

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评估:以许昌市为例

闫慧¹, 陈杰¹, 肖军²

(1. 许昌学院城市与环境学院, 许昌 461000; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

摘要: 街道灰尘重金属特征是评价城市环境质量的有效手段. 对我国典型农业城市许昌市的街道灰尘 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 等重金属元素含量水平和空间分布特征进行了分析, 并采用地累积污染指数法和潜在生态风险指数法对街道灰尘中重金属的环境风险进行了评价. 结果表明, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 的平均值分别为 25.4、41.9、145.3、96.7、18.5、9.0、408.1 和 7.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 Ni、Co、Mn 和 As 的平均值均小于河南省土壤背景值, 而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的平均值分别是背景值的 1.80、2.14、2.42 和 1.52 倍, 说明街道灰尘中这几种重金属元素聚集趋势较为明显. 空间分布上, 除 Co、Mn 和 As 外, Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 均表现出从西北向东南变小的趋势, 反映了城市不同功能区划和人类活动强度的差异. 地累积污染指数法的评价结果表明, 许昌市街道灰尘中 Ni、Co、Mn 和 As 属于无污染水平, 而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 均属于轻度污染, 污染水平是 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr}$. 许昌市街道灰尘重金属潜在生态风险指数为 40.71, 属于低生态风险水平.

关键词: 重金属; 地累积污染指数; 潜在生态风险指数; 街道灰尘; 许昌

中图分类号: X131; X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)10-4017-07

Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City

YAN Hui¹, CHEN Jie¹, XIAO Jun²

(1. College of Urban Planning and Environment Science, Xuchang University, Xuchang 461000, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: The characteristic of heavy metals in street dust is an effective means to evaluate the quality of the urban environment. The content and spatial distribution of heavy metals in street dust of Xuchang City was analyzed. The geo-accumulation pollution index and potential ecological risk index were used to assess the environmental risks of heavy metals in street dust. The results showed that the mean concentration of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Co, Mn and As was 25.4, 41.9, 145.3, 96.7, 18.5, 9.0, 408.1 and 7.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Concentrations of Ni, Co, Mn and As were lower than the background values in soil of Henan Province. Cu, Pb, Zn and Cr concentrations were 1.80, 2.14, 2.42 and 1.52 times as high as the background values, indicating their enrichment in street dust. Except for Co, Mn and As, the spatial distribution of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni showed a decreasing trend from the northwest to the southeast, reflecting differences of urban function zoning and human activity intensity. The assessment results of geo-accumulation pollution index showed that Ni, Co, Mn and As were at pollution-free level, while the pollution of Cu, Pb, Zn and Cr was mild, with pollution levels in descending order: $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr}$. The potential ecological risk index was 40.71, belonging to low level of ecological risk.

Key words: heavy metal; geo-accumulation pollution index; potential ecological index; street dust; Xuchang City

街道灰尘是城市污染的一种类型,同时也是污染物在城市环境中传播的重要介质^[1]. 街道灰尘一般在一定高度被反复地扬起、沉降、再次扬起,从而对人体健康造成直接危害^[2]. 同时由于受工业生产活动、城市交通和居民生活排放等活动的影响,街道灰尘含有较多的有毒有害物质,增强了街道灰尘的危害性^[3~6].

在众多的污染物中,重金属污染物由于其在街道灰尘中较高的含量、生物的富集效应及对有机体的毒害作用等原因而最受人们关注,因此,国内外学

者在街道灰尘重金属污染物的物理特性、来源、化学形态、生物危害、时空分布以及环境质量评价等方面进行了大量的研究,如已有足够的证据证明街道灰尘中重金属含量随粒径的减小而增加^[7~10]. 对重金属的源解析一般要与其他物理化学参数结合起来,如利用重金属与磁化率之间的相关性来判断其

收稿日期: 2013-01-29; 修订日期: 2013-04-17

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目; 河南省科技厅项目(122102310421); 河南省教育厅项目(2011B170014); 许昌市科技局项目(3009)

