

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

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

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析

石栋奇^{1,2,3}, 卢新卫^{1,2,*}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 陕西师范大学地理学国家级实验教学示范中心, 西安 710119; 3. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013)

摘要: 为揭示高强度人类活动对城市环境质量的影响, 在西安市采集文教区、居民区、公园景区和交通区这 4 个主要功能区道路灰尘样品, 利用 X-Ray 荧光光谱仪测定粒径 $< 63 \mu\text{m}$ 的道路细颗粒灰尘中 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、V、Mn 和 Ni 的含量, 采用地积累指数法和污染载荷指数法评价细颗粒灰尘中重金属的污染水平, 运用主成分分析、聚类分析等多元统计学方法识别重金属的可能来源, 利用主成分分析-多元线性回归受体模型解析不同来源对道路细颗粒灰尘中重金属的贡献。结果表明, 西安市道路细颗粒灰尘中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的含量高于陕西土壤背景值, 而 V、Mn、Ni 和 Co 的含量接近或低于它们的土壤背景值。道路细颗粒灰尘中 Co、Mn、Ni、V 呈现未污染, Cr、Cu 和 Zn 呈现轻度污染, 而 Pb 为偏中度污染。综合污染评价结果显示, 西安市道路细颗粒灰尘中重金属呈现轻度污染。多元统计分析结果表明, Cr、Cu、Pb 和 Zn 显著正相关, 属于同一主成分, 且在聚类分析中为同一类; V、Mn、Ni 和 Co 为同一类、同一主成分, 且显著正相关。结合样品中各重金属元素的含量特征, 推断出西安市道路细颗粒灰尘中的重金属主要有两种来源: Cu、Pb、Zn 和 Cr 主要来源于交通源, 而 V、Co、Mn 和 Ni 主要为自然源。交通源和自然源对西安市道路细颗粒灰尘中重金属的贡献分别为 56.7% 和 43.3%。

关键词: 重金属; 污染评价; 来源识别; 受体模型; 细颗粒灰尘; 西安

中图分类号: X513; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3126-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711072

Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China

SHI Dong-qi^{1,2,3}, LU Xin-wei^{1,2,*}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Geography, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3. School of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract: Road dust samples were collected from four different functional areas in Xi'an City, i. e., an educational area, a residential area, a park area, and a traffic area, to study the influence of intensive human activities on local urban environmental quality. The contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Co, V, Mn, and Ni in the smaller than $63 \mu\text{m}$ road dust particles were determined by X-ray fluorescence spectrometry, and the pollution levels of these metals were assessed by a geoaccumulation index and a pollution loading index. The possible sources of heavy metals measured in the dusts were identified by multivariate statistical analysis methods, including correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis, and the contributions of each source to heavy metals in the dusts were apportioned by a principal component analysis-multiple linear regression receptor model. The results showed that the contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Co, V, Mn, and Ni in the smaller than $63 \mu\text{m}$ road dust particles of urban road dust from Xi'an ranged 14.2-96.9, 23.5-206.1, 20.0-899.4, 122.7-262.8, 7.9-14.2, 48.7-71.5, 274.0-448.9, and 22.4-62.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, with averages of 46.6, 97.4, 169.2, 177.5, 9.8, 57.1, 337.6, and 29.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Compared to the element background values of Shaanxi soil, the finer particles of road dust from Xi'an had elevated contents of Cu, Pb, Zn, and Cr. The finer particles of road dust from Xi'an were unpolluted by Co, V, Mn, and Ni; unpolluted to moderately polluted by Cr, Cu, and Zn; and moderately polluted by Pb. The assessment results of comprehensive pollution indicated that the pollution levels of the heavy metals in the dusts were mainly unpolluted to moderately polluted. The multivariate statistical analysis results displayed that Cr, Cu, Pb, and Zn had significant positive correlation. These metals belong to a principal component and a cluster, whereas Mn, Ni, V, and Co belong to another principal component and cluster and have significant positive correlation. Considering the content characteristics of heavy metals in the dusts, these results illustrated that two kinds of sources for the heavy metals studied existed for the finer particles of road dust from Xi'an, i. e., Cu, Pb, Zn, and Cr mainly originated from traffic sources, whereas V, Co, Mn, and Ni were mainly from natural sources. The contributions of traffic sources and natural sources to the heavy metals in the finer particles of the road dust from Xi'an were respectively 56.7% and 43.3%.

