万方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰，何亚磊，郭朝晖，肖细元，张严

主办 中国科学院生态环境研究中心
出版 科学出版社

双效期刊

2022年1月
第43卷 第1期
Vol.43 No.1

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第1期
2022年1月15日

目 次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 …… 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 …… 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 …… 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的Meta分析 …… 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 …… 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周嵬, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 $PM_{2.5}$ 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 …… 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 $PM_{2.5}$ 时空分布特征和潜在源区季节分析 …… 王妘涛, 张强, 温肖宇, 窦乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 瞿程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 $PM_{2.5}$ 三维结构变化特征 …… 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 …… 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气VOCs污染特征及健康风险评估 …… 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 …… 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州COVID-19期间大气VOCs体积分数变化特征 …… 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气VOCs在臭氧生成中的作用 …… 金丹 (132)
铜川市秋冬季大气VOCs特征及其 O_3 和SOA形成潜势分析 …… 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收VOCs排放特征与排放因子 …… 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 …… 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 …… 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 …… 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征 …… 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 …… 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评价 …… 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 …… 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评价 …… 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 …… 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 …… 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 …… 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭逍宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中DOM特性分析 …… 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 …… 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 …… 徐金兰, 许洋, 李修民, 国淼, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素a和环境因子垂向分布的影响 … 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家河水库春季分层期 *nirS* 型反硝化菌群特征分析 …… 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 …… 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价 …… 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素:以珠江三角洲为例 …… 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中22种PPCPs的多介质分布特征及风险评估 …… 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中209种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 …… 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 … 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO_2 通量支干流对比及影响机制初探 …… 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb^{2+} 的吸附行为 …… 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 …… 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 …… 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对ANAMMOX生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 …… 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对ANAMMOX污泥活性恢复的影响及菌群特征 …… 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于PMF模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 …… 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险 …… 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区 …… 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于DGT技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 …… 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 …… 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评价 …… 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 …… 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评价 …… 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 …… 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 …… 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香椿土壤微生物群落的组成及多样性 …… 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 … 杨文娜, 余泺, 罗东海, 熊子怡, 王鋆燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 …… 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 …… 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 …… 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

《环境科学》征订启事(73) 《环境科学》征稿简则(209) 信息(229, 266, 338)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第1期 2022年1月
Vol.43,No.1 Jan.,2022

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险

庞晓晨[1], 韩新宇[2], 史建武[1*], 包宇斋[1], 宁平[1], 张朝能[1], 向峰[3]
(1.昆明理工大学环境与工程学院, 昆明 650500; 2.昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500; 3.云南省生态环境监测中心, 昆明 650000)

摘要: 为研究昭通市主城区扬尘中重金属的污染特征及健康风险, 2019 年 5 月在昭通市昭阳区采集了道路尘和周边土壤尘样品,使用颗粒物再悬浮系统将尘样悬浮并采集 $PM_{2.5}$(空气动力学当量直径≤2.5 μm 的颗粒物),并利用 ICP-MS 和 ICP-OES 检测了 $PM_{2.5}$中 Ca、Al、Fe、Mg、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 15 种金属元素. 对其中 10 种重金属的研究表明,Mn 在土壤尘中含量最高,其次为 Cr、Ni、Zn、Cu、Co、Pb、V、As 和 Cd; Zn 在道路尘中含量最高,其次为 Mn、Cu、Cr、Pb、Ni、As、Co、V 和 Cd,且道路尘中 Cu、Zn 和 Pb 的含量高于土壤尘,表现为中度富集. 两种扬尘的 Cd 均表现为高度富集. 相关性和主成分分析表明,两种扬尘中重金属均受燃煤源的影响,但土壤尘和道路尘中重金属还分别受到农业活动源和交通源的影响而存在一定的来源差异. 健康风险研究表明,土壤尘中 Cr、Co、Ni、As 和 Cd 的终身致癌风险均高于道路尘. 两种扬尘中重金属的儿童非致癌风险均高于成人,且道路尘中 Cu、Zn 和 Pb 的非致癌风险高于土壤尘.

关键词:昭通; 扬尘; 重金属; 来源; 健康风险
中图分类号: X513; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)01-0180-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202106018

Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City

PANG Xiao-chen[1], HAN Xin-yu[2], SHI Jian-wu[1*], BAO Yu-zhai[1], NING Ping[1], ZHANG Chao-neng[1], XIANG Feng[3]
(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Architectural, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Yunnan Ecological Environmental Monitoring Center, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to explore the pollution characteristics and health risks of heavy metals in fugitive dust around the urban areas of Zhaotong City, road dust and soil dust samples were collected in the Zhaoyang District of Zhaotong City in May 2019. The dust samples were suspended using a particle resuspension system to obtain $PM_{2.5}$ (particulate matter with an aerodynamic diameter less than or equal to 2.5 μm). The concentrations of Ca, Al, Fe, Mg, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in $PM_{2.5}$ were quantified by ICP-MS and ICP-OES. By analyzing 10 types of heavy metals in $PM_{2.5}$, the results showed that the average concentration of Mn was the highest in the soil fugitive dust, followed by Cr, Ni, Zn, Cu, Co, Pb, V, As, and Cd. The average concentration of Zn in the road fugitive dust was the highest, followed by Mn, Cu, Cr, Pb, Ni, As, Co, V, and Cd. The enrichment factor (EF) indicated that Cd was strongly enriched in the two types of fugitive dust. The EFs of Cu, Zn, and Pb in road fugitive dust showed a moderate enrichment, and they were higher than those in soil fugitive dust. Correlation and principal component analysis showed that heavy metals in the two types of fugitive dust were affected by coal burning sources. At the same time, heavy metals in soil fugitive dust were affected by agricultural activity sources, and heavy metals in road fugitive dust were affected by traffic sources. The results of the health risk assessment indicated that the carcinogenic risks of Cr, Co, Ni, As, and Cd in soil fugitive dust were higher than those in road fugitive dust. The non-carcinogenic risks of heavy metals in the two types of fugitive dust for children were higher than those for adults, and the non-carcinogenic risks of Cu, Zn, and Pb in road fugitive dust were higher than those in soil fugitive dust.