作者简介: 闫慧(1980~),男,博士,副教授,主要研究方向为环境污染与气候变化, E-mail: yanhuichj08@163.com

来源^[6, 11], 利用一些污染源的特征元素也可以大致判断污染来源^[12]. 街道灰尘重金属的生物危害研究发现, 街道灰尘中重金属会影响人的智力和行为, 而 Pb 会影响儿童血 Pb 含量^[13~15]. 重金属的危害不仅取决于含量, 与其赋存形态密切相关, 近年来国内外学者纷纷利用街道灰尘中重金属的赋存形态来评价其生物有效性^[16~18]. 张菊等^[19]对街道灰尘中重金属的季节变化规律研究发现, Cr 和 Ni 表现为夏季含量较高, 春季含量较低, 而 Cd、Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 季节性变化不明显. 环境质量评价等方面主要是进行灰尘重金属的污染评价和潜在生态风险评价^[8, 20~22]. 而在街道灰尘重金属空间变化方面, 前人主要针对不同功能区进行研究^[4, 5, 23~25]. 从已有的报道可以发现, 研究对象都是发达城市、工业城市或矿业城市, 而对农业城市的相关研究还鲜见报道, 农业城市的街道灰尘重金属污染问题同样值得研究.

许昌市位于河南省中部, 是我国重要的粮食生产基地, 处于东经 113°04′~114°19′, 北纬 33°16′~34°24′之间, 总面积 4 978.36 km², 市区面积 88 km², 总人口 456 万人. 许昌西部和西北部为低山丘陵, 中部和东部是黄淮冲积平原, 平均海拔 74 m, 气候为亚热带到暖温带的过渡地带, 属温带季风气候, 年平均气温 14.5℃, 年平均降水量 728.3 mm, 年平均相对湿度 71%, 盛行风向为北风, 年平均风速 2.5 m·s⁻¹. 近年来随着经济的发展、城镇化的进行和交通规模的增加, 许昌市环境污染问题越发严重, 而对许昌市街道灰尘的相关研究还未见报道. 本研究分析了许昌市城区街道灰尘的重金属空间分布规律, 并对街道灰尘重金属污染进行环境风险评价, 通过获得许昌市街道灰尘重金属污染现状信息, 以期解析街道灰尘重金属来源和控制街道灰尘污染危害提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析

根据许昌市城区布局、功能分区、自然环境状况等特征, 在许昌市城区共设置了 22 个采样点, 采样点主要位于市中心干道、外环路以内以及处于二者之间的贯通市区主干道交叉处, 具体的位置如图 1 所示.

使用毛刷和不锈钢铲扫取机动车道表面的街道灰尘样品, 每个点取样品 30 g 左右, 装入自封袋密封, 编号并记录采样点交通状况等环境特征. 样品

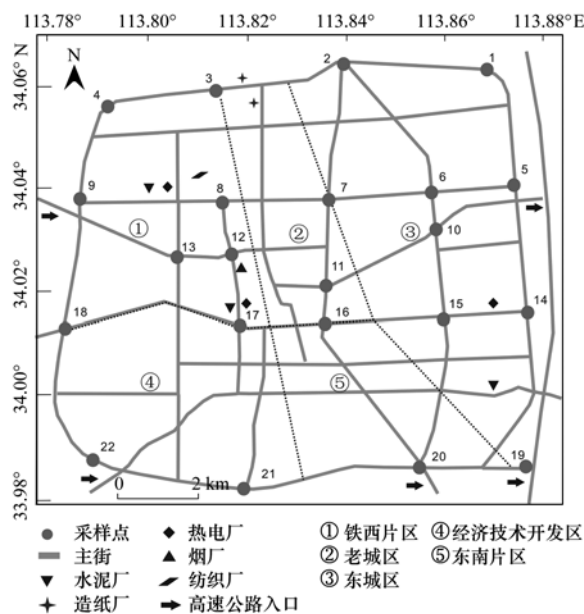


图 1 许昌市街道灰尘采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of street dust in Xuchang City

在实验室自然风干 24 h 以上, 同时除去树叶等杂物, 利用玛瑙研钵将样品研磨至 200 目, 取 4 g 左右放入聚氯乙烯环内, 利用 PW4400 型 X 射线荧光 (XRF) 光谱仪分析重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 含量. 测定过程用国家一级标样 (GSS-1、GSS-2、……、GSS-8) 和重复样片进行测量精度监控, 其准确度和精密度均满足实验要求.

1.2 环境风险分析

本研究采用地累积污染指数法和潜在生态风险指数法对许昌市街尘重金属进行污染和生态风险评价.

