS

|   |   |          |
|---|---|----------|
| Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in Chongqing   | WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i>          | ( 759 )  |
| Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2012-2013   | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>    | ( 768 )  |
| Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM <sub>1.1</sub> from Nanjing  | JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> | ( 774 )  |
| Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Taiyuan, China  | ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i>      | ( 780 )  |
| Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shouzhou City  | LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i>        | ( 787 )  |
| Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China   | XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i>              | ( 794 )  |
| Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels   | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i>     | ( 801 )  |
| Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing  | QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i>    | ( 809 )  |
| Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan   | LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>           | ( 817 )  |
| Organic and Element Carbon in Foliar Smoke  | CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i>                | ( 824 )  |
| Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge   | JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i>      | ( 831 )  |
| Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas                                 | MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i>           | ( 839 )  |
| Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors  | WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i>           | ( 847 )  |
| Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River   | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i>        | ( 855 )  |
| Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River   | LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i>                | ( 862 )  |
| Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River | YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i>             | ( 869 )  |
| Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region        | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i>           | ( 879 )  |
| Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season   | LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>         | ( 888 )  |
| Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation                                   | CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i>               | ( 898 )  |
| Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors  | YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i>              | ( 905 )  |
| Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu   | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i>     | ( 914 )  |
| Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake   | WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i>       | ( 922 )  |
| Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China  | HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>          | ( 928 )  |
| Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu  | JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>          | ( 936 )  |
| Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River   | GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i>          | ( 946 )  |
| Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus  | SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i>           | ( 955 )  |
| Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation   | YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i>              | ( 963 )  |
| Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material  | WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i>    | ( 969 )  |
| Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles   | HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i>             | ( 980 )  |
| Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst  | SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i>           | ( 989 )  |
| Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange   | WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>          | ( 995 )  |
| Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System   | LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i>         | ( 1000 ) |
| Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content                                      | ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i>                | ( 1006 ) |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR  | GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i>          | ( 1013 ) |
| Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell  | TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>     | ( 1021 ) |
| Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite   | HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i>             | ( 1027 ) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China  | LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i>          | ( 1037 ) |
| Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions   | QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i>    | ( 1045 ) |
| Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province                        | ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i>     | ( 1053 ) |
| Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk                   | JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i>         | ( 1060 ) |
| Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>   | ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i>  | ( 1069 ) |
| Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow                                     | LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i>          | ( 1075 ) |
| Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China                                       | LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i>         | ( 1084 ) |
| Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts  | YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i>                   | ( 1092 ) |
| Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials   | DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>          | ( 1098 ) |
| Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing  | SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i>     | ( 1105 ) |
| Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants  | DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>                | ( 1117 ) |
| Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi   | CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i>        | ( 1123 ) |
| Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria   | SHEN Li-dong  | ( 1133 ) |

# 《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

|         |   |                  |    |  |
|---------|---|------------------|----|--|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院   | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717   | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com  | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行