

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM_{2.5}浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)

北京地区近35年大气污染扩散条件变化 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)

北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)

北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)

北京市建筑施工扬尘排放特征 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)

生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)

广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O₃与SOA的生成潜势 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长秦(2246)

南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)

亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)

宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青耀,米持真一,吕森林(2273)

垃圾焚烧厂二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)

重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)

轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)

不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)

西江水氧同位素组成的空间变化及环境意义 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)

基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)

三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)

滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)

香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焱,黄应平(2345)

大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)

海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)

两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 王晨焱,姜括,谢文龙,汪磊(2373)

高地下水地区透水铺装控制径流污染的现场实验 金建荣,李田,时珍宝(2379)

稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)

超声、紫外增强H₂O₂/KI降解磺胺甲基嘧啶 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)

不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)

铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周徽(2412)

组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)

温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 张玲,彭党聪,常蝶(2429)

海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)

不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)

磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)

碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)

外源Ca²⁺对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)

膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 张崇森,牛全睿,徐雨梅,王院梅,王岱,武少华(2477)

反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)

硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 李欢,王磊,王亚楠(2496)

关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李磊(2502)

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 陈秀端,卢新卫(2513)

基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 佟瑞鹏,杨校毅(2522)

Eh、pH和铁对水稻土砷释放的影响机制 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)

典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)

复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)

两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)

大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)

源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 杨宁伟,毕二平(2568)

地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)

长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N₂O排放的影响 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)

基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)

广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)

活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏芫,周俊(2607)

工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)

《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)

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

陈秀端¹, 卢新卫^{2*}

(1. 陕西学前师范学院环境与资源管理系, 西安 710061; 2. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘要: 选取西安城市居民区土壤为研究对象, 通过绝对主成分分数/多元线性回归 (APCS/MLR) 与地统计相结合的方法解析其中 As、Ba、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、Zn、V 的主要来源、各来源对各元素的贡献量、各来源贡献的空间分布特征。结果表明, 相对于西安市褐土背景值西安城市居民区土壤中 Pb、Cu、Sr、Co、Zn、Ba、Ni、As、Mn、V 的累积程度依次减弱。西安城市居民区土壤中 10 种重金属的污染有自然源、交通源、化石燃料燃烧源这 3 种主要来源。As、Mn、Ni、V 的来源以自然源为主, 平均贡献量分别为 69.63%、74.28%、68.65%、77.09%, 其空间分布上表现为西北部低而东南部高的规律。Co、Pb、Sr、Zn 的来源以化石燃料燃烧源为主, 平均贡献量分别为 59.84%、42.22%、44.50%、44.44%, 空间分布上表现出自城市中心向外逐渐增加的特征。Ba 以自然源和化石燃料燃烧源为主, 平均贡献量分别为 41.67% 和 48.27%; 自然源、交通源、化石燃料源对 Cu 的平均贡献量分别为 37.00%、20.47%、26.50%。

关键词: 居民区; 土壤; 重金属; 源解析; APCS/MLR

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2513-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611208

Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics

CHEN Xiu-duan¹, LU Xin-wei^{2*}

(1. Department of Environment and Resource Management, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710061, China; 2. School of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The soils from residential areas of Xi'an city were selected as a case area. The absolute principal component scores-multivariate linear regression (APCS-MLR) model and the ordinary kriging interpolation were combined to identify and apportion the pollution sources of soil heavy metals (As, Ba, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, Zn, V), the percentage of contribution of every source for every element, and the spatial distribution characteristics of contribution rates. Compared with the background values of cinnamon, which is the main soil type in Xi'an, the accumulation levels of Pb, Cu, Sr, Co, Zn, Ba, Ni, As, Mn, V in soil of urban residential areas in Xi'an city decreased in turn. The standard-exceeding ratios of Ba, Co, Cu, Pb, Sr, Zn were higher than those of other studied elements. Three main pollution sources of soil heavy metals in residential areas were natural source, traffic sources, and fossil fuel combustion source, respectively. Natural source was the main source of As, Mn, Ni, V in studied residential areas. The average contribution rate of natural source for As, Mn, Ni, V was 69.63%, 74.28%, 68.65%, 77.09%, respectively. The fossil fuel combustion was the second largest contributor for their accumulation in these studied residential areas. Its contribution rate for As, Mn, Ni was 23.07%, 19.09%, 23.13%, respectively. The contribution of traffic emissions was lower. Their spatial distribution characteristics tended to be lower in west and higher in east. The average contribution rates of fossil fuel combustion source for Co, Pb, Sr, Zn were 59.84%, 42.22%, 44.50%, 44.44%, respectively. The performance of spatial distribution was increased gradually from the city center to the outside. The sources of Ba were given priority to natural source and fossil fuel combustion source, and the average contribution rates were 41.67% and 48.27%, respectively. The contribution rate of fossil fuel combustion source for Ba gradually decreased from the center of the city. The contribution rates of natural source, traffic source, and fossil fuel combustion source for Cu were 37.00%, 20.47% and 26.50%, respectively.

Key words: residential area; soil; heavy metal; source apportionment; APCS/MLR

城市土壤是城市生态环境的重要组成部分, 城市化过程中居民生活垃圾、工业生产排放物、交通尾气及其它释放物、煤燃烧产物等经由不同途径进入城市土壤环境, 造成土壤重金属富集, 再经由呼吸吸入、经口摄入、皮肤接触等方式对城市居民健康产生威胁, 也对城市生态环境质量产生不良影响^[1,2]。因此, 研究城市土壤污染的特征, 尤其是搞

清城市土壤污染的来源对于治理城市土壤污染, 制定相应的环境管理政策具有重要意义。

收稿日期: 2016-11-25; 修订日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271510); 陕西省教育厅科学研究计划项目(14JK1180)

作者简介: 陈秀端(1980~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为区域环境安全, E-mail: x_mary60@126.com

* 通信作者, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

城市土壤污染来源研究有两种层面的研究,一种是相对定性地判断污染物的来源类型(源识别),一种是相对定量地计算出主要污染源的贡献量(源解析)^[3]. 目前城市土壤重金属的来源研究中更多地集中在源识别层面,主要是利用相关分析、因子分析、聚类分析等多元统计分析方法相结合的手段识别研究区的土壤重金属的主要来源类型^[4~6]. 源解析的方法来自于大气污染物的来源解析,目前以污染研究区为对象的源解析方法大致分为两类,一类是已知源成分谱的受体模型(以化学质量平衡法 CMB 为代表),另一类是未知源成分谱的受体模型,以主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)、正定矩阵因子分析模型(PMF)和 UMIX 模型为代表. 由于土壤污染源成分谱的未知性与难确定性,目前主要是利用第二类方法进行土壤污染的源解析研究^[7~10],但城市土壤重金属污染来源定量解析的报道不多.

