

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征

林挺, 赵述华, 郗秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞*

(深圳市环境科学研究院, 国家环境保护饮用水水源地管理技术重点实验室, 深圳 518001)

摘要: 城市土壤环境背景值特征研究可为制定区域土壤背景值标准提供科学依据. 为摸清深圳市不同土类重金属(Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Co、V、Cd和Hg)的环境背景值特征, 探究重金属环境背景值与土壤理化性质的关系, 在全市布设500个土壤背景点位, 采用多点增量法采集500个土壤表层(0~20 cm)样品, 赤红壤405个, 红壤77个, 黄壤18个. 结果表明: ①红壤重金属的背景值整体偏低, 赤红壤Cr、Ni、Co和V以及黄壤Cu、Zn、Hg、Pb和Cd的背景值高于其他土类; 3种土类中Cr、Cu、Zn、Ni、Co和V的背景值比全国“七五”背景值低, Cd和Hg背景值与全国“七五”背景值较为接近, Pb背景值高于全国“七五”背景值; ②9种重金属背景值的空间分布规律差异较大, Pb、Zn和Co呈明显的地带性分布格局, Cr、Cu、Ni、V、Cd和Hg表现为点状分布格局; ③将不同土类重金属背景值与理化性质参数进行相关性分析, 发现赤红壤重金属背景值与理化性质的相关性最为显著; ④通过逐步回归分析, 将赤红壤中重金属背景值与理化性质参数的关系进行量化表达, 探明影响赤红壤重金属背景值的理化性质参数依次为机械组成、pH、有机质和阳离子交换量.

关键词: 赤红壤; 红壤; 黄壤; 土壤背景值; 多点增量采样; 逐步回归分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3518-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202011082

Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen

LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, YANG Kun, WU Jing-ya, ZHU Yan, LUO Fei*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Management and Technology, Shenzhen Academy of Environmental Science, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Research on the characteristics of environmental background values of soil can provide a scientific basis for setting regional standards for soils. To determine the characteristics of environmental background values and main influencing factors of heavy metals (Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, Co, V, Cd, and Hg) in soils in Shenzhen, 500 topsoil samples (0-20 cm) were collected by decision unit multi increment sampling (DUMS) from 500 soil background sites in the whole city, including 405 latosolic red soil, 77 red soil, and 18 yellow soil samples. The results show that the concentrations of heavy metals in red soil are relatively low in general, and those of Cr, Ni, Co, and V in latosolic red soil and Cu, Zn, Hg, Pb, and Cd in yellow soil are higher. Compared with the environmental background values of soil in the Seventh Five-year Plan of China in 1980s, the concentrations of Cr, Cu, Zn, Ni, Co, and V in latosolic red soil, red soil, and yellow soil are lower, the concentrations of Cd and Hg are similar, and the concentration of Pb is higher. The spatial distribution patterns of the nine heavy metals are significantly different. Pb, Zn, and Co present an obvious zonal distribution pattern, while Cr, Cu, Ni, V, Cd, and Hg present a point-like distribution pattern. Moreover, the correlation analysis between heavy metal content and physicochemical properties of different soils showed that the correlation between heavy metal content and physicochemical properties of latosolic red soil was the most significant. Stepwise regression analysis was used to elucidate the relationship between heavy metal content in latosolic red soil, and physicochemical properties were quantified. The physicochemical properties affecting heavy metal content in latosolic red soil were found to be mechanical composition, pH, organic matter, and cation exchange capacity.

Key words: latosolic red soil; red soil; yellow soil; environmental background values of soil; decision unit multi increment sampling; stepwise regression analysis

土壤环境背景值是指在一定时间条件下, 未受或少受人类活动影响下土壤本身化学元素的背景值^[1]. 土壤重金属来源于岩石, 其环境背景值与成土母质、土类和气候条件有关^[2]. 随着人类活动的加剧, 城市土地利用方式的改变, 土壤类型和性质发生了变化, 导致土壤重金属背景值发生变化^[3,4]. 探究城市土壤重金属背景值特征成为国内外研究的热点^[5-7]. 目前, 国内外关于城市土壤重金属背景值特征的研究主要集中在自然保护区^[8,9]、工业场地^[10,11]、城市公园绿地^[12-15]和地表灰尘^[16-18]等,

而对于城市土壤重金属的环境背景值研究较少.