Key words:Zhaotong; fugitive dust; heavy metals; source; health risk

扬尘是大气颗粒物的主要来源之一[1~3]. 在起尘过程中,重金属元素往往是一种高于本底浓度的迁移过程[4,5],扬尘也因在大气环境中的反复“起沉”,正逐渐成为城市生态系统中重金属污染物的汇与源[6~8]. 不同地理背景的扬尘源的化学特征应存在差异[9],但对于扬尘中重金属的污染特征和风险评价等相关研究多集中于中国北方、西北和东部地区[10~14]. 目前已有中国西南地区部分城市扬尘的 PM_{10}源谱[15],但 $PM_{2.5}$因具有较大的比表面积,更易富集重金属并通过皮肤接触、呼吸及摄入等暴露途径进入人体[16],引起血管、呼吸系统和神经系统等疾病[17,18],危害人体健康. 如扬州和湖州等地的 $PM_{2.5}$中,由扬尘中重金属导致的健康风险最高[19,20],而云南土壤重金属元素自然本底值相对较高[21],且在云南不同成土母质风化成土过程中,As、Cd 和 Pb 等重金属普遍呈次生富集状态[22]. 岳敏慧等[23]的研究指出云南土壤中重金属主要来源于矿业开采、农业活动和大气沉降等,而扬尘作为土壤向大气环境中迁移的介质之一,其重金属含量水平应引起重视. 因此,本文选取云南省昭通市主城区为研究区域,采集土壤尘及道路尘进行分析,通过掌握昭通扬尘 $PM_{2.5}$中重金属污染特征及其重金属对人群可能造成的健康风险,以期为该地区大气颗粒物

收稿日期: 2021-06-02; **修订日期**: 2021-07-04
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214405); 国家自然科学基金项目(21966016)
作者简介: 庞晓晨(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染物防治,E-mail:18392066312@163.com
* 通信作者,E-mail:shijianwu2000@sina.com

防治及人体健康防护提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

昭通(102°52′～105°19′E, 26°55′～28°36′N)位于云南省东北部,地处乌蒙山腹地,平均海拔为1 920 m,属北纬高原大陆季风气候,干湿季分明,年平均温度为13.2℃,年平均降雨量为473 mm,主导风向为北风,土壤以黄壤、黄棕壤及水稻土等为主.昭通以建材、化学制品制造、褐煤化工和矿冶加工等行业为主,煤、硫储量居全省首位,是云南有色金属三大基地之一,且昭通拥有中国南方第二大的褐煤田[24].

1.2　样品采集预处理

本研究在2019年5月采集了昭通市主城区的土壤尘和道路尘样品,土壤尘采样点及道路尘采集路段见图1.土壤尘的土样类型以城市周边农业耕地为主,在主城区东、南、西、北的4个方向和主导风向的下风向选择裸露农田或果园地采集土壤尘,每个采样点采集表层混合土样,用木铲以四分法取约1 000 g的样品装入密封袋保存,共获得14组土壤样品.选取昭通市具有代表性的8条城市主干道,用毛刷收集城市主干道上的道路积尘,每条道路据采集路段长度等间隔设置3个采样点,每个采样点的尘样质量不少于500 g,每条道路采样点的尘样混合为一组混合尘样,最终共获得8组道路混合尘样.采样前地面干燥且7 d内无降雨.

将采集的样品带回实验室去除砂石、枝叶等杂物,在室温、通风和避光条件下自然晾干,然后用150目的不锈钢筛进行筛分,过筛的量不少于100 g.通过再悬浮采样器(NK-ZXF,南开大学)将过筛的尘样采集于直径为47 mm的Teflon膜(MK360,瑞典Munktell公司)上,最终得到22个$PM_{2.5}$样品.空白滤膜采样前置于60℃的烘箱中烘烤2 h以去除滤膜上的杂质,采样前后将滤膜置于恒温恒湿(温度:25℃ ±1℃; 湿度:30% ±5%)的环境中平衡24 h后再进行称重.

1.3　样品分析及质量保证

将载有$PM_{2.5}$样品的滤膜准确剪取1/2后剪碎放入锥形瓶中,加适量去离子水润湿,之后加入15 mL HNO_3和5 mL $HClO_4$,在电热板上加热锥形瓶,温度控制在100℃左右,约1 h后将温度提升至160℃,当酸剩余约3 mL时,冷却锥形瓶,加入适量去离子水,过滤残渣并定容至25 mL容量瓶.采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国Agilent公司,Agilent 7500a型)对$PM_{2.5}$中的V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb等10种重金属进行定量分析.另一半滤膜按碱熔法[25]消解后采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES,美国PerkinElmer公司,Optima 7000DV型)对$PM_{2.5}$中的Ca、Al、Fe、Mg和Ti等地壳元素进行定量分析.

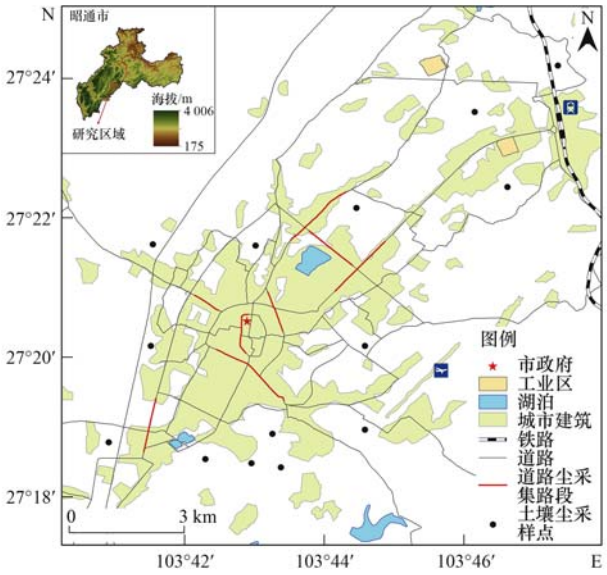


图1　昭通市土壤尘采样点及道路尘采集路段示意

Fig. 1　Sampling sites for soil dust and road dust around the urban areas of Zhaotong City

每10个样品执行一个重复样品、一个空白分析及一个空白加标回收分析.重复样品分析中目标元素含量的相对误差均小于10%,且空白分析中目标元素的含量均低于二倍方法检出限[26].空白加标回收分析中,每次称取10 mg的GBW07407土壤标准物质与剪碎的空白滤膜进行消解[25],然后按照样品分析步骤进行ICP-MS和ICP-OES分析,回收率均在90%～110%内.样品分析数据最终均扣除了空白样品的均值.