1.2.1 地累积污染指数法

地累积污染指数法是由德国学者 Müller 于 1969 年提出的一种研究沉积物中重金属污染的定量指标^[26], 其计算公式为:

$$I_{Geo} = \log_2(c_i/kB_i)$$

式中, I_{Geo} 为地累积污染指数; c_i 为重金属元素 i 的实测浓度; B_i 为所测元素的环境背景值, 本研究取河南省土壤元素背景值; k 为常数, $k = 1.5$. 根据 I_{Geo} 数值的大小, 可以将重金属污染程度分为 7 个等级 (表 1).

1.2.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法由瑞典学者 Hakanson 在 1980 年建立的评价重金属污染以及生态风险性的方法^[27], 其计算公式为:

(1) 重金属元素污染系数

$$c_{rf}^i = c^i/c_n^i$$

式中, c_i^i 为重金属元素 i 的污染系数; c_i^i 为重金属元素 i 的实测浓度; c_n^i 为重金属元素 i 的评价参比值, 本研究以河南省土壤元素背景为评价参比。

表 1 地累积污染指数分级

Table 1 Grading of geoaccumulation pollution index

地累积污染指数 I_{Geo}	分级	污染程度
≤ 0	0	无污染
0 ~ 1	1	轻度污染
1 ~ 2	2	偏中污染
2 ~ 3	3	中度污染
3 ~ 4	4	偏重污染
4 ~ 5	5	重污染
≥ 5	6	严重污染

(2) 重金属元素 i 的潜在生态风险系数

$$E_r^i = T_r^i \cdot c_f^i$$

式中, E_r^i 为金属元素 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性系数, 反映重金属元素的毒性水平以及生物对重金属污染的敏感程度, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 的毒性系数分别是 5、5、1、2、5、5、1 和 10^[27]。

街道灰尘中重金属元素总的潜在生态风险指数 E_{RI} 等于所有重金属元素潜在生态风险系数的总和, 计算公式为:

$$E_{RI} = \sum T_r^i \cdot c_f^i$$

重金属潜在生态风险程度的关系如表 2。

表 2 潜在生态风险指数分级

Table 2 Grading of potential ecological risk index

污染系数	污染程度	潜在生态风险系数	生态风险程度	潜在生态风险指数	总生态风险程度
<1	低	<40	低	<150	低
1 ~ 3	中等	40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
3 ~ 6	重	80 ~ 160	较重	300 ~ 600	重
≥ 6	严重	160 ~ 320	重	≥ 600	严重
		≥ 320	严重		

1.3 数据统计与分析

所有数据利用 Excel 和 SPSS 19.0 软件进行统计和相关性分析, 利用 Surfer 9.0 软件绘制重金属空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 许昌市街道灰尘重金属含量特征

许昌市街道灰尘重金属含量见表 3。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 的平均值分别为 25.4、41.9、

145.3、96.7、18.5、9.0、408.1 和 7.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Co 和 Mn 没有相关的国家标准, 其他元素平均值与国家二级标准值^[28]相比, 均未超标, 但 Cu、Zn 和 Cr 的最大值超过了国家二级标准值。与河南省土壤背景值^[29]相比, Ni、Co、Mn 和 As 的平均值均小于背景值, 说明街道灰尘中这 4 种重金属元素污染程度较轻, 而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的平均值均高于背景值, 分别是背景值的 1.80、2.14、2.42 和 1.52 倍, 说明街道灰尘中这 4 种重金属元素聚集趋势明显。

表 3 许昌市街道灰尘重金属含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Heavy metal concentrations in street dust of Xuchang City/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

重金属元素	范围	平均值	标准差	河南省土壤背景值	国家二级标准
Cu	15.5 ~ 116.4	35.4	23.8	19.7	50
Pb	25.1 ~ 63.7	41.9	10.4	19.6	250
Zn	76.5 ~ 398.7	145.3	67.2	60.1	200
Cr	60.9 ~ 227.4	96.7	34.7	63.8	150
Ni	9.0 ~ 25.6	18.5	4.1	26.7	40
Co	7.9 ~ 10.4	9.0	0.7	10.0	— ¹⁾
Mn	355.6 ~ 518.7	408.1	35.7	579	—
As	5.60 ~ 13.7	7.8	1.9	11.4	40