Key words: heavy metal; pollution evaluation; source identification; receptor model; finer particle dust; Xi'an

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2017-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271510); 中央高校基本科研业务费专项(2017TS027, GK201601009)

作者简介: 石栋奇(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境评价与治理, E-mail: shidq2017@snnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

随着人口的增长、机动车辆的增多,以及城市化、工业化的快速发展,城市大气、土壤、水等环境污染问题越来越突出^[1~4]. 重金属是城市表生环境介质中常见的一类污染物,由于其在环境中的不可降解性、累积性、持久性及毒害性等特点^[5],重金属污染问题一直是环境科学领域重点关注的热点问题. 作为城市环境介质之一的道路灰尘,由于受到城市人类活动如工业生产活动、交通运输活动、建筑施工、居民日常生活等影响,灰尘中往往累积了大量有害的污染物^[5,6]. 灰尘中的污染物会随着吞食摄入、呼吸摄入、皮肤接触等方式进入人体,从而危害人体健康^[7~10]. 沉积于城市道路上的灰尘颗粒物在行人、车流及风力的作用下可再次悬浮进入大气,影响大气环境质量状况,尤其是细颗粒灰尘^[11,12]. 有研究表明,道路细颗粒灰尘($<63\ \mu\text{m}$ 灰尘颗粒)不仅能够悬浮进入大气,而且更容易暴露于人体^[12,13]. 当前,国内外学者对城市道路灰尘中重金属的含量、分布、赋存状态、来源、污染及生态健康风险进行了大量研究^[4~10,14~18]. 但这些研究主要是基于道路灰尘全样开展的工作,而对于环境风险较大的道路细颗粒灰尘中重金属的关注相对欠缺^[12,13].

西安是我国西北地区最大的省会城市,城市发展迅速. 近十年来,西安城市道路灰尘重金属污染引起了学者的高度关注. Han 等^[19,20]应用多元统计分析方法定性识别了西安市道路灰尘全样中重金属的可能来源,分析了不同粒径道路灰尘中重金属的含量. 本课题组研究了西安市各类校园环境中灰尘重金属的含量、分布、来源及其人群暴露^[21~24];分析了西安城市道路灰尘全样中重金属的污染水平、空间分布及不同来源对灰尘中重金属含量的贡献^[5,25];利用富集因子及多元统计方法诊断了西安市不同功能区粒径小于 $100\ \mu\text{m}$ 道路灰尘中重金属的来源^[26];评价了西安市主要功能区道路细颗粒灰尘($<63\ \mu\text{m}$ 灰尘颗粒)中重金属的生态健康风险^[13]. 而关于西安市道路细颗粒灰尘($<63\ \mu\text{m}$ 灰尘颗粒)中重金属的污染水平及来源的定量解析未见报道. 本研究是课题组前期工作的继续,主要目的是评价产自西安市不同功能区道路细颗粒灰尘($<63\ \mu\text{m}$ 灰尘颗粒)中重金属的污染水平,识别重金属的来源,并利用受体模型定量解析各来源对道路细颗粒灰尘中重金属含量的贡献,以期西安市环境保护及管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西安($107^{\circ}40'\sim109^{\circ}49'\text{E}$ 和 $33^{\circ}39'\sim34^{\circ}45'\text{N}$)地处关中盆地中部,北邻渭河,南依秦岭,是陕西省省会. 市区面积 $3\,782\ \text{km}^2$,2015 年末总人口 869 万,机动车辆 240 万. 西安市属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 $13.0\sim13.7^{\circ}\text{C}$,年降水量 $522\sim720\ \text{mm}$,年日照时数 $1\,646.1\sim2\,114.9\ \text{h}$,常年主导的风向为东北风,主要土壤类型为褐土^[27]. 作为丝绸之路起点城市,西安市近年来城市的发展迅速,人类活动对城市环境的影响愈来愈显著.

1.2 样品采集、处理及测试

按照城市功能分区(如居民区、交通区、公园、文教区等)确定调查区域(图 1),根据调查区域大小及特点布设道路灰尘样品采集点. 居民区选择 2 个规模较大、建成时间不同的商住居民小区,每个小区布设 5 个采样点;公园景区选择市区内游人较多的 7 个公园,布设 21 个采样点;文教区选择 11 个大学校园,布设 33 个采样点;交通区灰尘采样点布设于西郊、东郊,以及环城路、二环路与东西南北主要干道交汇点,共 30 个^[13]. 2015 年 4 月,在天气至少晴朗 1 周的天气里,用塑料毛刷和塑料簸箕在每个采样点采集道路灰尘样品,每个采样点采集 3~5 处混合,每个样品重约 $200\sim250\ \text{g}$,所有样品密封在自封的塑料样品袋中运回实验室. 所有样品在室内自然风干 2 周,过 $1\ \text{mm}$ 尼龙筛,剔除石子、植物残