西安市是我国西部地区的中心城市,人类活动对城市土壤环境的压力较大. 城市居民区是城市居民活动的主要场所,其土壤环境质量的优劣直接关系居民的身体康,因此有必要搞清西安城市居民区土壤重金属污染特征,解析西安城市居民区土壤重金属污染的来源. 目前,西安市土壤重金属的研究领域可见于城市公园土壤污染研究^[11,12]、城市工业区土壤重金属污染与来源研究^[13]、城市污灌区土壤重金属污染研究^[14]等,本研究组较为系统研究了西安市二环内土壤重金属的污染特征与健康风险以及空间分布与来源类型^[15~17]. 但西安城市土壤重金属污染来源的定量解析,尤其是居民区为对象的研究还未见报道.

本研究将绝对主成分分数(APCS)与多元线性回归(MLR)以及克里金插值的方法相结合,定量解析西安城市居民区土壤重金属的主要类型及各自的贡献量,并利用地统计方法获得主要来源的贡献量的空间分布,结合采样点的属性信息定量研究西安城市居民区土壤重金属的来源及其空间分布,以期城市生态环境管理提供支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西安市是陕西省省会,主城区位于渭河南岸冲积平原的二、三级阶地上,关中平原中部,北濒渭河,南依秦岭. 西安市气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.0~13.7℃,年均降水

量 522~720 mm,由北向南递增,集中在 7、8、9 月,西安市区的常年主导风向为东北风. 西安市的主要土壤类型为褐土. 西安市常住人口约为 870 多万. 西安市是我国西部重要的中心城市与交通枢纽城市,作为丝绸之路的起点城市,在国际化大都市建设的背景下西安市城市发展迅速,人类活动对城市土壤环境的影响愈来愈显著.

1.2 样品处理与分析

在抽样调查与室内研究的基础上布设相应的居民区采样点,然后在野外实地采样过程中记录采样居民区的属性特征,并利用 GPS 记录采样点的地理坐标,共采集城市居民区表层(0~20 cm)土壤样品 69 个,每个采样点均为 3~5 个点的混合样,每个样品约为 1.5 kg,将土样封存在聚乙烯土样袋中带回实验室. 采样点示意图见图 1. 回到实验室后将土样自然风干后,磨碎,先过 20 目筛,用于测定理化性质;每个样品采用缩分法取约 20 g 再利用振动研磨,使其粒径小于 200 目,压片. 然后利用 X-荧光光谱仪(XRF,帕纳科仪器 PW2403 型)测定土壤样品中 As、Ba、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、V、Zn 的含量^[15~17],测定过程中利用标准样品(GSD-12, GSS1)和重复样进行质量控制. 标准样品测定的误差范围分别是 2.27%~5.71% 和 0.10%~5.97%,误差小于 10%;标准样和重复样的测定结果的标准差均小于 5%,结果可信.

1.3 绝对因子分析/多元线性回归受体模型

绝对因子分析/多元线性回归(absolute principal component scores-multivariate linear regression, APCS-MLR)受体模型于 1985 年由 Thurston 和 Spengler 提出,其基本原理是将因子分析的因子转化为绝对主成分因子得分,再分别对受体含量进行多元线性回归,回归系数用于计算各个因子对应的排放源对受体中该物质的贡献. 计算时先对含量数据进行标准化,再按照以下的计算步骤计算.

(1)引入 0 含量的人为样本,计算出 0 含量样本的因子分数,计算公式为:

$$Z_{0i} = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{C}_i}{\sigma_i}$$

(2)旋转后的因子得分与人为样本做减法,计算出每种元素的绝对主成分因数.

(3)将绝对主成分因子做自变量,元素含量做因变量,做多元线性回归:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{p=1}^p (b_{pi} \times \text{APCS}_p)$$