1) “—”表示没有相关数据

研究街道灰尘中重金属之间的相关性, 有利于判断重金属的来源。许昌市街道灰尘中各重金属元素间的相关系数如表 4。从中可知, Pd-Zn、Cu-Ni、Cr-Mn、Co-Ni、Ni-Mn 之间的 Pearson 相关系数分别

是 0.68、0.44、0.660、0.447 和 0.544, 都有着极显著的相关性, 说明这些重金属可能具有相同污染源。街道灰尘中重金属主要有自然源和人为源两种, 自然源主要是研究区成土母质的风化, 而不同元素的人为源

则存在差异,如 Pb 主要来源于汽车尾气排放,Zn 主要来源于汽车轮胎的老化磨损、机械磨损及路面栏杆的腐蚀等,Cu 与燃油、燃煤、机动车磨损和金属冶炼等活动密切相关,Cr 主要源于原油和煤的燃烧,而汽油、柴油、交通和工业活动是 Ni 的重要来源,As 则是燃煤和垃圾燃烧的标志元素. 从相关系数可以得出,交通因素应是许昌市街道灰尘中 Pd 和 Zn 最主要的来源,Mn 是土壤中的主要元素,通常被认为主要

来源于成土母质,Mn-Ni、Cr-Mn、Co-Ni 和 Cu-Ni 之间亦存在显著相关,因此可以认为目前许昌市街道灰尘中 Mn、Ni、Cr、Co 和 Cu 主要来源于自然源,但表 3 显示许昌市街道灰尘中 Cu 和 Cr 含量平均值高于土壤背景值,可能说明除自然来源外,人为源的输入对 Cu 和 Cr 也产生了一定影响,Ni 和 Co 虽未超过土壤背景值,但人为源对特定地点的 Ni 和 Co 也有一定的贡献(见 3.2 节).

表 4 许昌市街道灰尘重金属相关系数¹⁾

Table 4 Correlation of heavy metals in street dust of Xuchang City

	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Mn	As
Cu	1. 000							
Pb	0. 396	1. 000						
Zn	0. 142	0. 680 **	1. 000					
Cr	0. 158	0. 004	0. 217	1. 000				
Ni	0. 440 *	0. 304	0. 351	0. 136	1. 000			
Co	0. 099	0. 243	0. 382	0. 016	0. 447 *	1. 000		
Mn	0. 035	0. 047	0. 255	0. 660 **	0. 544 **	0. 342	1. 000	
As	0. 133	0. 134	0. 047	0. 311	0. 009	0. 210	0. 071	1. 000

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

将许昌市街尘中高于背景值的 Cu、Pb、Zn 和 Cr 同国内外部分发达城市、工业城市和矿业城市含量进行比较(表 5),显示许昌市街尘中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量比国内外大多城市都低,尤其是 Cu、Pb 和 Zn,如伦敦街道灰尘中 Cu、Pb、Zn 含量分别是许昌的 4.5、32.3 和 3.5 倍,与国内城市相比,许昌市街尘中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量不仅低于经济发达的大城市,也小于同级别的地级市,如洛阳街道灰尘中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 含量分别是许昌的 9.5、4.2、7.0 和 4.1 倍. 前人通过研究和统计,发现发达城市和老牌工业城市街道灰尘和土壤中重金属含量要比新兴城市要高^[6, 30]. 许昌是我国重要的农业生产基地,工业化历史较短,工业规模也较小,城市交通规模与表 5 中其他城市相比也较小,这些因素使得许昌市街道灰尘重金属含量处于较低的水平. 可见,与发达城市、工业城市和矿业城市相比,农业城市街道灰尘重金属污染相对较轻.

2.2 许昌市街道灰尘重金属空间分布特征

从图 2 中可以看出,除 Co、Mn 和 As 外,Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 均表现出从西北向东南变小的趋势,Pb、Zn、Ni 和 Co 在西南还存在个别的极值点. 许昌市街尘中重金属元素空间分布上反映了城市不同功能区划和人类活动强度的差异.