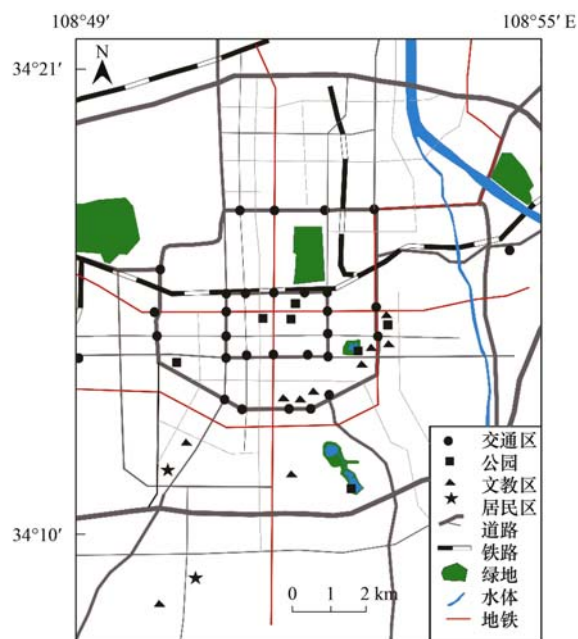


图 1 西安市道路灰尘采样点示意

Fig. 1 Sketch map of road dust sampling sites in Xi'an City

体等外来物质。然后取 20 g 左右样品过 63 μm 尼龙筛,所得到的细颗粒灰尘样品(<63 μm)密封在自封口的塑料样品袋中待分析。

细颗粒灰尘样品中 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、V、Mn 和 Ni 的含量采用 PW2403 型 X-Ray 荧光光谱仪(荷兰 PANalytical)测定^[13]。分析过程中采用重复样及标准样品(GSSI 和 GSD12)进行质量控制,所分析元素的误差均在 5% 以内。

1.3 重金属污染评价方法

西安市道路细颗粒灰尘中单个重金属的污染水平采用地积累指数法评价,重金属的综合污染水平采用污染载荷指数进行评价。这两种方法被广泛用于评价土壤、灰尘、沉积物等环境介质中重金属的污染水平^[5,9,18,21,22,28]。地积累指数的计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地积累指数; C_i 为道路细颗粒灰尘样品中重金属 i 的实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);常数 1.5 是为了减小背景值变动对评价结果所产生的影响; B_i 为重金属 i 的背景值,本研究选取陕西土壤元素背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[29]。根据 I_{geo} 的数值大小,可以将重金属污染分为 7 个等级,具体分级及污染程度见文献^[5,9,22]。

污染载荷指数的计算公式如下:

$$\text{PLI} = n \sqrt{\prod_{i=1}^n C_i / B_i} \quad (2)$$

式中,PLI 为污染载荷指数; C_i 为道路细颗粒灰尘中重金属 i 的实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为重金属 i 的背景值,本研究选取陕西土壤元素背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[29]。污染指数的具体分级及污染程度见文献^[9,21]。

1.4 重金属含量的多元统计分析及来源解析方法

为识别西安市道路细颗粒灰尘中重金属的来源,本研究利用 SPSS 19.0 统计学软件对所测样品中重金属含量数据进行了相关分析、主成分分析和聚类分析。相关分析用于揭示重金属元素间的内在关系。主成分分析是在损失较小信息的基础上,将多个指标问题变成少数几个新的综合变量,提高分析效率。聚类分析是根据样品中重金属的性质对其进行分类组合的分析过程,可用于重金属来源判别,并可验证主成分分析的结果。本研究中采用离差平方和法(Ward's method)和欧氏距离法(Euclidean distance)对西安市道路细颗粒灰尘中重金属元素进行 R 型变量聚类分析。

在利用多元统计分析方法对西安市道路细颗粒灰尘中重金属含量来源定性识别的基础上,利用主成分分析-多元线性回归模型(PCA-MLR model)定量识别每一种来源对于灰尘样品中重金属含量的贡献。主成分分析-多元线性回归模型是一种受体模型,被广泛用于灰尘、大气颗粒物及土壤中污染物来源的定量解析^[5,30,31]。利用该模型定量解析西安市道路细颗粒灰尘中重金属的来源时,以灰尘样品中总的重金属含量为因变量,以主成分分析结果中提取出来的主成分的因子得分为自变量进行多元线性回归分析,具体方程如下^[5]:

$$y = \sum m_i X_i + b \quad (3)$$

式中, y 是重金属浓度总值, X_i 是主成分因子得分, m_i 是回归系数, b 是常数项。经过标准化处理之后,上述方程变为:

$$z = \sum A_i X_i \quad (4)$$

式中, z 为总的重金属浓度值的标准偏差, X_i 是主成分因子得分, A_i 是回归系数。各污染源对灰尘中重金属含量的贡献率可由下式计算得到^[5]:

$$R_i(\%) = (A_i / \sum A_i) \times 100 \quad (5)$$

式中, R_i 为污染源 i 对重金属含量的平均贡献率。

2 结果与讨论

2.1 西安市道路细颗粒灰尘中重金属含量水平

西安市道路细颗粒灰尘中重金属含量的统计结果见表 1。从中可见,西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量的算术平均值及中值是其相应陕西表层土壤背景值 2 倍以上,而 V、Co、Mn 和 Ni 含量的算术平均值和中值则低于或接近其当地土壤背景值。样品中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量的最大值分别为 262.8、96.9、206.1 和 899.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是其背景值 4.2 倍、4.5 倍、9.6 倍和 13.0 倍。元素含量的变异系数可以反映样品中元素含量的离散程度。根据已有的研究成果^[5],变异系数 $\leq 20\%$ 为低变异度, $20\% < \text{变异系数} \leq 50\%$ 为中等变异度, $50\% < \text{变异系数} \leq 100\%$ 为高变异度,变异系数 $> 100\%$ 为极高变异度。本研究中,西安市道路细颗粒灰尘中 Zn 的变异系数为 76.2%,呈现高变异度。Pb、Cu 和 Ni 的变异系数分别为 35.1%、29.1% 和 21.5%,呈现中等变异度,而 Cr、Co、V 和 Mn 的变异系数 $< 20\%$,呈现低变异度。西安市道路细颗粒灰尘样品中各个重金属元素变异系数的大小反映了各元素含量的变化特征:细颗粒灰尘样品中 Zn 含量的变