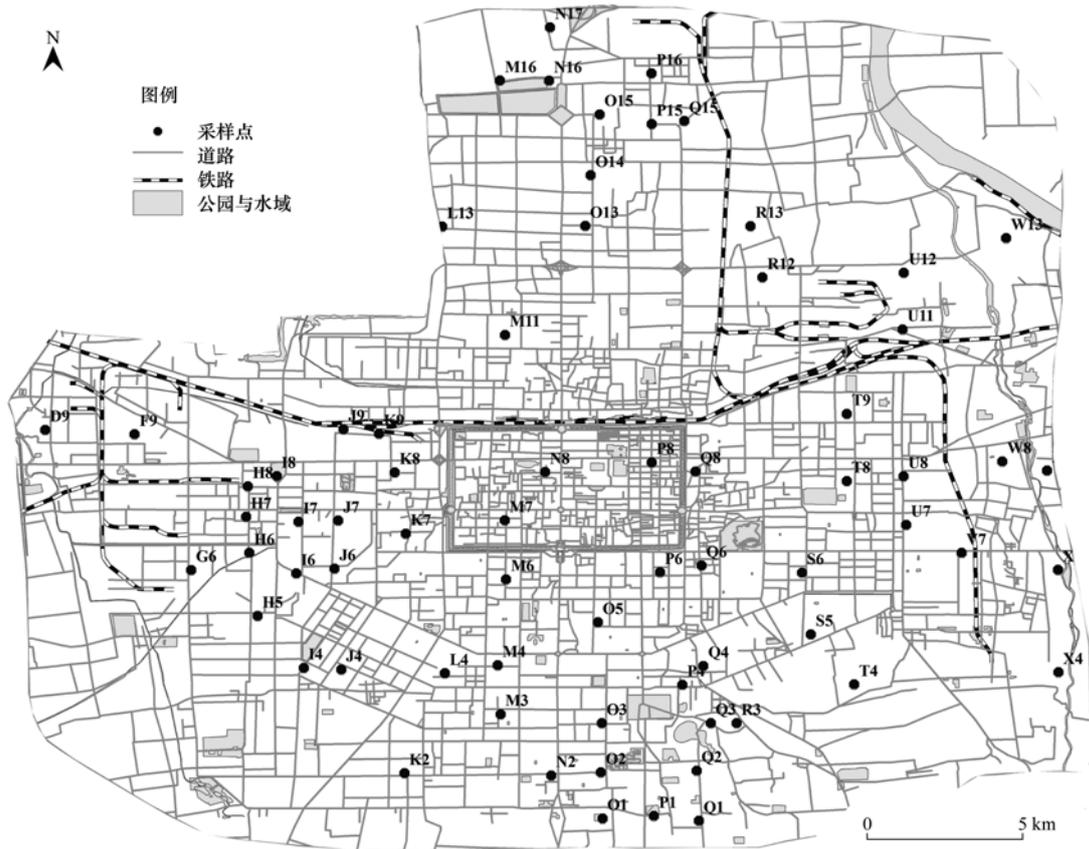


图 1 西安居民区土壤采样点示意

Fig. 1 Sketch indicating sampling sites

式中, \bar{C}_i 为元素含量的算术平均值, σ_i 是元素含量的标准偏差, C_i 是元素含量, b_0 是多元线性回归的常数项, b_{pi} 是多元线性回归的回归系数, $APCS_p$ 是绝对主成分因子得分, $b_{pi} \times APCS_p$ 是源 p 对于 C_i 的含量贡献率, 所有样本的 $b_{pi} \times APCS_p$ 平均值即为该源的贡献率。

2 结果与分析

2.1 西安市居民区土壤重金属含量描述

西安市居民区土壤中 As、Ba、Co、Cu、Mn、

Ni、Pb、Sr、V、Zn 的含量描述见统计箱图 2。

西安市居民区土壤中 As、Ba、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、V、Zn 的平均含量分别是 11.55、548.83、18.47、34.65、665.19、32.30、37.14、242.62、84.01、92.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 它们与土壤背景值 (褐土含量) 的比值由高到低依次是 Pb (1.83 倍)、Cu (1.50 倍)、Sr (1.43 倍)、Co (1.36 倍)、Zn (1.32 倍)、Ba (1.14 倍)、Ni (1.11 倍)、As (1.06 倍)、Mn (1.05 倍)、V (1.02 倍)。Cu、Pb、Zn 的变异系数分别是 41.11%、37.71%、

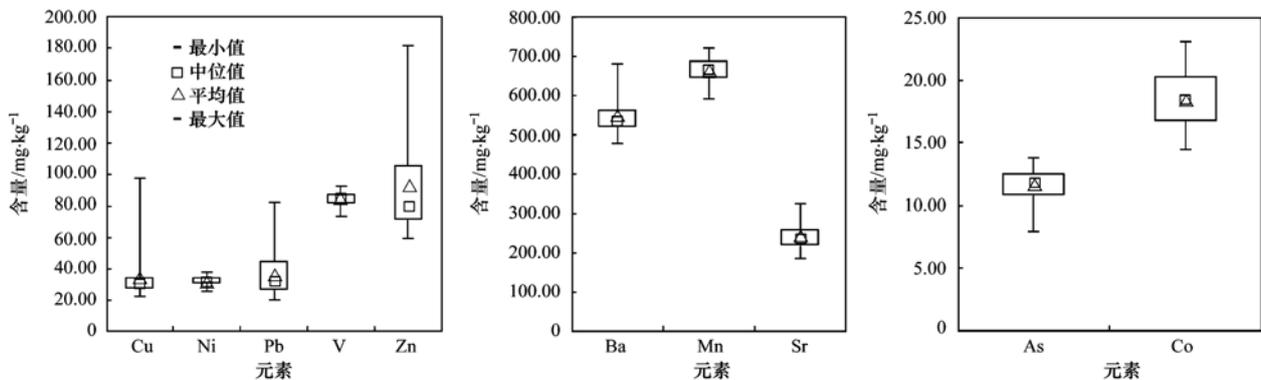


图 2 西安城市居民区土壤重金属含量

Fig. 2 Box plot of concentrations of heavy metals in soil from residential areas in Xi'an City

32.94%,为强变异;Sr、Co、As、Ba、Ni、V、Mn的变异系数均低于12%,属于弱变异. 在所有采样点中分别有66.67%、98.55%、100.00%、98.55%、86.96%、89.86%、98.55%、100.00%、69.57%、81.16%的样点中As、Ba、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、V、Zn的含量高于西安市褐土背景值,可见西安市居民区土壤中Ba、Co、Cu、Pb、Sr、Zn的超标率相对较高.

2.2 异常值的分析

为了避免重金属测定含量异常值对多元统计方法结果的不良影响,研究中采用Grubbs方法识别异常值,具体步骤参照文献[17]. 采用该方法得出As(采样点Q8,极小值)、Ba(采样点I6,极大值)、Cu(采样点J9,极大值)、Co(采样点W8,极大值)、Pb(采样点Q8,极大值)、Zn(采样点I6,极大值)、V(采样点H7,极小值)为异常值,采用相应方法处理后进行多元统计分析.

2.3 西安城市居民区土壤重金属的来源诊断

环境学领域中常将多元统计分析中的聚类分析与因子分析相结合研究土壤重金属的来源. 研究中先将去除异常之后的数据进行标准化,采用欧氏距离测定数据之间的距离,基于Wards法绘制出10种元素的树状图,如图3. 聚类分析将10种元素归为3类,即As-Mn-Ni-V、Ba-Co-Sr、Cu-Pb-Zn.

