

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 ..... 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM<sub>2.5</sub> 影响霾污染的关键尺度谱特征 ..... 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征及来源分析 ..... 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 ..... 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 ..... 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 ..... 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 ..... 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 ..... 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 ..... 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 ..... 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 ..... 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 ..... 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 ..... 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 ..... 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 ..... 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 ..... 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 ..... 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 ..... 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 ..... 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 ..... 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 ..... 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 ..... 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 ..... 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 ..... 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 ..... 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 ..... 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 ..... 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 ..... 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 ..... 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 ..... 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 ..... 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 ..... 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 ..... 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 ..... 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

<sup>13</sup>C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 ..... 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 ..... 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 ..... 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 ..... 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 ..... 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 ..... 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 ..... 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 ..... 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 ..... 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 ..... 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 ..... 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 ..... 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 ..... 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 ..... 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 ..... 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 ..... 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

# 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价：以临安市为例

郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军\*

(浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省土壤污染修复重点实验室, 临安 311300)

**摘要:** 城市土壤是城市生态系统不可分割的一部分, 与城市居民的人体健康和生活质量密切相关. 本研究以浙江省典型小城市——临安市为研究样区, 共采集 62 个土壤表层样品(0~15 cm, 样品采样密度: 5 个·km<sup>-2</sup>), 基于多元统计学、地统计学结合 GIS 技术研究该地区土壤重金属的污染特征、空间变异结构与分布规律. 土壤重金属 Mn<sub>全量</sub>、Cu<sub>全量</sub>、Zn<sub>全量</sub>、Pb<sub>全量</sub>、Cr<sub>全量</sub>、Cd<sub>全量</sub> 的平均含量分别为 439.42、42.23、196.80、62.55、63.65、0.22 mg·kg<sup>-1</sup>, 与浙江省土壤背景值及环境质量标准相比较, 这些重金属在临安市存在不同程度的累积, 局部污染严重. 单个重金属潜在生态风险危害指数表明, Pb 的潜在生态危害指数最高. pH 与大部分重金属全量以及重金属全量之间存在显著相关关系. 研究区土壤 Pb、Zn 和 Cu 主要来自于城市交通工具的使用和尾气排放, 而 Mn 和 Cr 主要来自于母岩, Cd 主要由市区工厂的长期有害物质排放. 研究区土壤重金属全量及其有效态均具有较强的空间自相关性 [ $C_0/(C_0 + C) < 50%$ ], 其空间分布特征受人为活动的影响极为明显.

**关键词:** 城市土壤; 重金属; 地统计分析; 空间分布; 生态风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2875-09 DOI: 10.13227/j.hjxk.201711028

## Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation

ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, LIN Yu-ye, ZHAO Ke-li, WU Dong-tao, FU Wei-jun\*

(Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, School of Environmental and Resources Science, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China)

**Abstract:** Urban soil is an important part of the urban ecosystem, which is strongly correlated with human health and life quality. In this study, Lin'an city was chosen as a typical small city to study the spatial variation and distribution of heavy metals in urban soils and their pollution characteristics using multivariate analysis, geostatistics, and GIS techniques. A total of 62 soil samples were collected from the study areas. The results indicated that the average concentrations of soil Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, and Cd were 439.42, 42.23, 196.80, 62.55, 63.65, and 0.22 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Compared with the background values and the environmental quality standards, these heavy metals were accumulated in urban soils to some extent. Almost 80% of the study area was polluted by heavy metals. The single potential ecological risk index of heavy metals indicated that Pb had the highest ecological risk. The pH and most of the heavy metals had strong correlations, and there were strong correlations among the heavy metals. The principle component analysis (PCA) showed that Pb, Zn, and Cu had the same pollution source, which was related to vehicle exhausts; Mn and Cr were mainly from the parent material; and Cd was from the emissions of manufacturing plants. The spatial structure and distribution of heavy metals and their corresponding available fractions had strong spatial autocorrelation with all of the  $C_0/(C_0 + C) < 50%$ . Their spatial patterns were influenced by human activities.

**Key words:** urban soil; heavy metals; geostatistical analysis; spatial distribution; ecological risk

目前, 中国城市化进程在持续推进, 城市人口日益增多, 导致城市环境问题日渐频发. 城市土壤是城市生态环境的有机组成部分, 也是城市污染的源头和汇聚地, 城市土壤重金属可以直接或者间接进入大气、水体, 从而影响城市居民的身体健  
康<sup>[1-3]</sup>.

城市土壤重金属污染已经成为国内外环境科学领域研究的热点<sup>[4]</sup>, 目前许多学者对北京<sup>[5]</sup>、上海<sup>[6]</sup>、沈阳<sup>[7]</sup>、南京<sup>[8]</sup>、呼和浩特<sup>[9]</sup>、贵阳<sup>[10]</sup>和开封<sup>[11]</sup>等城市土壤中的 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 等元素

的来源、含量和分布进行了报道. 但是, 这些研究主要集中在大、中城市或是工业化程度较高的城市, 而对于小型及宜居性城市的土壤重金属的研究相对缺乏, 相关信息缺失.