化幅度最大, Pb、Cu 和 Ni 含量的变化幅度中等, Cr、Co、V 和 Mn 含量的变化幅度最小. 样品中重金属含量的最大值与最小值的比率可以进一步证实这一认识. 西安市道路细颗粒灰尘中重金属含量最大值与最小值的比率由高到低的顺序为 Zn (45.0) > Pb (8.8) > Cu (6.8) > Ni (2.8) > Cr (2.1) > Co (1.8) > Mn(1.6) > Ni(1.5). Zn、Pb 和 Cu 具有较大的变异系数及较大的最大值与最小值比率反映了他们在环境中的异质性,也表明了人类活动源对西安市道路细颗粒灰尘中 Zn、Pb 和 Cu 含量的影响与贡献.

表 1 西安市区及不同功能区道路细颗粒灰尘中重金属含量的描述性统计分析

Table 1 Summary statistics of the heavy metal contents in finer particles of road dust in the different functional areas of Xi'an City									
位置	项目	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	V	Pb	Zn
交通区	最小值/mg·kg ⁻¹	7.9	124.3	14.2	274.0	22.4	48.7	23.5	20.0
	最大值/mg·kg ⁻¹	14.2	241.9	60.6	448.9	62.5	71.5	162.4	899.4
	平均值/mg·kg ⁻¹	9.8	178.0	47.1	333.1	29.2	55.9	92.4	168.3
	标准偏差/mg·kg ⁻¹	1.8	21.9	11.2	36.2	7.5	5.4	28.8	149.4
	变异系数/%	18.1	12.3	23.8	10.9	25.8	9.7	31.2	88.7
居民区	最小值/mg·kg ⁻¹	11.5	145.9	44.5	362.8	33.9	61.0	91.1	145.6
	最大值/mg·kg ⁻¹	12.8	197.0	50.4	390.9	35.2	64.6	139.1	179.7
	平均值/mg·kg ⁻¹	12.2	171.5	47.5	376.9	34.6	62.8	115.1	162.7
	标准偏差/mg·kg ⁻¹	0.9	36.1	4.2	19.9	0.9	2.5	33.9	24.1
	变异系数/%	7.6	21.1	8.8	5.3	2.7	4.1	29.5	14.8
公园区	最小值/mg·kg ⁻¹	8.3	139.4	20.5	319.2	24.7	52.8	57.9	75.0
	最大值/mg·kg ⁻¹	11.8	228.3	65.2	391.6	35.0	70.5	206.1	272.6
	平均值/mg·kg ⁻¹	10.0	178.6	42.8	343.8	30.3	60.3	110.5	161.1
	标准偏差/mg·kg ⁻¹	1.3	31.8	15.1	29.2	4.2	5.5	49.7	73.0
	变异系数/%	13.4	17.8	35.2	8.5	13.8	9.1	45.0	45.3
文教区	最小值/mg·kg ⁻¹	8.4	122.7	23.2	302.8	23.0	52.7	46.9	72.1
	最大值/mg·kg ⁻¹	11.5	262.8	96.9	374.7	34.6	63.7	164.1	475.4
	平均值/mg·kg ⁻¹	9.5	176.4	47.6	339.1	27.9	57.0	99.2	178.1
	标准偏差/mg·kg ⁻¹	1.0	35.3	19.7	21.6	3.4	3.9	38.3	116.1
	变异系数/%	10.1	20.0	41.3	6.4	12.2	6.9	38.6	65.2
西安市城区	最小值/mg·kg ⁻¹	7.9	122.7	14.2	274.0	22.4	48.7	23.5	20.0
	最大值/mg·kg ⁻¹	14.2	262.8	96.9	448.9	62.5	71.5	206.1	899.4
	平均值/mg·kg ⁻¹	9.8	177.5	46.6	337.6	29.3	57.1	97.4	169.2
	标准偏差/mg·kg ⁻¹	1.6	26.3	13.6	32.6	6.3	5.3	34.2	129.0
	变异系数/%	16.1	14.8	29.1	9.7	21.5	9.3	35.1	76.2
陕西省土壤背景值/mg·kg ⁻¹ [29]		10.6	62.5	21.4	557.0	28.8	66.9	21.4	69.4