1.4　富集因子法

富集因子法(EF)是用来判断和评价环境中污染物来源的一种常用方法,也是评价元素富集程度的重要指标[27].其公式如下:

$$EF_i = (C_i/C_n)_{样品}/(B_i/B_n)_{背景} \quad (1)$$

式中,EF_i为土壤样品中测量元素i的富集因子;C_i和C_n分别为样品中测量i和参比元素n的含量;B_i和B_n分别为土壤背景值中测量元素i和参比元素n的含量.本研究使用Al作为参比元素,重金属元素背景值参考云南省表层(A层)土壤背景值,见表3.若EF≤10,主要受自然源影响;若EF>10,则主要受人为源影响,且元素的EF值越大,说明其污染程度越大,人类活动对该元素造成的影响越大[28].

1.5　健康风险评价

本研究采用美国环保署(EPA)提供的健康风险

评价模型对扬尘中重金属进行评估,其中 Mn、Cu、Zn、Pb 和 V 属于非致癌物质,Cr、Co、Ni、As 和 Cd 属于致癌物质. 本研究对象为儿童和成人两个群体,人体通过摄食、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径暴露于扬尘中的日均暴露量的计算公式如下:

$$D_{ing} = C \times \frac{IngB \times EF \times ED}{BW} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$D_{inh} = C \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (3)$$

$$D_{dermal} = C \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (4)$$

由于 EPA 只给出了呼吸途径的致癌风险参数,因此本研究只考虑呼吸途径的致癌风险,其终身日均暴露量(LADD)计算公式为:

$$LADD = \frac{C \times EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}}\right) \quad (5)$$

式中,D_{ing}、D_{inh}和 D_{dermal}分别代表摄食、呼吸吸入和皮肤接触的日均暴露剂量,mg·(kg·d)$^{-1}$; C 表示重金属含量,mg·kg^{-1}; 其余参数见表 1.

重金属的非致癌总风险值(HI)和终身致癌总风险值(R_T)计算公式如下:

$$HI = \sum_i^m \sum_j^n HQ_{ij} = \sum_i^m \sum_j^n \frac{D_{ij}}{RFD_{ij}} \quad (6)$$

$$R_T = \sum_i^m R_i = \sum_i^m LADD_i \times SF_i \quad (7)$$

式中,HQ_{ij}为重金属 i 元素在 j 途径的非致癌风险值; R_i 为重金属 i 元素的致癌风险值; RFD_{ij} 为重金属 i 在 j 途径暴露的参考剂量,mg·(kg·d)$^{-1}$; SF 为致癌斜率因子,mg·(kg·d)$^{-1}$,具体参数见表 3. 若 HI < 1.00E +00,则表示致癌风险较小或可以忽略; 若 HI ≥ 1.00E +00,则表示存在非致癌风险,且风险随着 HI 值的增大而增大; 当 R_T < 1.00E -06 时,认为存在较低的致癌风险; 当 R_T 介于 1.00E -06 ~ 1.00E -04 时,认为存在一定的致癌; 当 R_T ≥ 1.00E -04 时,认为存在较高的致癌风险.

表 1 重金属暴露参数[14]

Table 1 Exposure parameters of heavy metals

参数	含义	单位	儿童取值	成人取值
ED	暴露年限	a	6	24
BW	平均体重	kg	15	70
EF	暴露频率	d·a^{-1}	180	180
AT(非致癌)	平均作用时间	d	365 × ED	
AT(致癌)	平均作用时间	d	70 × ED	
IngR	摄食灰尘量	mg·d^{-1}	200	100
InhR	呼吸摄入量	mg·d^{-1}	7.6	20
PEF	颗粒物排放因子	m^3·kg^{-1}	1.36 × 10^9	1.36 × 10^9
SL	皮肤富集因子	mg·(cm^2·d)$^{-1}$	0.2	0.7
SA	暴露的皮肤面积	cm^2	2 800	5 700
ABS	吸入因子	/	0.001,As 取 0.03	

表 2 重金属参考剂量和致癌斜率因子/mg·(kg·d)$^{-1}$

Table 2 Reference doses and slope factors of heavy metals/mg·(kg·d)$^{-1}$

重金属	RFD			SF
	摄食	呼吸吸入	皮肤接触	
Cd	1.00E -03	1.00E -03	1.00E -05	6.3
Co	2.00E -02	5.70E -06	1.60E -02	9.8
Cr	3.00E -03	2.86E -05	6.00E -05	42
Ni	2.00E -02	2.06E -02	5.40E -03	0.84
As	3.00E -04	3.01E -04	1.23E -04	15.1
Mn	4.60E -02	1.43E -05	1.84E -03	—
Zn	3.00E -01	3.00E -01	6.00E -02	—
Pb	3.50E -03	3.52E -03	5.25E -04	—
Cu	4.00E -02	4.02E -02	1.20E -02	—
V	7.00E -03	7.00E -03	7.00E -05	—

2 结果与讨论

2.1 元素含量水平特征

表 3 给出了昭通市主城区扬尘中 15 种金属元素的含量,土壤尘和道路尘的金属元素总平均含量分别为 227.58 g·kg^{-1} 和 206.74 g·kg^{-1},两种扬尘中地壳元素占主要成分,其含量之和分别占其 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 22.76% 和 20.67%. 土壤尘中地壳元素的含量表现为:Al > Fe > Ca > Ti > Mg,道路尘中地壳元素的含量表现为:Ca > Al > Fe > Ti > Mg,道路尘 Ca 的含量高于土壤尘,而其余地壳元素含量则表现为土壤尘大于道路尘.

土壤尘和道路尘中 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 10 种重金属平均含量之和分别为:2 516.46 mg·kg^{-1} 和 2 408.64 mg·kg^{-1},占其 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 0.25% 和 0.24%,10 种重金属在土壤尘中的含量大小顺序为:Mn > Cr > Ni > Zn > Cu > Co > Pb > V > As > Cd,分别为土壤背景值的 1.68、7.09、4.85、2.12、3.75、2.99、7.72、0.55、

表 3　昭通周边扬尘中金属元素含量/mg·kg^{-1}

Table 3　Concentrations of metal elements in the two types of fugitive dust around Zhaotong City/mg·kg^{-1}