本文以浙江临安为研究区域, 通过地统计学结

收稿日期: 2017-11-02; 修订日期: 2017-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201538); 浙江农林大学大学生创新项目(2013200019); 浙江省土壤污染生物修复重点实验室开放基金项目(FSLAB20160007)

作者简介: 郑晴之(1995~), 女, 主要研究方向为产地环境质量与食品安全, E-mail: 501197818@qq.com

\* 通信作者, E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

合地理信息系统技术,分析研究区土壤重金属的空间变异结构和分布规律;利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法以及潜在生态风险指数法明确研究区土壤重金属污染特征并对研究区的重金属污染状况进行风险评价,以期为小城市发展的安全布局提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

临安市位于东经  $118^{\circ}51' \sim 119^{\circ}52'$ , 北纬  $29^{\circ}56' \sim 30^{\circ}23'$ , 境内地势自西北向东南倾斜, 市境北、西、南三面环山, 形成一个东南向的马蹄形

屏障。临安属季风型气候, 温暖湿润, 年平均气温  $15.8^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量  $1613.9\text{ mm}$ 。临安市境内土壤类型多样, 主要有黄壤、红壤、潮土、水稻土 and 盐土这 5 种土类, 属亚热带低丘森林植被区系。其与杭州主城区邻接, 城区人口规模小, 人均 GDP 处于浙江省县级市中游, 是典型小城市(区)的代表。

### 1.2 土壤样品采集和分析

通过采样方案优化, 在临安城区内网格布点, 平均在每平方公里范围内采集 5 个土壤表层样品 ( $0 \sim 15\text{ cm}$ ), 每个样品重量约  $1\text{ kg}$ 。将 GPS 定位数据导入计算机中, 利用 ArcGIS 9.2 将采样点位数字化(图 1)。

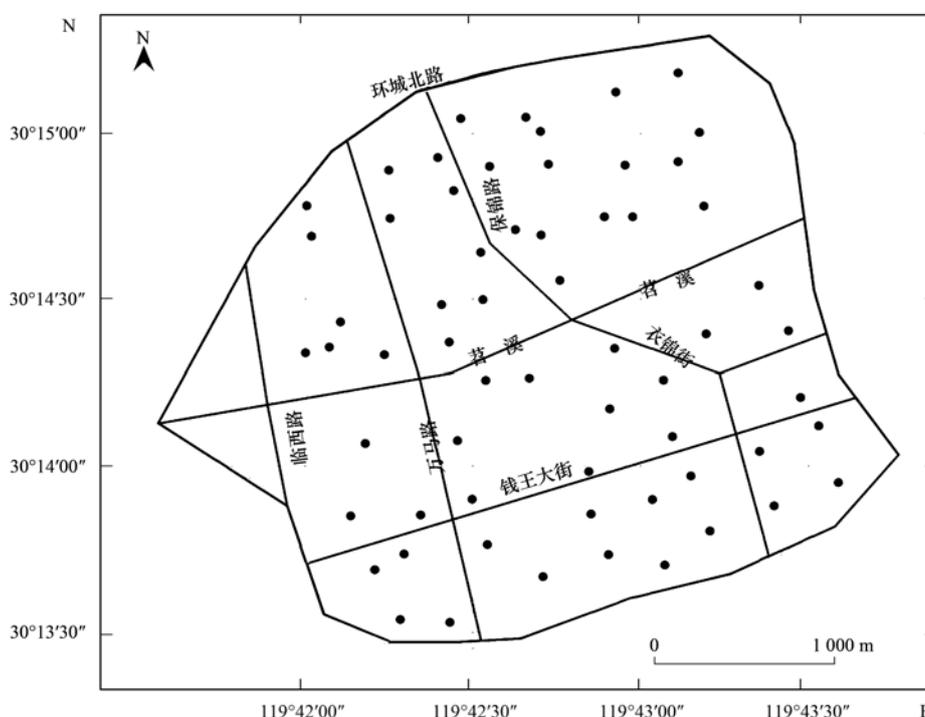


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution map of soil sampling sites

将土壤样品置于室内自然风干, 并在土样半干时将大土块捏碎。待样品风干后, 拣去动、植物残体和石块, 用木棍研细, 过  $2\text{ mm}$  孔径的筛子。再从中  $2\text{ mm}$  土壤样品中取出一部分, 用玛瑙研钵研磨过  $100$  目的筛子。将经研磨过筛的土样装袋, 并贴好标签, 保存备用。

土壤理化性状测定均采用常规分析方法: 土壤 pH 采用  $1:2.5$  的土水比测定; 土壤电导率采用  $1:5$  的土水比测定; 土壤重金属全量采用  $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$  三酸消解法; 重金属有效态采用  $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$  浸提 ( $25^{\circ}\text{C}$  振荡  $1.5\text{ h}$ , 再过滤待测)<sup>[12]</sup>; 重金属 Mn、Cu、Zn、Cr、Pb 的含量采用

ICP-OES (Optima 7000 DV, 美国 PE 公司) 进行测试。为保证实验测定的精度和结果的准确性, 实验样品均设定两个重复, 并采用国家一级标准物质 GSS-4 和 GSS-15 土壤样品进行质量控制。

### 1.3 土壤重金属污染评价

#### 1.3.1 生态风险评价

本研究采用 Hankason 潜在生态危害指数法评价临安市城市土壤中重金属的潜在生态危险。其公式如下<sup>[13-15]</sup>。

单项污染系数:

$$P_i = C_i/C_{0i} \quad (1)$$

单因子潜在生态风险:

$$E_i^i = P_i \times T_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i \quad (3)$$