大量研究表明^[5, 10, 12, 16, 32], 城市道路灰尘中 Cu、Pb 和 Zn 含量主要受到工业活动及交通排放影响. Zhou 等的研究发现^[12], 葫芦岛市 <63 μm 道路细颗粒灰尘中 Pb 和 Cu 的平均含量分别为 2 099 mg·kg⁻¹ 和 1 038 mg·kg⁻¹, 是西安城区道路细颗粒灰尘中 Pb 和 Cu 平均含量的 21.6 倍和 22.3 倍. 葫芦岛市道路细颗粒灰尘中 Pb 和 Cu 的高含量与该市的工业活动有关. 葫芦岛市是东北地区的一个重要工业城市, 拥有亚洲最大的锌冶炼厂——葫芦岛炼锌厂, 炼锌工业活动是造成企业周边道路细颗粒灰尘中 Pb 和 Cu 高含量的主要原因^[12]. Han 等^[20]于 2008 年报道的西安市道路细颗粒灰尘中 Cu、Pb 和 Zn 的平均含量 (分别为 71.6、117 和 253 mg·kg⁻¹) 也明显高于本次调查结果. 两次调查结果

的差异, 可能与西安市区人类活动变化、采样区域不同, 以及环境保护措施的实施有关. Han 等^[20]是在 1998 ~ 2001 年进行调研采样, 道路灰尘样品主要采自西安市工业区、商业区、交通区和居民区, 未涉及文教区和公园景区. 2005 年之后, 西安市城区内对大气环境质量有重要影响的西安焦化厂、水泥厂等重污染企业关停. 本研究的灰尘样品采自西安市的交通区、文教区、公园景区及居民区, 采样区附近没有重污染企业. 文教区交通流量相对商业区低, 而公园景区除景区维护的机动车及为游客服务的电动车外, 社会机动车辆禁止驶入, 交通流量更低. 另外, 机动车辆所使用的燃油品质近年来也得到了明显的改善, 政府也对黄标车和黑烟车加大了监管, 这些因素都会对环境质量产生影响.

表 1 显示,西安市不同功能区道路细颗粒灰尘中重金属元素具有不同的含量变化特征. Cu 在交通区、居民区和文教区含量接近,稍高于公园景区. 其含量变化范围在文教区最大(变异系数 = 41.3%),而在居民区最小(变异系数 = 8.8%). Pb 含量在交通区低于其他 3 个功能区,其含量变化范围在公园景区最大(变异系数 = 45.0%),在居民区最小(变异系数 = 29.5%). Zn 的平均含量在居民区和公园景区低于文教区和交通区,其含量变化范围在居民区(变异系数 = 14.8%)小于交通区(变异系数 = 88.7%)、文教区(变异系数 = 65.2%)和公园景区(变异系数 = 45.3%). Cr 含量在 4 个功能区接近. Co 含量在居民区稍高于其他 3 个功能区,且其含量变化范围在交通区(变异系数 = 18.1%)高于其他 3 个功能区. 交通区、公园景区和文教区 Mn 和 Ni 的含量接近,稍低于居民区,它们的含量变化范围均在交通区最大,而在居民区最小. V 在交通区和文教区的含量稍低于居民区和公园景区. 各个功能区中 Mn、Ni、Co、V 的平均含量低于或接近其相应陕西土壤背景值, Cr、Cu、Pb 和 Zn 的平均含量明显超过其陕西土壤背景值. Cu、Pb、Zn 和 Cr 作为交通排放指示元素^[5, 16, 32],其平均含量之和在 4 个功能区由高到低依次为:文教区($501.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 居民区($496.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 公园区

($493.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 交通区($485.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 不同功能区 Cu、Pb、Zn 和 Cr 含量之和的这种差异可能与微环境及地面粗糙度有关. 交通区车流量大、车速快,车辆行驶过程中零部件磨损、润滑油泄漏和路面镀锌安全护栏腐蚀等所产生的富含重金属污染物的相当部分细颗粒灰尘在行驶车辆气流的扰动下,迁移到远离交通区的地方. 而文教区和居民区建筑物密集,气流运动受阻,空气流动小;同时,文教区、公园景区及居民区密集的植物进一步增加了地表粗糙度,这些均会促使局地排放及远距离飘运来的大气细颗粒物产生沉降,从而增加了文教区、公园区和居民区道路细颗粒灰尘中重金属的负荷.

2.2 西安市道路细颗粒灰尘中重金属污染水平

西安市道路细颗粒灰尘中重金属污染的地积累指数评价结果见图 2(a). 所有样品中 Co、V 和 Mn 的地积累指数和 98% 的样品中 Ni 地积累指数 < 0, 呈现未污染. Cr、Cu、Zn 和 Pb 的地积累指数变化范围较大,其值分别为 0.39 ~ 1.49、-1.18 ~ 1.59、-2.38 ~ 3.11 和 -0.45 ~ 2.68, 平均值分别为 0.91、0.47、0.47 和 1.51. 样品中 Cr、Cu 和 Zn 主要呈现轻度污染,而 Pb 主要呈现偏中度污染.

污染载荷指数评价结果显示[图 2(b)],西安市道路细颗粒灰尘中重金属的污染载荷指数为 0.87 ~ 2.05, 平均值为 1.51, 呈现轻度污染.