元素	土壤尘		道路尘		云南土壤背景值[29]
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	
V	85. 42	62. 23	55. 45	27. 07	154. 9
Cr	461. 97	206. 58	284. 68	109. 48	65. 2
Mn	1 050. 38	1 011. 89	469. 16	108. 27	626. 0
Co	135. 16	62. 40	59. 52	28. 79	17. 5
Ni	206. 10	144. 96	141. 51	66. 66	42. 5
Cu	173. 84	146. 66	323. 52	260. 15	46. 3
Zn	190. 51	93. 35	743. 41	383. 18	89. 7
As	62. 89	33. 41	61. 55	46. 45	18. 4
Cd	28. 89	22. 73	21. 41	13. 73	0. 218
Pb	121. 31	70. 36	248. 44	72. 24	40. 6
Mg	1 040. 58	591. 59	979. 02	245. 79	6 100
Ca	32 008. 64	27 941. 95	89 787. 98	39 659. 63	1 600
Fe	79 675. 28	32 195. 71	48 557. 38	12 850. 69	5 200
Ti	30 623. 99	16 379. 93	12 384. 25	4 805. 10	7 100
Al	84 230. 50	31 750. 93	55 032. 22	25 702. 03	88 100

3. 42 和 132. 54 倍；道路尘中 10 种重金属的含量大小顺序为：Zn > Mn > Cu > Cr > Pb > Ni > As > Co > V > Cd，为土壤背景值的 8. 29、0. 74、4. 37、6. 11、8. 49、3. 33、3. 35、3. 40、0. 36 和 98. 20 倍. 两种扬尘中，仅 V 的含量未超过云南土壤背景值. 昭通扬尘中，V、Cr、Mn、Co、Ni、As 和 Cd 的含量总体上表现为土壤尘大于道路尘，且如图 2 所示，两种扬尘的 Cr、Ni 和 As 的含量均高于其它城市，处于较高水平. 昭通土壤尘中重金属元素的总含量仅次于香港，Mn 的含量在 10 种重金属中最高，Cr、Co、Ni 和 As 的含量高于其它城市，除地处高土壤母质背景区外，可能受其它人为活动影响. 在昭通道路尘中，Cu、Zn 和 Pb 的含量高于土壤尘，其含量是土壤尘的 1. 86、3. 90 和 2. 05 倍，Zn 的含量在 10 种重金属中最高，且 Zn、Pb 和 Cu 的含量之和占重金属总含量的 50% 以上，这与苏州、香港和 Big Bend 的道路尘类似.

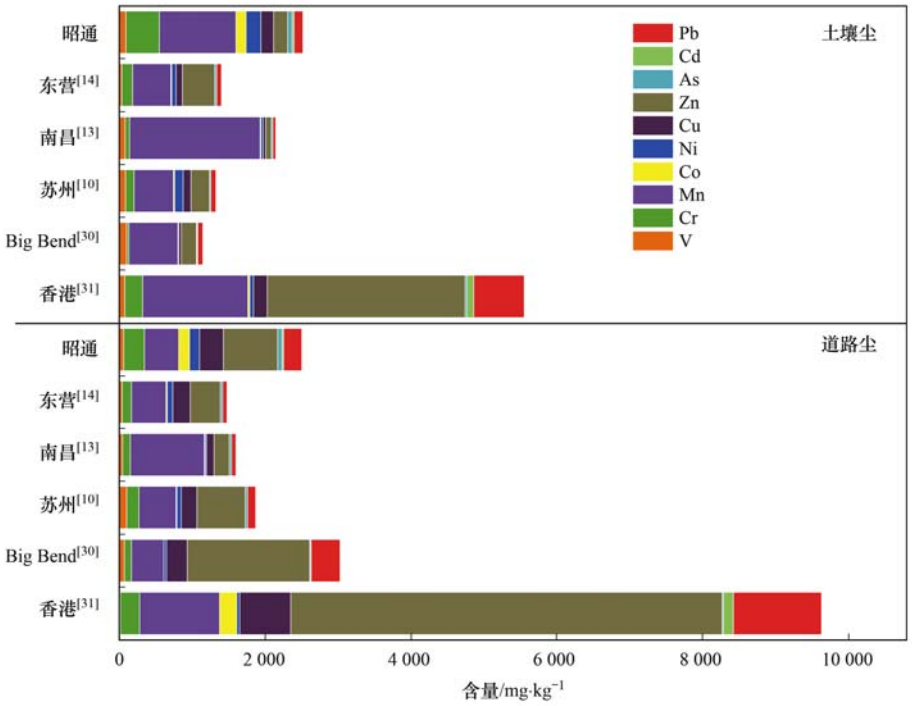


图 2　不同城市扬尘中重金属含量比较

Fig. 2　Comparison of the contents of heavy metals in the two types of fugitive dust among different cities

2. 2　富集因子

图 3 给出了昭通扬尘金属元素的 EF. Ca、Al、Fe、Mg 和 Ti 等地壳元素中，土壤尘和道路尘中 Mg、Ti 和 Al 的 EF 小于 10，而 Ca 和 Fe 的 EF 在 10 ~ 100 之间，表现为中度富集，表明两种扬尘的 Ca 和 Fe 受一定的人为活动影响. 在土壤尘中，Cr、Mn、Co、

Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的 EF 小于 10,表现为轻度富集,主要受自然源影响. 在道路尘中,V、Cr、Mn、Co、Ni 和 As 的 EF 小于 10,而 Cu、Zn 和 Pb 的 EF 在 10 ~ 100 之间,为中度富集,表明 Cu、Zn 和 Pb 主要受人为源影响. Cd 在两种扬尘中的 EF 均大于 100,表现为高度富集,受强烈的人为污染影响. Cd 主要来源于燃煤活动[1,32,33],昭通无钢铁冶炼行业,褐煤化工、矿冶加工是昭通的七大支柱产业之一,且昭通市 2019 年居民能源消耗量为 106.92 万吨标准煤,占总能源消耗用煤的 13.85%[34],两种扬尘的 Mn/V 值也均远大于 1,表明两种扬尘均受燃煤活动影响[10,35].