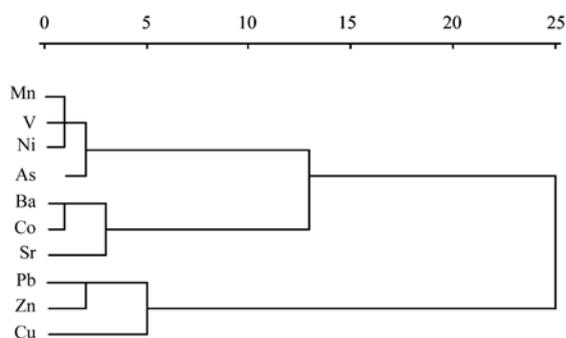


图3 基于Ward法的聚类分析树状图

Fig. 3 Dendrogram results of cluster analysis based on Ward method of hierarchical cluster analysis

KMO检验和巴特利特球度检验(KMO为0.730)说明变量之间相关性较强,适合做因子分析. 利用SPSS软件,基于主成分方法,采用Kaiser标准化的正交旋转法提取出3个因子,采用最大方差法对因子载荷矩阵进行正交旋转,累积解释总方差达90.743%,各元素的变量共同度均较高,介于0.813~0.981之间,说明元素的大部分信息可以被3个因子解释,信息丢失较少,因子分析提取的效果较好,如表1.

表1 土壤重金属含量因子分析的旋转成份矩阵
Table 1 Rotated component matrix for data of heavy metals in soil from residential areas in Xi'an City

元素	因子			变量共同度
	1	2	3	
As	0.894	0.053	0.259	0.869
Ba	0.490	0.303	0.791	0.958
Co	0.488	0.276	0.763	0.896
Cu	0.175	0.916	0.063	0.873
Mn	0.951	0.088	0.264	0.981
Ni	0.915	0.224	0.261	0.956
Pb	0.074	0.912	0.321	0.940
Sr	0.338	0.387	0.741	0.813
V	0.936	0.104	0.300	0.976
Zn	0.064	0.779	0.449	0.813
特征值	6.351	2.091	0.632	
解释总方差/%	63.508	20.912	6.323	
累积解释总方差/%	63.508	84.420	90.743	

元素As、Mn、Ni、V在因子1上具有较高的因子载荷,因子1解释了63.508%的总信息;元素Cu、Pb、Zn在因子2上具有较高的因子载荷,因子2解释了20.912%的总信息;元素Ba、Co、Sr在因子3上具有较高的因子载荷,因子3解释了6.323%的总信息.

一般将Mn元素作为土壤重金属自然来源的标志元素,且从重金属含量分析来看,As、Mn、Ni、V的含量略高于西安市褐土背景值,也有相对较多的采样点中这4种元素的含量低于相应的背景值,因此可以将因子1定为自然源.

总结城市土壤重金属污染来源的相关研究发现交通尾气排放被看作城市土壤Pb累积的主要来源,每分钟有200辆汽车通过的主干道路侧土壤中有明显的Pb富集^[18-21],含铅汽油较长的使用历史不可避免地会对土壤Pb累积产生一定的正向影响,Pb常被作为汽车污染的标识元素.Zn是汽车轮胎生产过程中重要的添加剂、汽车润滑改良剂和抗氧化剂;Cu因为其高耐腐蚀性与高导热性而被作为车辆制动系统与汽车散热器的重要组成部分^[21-23]. 汽车行驶过程中Cu、Pb、Zn会随汽车部件的磨损而进入周围环境,因此Cu、Pb、Zn组合也常被作为土壤交通来源的标志. 近十几年是西安市私家汽车快速增长的时期,居民区汽车进出与停放数量明显增加. 研究中将因子2确定为交通源.

土壤中的Co来自于煤的燃烧与冶金工业等的排放,将Co看作土壤来源的煤燃烧因子^[13]. Ba除了广泛用于柴油机及其它内燃机的清洁剂、氧化腐蚀抑制剂与抑制黑烟的添加剂^[24],其化合物也常被

用作燃煤的脱硫剂或固硫剂; Sr 及其化合物作为煤燃烧的添加剂可以高效促进高温固硫, 石油燃烧的残渣中含有 Ba、Sr, 二者也作为天然气的催化剂以提高其热稳定性^[25]. 因此, Co、Ba、Sr 可以吸附于化石燃料产物的颗粒表面而进入大气环境, 再经由干湿沉降的方式进入土壤环境而在土壤表层累积, 将因子 3 确定为化石燃料燃烧源.

2.4 绝对因子分析/多元线性回归分析

根据前述方法将因子分析的 3 个因子分数转换为绝对因子分数, 再将各绝对因子分数与各元素质量分数做多元线性回归, 分别得到每个元素与 3 个绝对因子的多元线性回归方程, 由多元线性回归方程计算得到各元素的质量分数的拟合值, 与实测值作比较, 得出二者的比值; 拟合值/实测值. 该值接近于 1 则说明多元线性回归的拟合度好^[26], 所研究元素各自回归方程的复相关系数 R^2 和拟合值/实测值的结果如图 4.

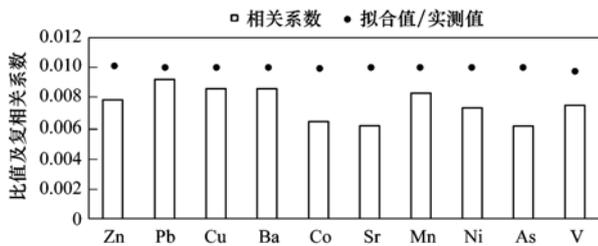


图4 绝对因子分析/多元线性回归的准确性表征

Fig. 4 Accuracy of the APCS/MLR

As、Ba、Co、Cu、Mn、Ni、Sr、Pb、Zn、V 的多元回归拟合的相对误差分别是 0.10%、0.13%、0.04%、0.03%、0.05%、0.05%、0.02%、0.01%、0.01%、1.50%，说明多元线性回归拟合值与实测值相比产生的误差较小。另外 Pb 的复相关系数大于 0.9, Cu、Ba、Mn 的复相关系数大于 0.8, Zn、Ni、V 的复相关系数大于 0.7, Co、Sr、As 的复相关系数接近于 0.7。由此说明多元线性回归的拟合度好, APCS/MLR 方法的准确性较高。

2.5 西安市居民区土壤中重金属来源贡献量解析

依据前述方法分别计算得出 10 种元素的 3 种来源的贡献率, 结果如图 5.