式中,  $P_i$  为污染物  $i$  的污染指数;  $E_i^i$  为单一金属潜在生态风险因子; RI 为多金属潜在生态风险指数;  $C_i$  为土壤重金属实测浓度;  $C_{0i}$  为研究区域重金属土壤背景值<sup>[16]</sup>;  $T_f^i$  为单个污染物的毒性响应系数 (Pb 为 5、Cu 为 5、Cr 为 2、Zn 为 1、Mn 为 1、Cd 为 30)<sup>[15]</sup>。

### 1.3.2 内梅罗综合污染指数法

综合污染指数法兼顾单因子污染指数平均值和最高值, 全面反映土壤中各污染物的平均污染水平, 突出污染较重的污染物的作用。其公式如下:

$$P_N = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{C_i}{C_{0i}} \right)_{\text{ave}}^2 + \left( \frac{C_i}{C_{0i}} \right)_{\text{max}}^2 \right]} \quad (4)$$

式中,  $P_N$  为综合污染指数;  $(C_i/C_{0i})_{\text{ave}}$  为各污染物中污染指数的算数平均值;  $(C_i/C_{0i})_{\text{max}}$  为各污染物中污染指数最大值<sup>[15]</sup>。

### 1.4 地统计学分析

地统计学基于区域化变量理论, 以变异函数为主要工具, 研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性, 或者存在空间相关性和依赖性的自然现象的科学<sup>[17]</sup>。地统计学最基本的核心是克里格空间插值法, 其被用于绘制空间分布, 进行空间格局识别。本研究利用普通克里格方法绘制重金属空间分布, 该方法要求数据符合正态分布, 根据峰度、偏度结合单样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 联合法检验, 对于不符合正态分布的变量, 进行对数转换, 转换后

较好地符合正态分布, 用于克里格空间插值。

### 1.5 实验数据处理

本研究中, 采用 SPSS 22.0 统计分析软件进行数据的描述统计分析、正态分布检验、相关分析及主成分分析; 利用 GS + 7.0 地统计软件完成地统计分析, 半方差模型拟合, 并选取最佳拟合模型; 用 ESRI 公司的 ArcGIS 10.2 地理信息系统软件进行 Kriging 空间最优无偏插值和分布图的制作。

## 2 结果与讨论

### 2.1 描述性统计

表 1 为研究区土壤理化性质和重金属的描述性统计分析。土壤 pH 的取值范围为 4.64 ~ 7.33, 平均值为 5.66, 是典型的酸性土壤。土壤电导率的平均值为 166.72  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 范围介于 10.00 ~ 460.00  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  之间, 变化幅度较大, 这与研究区存在不同的土壤类型有关, 较高的土壤电导率可能来自于盐土。土壤中重金属  $\text{Mn}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Cu}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Zn}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Pb}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Cr}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Cd}_{\text{全量}}$  与浙江省土壤背景值<sup>[16]</sup> 相比, 重金属  $\text{Cu}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Zn}_{\text{全量}}$ 、 $\text{Pb}_{\text{全量}}$  的平均值均超过土壤背景值, 尤其是  $\text{Pb}_{\text{全量}}$ , 超过背景值两倍多。超标倍数表现为  $\text{Pb}_{\text{全量}} > \text{Zn}_{\text{全量}} > \text{Cu}_{\text{全量}} > \text{Mn}_{\text{全量}} > \text{Cd}_{\text{全量}} > \text{Cr}_{\text{全量}}$ 。重金属  $\text{Mn}_{\text{有效态}}$ 、 $\text{Cu}_{\text{有效态}}$ 、 $\text{Zn}_{\text{有效态}}$ 、 $\text{Pb}_{\text{有效态}}$ 、 $\text{Cr}_{\text{有效态}}$ 、 $\text{Cd}_{\text{有效态}}$  的平均值分别为 38.41、2.57、13.46、6.01、0.17、0.09  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其中 Cd 的活化率(有效态/全量)最高, 而 Cr 最低。

研究区土壤重金属变异系数介于 51.29% ~ 268.51% 之间, 属于中、高等变异强度<sup>[18]</sup>。 $\text{Pb}_{\text{全量}}$ 、

表 1 研究区土壤重金属和理化性状描述统计分析<sup>1)</sup>

Table 1 Descriptive statistics of physical-chemical properties and heavy metals in soils