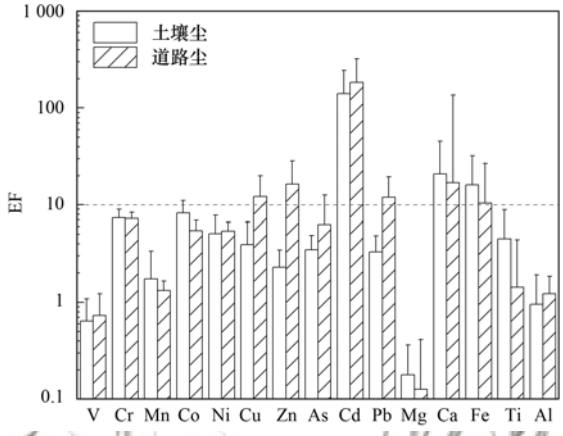


图 3 扬尘中金属元素的富集因子

Fig. 3 Enrichment factors of metal elements in the two types of fugitive dust

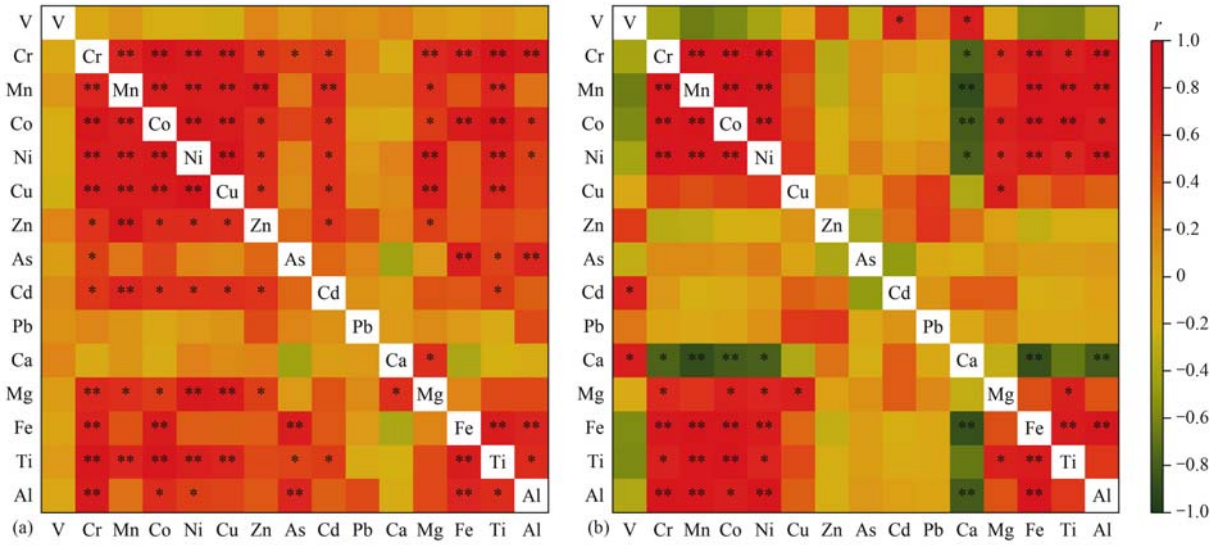
2.3 相关性分析

元素间的相关性可以反映其是否具有同源性,图 4 为两种扬尘中元素之间的 Pearson 相关性系数. 土壤尘中,Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn 和 Cd 之间均呈显著正相关($r \geq 0.50$, $P \leq 0.05$),表明这些重金属之间具有较强的关联性. Cr、Mn、Co、Ni、Cu 和 As 与地壳元素(Mg、Fe、Ti 和 Al)[7,11]之间呈显著正相关($r \geq 0.50$, $P \leq 0.05$),表明 Cr、Mn、Co、Ni、Cu 和 As 与地壳元素具有同源性,而 Zn 和 Cd 与地壳元素之间无显著相关性,表明土壤尘中 Zn 和 Cd 存在一定程度的人为污染. Ca 仅和 Mg 呈显著相关($r = 0.63$, $P \leq 0.05$),而 Ca 和 Mg 是建筑尘的标志组分[36],表明 Ca 和 Mg 可能受建筑尘影响. V 和 Pb 与其它元素无显著相关性,表明其可能存在其它源.

道路尘中,Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 与其它元素之间无显著相关性,而 Cr、Mn、Co 和 Ni 与地壳元素(Mg、Fe、Ti 和 Al)之间呈显著正相关($r \geq 0.60$, $P \leq 0.05$),表明 Cr、Mn、Co 和 Ni 与地壳元素具有同源性. Ca 与 Cr、Mn、Co、Ni、Fe 和 Al 呈显著负相关($r \leq -0.60$, $P \leq 0.05$),而 V 与 Ca 和 Cd 呈显著正相关($r \geq 0.50$, $P \leq 0.05$). 同时,昭通主城区道路建设材料富含 Ca[4]. 因此,推断道路尘中 Ca、V 和 Cd 等元素可能来源于路面磨损和机动车尾气排放[37~39].

2.4 主成分分析

为进一步判断土壤尘与道路尘中重金属的来源异同,对重金属含量数据进行检验(KMO > 0.50, Bartlett < 0.05),最终将土壤尘与道路尘中载带的 Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 Pb 通过 SPSS 25.0 进行主成分分析,截取了特征值大于 1 的因子以讨论两种扬尘中重金属的来源,正交旋转后的成分矩阵见表 4. 土壤尘(KMO = 0.56, Bartlett = 0.00)与道路尘



(a)土壤尘,(b)道路尘; * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$

图 4 土壤尘与道路尘中金属元素之间的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients among metal elements in soil fugitive dust and road fugitive dust

(KMO = 0.67, Bartlett = 0.01) 分别解析获得了 2 个因子.

表 4　土壤尘和道路尘中重金属主成分分析

Table 4　Principal component analysis of heavy metals in soil fugitive dust and road fugitive dust

重金属	土壤尘		道路尘	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
Cr	0.905	0.195	0.967	−0.134
Co	0.951	0.030	0.922	−0.074
Ni	0.962	0.078	0.960	0.012
Cu	0.948	0.099	0.713	0.536
Zn	0.642	0.619	−0.252	0.828
Pb	−0.019	0.972	0.133	0.934
特征值	4.16	1.18	3.31	1.86
解释方差/%	66.00	23.06	54.96	31.16
累积方差/%	66.00	89.06	54.96	86.12

土壤尘的因子 1 解释方差为 66.00%, 负载较高的系数有 Cr、Co、Ni 和 Cu, 且 Cr、Co、Ni 和 Cu 的 EF 值均低于 10, 受人为源影响较小. 而昭通土壤中 Cr、Co、Ni 和 Cu 等重金属具有典型的母岩继承性[22,40], 表明因子 1 符合本地土壤母质重金属的特征. 此外, 土壤尘多受到施肥、污水灌溉和农药喷洒等农业活动的影响, 可能在土壤中富集 Cu 和 Zn 等重金属[12,41,42]. 可以推断, 因子 1 为土壤母质源和农业活动源; 因子 2 解释方差为 23.06%, 负载系数以 Pb 为主, 而 Pb 一般与燃煤相关活动有关[28,43]. 因此, 因子 2 可作为燃煤源.