西安市居民区土壤中 As、Mn、Ni、V 的来源以自然源为主, 自然源对这 4 种元素的贡献率分别可达 69.63%、74.28%、68.65%、77.09%, 其次是化石燃料燃烧源对 As、Mn、Ni 这 3 种元素的贡献率较高, 这 3 种元素在土壤中的累积主要以自然源和化石燃料燃烧源为主, 交通源的贡献率很低, 交通源是土壤 V 的第二来源. 西安市居民区土壤中 Ba、

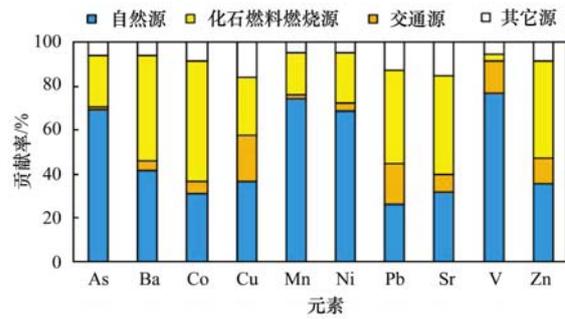


图5 西安市居民区土壤重金属污染源贡献率

Fig. 5 Source contribution ratios of heavy metals of soil from residential area in Xi'an City

Co、Pb、Sr、Zn 的来源以化石燃料燃烧源为主, 对这 5 种元素的贡献率分别为 48.27%、59.84%、42.22%、44.50%、44.44%, 其次是自然源对这 5 种元素的贡献率较高, 交通源对居民区土壤中 Sr、Ba、Co 的贡献率较低, 对土壤中 Pb、Zn 的贡献率也达到 10% 以上. 西安市居民区土壤中 Cu 的来源以自然源的贡献率最高, 达到 37.00%, 交通源和化石燃料燃烧源的贡献率均在 20% 以上.

2.6 西安市居民区土壤中重金属来源贡献率的空间分布特征

先对所有元素各个来源进行 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验, 显著性水平 Sig. 值分别为 0.154、0.363、0.137、0.469、0.752、0.145、0.292、0.461、0.678、0.162, 均远大于 0.05, 说明可以采用普通克里金方法利用 ARCGIS 软件绘制不同污染源贡献率的空间分布, 由此分析相应的空间分布特征, 结果如图 6、7.

所有采样点的土壤样品中元素 As、Mn、Ni、V 的来源均以自然源为主, 自然源对 4 种元素的贡献率的空间分布特征具有一定的相似性, 即西北部低东南部高. 自然源对 Mn 的贡献率最高的采样点是 Q1、Q4、N2, 对 Ni 的贡献率最高的采样点是 N2、V7、S5, 对 As 的贡献率最高的采样点是 N2、M6、L4, 对 V 的贡献率最高的采样点是 L4、M4、T4. 这些采样点基本位于城市主体城区二环道路以外, 有些采样点接近于城区边界三环道路, 人类活动对 As、Mn、Ni、V 的贡献相对较低, 以自然源的贡献为主, 这些采样点中自然源贡献最低的为 77.73%, 最高的可达 82.65%.

3 种来源对西安城市居民区土壤中 Co、Pb、Sr、Zn 的贡献率均以化石燃料燃烧源为最高值, 仅有 1 个采样点土壤中自然源对 Co 的贡献率最高, 有 9 个采样点土壤中交通源对 Pb 的贡献率最高, 分别有 2