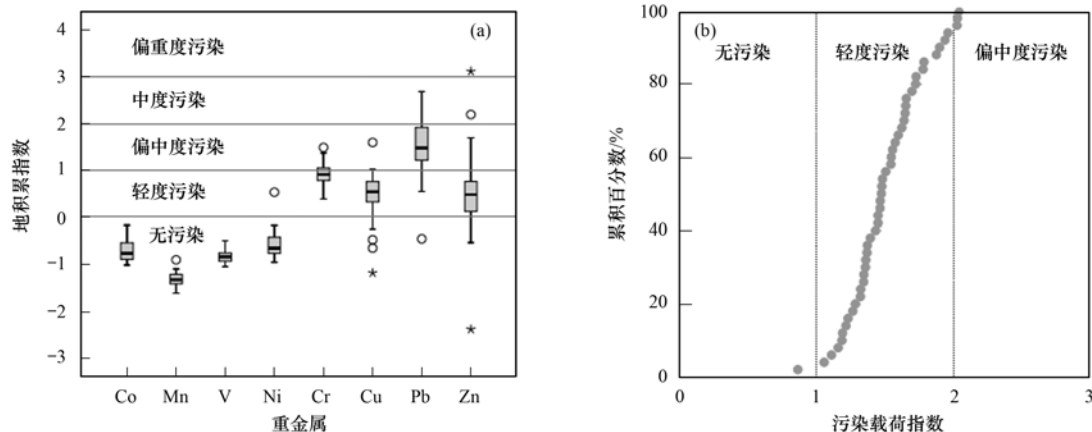


图 2 重金属污染评价结果

Fig. 2 Pollution assessment results for the heavy metals

2.3 西安市道路细颗粒灰尘中重金属的来源解析

2.3.1 相关分析

西安市道路细颗粒灰尘中重金属元素之间的相关分析结果见表 2. 从中可见,西安市道路细颗粒灰尘中 Co-Mn(0.677)、Co-Ni(0.771)、Co-V(0.758)、Co-Pb(0.484)、Co-Zn(0.366)、Cr-Cu(0.744)、Cr-Pb(0.599)、Cr-Zn(0.571)、Cu-Ni(0.412)、Cu-Pb

(0.644)、Cu-Zn(0.707)、Mn-Ni(0.776)、Mn-V(0.726)、Mn-Pb(0.578)、Mn-Zn(0.496)、Ni-V(0.705)、Ni-Pb(0.728)、Ni-Zn(0.625)、Pb-Zn(0.777)之间在 $P < 0.01$ 水平上显著正相关; Cr-Ni(0.342)和 V-Pb(0.320)在 $P < 0.05$ 水平上显著正相关,而 Co 与 Cr 和 Cu, Cr 与 Mn 和 V, Cu 与 Mn 和 V, V 与 Zn 之间不存在相关关系.

表 2 西安市道路细颗粒灰尘中重金属的相关分析¹⁾

	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	V	Pb	Zn
Co	1							
Cr	0.110	1						
Cu	0.169	0.744 **	1					
Mn	0.677 **	0.142	0.251	1				
Ni	0.771 **	0.342 *	0.412 **	0.776 **	1			
V	0.758 **	-0.063	-0.069	0.726 **	0.705 **	1		
Pb	0.484 **	0.599 **	0.644 **	0.578 **	0.728 **	0.320 *	1	
Zn	0.366 **	0.571 **	0.707 **	0.496 **	0.625 **	0.182	0.777 **	1

1) ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关; * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关

2.3.2 主成分分析

西安市道路细颗粒灰尘中重金属元素的主成分分析结果见表 3 和图 3。由表 3 可知,通过 varimax 旋转后,提取出 2 个特征值 > 1 的主成分,主成分 1 (3.240) 和主成分 2 (3.143) 累积方差贡献率为

82.028%。图 3 显示,主成分 1 由 V (0.927)、Co (0.881)、Mn (0.8658) 和 Ni (0.838) 构成,方差贡献率为 42.746%。主成分 2 由 Cu (0.916)、Cr (0.871)、Zn (0.818) 和 Pb (0.771) 构成,方差贡献率为 39.282%。

表 3 各主成分对道路细颗粒灰尘中重金属的总体解释方差百分数¹⁾

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	4.491	56.141	56.141	4.491	56.141	56.141	3.240	42.746	42.746
2	2.071	25.887	82.028	2.071	25.887	82.028	3.143	39.282	82.028
3	0.421	5.259	87.287						
4	0.291	3.644	90.931						
5	0.256	3.203	94.134						
6	0.188	2.348	96.482						
7	0.159	1.986	98.468						
8	0.123	1.532	100.000						