许昌市城区可以分为五大片区,即铁西片区、老城片区、东城区、经济技术开发区和东南片区

表 5 许昌市同其他城市街尘中重金属元素的含量比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 5 Comparison of heavy metal content in street dust of xuchang and other cities/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

城市	Cu	Pb	Zn	Cr
伦敦 ^[31]	115. 0	1 354. 0	513. 0	—
香港 ^[16]	173. 0	181. 0	1 450. 0	—
北京 ^[3]	78. 3	69. 6	248. 5	85. 0
上海 ^[8]	186. 4	212. 9	687. 3	218. 9
西安 ^[32]	95. 0	230. 5	421. 5	167. 3
葫芦岛 ^[33]	264. 0	533. 0	5 271. 0	—
保定 ^[20]	177. 0	279. 0	416. 0	225. 0
芜湖 ^[9]	162. 8	95. 2	257. 7	46. 2
沈阳 ^[34]	81. 3	106. 3	334. 5	—
重庆 ^[24]	79. 4	75. 6	169. 7	87. 3
宝鸡 ^[22]	123. 3	408. 4	715. 1	126. 7
昆明 ^[21]	166. 6	97. 5	316. 5	79. 4
洛阳 ^[35]	240. 1	176. 0	1 019. 6	401. 6
许昌(本研究)	25. 4	41. 9	145. 3	96. 9

(图 1). 各个片区功能定位和发展历史不同,进而造成了各片区街道灰尘重金属污染程度差异明显. 铁西片区和老城片区位于许昌市西北部,是许昌市的老工业区和居民区,开发历史较长,人口密度大,车流量多,同时该区内还有对环境影响较大的工业企业,如造纸厂、火电厂、化肥厂及卷烟厂等(图 1),环境污染情况较为严重,街道灰尘重金属含量表现为高值区;东城区、经济技术开发区和东南片区街道灰尘重金属含量主要为低值区,这是因为东城区是许昌市新城区,以科研文教为主和输变电装