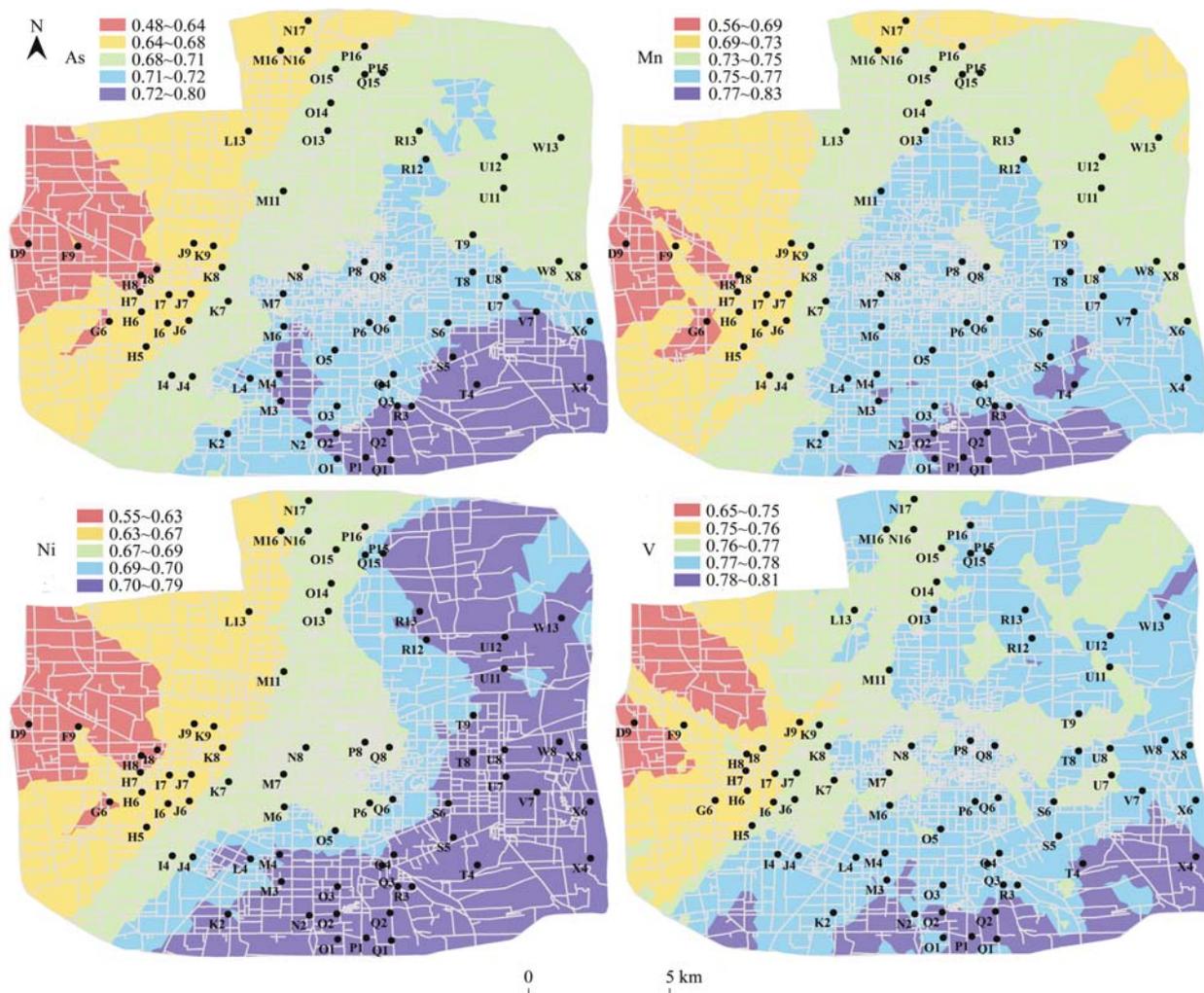


图 6 自然源贡献量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of source 1 contribution for As, Mn, Ni, V

个采样点土壤中自然源、交通源对 Sr 的贡献率最高, 分别有 9 个、3 个采样点土壤中自然源、交通源对 Zn 的贡献率最高。由图 7 可知, 化石燃料燃烧源对 Co、Pb、Sr、Zn 的贡献率的空间分布的总体特征表现为由城市中心向外逐渐增大, 不同方向的变化幅度有所差异。

化石燃料燃烧源对 Co 贡献率最低的采样点分别是 M6、J9、P8、Q8、Q4, 对 Co 贡献率最高的采样点分别是 W8、D9、N17、M16、H7, 贡献率均在 70% 以上。化石燃料燃烧源对 Pb 贡献率最低的采样点分别是 P8、Q8、Q4、J9、M6, 化石燃料燃烧源对 Pb 贡献率最高的采样点分别是 W8、M16、U7、Q15、N16, 最低贡献率为 13.57%, 最高贡献率为 78.10%。化石燃料燃烧源对 Sr 贡献率最低的采样点分别是 P8、J9、Q8、M6、Q6, 化石燃料燃烧源对 Sr 贡献率最高的采样点分别是 W8、M16、N17、H6、N16, 最低贡献率为 24.83%, 最高贡献率为

78.98%。化石燃料燃烧源对 Zn 贡献率最低的采样点分别是 J9、P8、M6、P18、Q8, 化石燃料燃烧源对 Zn 贡献率最高的采样点分别是 M16、D9、N17、W8、H6, 最低贡献率为 18.50%, 最高贡献率为 61.75%。

采样点 M6 位于朱雀大街西侧的红缨路, 自然源、交通源对该点 Co 的贡献率分别为 43.57%、17.28%, 化石燃料燃烧源的贡献率为 39.15%; 自然源、交通源对该点 Pb 的贡献率分别为 21.26%、45.06%; 自然源、交通源对该点 Sr 的贡献率分别为 40.95%、28.15%; 自然源、交通源对该点 Zn 的贡献率分别为 37.23%、31.21%, 交通活动排放对该采样点 Co、Pb、Sr、Zn 的累积的影响较大。采样点 J9 位于西安市西部桃园路, 该地机械加工类等工厂布局较多, 北侧是陇海铁路线。在该点, 化石燃料燃烧源对 Co 的贡献率最高, 自然源与交通源的贡献率相当, 分别为 32.01% 和 26.35%; 交通源对土