项目	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差	变异系数 /%	偏度	峰度	几何 平均数	背景值
$\text{Mn}_{\text{全量}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	88.16	2248.31	397.33	439.42	305.37	69.49	3.61	20.00	371.99	555.48
$\text{Cu}_{\text{全量}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.73	123.63	37.47	42.23	21.66	51.29	1.73	4.13	37.80	30.54
$\text{Zn}_{\text{全量}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	67.49	872.19	158.00	196.80	142.76	72.54	2.59	8.46	165.73	107.79
$\text{Pb}_{\text{全量}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.61	1259.62	30.94	62.55	167.95	268.51	6.55	45.27	34.44	30.46
$\text{Cr}_{\text{全量}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	18.87	311.37	51.13	63.65	53.89	84.67	3.78	14.61	54.11	90.00
$\text{Cd}_{\text{全量}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.02	1.12	0.09	0.22	0.15	68.20	5.10	33.10	0.09	0.13
pH	4.64	7.33	5.81	5.66	0.94	16.61	-0.83	0.67	5.57	—
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	10.00	460.00	0.16	166.72	71.83	43.08	1.49	4.63	150.64	—
$\text{Mn}_{\text{有效态}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.59	102.95	34.53	38.41	24.40	63.53	0.83	0.11	30.63	—
$\text{Cu}_{\text{有效态}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.01	14.97	1.89	2.57	2.60	91.17	2.38	7.82	1.49	—
$\text{Zn}_{\text{有效态}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.11	66.55	9.43	13.46	12.81	95.17	1.94	4.40	8.89	—
$\text{Pb}_{\text{有效态}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.07	98.25	2.91	6.01	13.47	224.13	5.83	37.85	2.35	—
$\text{Cr}_{\text{有效态}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.04	0.67	0.16	0.17	0.13	76.47	1.76	3.49	0.14	—
$\text{Cd}_{\text{有效态}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.01	0.84	0.07	0.09	0.11	122.22	5.12	33.47	0.07	—

1) “—”: 没有相关数据; 重金属的有效态指酸可提取态

Cd<sub>全量</sub>、Pb<sub>有效态</sub>以及Cd<sub>有效态</sub>的变异系数超过100%，说明这两种元素的最大值与最小值之间差异显著，其中Pb的最大值超过浙江省土壤背景值的40多倍，说明研究区部分地区土壤Pb的富集特征明显。同时，元素Pb及其有效态的偏度、峰度值最高，表明数据偏离正态分布。与北京<sup>[5]</sup>、上海<sup>[6]</sup>和广州<sup>[19]</sup>这些大城市相比，临安市土壤中部分重金属含量处于较高水平；与西安<sup>[20]</sup>老工业城市相比，临安市土壤重金属含量相对较低；而与欠发达地区呼和浩特<sup>[9]</sup>相比，临安市土壤重金属含量偏高。

## 2.2 土壤重金属污染评价

重金属累积和污染与否的评判标准采用浙江省土壤重金属背景值。由表2可知，Cu、Zn、Pb、Cr重金属的累积比较明显，其单因子污染指数平均值均大于1，其中Pb的单因子污染指数平均值最大，为2.05。Pb的单因子污染指数介于0.25~41.35之间，表明Pb在研究区的空间差异很大，部分地区Pb的污染非常严重。Zn的超标率最高，为78.69%，这说明研究区大部分区域都有不同程度的Zn累积。Mn和Cd的单因子污染指数平均值均小于1，超标率分别为16.39%和32.79%，表明

Mn和Cd虽然在研究区的部分地区存在一定程度的累积，但是Mn和Cd的累积程度低于Cu、Zn、Pb、Cr这4种重金属元素。

表2 临安市土壤重金属单因子污染指数评价结果

Table 2 Evaluated results of single factor pollution index for soil heavy metals in Lin'an

元素	以浙江土壤背景值为参考			
	平均值	最小值	最大值	超标率/%
Mn	0.71	0.14	3.62	16.39
Cu	1.38	0.38	4.05	67.21
Zn	1.83	0.63	8.09	78.69
Pb	2.05	0.25	41.35	52.46
Cr	1.14	0.34	5.56	37.70
Cd	0.96	0.12	8.62	32.79

内梅罗综合污染指数的评价结果见表3。以浙江省土壤背景值为评价标准，没有样品数处于清洁等级，12个样品为尚清洁等级，34个样品处于轻度污染，9个样品属于中度污染，7个样品属于重度污染。所占比例排序为：轻度污染 > 警戒线 > 中度污染 > 重污染 > 清洁。属于污染的采样点约占80%，说明临安市研究区土壤的综合污染程度较为严重，部分样品属于重污染等级，急需对研究区的土壤污染引起重视。

表3 临安市土壤重金属污染评价结果

Table 3 Evaluated results of soil heavy metal pollution in Lin'an/%

污染程度	清洁 $I < 0.7$	警戒线 $0.7 < I < 1$	轻度污染 $1 < I < 2$	中度污染 $2 < I < 3$	重污染 $I > 3$
样品数	0	12	34	9	7
百分比/%	0	20	55	15	11

## 2.3 土壤潜在生态风险评价

临安市土壤6种重金属的潜在生态危害系数 $E_i^i$ 如表4所示。Mn、Cu、Zn、Cr元素在所有样点处于轻微危害，Pb元素1.64%的样点处于强度危害，其余大部分样点处于轻微危害；Cd元素19.67%的样点处于中等危害，1.64%的样点处于很强危害。

表4 临安市土壤重金属生态危害评价指数

Table 4 Risk index of heavy metals in the soils of Linan

重金属	$E_i^i$	不同危害程度样本比例/%				
		轻微	中等	强	很强	极强
Mn	0.71	100	0	0	0	0
Cu	6.91	100	0	0	0	0
Zn	1.83	100	0	0	0	0
Pb	10.27	98.36	0	1.64	0	0
Cr	2.27	100	0	0	0	0
Cd	28.73	78.69	19.67	0	1.64	0