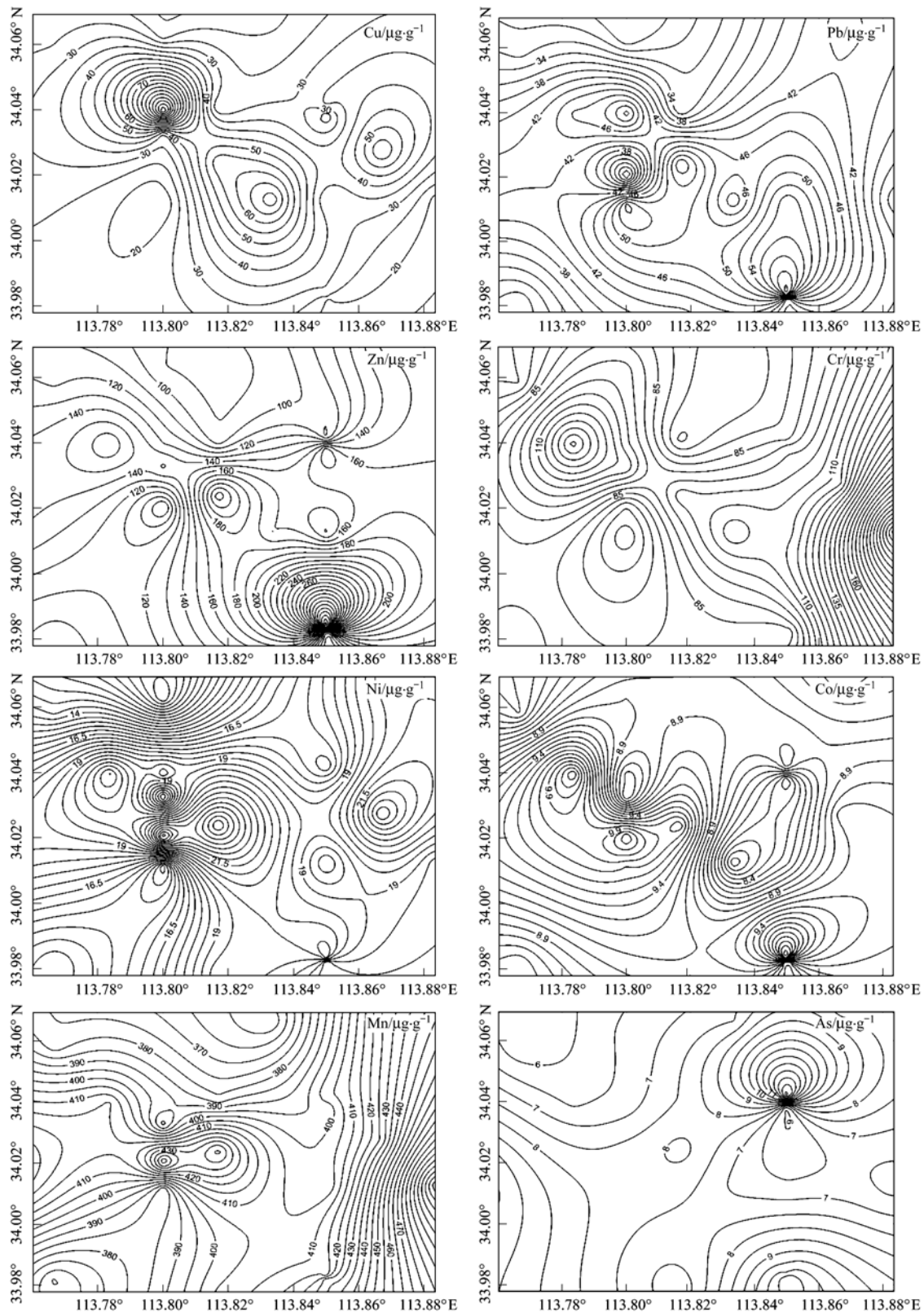


图2 许昌市街道灰尘重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in street dust of Xuchang City

备制造业等新兴工业为主,人口密度很小,交通流量不大,并且区域内植被覆盖率很高,环境状况良好,

而经济技术开发区位于许昌市西部和南部城乡结合带,也是许昌市新开发区,以装备制造及零部件业、

生物制品产业为特色产业,东南片区则是以生活服务、商品贸易、货物流通为主的城区,均没有对环境污染严重的工业企业。

由于 Co、Mn 和 As 这 3 种元素平均值均小于河南省土壤背景值,它们的空间特征可能主要反映了基岩中元素含量特征,而受人类活动影响较小,同样小于背景值的 Ni 在空间变化上呈现出从西北向东南变小的趋势,说明街道灰尘中 Ni 除自然来源外,还受到人类活动影响。Pb、Zn、Ni 和 Co 在东南的极值点位于许昌市梨园村和朱寺村附近,该处有 2 座大型的加油站,说明此处 Pb、Zn、Ni 和 Co 的高值主要由交通因素及汽油和柴油燃烧和挥发贡献的。

3 环境风险分析

3.1 地累积污染指数评价

以河南省土壤元素背景值为评价参比,基于地累积污染指数法对许昌市街道灰尘中重金属元素进行污染评价。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 的地累积污染指数分别为 0.26、0.51、0.69、0.01、-1.11、-0.74、-1.09 和 -1.13,根据地累积污染指数分级标准,许昌市街道灰尘中 Ni、Co、Mn 和 As 属于无污染水平,而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 均属于轻度污染,污染水平是 $Zn > Pb > Cu > Cr$ 。

3.2 潜在生态风险指数评价

表 6 是以河南省土壤元素背景值为评价参比,基于潜在生态风险指数法的许昌市街尘重金属污染评价结果。从中可知,许昌市街尘中重金属元素潜在生态风险指数 40.71,属于低生态风险水平。从重金属元素的污染系数看,Ni、Co、Mn 和 As 均小于 1,属于低污染程度,而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 处于 1~3 之间,属于中等污染水平,污染程度 $Zn > Pb > Cu > Cr$ 。从重金属元素的潜在生态风险系数看,Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 均小于 40,属于低生态风险水平,风险水平 $Pb > Cu > As > Co > Ni > Cr > Zn > Mn$ 。

表 6 潜在生态风险指数评价结果

Table 6 Results of potential ecological risk index

重金属元素	重金属元素污染系数	潜在生态风险系数
Cu	1.80	9.00
Pb	2.14	10.70
Zn	2.42	2.42
Cr	1.52	3.04
Ni	0.69	3.47
Co	0.90	4.50
Mn	0.70	0.70
As	0.69	6.88
潜在生态风险指数		40.71

4 结论

(1) 许昌市街道灰尘的 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 的平均值分别为 25.4、41.9、145.3、96.7、18.5、9.0、408.1 和 $7.8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 Ni、Co、Mn 和 As 的平均值均小于河南省土壤背景值,而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的平均值分别是背景值的 1.80、2.14、2.42 和 1.52 倍,说明街道灰尘中这几种重金属元素聚集趋势明显。