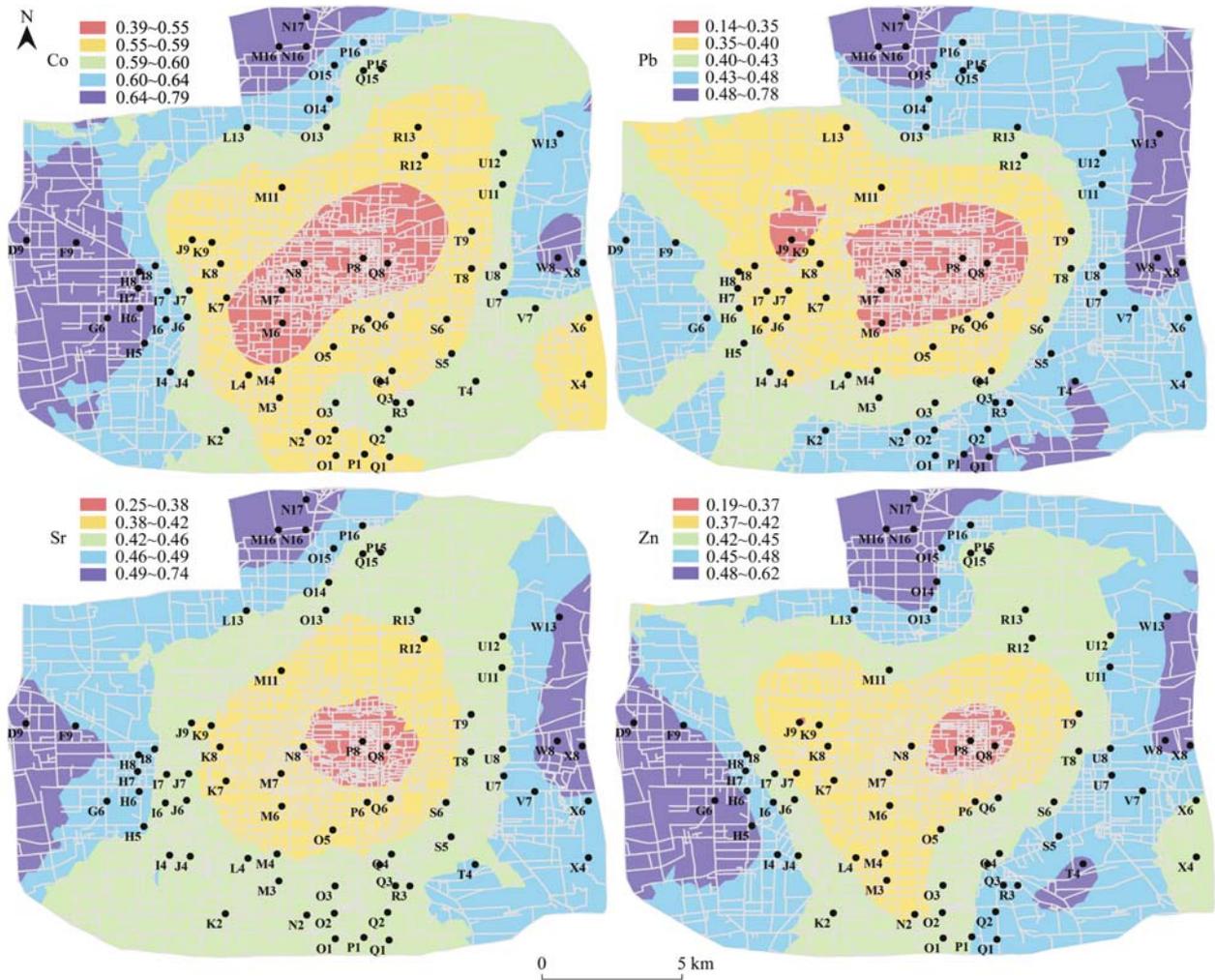


图 7 化石燃料燃烧源贡献量的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of source 3 contribution for Co,Pb,Sr,Zn

壤 Pb 的贡献率占明显优势,达 63.33%,自然源和交通源的贡献率均不足 15%;交通源对 Sr 的贡献率最高,为 36.15%,自然源和化石燃料燃烧源的贡献率基本相同,均略高于 25%;交通源对 Zn 的贡献率最高,为 34.63%,自然源和化石燃料燃烧源的贡献率均接近于 20%.

采样点 W8 位于东三环半坡立交西侧,向东是西安市建国之后布局的大型纺织企业集聚地,西北第一印染厂、陕西三棉等纺织企业位于采样点东侧,东北方向是灞桥热电厂;采样点 D9 位于西三环,东紧邻陕西省第一针织厂,向北有西安造纸机械厂等工厂布局;采样点 M16 位于西安市北部城区的经济技术开发区,近二十年建设了大型房地产项目.由于很长时间中工业生产的主要动力来源是煤炭等,因此化石燃料燃烧对土壤中 Co、Pb、Sr、Zn 的累积影响较大.

69 个采样点中有 45 个采样点的 Ba 是以化石

燃料燃烧源的贡献率最高,有 24 个采样点是以自然源的贡献率最高,自然源对 Ba 的贡献率的空间分布表现出自西部向东部增加的规律,化石燃料燃烧源对 Ba 的贡献率则表现为自城市中心向四周减小的规律,西部较东部减小的快.自然源对 Ba 的贡献率最低的采样点分别是 I6、W8、I8、H7、Q8,自然源对 Ba 的贡献率最高的采样点分别是 V7、K7、M6、S5、N2,贡献率均在 50% 以上.化石燃料燃烧源对 Ba 的贡献率最低的采样点分别是 M6、P8、J9、Q4、Q8,化石燃料燃烧源对 Ba 的贡献率最高的采样点分别是 D9、W8、N17、H7、M16,贡献率均在 60% 以上.69 个采样点中有 53 个采样点的自然源对 Cu 的贡献率的百分比最高,有 12 个采样点(H7、H8、I6、I8、J9、K8、M6、M7、P6、Q8、U8)交通源对 Cu 的贡献率的百分比最高,有 4 个采样点(D9、M16、N17、W8)化石燃料燃烧源对 Cu 的贡献率的百分比最高.

3 讨论

APCS/MLR 方法不需要确定土壤污染源成分谱,可以较为准确地定量解析出土壤重金属污染源的性质、各个污染源的贡献量和每个采样点各个污染源对每种重金属的贡献量;结合地统计分析污染源空间分布特征的研究,可进一步明确各类污染源的空间分布状况,从而验证土壤污染源的来源,这表明 APCS/MLR 与地统计相结合的方法可以很好地应用于土壤重金属污染来源的解析. 采用类似方法,瞿明凯等^[7]解析出电子工业源、城市大气沉降、成土母质源对武汉市东湖高新技术开发区土壤 Cd 的贡献量分别是 67%、28%、16%;陈丹青等^[8]解析得出自然源、交通源、工业源对广州市土壤 Cd 的贡献量分别是 46.1%、42.8%、1.1%,对土壤 Hg 的贡献量分别是 13.6%、36.1%、45.4%. 对比可知 APCS/MLR 与地统计相结合的方法可以达到定量解析不同类型城市土壤重金属来源的研究目的,能够明晰城市中土壤重金属累积的贡献率较高的人类活动类型,及其在城市中的空间分布特征,从而有针对性地提出城市土壤环境治理的策略.

4 结论

(1)相对于西安市褐土背景值西安城市居民区土壤中 Pb、Cu、Sr、Co、Zn、Ba、Ni、As、Mn、V 的富集程度依次减弱. Cu、Pb、Zn 属于强变异, Sr、Co、As、Ba、Ni、V、Mn 属于弱变异. 分别有 66.67%、98.55%、100.00%、98.55%、86.96%、89.86%、98.55%、100.00%、69.57%、81.16% 的样点中 As、Ba、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、V、Zn 的含量高于西安市褐土背景值,西安城市居民区土壤中 Ba、Co、Cu、Pb、Sr、Zn 的超标率相对较高.