1) 提取方法为主成分分析; 旋转法为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法

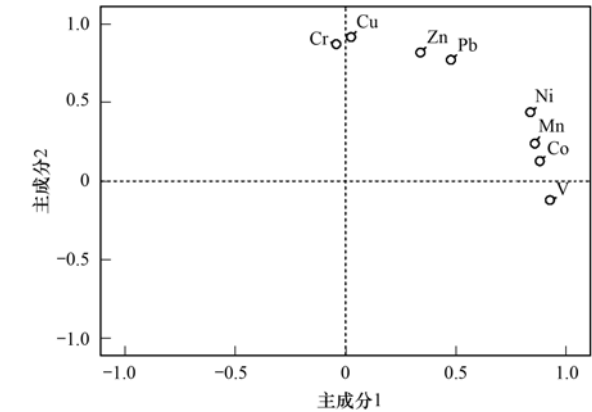


图 3 主成分分析旋转后的因子负荷图
Fig. 3 Component plot in rotated space of principal component analysis

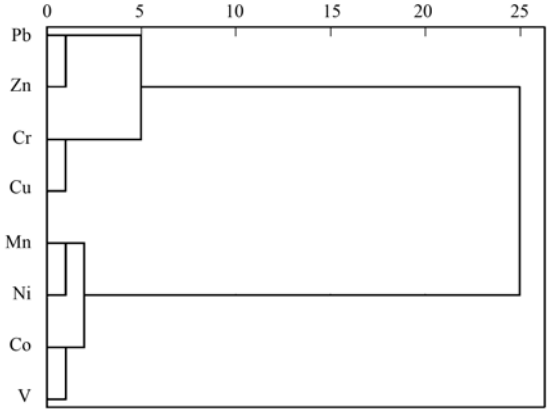


图 4 重金属聚类分析结果
Fig. 4 Cluster analysis result for the heavy metals

2.3.3 聚类分析

图 4 是西安市道路细颗粒灰尘中重金属元素的聚类分析结果。从中可知,西安市道路细颗粒灰尘中重金属元素被分为 Pb-Zn-Cr-Cu 和 Mn-Ni-Co-V

两类,与主成分分析结果一致。

2.3.4 来源解析

西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的含量远高于陕西土壤元素背景值,呈现轻度污染和偏重度污染,受人类活动影响显著,可能主要是人为

来源; V、Co、Mn 和 Ni 的含量低于或接近陕西土壤元素背景值, 呈现未污染, 受人类活动影响较小, 可能主要是自然来源(当地土壤)。结合相关分析、主成分分析和聚类分析结果可以推断西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 来源相同, 主要来自人为源; V、Co、Mn 和 Ni 代表另外一种来源, 为自然源(当地土壤)。

第一组元素 Cr、Cu、Pb 和 Zn 显著正相关, 属于同一主成分, 且在聚类分析中归为一类, 说明西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的地球化学性质相似或者来源相同。研究表明, 汽车金属部件的磨损可以释放 Cr 和 Cu^[32~34], 车辆轮胎、润滑油均含有 Pb 和 Zn^[33], 汽车行驶过程中轮胎和车体的机械磨损及润滑油的泄漏可以向环境中释放 Cr、Cu、Pb 和 Zn, 从而引起道路灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量的升高。本次所调查的所有样品中的 Cr 和 Pb, 98% 样品中的 Cu 和 Zn 显著高于陕西土壤元素背景值。因此, 第一组元素代表交通源。

第二组元素 V、Co、Mn 和 Ni 显著正相关, 在主成分分析中属于同一主成分, 在聚类分析中被聚为一类, 说明道路细颗粒灰尘中 V、Co、Mn 和 Ni 同源。依据前面的含量分析及污染评价结果可以推断人类活动对西安市道路细颗粒灰尘中 V、Co、Mn 和 Ni 的含量影响甚微, 其主要来自自然源。

在重金属来源定性识别的基础上, 应用多元线性回归方法进一步解析各类来源对西安市道路细颗粒灰尘中重金属的贡献。多元线性回归分析所得方程为: $z = 0.564FS1 + 0.739FS2$ ($R^2 = 0.930$, $P < 0.001$)。分析结果显示, 自然源和交通源对于西安市道路细颗粒灰尘中重金属的贡献分别为 43.3% 和 56.7%。

3 结论

(1) 西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量显著高于陕西土壤元素背景值, 而 V、Co、Mn 和 Ni 含量低于或接近于陕西土壤元素背景值。

(2) 文教区、居民区和公园景区 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量之和相对较高。由于人们在这些功能区滞留时间相对较多, 且这些重金属的危害较大, 因此, 文教区、居民区和公园景区道路细颗粒灰尘重金属的环境风险应引起重视。

(3) 西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu 和 Zn 轻度污染物, Pb 偏中度污染, 而 V、Co、Mn 和 Ni 呈现未污染。所测重金属的综合污染水平为轻度污染。

(4) 西安市道路细颗粒灰尘中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 来自交通源, V、Co、Mn 和 Ni 来自自然源(当地土壤)。交通源和自然源对细颗粒灰尘中重金属的贡献分别为 56.7% 和 43.3%。

参考文献:

- [1] Sponza D, Karaoğlu N. Environmental geochemistry and pollution studies of Aliaga metal industry district [J]. *Environment International*, 2002, **27**(7): 541-553.
- [2] Wang L Q, Liang T. Accumulation and fractionation of rare earth elements in atmospheric particulates around a mine tailing in Baotou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **88**: 23-29.
- [3] Zhu Y J, Lu X W, Yang L N, *et al.* Accumulation and source of heavy metals in sediment of a reservoir near an industrial park of northwest China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, **10**(4): 707-716.
- [4] Tang Z W, Chai M, Cheng J L, *et al.* Contamination and health risks of heavy metals in street dust from a coal-mining city in eastern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **138**: 83-91.
- [5] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 1361-1369.
- [6] Shi G T, Chen Z L, Bi C J, *et al.* A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(3): 764-771.
- [7] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [8] 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.
- [9] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2972-2980.
Duan H J, Cai X Q, Ruan X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [10] 张丹龙, 方凤满, 姚有如, 等. 淮南市不同功能区叶面尘和地表灰尘中重金属分布特征、来源及健康风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3322-3332.
Zhang D L, Fang F M, Yao Y R, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in foliar and surface dust of different functional areas of Huainan city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3322-3332.
- [11] Zhao N, Lu X W, Chao S G, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metals in less than 100 μm particles of street dust from Xining, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(5): 2319-2327.
- [12] Zhou Q H, Zheng N, Liu J S, *et al.* Residents health risk of Pb,

- Cd and Cu exposure to street dust based on different particle sizes around zinc smelting plant, Northeast of China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(2): 207-220.
- [13] Lu X W, Shi D Q, Yin N, *et al.* Risk assessment of heavy metals in finer than 63- μm dust particles from various functional areas in Xi'an, China[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, **10**(7): 907-915.
- [14] 杨梅, 李晓燕. 贵阳市冬季地表灰尘重金属含量动态变化及原因探析[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(8): 2070-2076.
Yang M, Li X Y. Dynamic changes and cause analysis of heavy metals in street dust in Guiyang city, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(8): 2070-2076.
- [15] Acosta J A, Gabarrón M, Faz A, *et al.* Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas[J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 328-337.
- [16] Christoforidis A, Stamatis N. Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece[J]. *Geoderma*, 2009, **151**(3-4): 257-263.
- [17] Wei X, Gao B, Wang P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **112**: 186-192.
- [18] 田东凡, 卢新卫, 景一鸣, 等. 西安市汽车站地表灰尘中重金属的污染评价及其来源识别[J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(1): 34-39.
Tian D F, Lu X W, Jing Y M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and source identification in surface dust at urban coach stations in Xi'an City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(1): 34-39.
- [19] 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.
- [20] Han Y M, Cao J J, Posmentier E S, *et al.* Particulate-associated potentially harmful elements in urban road dusts in Xi'an, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(4): 835-845.
- [21] Lu X W, Zhang X L, Li L Y, *et al.* Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China[J]. *Environmental Research*, 2014, **128**: 27-34.
- [22] Chen H, Lu X W, Chang Y Y, *et al.* Heavy metal contamination in dust from kindergartens and elementary schools in Xi'an, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(6): 2701-2709.
- [23] Chen H, Lu X W, Li Y L, *et al.* Metal contamination in campus dust of Xi'an, China: a study based on multivariate statistics and spatial distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **484**: 27-35.
- [24] Chen H, Lu X W, Li L Y. Spatial distribution and risk assessment of metals in dust based on samples from nursery and primary schools of Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **88**: 172-182.
- [25] 张文娟, 王利军, 王丽, 等. 西安市地表灰尘中重金属污染水平与健康风险评价[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(2): 481-487.
Zhang W J, Wang L J, Wang L, *et al.* Assessment of pollution level and health risks of heavy metals in surface dust in Xi'an city, NW China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 481-487.
- [26] Wang Q, Lu X W, Pan H Y. Analysis of heavy metals in the re-suspended road dusts from different functional areas in Xi'an, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(19): 19838-19846.
- [27] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
Chen X D, Lu X W. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [28] 秦先燕, 李运怀, 孙跃, 等. 环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(4): 455-463.
Qin X Y, Li Y H, Sun Y, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(4): 455-463.
- [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. 87-90, 330-496.
- [30] Shi G L, Liu G R, Peng X, *et al.* A comparison of multiple combined models for source apportionment, including the PCA/MLR-CMB, unmix-CMB and PMF-CMB models[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(7): 2040-2050.
- [31] Nasir M F M, Samsudin M S, Mohamad I, *et al.* River water quality modeling using combined principle component analysis (PCA) and multiple linear regressions (MLR): a case study at Klang River, Malaysia[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2011, **14**: 73-82.
- [32] Lu X W, Pan H Y, Wang Y W. Pollution evaluation and source analysis of heavy metal in roadway dust from a resource-typed industrial city in Northwest China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, **8**(3): 587-595.
- [33] Lu X W, Wang L J, Li L Y, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 744-749.
- [34] 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.
Xiang L, Li Y X, Shi J H, *et al.* Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 159-167.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)