## 2.4 相关性分析及主成分分析

基于Spearman相关系数分析变量之间的相关性强弱(表5)，结果表明：pH与多数重金属全量以

从各元素平均含量的 $E_i^i$ 来看，Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd均处于轻微危害。临安市土壤重金属的潜在生态危害由强至弱依次是Cd > Pb > Cu > Cr > Zn > Mn。由各元素平均含量计算得知，临安市土壤的RI值为50.72，表明临安市土壤总体处于轻微生态危害程度。

及与Mn和Pb的有效态存在显著相关关系，这与土壤pH值是影响土壤重金属活性的重要因素的观点较为一致<sup>[18, 21]</sup>。重金属全量与其有效态之间存在

显著相关性, 其中 Cd 全量与 Cd 有效态的相关系数最高, 说明土壤 Cd 的活性最强<sup>[21]</sup>. 大部分重金属之间也存在显著相关性, 表明重金属污染源可能相同<sup>[22]</sup>.

表 5 土壤理化性状与重金属间的非参数相关关系<sup>1)</sup>

Table 5 Spearman's correlations between heavy metals in soil

	Mn <sub>全量</sub>	Cu <sub>全量</sub>	Zn <sub>全量</sub>	Pb <sub>全量</sub>	Cr <sub>全量</sub>	Cd <sub>全量</sub>	pH	CEC	Mn <sub>有效态</sub>	Cu <sub>有效态</sub>	Zn <sub>有效态</sub>	Pb <sub>有效态</sub>	Cr <sub>有效态</sub>	Cd <sub>有效态</sub>
Mn <sub>全量</sub>														
Cu <sub>全量</sub>	0.47**													
Zn <sub>全量</sub>	0.48**	0.75**												
Pb <sub>全量</sub>	0.34*	0.85**	0.48**											
Cr <sub>全量</sub>	0.18	0.35**	0.39**	0.13										
Cd <sub>全量</sub>	0.35**	0.58**	0.64**	0.49**	0.10									
pH	0.27*	0.25*	0.39**	0.41**	-0.15	0.26*								
CEC	0.06	0.13	0.26*	0.20	-0.12	0.16	0.31*							
Mn <sub>有效态</sub>	0.26*	-0.02	0.06	0.12	-0.06	0.45**	0.26*	-0.01						
Cu <sub>有效态</sub>	-0.04	0.24*	0.09	0.27*	0.04	0.33*	-0.04	0.11	0.38**					
Zn <sub>有效态</sub>	0.35**	0.26*	0.29*	0.46**	-0.09	0.79**	0.25	0.25	0.49**	0.55**				
Pb <sub>有效态</sub>	-0.28*	-0.12	-0.16	0.28*	0.01	0.34**	-0.31*	-0.11	0.31*	0.34**	0.39**			
Cr <sub>有效态</sub>	0.10	0.15	0.09	0.26*	0.25*	-0.10	0.20	0.18	0.47**	0.33**	0.45**	0.46**		
Cd <sub>有效态</sub>	0.13	0.12	0.21	0.14	0.10	0.36**	-0.10	0.10	0.03	0.23	0.24	0.05	0.09	

1) \* 表示在 0.05 水平(双侧)下显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)下显著相关

主成分分析结果表明(表 6), 主成分(PC1)解释了 50.32% 的总变异, 显示了 3 个元素 Cu、Zn 和 Pb 正的高载荷值(>0.8), 这 3 种元素的强相关关系可能由同一人为污染物引起, 在过去的 50 年间, 城市土壤中 Pb 主要来源是汽车尾气的排放<sup>[22,23]</sup>, 尽管从 2000 年开始控制了含铅汽油的使用, 但是沉积在土壤中的 Pb 由于半衰期长, 始终是城市土壤重金属的重要污染物. Cu 和 Zn 同样也是来自于交通工具的尾气排放、轮胎磨损以及汽车零部件损耗而释放到环境中<sup>[24,25]</sup>. 第二主成分(PC2)解释了 28.45% 的总变异, 分别显示了 Mn 和 Cr 正的高载荷值(>0.7)表明它们主要来自于土壤母岩<sup>[26]</sup>. Cd 单独占据第三成分, 其可能由城区的工业排放所引起<sup>[27]</sup>.

## 2.5 土壤理化性质及重金属的空间结构特征

对通过正态性检验的样品数据进行半方差函数拟合, 选取标准平均值(MS)和标准均方根预测误差(RMSS)作为最优插值模型的判断标准<sup>[28]</sup>. 当标准平均值越接近于 0, 标准均方根预测误差越接近于 1, 模型的拟合情况越好<sup>[29]</sup>. 临安市研究区土壤重金属全量 Mn、Cd、Pb、Zn、Cr 以及土壤重金属有效态 Mn、Zn、Cd 符合高斯模型, 土壤重金属全量 Cu、土壤重金属有效态 Pb、Cr 以及土壤 pH 符合指数模型, 土壤重金属有效态 Cu 以及土壤电导率符合球状模型(表 7). 块基比 $[C_0/(C_0 + C)]$ 用来度量所研究变量的空间相关性强弱<sup>[30]</sup>. 土壤 pH、CEC 以及土壤重金属有效态 Mn、Cu、Zn、Cr 的块基比介于 25%~75%, 属于中等程度空间结构, 说

明他们的空间变异受到土壤性状和人类活动的共同作用影响<sup>[31~33]</sup>. 而其他变量的块基比<25%, 说明主要受到结构性因素的影响, 而 Pb 和 Cd 的空间结构性强, 可能与其受到人为扰动大, 时间较长, 成为结构性因素的一部分<sup>[18]</sup>.