(2)西安城市居民区土壤中 10 种重金属的累积有自然源、交通源、化石燃料燃烧源这 3 种主要来源. 自然源是 As、Mn、Ni、V 的主要来源,其平均贡献量分别为 69.63%、74.28%、68.65%、77.09%,化石燃料燃烧源对前 3 种元素贡献率次之,交通源对 V 的贡献率仅次于自然源. 化石燃料燃烧源是 Co、Pb、Sr、Zn 的主要来源,其平均贡献量分别为 59.84%、42.22%、44.50%、44.44%,其次是自然源,交通源的贡献最小. 自然源和化石燃料燃烧源是土壤 Ba 的主要来源. 土壤 Cu 来源以自然源为主,交通源和化石燃料燃烧源的贡献相当.

(3)西安居民区土壤中 As、Mn、Ni、V 的自然

源的空间分布特征表现为西北部低而东南部高; Co、Pb、Sr、Zn 的化石燃料燃烧源在空间分布上表现出自城市中心向外逐渐增加的特征;化石燃料燃烧源对 Ba 的贡献率则表现为自城市中心向四周减小的规律,西部较东部减小的快.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wu S, Peng S Q, Zhang X X, *et al.* Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **148**: 71-78.
- [3] Mostert M M R, Ayoko G A, Kokot S. Application of chemometrics to analysis of soil pollutants [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2010, **29**(5): 430-445.
- [4] 崔那涛, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. *中国地质*, 2016, **43**(2): 683-690. Cui X T, Luan W L, Song Z F, *et al.* A study of the spatial distribution and source of heavy metals in urban soil in Shijiazhuang City[J]. *Geology in China*, 2016, **43**(2): 683-690.
- [5] 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.
- [6] Zhao L, Xu Y F, Hou H, *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 654-662.
- [7] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 854-860. Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 854-860.
- [8] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(6): 1014-1022. Chen D Q, Xie Z Y, Zhang Y J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, **25**(6): 1014-1022.
- [9] 董驷睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2103-2111. Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [10] 李娇, 陈海洋, 滕彦国, 等. 拉林河流域土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(19): 226-233.

- Li J, Chen H Y, Teng Y G, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Lalin River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(19): 226-233.
- [11] 孙先锋, 徐甜甜, 王敏, 等. 西安市城墙内公园土壤重金属含量水平及污染评价[J]. 城市环境与城市生态, 2011, **24**(3): 1-4.
- Sun X F, Xu T T, Wang M, *et al.* Concentration determination and contamination evaluation for heavy metals in soil of three parks inside wall of Xi'an city[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2011, **24**(3): 1-4.
- [12] 黄静, 卢新卫, 翟雨翔. 西安市公园土壤重金属元素含量水平及风险评价[J]. 地质科技情报, 2009, **28**(4): 127-130.
- Huang J, Lu X W, Zhai Y X. Heavy metals content and ecological risk assessment of soil in Xi'an urban parks [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, **28**(4): 127-130.
- [13] Li X P, Feng L N. Spatial distribution of hazardous elements in urban topsoils surrounding Xi'an industrial areas, (NW, China): controlling factors and contamination assessments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **174**(1-3): 662-669.
- [14] 任伟琴, 梅凡民, 陈敏. 西安灌区土壤重金属形态特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2009, **28**(3): 451-452.
- [15] 陈秀端, 卢新卫, 杨光, 等. 西安市二环内表层土壤重金属污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, **26**(11): 81-86.
- Chen X D, Lu X W, Yang G, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in the urban topsoil of interior area of Xi'an[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, **26**(11): 81-86.
- [16] 陈秀端, 卢新卫, 杨光, 等. 西安市区表层土壤重金属风险评价[J]. 城市环境与城市生态, 2012, **25**(2): 41-46.
- Chen X D, Lu X W, Yang G, *et al.* Risk assessment of heavy metals in urban topsoil in Xi'an[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2012, **25**(2): 41-46.
- [17] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. 地理学报, 2011, **66**(9): 1281-1288.
- Chen X D, Lu X W, Zhao C M, *et al.* The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the Second Ring Road, Xi'an[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(9): 1281-1288.
- [18] Duzgoren-Aydin N S, Li X D, Wong S C. Lead contamination and isotope signatures in the urban environment of Hong Kong [J]. Environment International, 2004, **30**(2): 209-217.
- [19] Fong F T, Chee P S, Mahmood A A, *et al.* Possible source and pattern distribution of heavy metals content in urban soil at Kuala Terengganu town center[J]. The Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2008, **12**(2): 458-467.
- [20] Hernandez L, Probst A, Probst J L, *et al.* Heavy metal distribution in some French forest soils; evidence for atmospheric contamination[J]. Science of the Total Environment, 2003, **312**(1-3): 195-219.
- [21] 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.
- [22] Zheng Y M, Gao Q Z, Wen X H, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metals in foliage dust near pedestrian bridges in Guangzhou, South China in 2009 [J]. Environment Earth Science, 2013, **70**(1): 107-113.
- [23] Nimmo J W. New design radiators[J]. Canadian Copper, 1998, **139**: 8-9.
- [24] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属的富积、分布特征与环境风险[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(1): 70-76.
- Wang X S, Qin Y. Accumulation, distribution and environmental risk of heavy metals in Xuzhou urban topsoil[J]. Environmental Monitoring in China, 2006, **22**(1): 70-76.
- [25] 杨天华. 煤燃烧脱硫过程中高温物相固硫基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. 2-12.
- Yang T H. Fundamental research of high-temperature phase desulfurization during coal combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. 2-12.
- [26] 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 等. 南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2436-2442.
- Zhang Y F, Ma Y, Qi L, *et al.* Determination and source apportionment of aromatic acids in PM_{2.5} from the northern suburb of Nanjing in winter[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2436-2442.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-ni, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-ru, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cao, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)