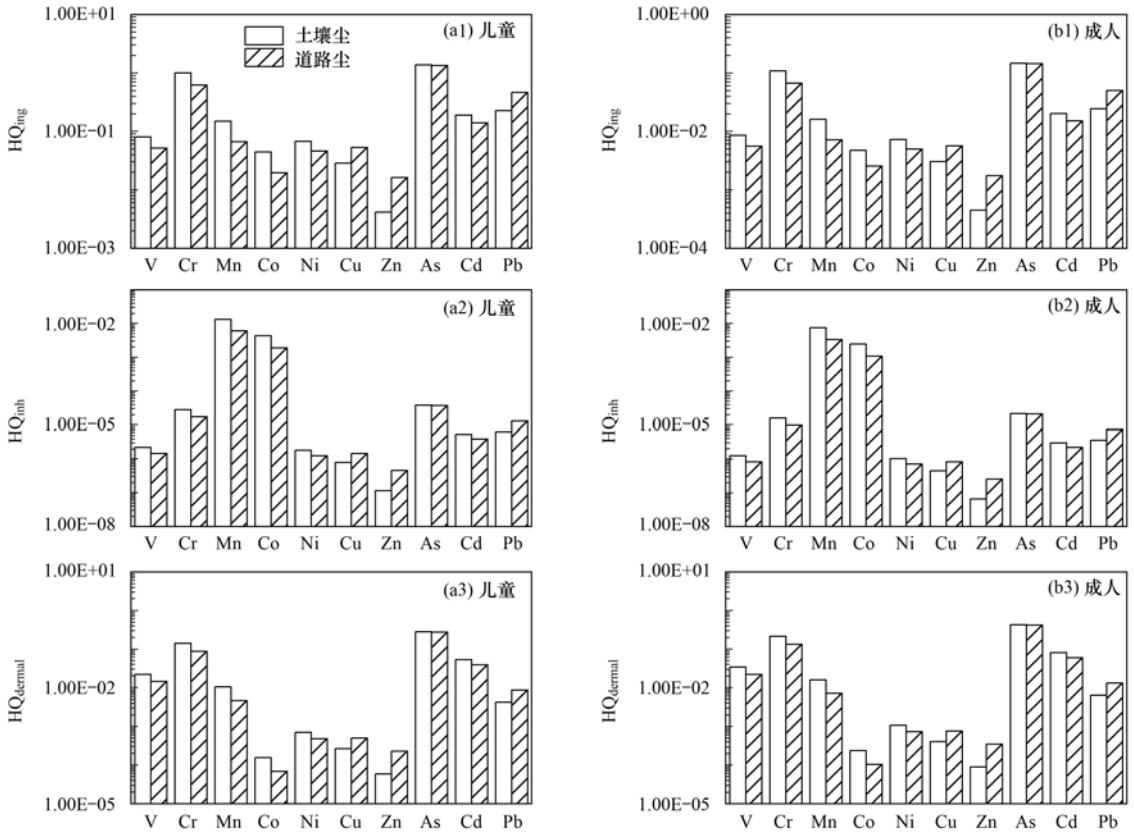
道路尘的因子 1 解释方差为 54.96%, 负载系数较高的重金属有 Cr、Co 和 Ni(EF 值均小于 10), 且有研究表明道路尘中 Cr、Co 和 Ni 主要受土壤母质影响[26,38,44]. 因此, 可以推断, 因子 1 代表土壤母质源; 因子 2 解释方差为 31.16%, 负载系数以 Pb、Zn 和 Cu 为主(EF 值均大于 10). 有研究表明, Pb 主要来源于燃煤活动[45], 而 Zn 和 Cu 主要与机动车抗氧化剂、润滑油使用、刹车片磨损和轮胎摩擦等排放有关[46]. 因此, 因子 2 可看作为交通与燃煤混合源.

综上, 两种扬尘中重金属均受燃煤源的影响, 但土壤尘和道路尘中重金属还分别受到农业活动源和交通源的影响而存在一定的来源差异.

2.5　健康风险研究

2.5.1　非致癌风险

图 5 为儿童与成人在摄食、呼吸吸入和皮肤接触暴露途径下的非致癌暴露风险值(HQ). 在两种扬尘中, 儿童 3 种暴露途径的非致癌风险强度顺序为: 摄食 > 皮肤接触 > 呼吸吸入, HQ_{ing} 占非致癌总风险值(HI)的 89.88%, 表明摄食途径是扬尘中造



HQ_{ing}、HQ_{inh} 和 HQ_{dermal} 分别为摄食、呼吸吸入和皮肤接触的非致癌暴露风险值

图 5　扬尘中重金属非致癌暴露风险值

Fig. 5　Risk value of non-carcinogenic exposure of heavy metals in the two types of fugitive dust

成儿童重金属非致癌风险的主要途径；而成人的3种暴露途径的非致癌风险强度顺序为：皮肤接触 > 摄食 > 呼吸吸入，HQ_{dermal} 占 HI 的 40.68%，表明皮肤接触途径是扬尘中造成成人重金属非致癌风险的主要途径.

两种扬尘 10 种重金属的各暴露途径的 HQ 均表现为儿童大于成人，土壤尘与道路尘中 10 种重金属的儿童 HI 分别为：3.72E +00 和 3.28E +00，成人的 HI 为 1.14E +00 和 0.97E +00，两种扬尘的儿童 HI 均大于 1.00E +00，存在非致癌风险，且是成人 HI 的 3.26 和 3.38 倍. 道路尘中 Pb、Cu 和 Zn 的 HI 高于土壤尘，其余重金属的 HI 小于土壤尘，这与含量水平特征一致. 无论成人还是儿童，两种扬尘 As 的 HI 高于其它重金属，其次为 Cr，而 Zn 的 HI 最低. 在土壤尘和道路尘中，儿童 As 的 HI 分别为 1.66E +00 和 1.63E +00，土壤尘的 Cr 在儿童中的 HI 为 1.15E +00，存在一定的非致癌风险，应加强对儿童的扬尘风险防护.

2.5.2 致癌风险

表 5 为昭通两种扬尘中 Cr、Co、Ni、As 和 Cd 的终身致癌暴露剂量（LADD）与终身致癌风险值（R）. 5 种重金属的 LADD 与 R 表现为土壤尘高于道路尘. 土壤尘中重金属的致癌风险强度表现为：Cr > Co > As > Cd > Ni，而道路尘：Cr > As > Co > Cd > Ni. 土壤尘的终身致癌总风险值（R_T）大于 1.00E -06，存在一定的致癌风险，土壤尘和道路尘中 Cr 的终身致癌总风险值在 R_T 中占比最高，分别占 R_T 的 88.07% 和 87.13%.