表 6 土壤重金属主成分分析载荷矩阵

Table 6 Matrix for the principal component analysis loadings of soil heavy metals

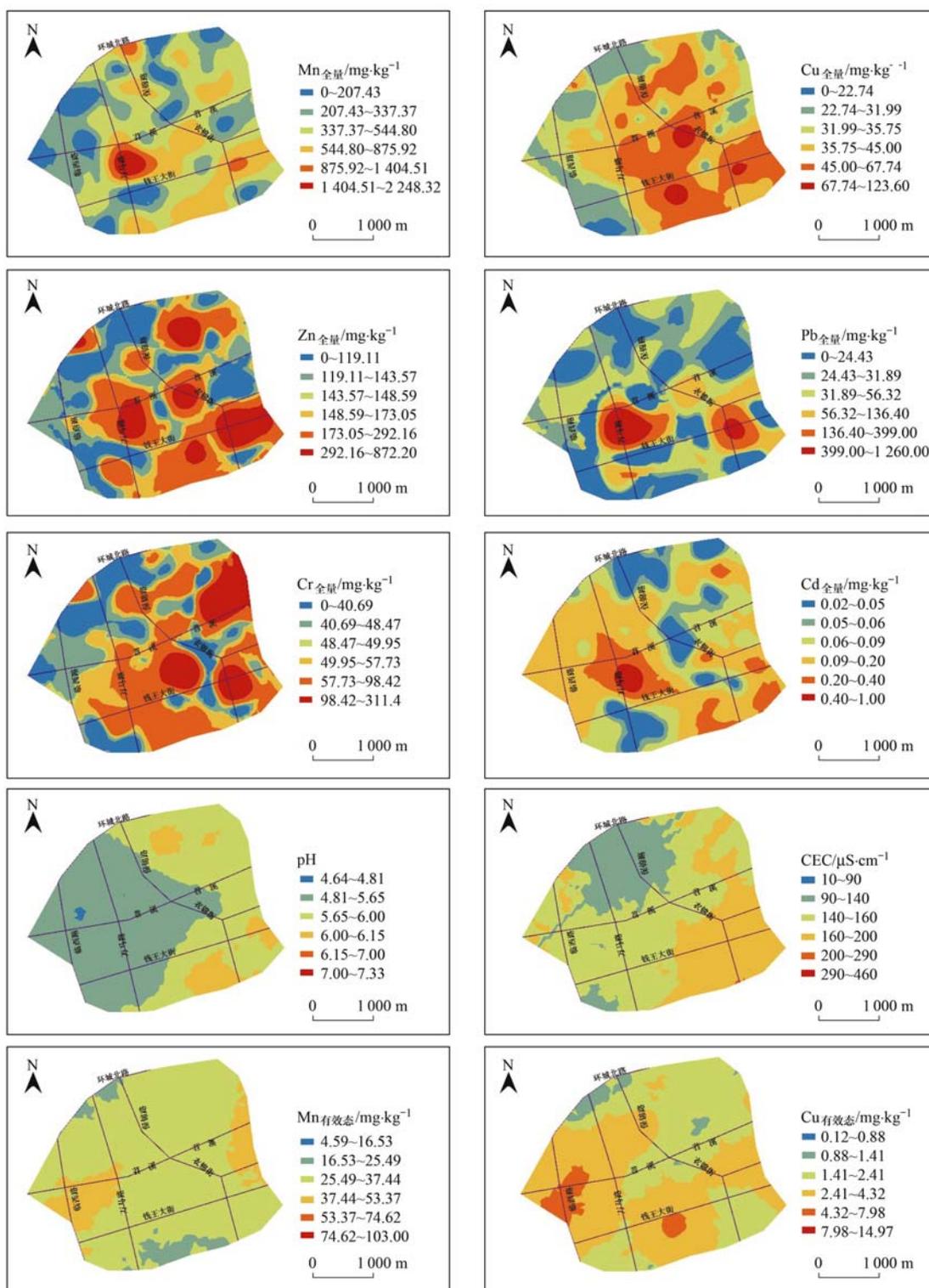
元素	主成分载荷因子		
	PC1 (50.32%)	PC2 (28.45%)	PC3 (16.53%)
Mn	0.168	0.782	0.215
Cu	0.895	0.282	0.138
Zn	0.821	0.196	0.241
Pb	0.839	0.251	0.169
Cr	0.287	0.756	0.184
Cd	0.282	0.179	0.786

## 2.6 土壤重金属、理化性质空间分布格局

图 2 为采用普通克里格插值法绘制的土壤重金属全量、有效态及其理化性质的空间分布. 土壤重金属全量 Cu、Zn、Pb 之间的空间分布特征有一定程度的相似性, 在临安市研究区的中部和东南部含量高, 西北部和西南部含量相对较低; 土壤重金属全量 Cr 在研究区东部较高, 西部较低, 呈现自西向东递增趋势; 土壤重金属全量 Cd 在研究区中部含量高, 北部和南部含量低, 呈现中部向南、北递减. 土壤重金属全量 Cu、Zn、Pb 的高值主要分布在万马路和钱王大街, 这与这两条道路上的机械加工、汽配厂林立有关, 也跟这两条主干线的交通运