(2) 空间分布上,除 Co、Mn 和 As 外,Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 均表现出从西北向东南变小的趋势,反映了城市不同功能区划和人类活动强度的差异。

(3) 地累积污染指数法的评价结果表明,许昌市街道灰尘中 Ni、Co、Mn 和 As 属于无污染水平,而 Cu、Pb、Zn 和 Cr 均属于轻度污染,污染水平是 $Zn > Pb > Cu > Cr$ 。潜在生态风险指数是 40.71,属于低生态风险水平。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Mn 和 As 潜在生态风险系数均小于 40,属于低生态风险水平。

参考文献:

- [1] Xie S J, Dearing J A, Bloemendal J, *et al.* Association between the organic matter content and magnetic properties in street dust, Liverpool, UK[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **241** (1-3): 205-214.
- [2] 刘春华,岑况.北京市街道灰尘粒度特征及其来源探析[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 1006-1012.
- [3] 向丽,李迎霞,史江红,等.北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 159-167.
- [4] Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(21): 3835-3844.
- [5] Al-Khashman O A. The investigation of metal concentrations in street dust samples in Aqaba city, Jordan[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, **29**(3): 197-207.
- [6] Xie S J, Dearing J A, Boyle J F, *et al.* Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, **48**(2): 83-92.
- [7] Deletic A B, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(1): 49-59.
- [8] 常静,刘敏,李先华,等.上海城市地表灰尘重金属污染粒级效应与生物有效性[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3489-3495.
- [9] 方凤满,蒋炳言,王海东,等.芜湖市市区地表灰尘中重金属粒径效应及其健康风险评价[J]. *地理研究*, 2010, **29**(7): 1193-1202.
- [10] Zhao H T, Li X Y, Wang X M, *et al.* Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal

- pollution in urban runoff in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 203-210.
- [11] El Baghdadi M, Barakat A, Sajieddine M, *et al.* Heavy metal pollution and soil magnetic susceptibility in urban soil of Beni Mellal City (Morocco) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **66**(1): 141-155.
- [12] 李凤全, 潘虹梅, 叶玮, 等. 城市灰尘地球化学研究进展[J]. *物探与化探*, 2009, **33**(3): 313-318.
- [13] Bellinger D, Leviton A, Slowman J. Antecedents and correlates of improved cognitive performance in children exposed in utero to low levels of lead[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1990, **89**: 5-11.
- [14] Dietrich K N, Succop P A, Bormschein R L, *et al.* Lead exposure and neurobehavioral development in later infancy[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1990, **89**: 13-19.
- [15] 刘春梅, 欧阳华, 王金达, 等. 沈阳市环境铅污染对儿童健康的影响[J]. *环境科学*, 2003, **24**(5): 17-22.
- [16] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [17] 田晖. 西安市街道灰尘中铬、镉、铅赋存状态及环境效应[J]. *北京地质*, 2002, **14**(2): 34-39.
- [18] 韩晓涛, 郭宇, 鲍征宇, 等. 大冶市街尘重金属污染评价及化学形态特征[J]. *地球化学*, 2012, **41**(6): 585-592.
- [19] 张菊, 邓焕光, 陈振楼, 等. 上海市区街道灰尘重金属污染研究[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(4): 727-731.
- [20] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(10): 2195-2202.
- [21] 梁涛, 史正涛, 刘勇, 等. 昆明市城区旱季尘土磁化率特征及环境意义[J]. *热带地理*, 2010, **30**(1): 45-49, 56.
- [22] 王利军, 卢新卫, 雷凯. 宝鸡市街尘重金属元素含量及其环境风险分析[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(1): 200-205.
- [23] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **123**(1): 95-105.
- [24] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区街道地表物中重金属的污染特征[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(1): 114-116.
- [25] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1584-1589.
- [26] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [27] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [28] GB 15618-1995. 土壤环境质量标准[S].
- [29] 国家环境保护局, 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. 329-486.
- [30] 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.
- [31] Thornton I. Metal contamination of soils in urban areas[A]. In: Bullock P, Gregory P J (Eds.). *Soils in the Urban Environment* [M]. Oxford: Blackwell, 1991. 47-75.
- [32] 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.
- [33] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 726-733.
- [34] 李崇, 李法云, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 560-564.
- [35] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 253-259.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行