表 5 扬尘中重金属的终身致癌暴露剂量与终身致癌风险值

Table 5 Lifetime exposure doses and lifetime carcinogenic risk values of heavy metals in the two types of fugitive dust

类型	项目	Cr	Co	Ni	As	Cd	总计
土壤尘	LADD	2.37E -08	6.93E -09	1.06E -08	3.22E -09	1.48E -09	4.59E -08
	R	9.95E -07	6.79E -08	8.88E -09	4.87E -08	9.33E -09	1.13E -06
道路尘	LADD	1.46E -08	3.05E -09	7.25E -09	3.16E -09	1.10E -09	2.92E -08
	R	6.13E -07	2.99E -08	6.09E -09	4.77E -08	6.91E -09	7.04E -07

3 结论

（1）土壤尘和道路尘中 10 种重金属的平均含量分别为2 516.46 $mg \cdot kg^{-1}$ 和2 408.64 $mg \cdot kg^{-1}$，土壤尘中重金属的含量大小顺序为：Mn > Cr > Ni > Zn > Cu > Co > Pb > V > As > Cd；道路尘中重金属的含量大小顺序为：Zn > Mn > Cu > Cr > Pb > Ni > As > Co > V > Cd，两种扬尘中仅 V 未超过云南土壤重金属背景值.

（2）富集因子表明，Cd 在两种扬尘中均表现为强烈富集，Cu、Zn 和 Pb 在道路尘中表现为中度富集，其余重金属均表现为轻度富集. 结合相关性和主成分分析可知，道路尘中重金属受燃煤源和交通源影响，而土壤尘中重金属受燃煤源和农业源影响.

（3）健康风险分析表明，土壤尘中 Cr 和 As 均存在儿童非致癌风险，而道路尘中仅有 As 存在儿童非致癌风险. Cr、Co、Ni、As 和 Cd 均不存在终身致癌风险. 因此，应对此研究区域扬尘中的 Cr 和 As 加强关注.

参考文献：

[1] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al*. Emission control priority of $PM_{2.5}$-bound heavy metals in different seasons: a comprehensive analysis from health risk perspective[J]. Science of the Total Environment, 2018, **644**: 20-30.

[2] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 76-85.
Wu M, Wu D, Xia J R, *et al*. Analysis of pollution characteristics and sources of $PM_{2.5}$ chemical components in Chengdu in winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 76-85.

[3] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 $PM_{2.5}$ 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4813-4824.
Zhang J F, Jiang N, Duan S G, *et al*. Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4813-4824.

[4] Cesari D, Contini D, Genga A, *et al*. Analysis of raw soils and their re-suspended PM_{10} fractions: characterisation of source profiles and enrichment factors[J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(6): 1238-1246.

[5] 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.

[6] Ho K F, Wu K C, Niu X Y, *et al*. Contributions of local pollution emissions to particle bioreactivity in downwind cities in China during Asian dust periods[J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 675-683.

[7] Pan Y P, Tian S L, Li X R, *et al*. Trace elements in particulate matter from metropolitan regions of Northern China: Sources, concentrations and size distributions[J]. Science of the Total Environment, 2015, **537**: 9-22.

[8] Han Q, Wang M S, Cao J L, *et al*. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110157.

[9] Chow J C, Watson J G, Houck J E, *et al*. A laboratory resuspension chamber to measure fugitive dust size distributions and chemical compositions[J]. Atmospheric Environment,

1994, **28**(21): 3463-3481.

[10] Wu F Q, Kong S F, Yan Q, *et al*. Sub-type source profiles of fine particles for fugitive dust and accumulative health risks of heavy metals: a case study in a fast-developing city of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(14): 16554-16573.

[11] Zhang R, Cao J J, Tang Y R, *et al*. Elemental profiles and signatures of fugitive dusts from Chinese deserts[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 1121-1129.

[12] Cao J J, Chow J C, Watson J G, *et al*. Size-differentiated source profiles for fugitive dust in the Chinese Loess Plateau[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(10): 2261-2275.

[13] 郑权. 南昌市开放源 $PM_{2.5}$中化学组分特征及有害组分风险评价[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
Zheng Q. Characteristics of chemical components and risk assessment of harmful components in $PM_{2.5}$ of fugitive dust in Nanchang City[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019.

[14] 孔少飞. 大气污染源排放颗粒物组成、有害组分风险评价及清单构建研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
Kong S F. Study on the chemical composition, risk assessment and emission inventory establishment for hazardous components in particulate matter from atmospheric pollution sources[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.

[15] Liu Y Y, Zhang W J, Bai Z P, *et al*. Characteristics of PM_{10} chemical source profiles for geological dust from the South-West region of China[J]. Atmosphere, 2016, **7**(11), doi: 10.3390/atmos7110146.

[16] 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 等. 西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3556-3562.
Fan X Y, Lu X W, Liu H M, *et al*. Pollution and source analysis of heavy metal in surface dust from Xi'an University campuses[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3556-3562.

[17] Zhu C Y, Maharajan K, Liu K C, *et al*. Role of atmospheric particulate matter exposure in COVID-19 and other health risks in Human: a review[J]. Environmental Research, 2021, **198**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111281.

[18] Bai K J, Ho S C, Tsai C Y, *et al*. Exposure to $PM_{2.5}$ is associated with malignant pleural effusion in lung cancer patients[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111618.

[19] 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 等. 扬州市 $PM_{2.5}$中重金属来源及潜在健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 540-547.
Dong S H, Xie Y, Huangfu Y Q, *et al*. Source apportionment and heath risk quantification of heavy metals in $PM_{2.5}$ in Yangzhou, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 540-547.

[20] Peng X, Shi G L, Liu G R, *et al*. Source apportionment and heavy metal health risk (HMHR) quantification from sources in a southern city in China, using an ME2-HMHR model[J]. Environmental Pollution, 2017, **221**: 335-342.

[21] 李雅. 基于土壤发生分类的云南省土壤重金属空间分异及污染评估[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
Li Y. Spatial distribution and pollution assessment of soil heavy metals in Yunnan Province based on soil genetic classification[D]. Kunming: Yunnan University, 2019.