输繁忙有很大的关联. 土壤 pH 在研究区西部的值小, 呈自西向东递增趋势; 土壤 CEC 在研究区呈自南向北递减趋势. 土壤有效态 Cd 与土壤重金属总量 Cd 的空间格局大体一致, 尤其是重金属高值区的分布基本一致, 说明有效态 Cd 的含量在一定程度上受到总量 Cd 的影响. 土壤有效态 Mn、Cr 与土

壤重金属总量 Mn、Cr 的空间格局差异较大. 其中有效态 Mn 在研究区西部和东部含量高, 在南部和北部含量相对较低; 有效态 Cr 在研究区的西部和东南部含量高, 在研究区北部含量低. 说明重金属有效态含量除了会受到重金属总量含量的影响外, 还受其他因素的干扰.



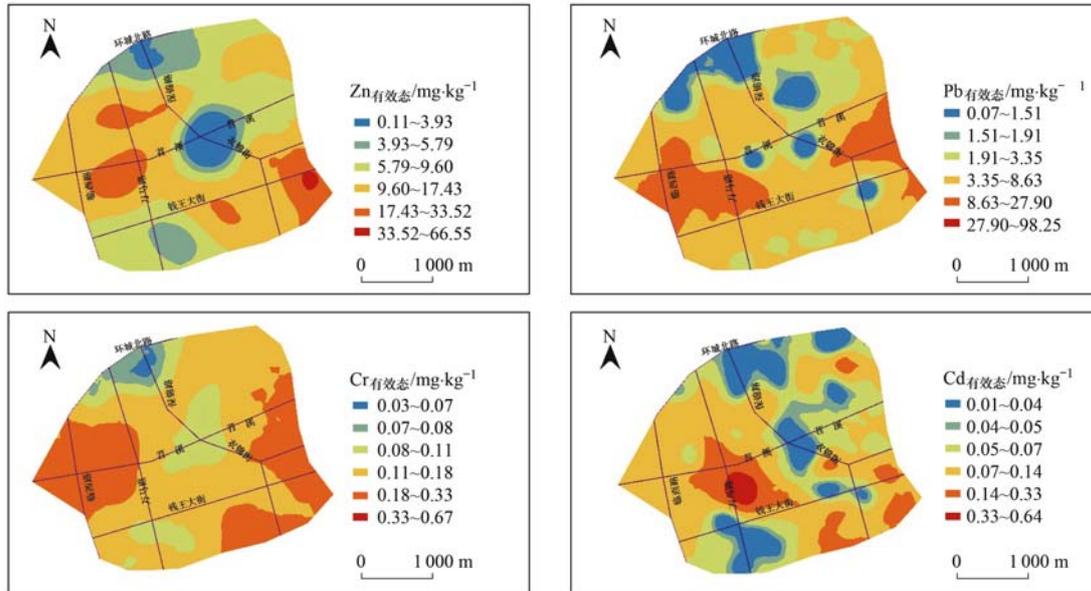


图 2 土壤重金属总量、有效态以及理化性状的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of the total heavy metals, their available fractions, pH, and CEC

表 7 临安市土壤重金属以及土壤理化性状的变异函数理论模型及其相关参数

Table 7 Summary of the theoretical semivariogram models and the corresponding parameters for soil heavy metals and soil physical and chemical properties in Lin'an

变量	理论模型	块金值 ( $C_0$ )	基台值( $C_0 + C$ )	块基比[ $C_0/(C_0 + C)$ ] /%	变程/km	MS	RMSS
Mn <sub>总量</sub>	高斯模型	124.544	124 668.444	0.10	0.005	-0.072	1.015
Cd <sub>总量</sub>	高斯模型	0.076	0.684	11.11	0.004	-0.152	1.039
Cu <sub>总量</sub>	指数模型	75.479	553.778	12.63	0.006	0.021	1.084
Pb <sub>总量</sub>	高斯模型	42.554	42 596.924	0.10	0.007	-0.072	1.073
Zn <sub>总量</sub>	高斯模型	238.042	23 034.992	1.03	0.004	0.010	1.032
Cr <sub>总量</sub>	高斯模型	3.296	3 299.030	0.09	0.004	-0.021	1.093
pH	指数模型	0.018	0.038	47.38	0.017	-0.005	0.900
CEC	球状模型	0.168	0.278	56.40	0.038	0.003	0.765
Mn <sub>有效态</sub>	高斯模型	0.201	0.588	34.18	0.011	-0.001	0.739
Cu <sub>有效态</sub>	球状模型	5.854	7.496	46.09	0.006	0.010	0.960
Zn <sub>有效态</sub>	高斯模型	0.540	1.275	42.35	0.007	-0.001	0.939
Pb <sub>有效态</sub>	指数模型	0.529	2.540	20.83	0.006	0.010	0.908
Cd <sub>有效态</sub>	高斯模型	0.076	0.684	11.11	0.004	-0.151	1.039
Cr <sub>有效态</sub>	指数模型	0.291	0.592	49.15	0.012	-0.013	0.880

### 3 结论

(1)研究区土壤重金属 Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的平均值分别为 439.42、42.23、196.80、62.55、63.65、0.22  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与浙江省土壤重金属背景值相比，临安市研究区土壤重金属 Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 均表现出不同程度的富集与污染特征。