[22] 成晓梦. 云南不同成土母质土壤剖面中重金属元素地球化学行为与风险分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
Cheng X M. Geochemical behavior and risk analysis for heavy elements in soil profiles with different parent material, Yunnan Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[23] 岳敏慧, 王朋, 禹明慧, 等. 云南地区土壤重金属污染危害及其防治措施建议[J]. 农业科学, 2019, **9**(4): 278-289.
Yue M H, Wang M, Yu M H, *et al*. The harm of soil heavy metal pollution in Yunnan Province and its prevention and control measures[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2019, **9**(4): 278-289.

[24] 李建波. 昭通市特色产业发展研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2010.

[25] HJ 777-2015, 空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法[S].
HJ 777-2015, Ambient air and waste gas from stationary sources emission-determination of metal elements in ambient particle matter-inductively coupled plasma optical emission spectrometry[S].

[26] 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 等. 有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3547-3555.
Feng Y Y, Shi J W, Zhong Y Q, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dust from non-ferrous smelting parks[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3547-3555.

[27] Wang H B, Qiao B Q, Zhang L M, *et al*. Characteristics and sources of trace elements in $PM_{2.5}$ in two megacities in Sichuan Basin of Southwest China[J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 1577-1586.

[28] Zhou S Z, Yuan Q, Li W J, *et al*. Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: spatial variations, sources, and health implications[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(1): 205-213.

[29] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[30] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al*. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study[J]. Chemosphere, 2004, **54**(2): 185-208.

[31] Ho K F, Lee S C, Chow J C, *et al*. Characterization of PM_{10} and $PM_{2.5}$ source profiles for fugitive dust in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(8): 1023-1032.

[32] Taiwo A M, Harrison R M, Shi Z B. A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter[J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 109-120.

[33] Shen F, Liao R M, Ali A, *et al*. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil near a Pb/Zn smelter in Feng County, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **139**: 254-262.

[34] 云南省统计局. 2020 年云南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[35] Sun J, Shen Z X, Zhang L M, *et al*. Chemical source profiles of urban fugitive dust $PM_{2.5}$ samples from 21 cities across China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 1045-1053.

[36] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁省典型城市道路尘 $PM_{2.5}$成分谱研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(2): 412-417.
Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, *et al*. Study on the road dust source profile of $PM_{2.5}$ in Liaoning Province typical cities[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(2): 412-417.

[37] Wang Y F, Huang K L, Li C T, *et al*. Emissions of fuel metals content from a diesel vehicle engine[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(33): 4637-4643.

[38] Fiala M, Hwang H M. Influence of highway pavement on metals

in road dust: a case study in Houston, Texas[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, **232**(5), doi: 10.1007/s11270-021-05139-7.

[39] Han N M M, Latif M T, Othman M, *et al*. Composition of selected heavy metals in road dust from Kuala Lumpur city centre [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(3): 849-859.

[40] 彭敏. 西南典型地质高背景区土壤-作物系统重金属迁移富集特征与控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
Peng M. Heavy metals in soil-crop system from typical high geological background areas, Southwest China: transfer characteristics and controlling factors [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

[41] 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(19): 202-208.
Wang F, Zhao L X, Shen Y J, *et al*. Analysis of heavy metal contents and source tracing in organic fertilizer from livestock manure in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(19): 202-208.

[42] Wang Y T, Guo G H, Zhang D G, *et al*. An integrated method for source apportionment of heavy metal(loid)s in agricultural soils and model uncertainty analysis [J]. Environmental Pollution, 2021, **276**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116666.

[43] Zhang K, Chai F H, Zheng Z L, *et al*. Size distribution and source of heavy metals in particulate matter on the lead and zinc smelting affected area[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **71**: 188-196.

[44] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al*. Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. Science of the Total Environment, 2015, **505**: 712-723.

[45] 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 等. 基于PMF模型的$PM_{2.5}$中金属元素污染及来源的区域特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5276-5287.
Deng L L, Zhang K S, Yin Z Y, *et al*. Characterization of metal pollution of regional atmospheric $PM_{2.5}$ and its sources based on the PMF model[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5276-5287.

[46] Lin Y C, Li Y C, Amesho K T T, *et al*. Chemical characterization of $PM_{2.5}$ emissions and atmospheric metallic element concentrations in $PM_{2.5}$ emitted from mobile source gasoline-fueled vehicles[J]. Science of the Total Environment, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139942.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 1

Jan. 15, 2022

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China ····· PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, *et al.* (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review ····· CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, *et al.* (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge ····· ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, *et al.* (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China ····· RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, *et al.* (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China ····· ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, *et al.* (46)
Real-time Source Apportionment of $PM_{2.5}$ and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan ····· JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of $PM_{2.5}$ in Yuncheng City ····· WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, *et al.* (74)
Three-dimensional Structure Variation of $PM_{2.5}$ During Cold Front Advance in Eastern China ····· MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, *et al.* (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China ····· LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, *et al.* (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa ····· YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, *et al.* (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period ····· LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, *et al.* (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb ····· JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O_3 and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China ····· YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, *et al.* (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes ····· XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, *et al.* (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels ····· WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, *et al.* (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo ····· WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, *et al.* (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City ····· PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, *et al.* (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust ····· FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, *et al.* (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources ····· SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, *et al.* (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China ····· WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, *et al.* (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin ····· LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, *et al.* (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake ····· CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, *et al.* (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals ····· LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, *et al.* (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing ····· HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, *et al.* (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water ····· LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, *et al.* (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course ····· LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, *et al.* (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City ····· YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, *et al.* (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules ····· XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, *et al.* (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries ····· TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, *et al.* (295)
Characteristic Analysis of *nirS* Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification ····· LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir ····· ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, *et al.* (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China ····· WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta ····· LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, *et al.* (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area ····· ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, *et al.* (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers ····· HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, *et al.* (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration ····· LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, *et al.* (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO_2 Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area ····· QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, *et al.* (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red ····· LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, *et al.* (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter ····· WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, *et al.* (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment ····· DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, *et al.* (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community ····· WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, *et al.* (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics ····· LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, *et al.* (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model ····· XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, *et al.* (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China ····· CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, *et al.* (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products ····· WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, *et al.* (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique ····· SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, *et al.* (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice ····· LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, *et al.* (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse ····· DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, *et al.* (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable ····· ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-liang, *et al.* (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula ····· LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, *et al.* (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil ····· GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, *et al.* (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau ····· WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, *et al.* (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of *Torreya grandis* cv. Merrillii Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion ····· JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, *et al.* (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community ····· YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, *et al.* (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China ····· XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, *et al.* (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation ····· MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, *et al.* (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain ····· WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, *et al.* (569)