(2)研究区土壤单个重金属平均  $E_i^i$  值表明，Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 均处于轻微危害。综合潜在危害指数 RI 表明，临安市土壤总体处于轻度危

害。土壤重金属与土壤 pH 存在显著相关性，说明土壤 pH 对土壤重金属的活性和积累存在着一定的影响。研究区土壤重金属具有明显的空间格局特征，土壤重金属的高浓度区主要集中在工业区、交通活动频繁区域即万马路和钱王大街的位置，需要加强监控和防治。

#### 参考文献：

[1] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.  
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an autonomous county of Guangxi Zhuang autonomous region, China[J]. Environmental

- Science, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- [ 2 ] Hu Y N, Wang D X, Wei L J, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an city of the Loess Plateau, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **110**: 82-88.
- [ 3 ] 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1516-1522.  
Zhang H Z, Tang Y L, Lu J, *et al.* Sources and spatial distribution of typical heavy metal pollutants in soils in Xihu scenic area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1516-1522.
- [ 4 ] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(4): 1241-1249.  
Li X P, Xu C L, Liu X Y, *et al.* Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji city, P. R. China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- [ 5 ] Xia X H, Chen X, Liu R M, *et al.* Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 2043-2050.
- [ 6 ] 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.  
Liu Y L, Zhang L J, Han X F, *et al.* Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 599-605.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 105-111.  
Wu X M, Li L Q, Pan G X, *et al.* Soil pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in different city zones of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(3): 105-111.
- [ 9 ] 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): 1564-1567.  
Guo W, Sun W H, Zhao R X, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1564-1567.
- [ 10 ] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(1): 204-212.  
Zhang Y X, Wang J, Qin F X, *et al.* Comparison of sources of metals in road-dust and soil in Guiyang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(1): 204-212.
- [ 11 ] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.  
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [ 12 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 135.
- [ 13 ] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3845-3851.  
Ji X F, Zheng N, Wang Y, *et al.* Accumulation of mercury in soil-maize system of Non-ferrous metals smelting area and its related risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3845-3851.
- [ 14 ] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.  
Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [ 15 ] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2322-2328.  
Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, *et al.* Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2322-2328.
- [ 16 ] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [ 17 ] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for environmental scientists* [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [ 18 ] 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3151-3159.  
Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in an E-waste dismantling area and their distribution characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- [ 19 ] 陈海珍, 龚春生, 李文立, 等. 广州市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境与健康杂志*, 2010, **27**(8): 700-703.  
Chen H Z, Gong C S, Li W L, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Guangzhou [J]. *Journal of Environment and Health*, 2010, **27**(8): 700-703.
- [ 20 ] 阴雷鹏, 赵景波. 西安市主要功能区表层土壤重金属污染现状评价[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(3): 109-112.  
Yin L P, Zhao J B. Study on survey and evaluation of heavy metal pollution of surface soil in main suburbs of Xi'an city [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, **34**(3): 109-112.
- [ 21 ] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils; effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. *Geoderma*, 2006, **137**(1-2): 19-32.
- [ 22 ] Li X D, Lee S I, 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.
- [ 23 ] Wong C S C, Li X D, Zhang G, *et al.* Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 767-776.
- [ 24 ] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles

- embedded in tire dust[J]. *Environment International*, 2004, **30**(8): 1009-1017.
- [25] 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*, 2011, **108**(1): 27-38.
- [26] Ma L, Yang Z G, Li L, *et al.* Source identification and risk assessment of heavy metal contaminations in urban soils of Changsha, a mine-impacted city in Southern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(17): 17058-17066.
- [27] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from Southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 410-418.
- [28] Franklin R B, Mills A L. Multi-scale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an Eastern Virginia agricultural field [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **44**(3): 335-346.
- [29] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 356.
- [30] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(5): 1501-1511.
- [31] Webster R, Oliver M A. *Statistical methods in soil and land resource survey*[M]. London: Oxford University Press, 1990.
- [32] Zhao K L, Fu W J, Liu X M, *et al.* Spatial variations of concentrations of copper and its speciation in the soil-rice system in Wenling of Southeastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(11): 7165-7176.
- [33] Yan W B, Mahmood Q, Peng D L, *et al.* The spatial distribution pattern of heavy metals and risk assessment of moso bamboo forest soil around lead-zinc mine in southeastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **153**: 120-130.



## CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing .....	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM <sub>2.5</sub> Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan .....	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Panjin .....	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City .....	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning .....	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin .....	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China .....	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region .....	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China .....	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China .....	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province .....	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China .....	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m .....	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes .....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research .....	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain .....	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin .....	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir .....	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area .....	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir .....	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment .....	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios .....	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain .....	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China .....	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling .....	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) .....	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly( <i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network .....	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater .....	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization .....	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies .....	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion .....	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere .....	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria .....	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate .....	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession .....	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain .....	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil .....	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via <sup>13</sup> C Pulse-labeling .....	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China .....	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast .....	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River .....	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation .....	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China .....	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area .....	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils .....	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil .....	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province .....	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi .....	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province .....	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires .....	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO <sub>2</sub> Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level .....	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles .....	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments .....	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)