城市土壤重金属环境背景值研究可为制定区域土壤背景值标准、辅助修正污染地块土壤的风险筛选值和修复目标提供依据. 我国建设用地土壤重金属(As、Co和V)风险管控标准^[19,20]借鉴了我国在20世纪80年代“七五”期间全国土壤背景调查的结

收稿日期: 2020-11-09; 修订日期: 2020-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506605)

作者简介: 林挺(1990~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土壤环境调查与风险评估, E-mail: linting2016@163.com

* 通信作者, E-mail: luofei2006@qq.com

果. 美国国家环保署颁布的技术指导文件建议利用污染物背景值的算术平均值来判断地块土壤污染物是否存在污染^[21]. 国内在制定污染地块土壤重金属修复目标值时, 利用地块所在区域污染物的背景值修正修复目标值^[22].

我国经历了近 40 年的快速经济发展, 城市原有的空间格局和土地利用方式已发生剧烈变化, 导致重金属环境背景值也发生改变, 重新了解城市不同土类重金属的环境背景值特征具有重要意义. 本研究以高强度开发城市——深圳为例, 开展精细化土壤背景调查, 分析土壤地方标准中普遍关注的重金属(Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Co、V、Cd 和 Hg)在不同土类中的环境背景值和空间分布特征, 探究重金属环境背景值与土壤理化性质的关系, 以期制定高强度开发城市土壤背景值标准提供科学依据.

1 研究区概况

深圳市是中国南部海滨城市, 属于亚热带地区. 全市总面积 1 997.47 km², 常住人口为 1 302.66 万人; 全市建设用地面积为 968.5 km², 约占全市总面积的 48.5%; 基本生态控制线的面积约 974.7 km², 约占全市总面积的 48.8%; 土地利用类型包括建设用地、林地、城市绿地、农业用地、近岸海域、湿地、填海用地、湖库坑塘、裸土地和采石场等^[23].

深圳市的土壤类型主要有赤红壤、红壤、黄壤、水稻土、滨海砂土和滨海盐渍土等, 包括 10 个土类、15 个亚类、36 个土属和 74 个土种, 赤红壤、红壤和黄壤覆盖的区域占全市总面积 68.2%^[24]. 赤红壤主要分布在 300 m 以下丘陵、岗地和山坡, 是全市面积最大、

分布范围最广的自然土壤; 红壤主要分布在梧桐山、七娘山、羊台山、田心上和笔架山等海拔 300 ~ 600 m 之间的山坡; 黄壤主要分布在大鹏、七娘山、排牙山、笔架山以及沙头角等海拔 600 m 以上的山顶.

目前, 大部分水稻土、滨海砂土和滨海盐渍土等已转变为建设用地, 受人为活动影响较大, 不具备土壤环境背景采样条件, 本研究以分布最广的赤红壤、红壤和黄壤作为调查对象.

2 材料与方法

2.1 样品采集

以深圳市基本生态控制线范围内作为布点区域, 土壤背景点位布设采用环境单元法与网格法, 同时考虑以下 4 个方面^[2, 25]: ①点位选择在土壤类型特征明显、地形相对平坦、植被良好和无明显水土流失、非坡脚和洼地的区域; ②点位应离铁路、公路至少 300 m 以上; ③点位选择不施化肥和农药的区域; ④点位不设置在多种土类交错分布的地区.

2018 年 7 ~ 10 月在调查区域开展野外采样工作, 共布设 500 个土壤背景点位(图 1). 其中赤红壤 405 个, 红壤 77 个, 黄壤 18 个. 采用多点增量法进行采样^[26], 每个点位采集 50 个表层(0 ~ 20 cm)土样组成 1 个混合样, 按照 1:1 的比例采集土壤理化性质样品, 分析指标包括 pH、容重、阳离子交换量、有机质背景值和机械组成. 按照总样品数 4% 的比例设置现场密码平行样, 现场密码平行样的结果不纳入后续统计分析.

2.2 样品分析方法

土壤样品在自然条件下风干, 去除植物残体与

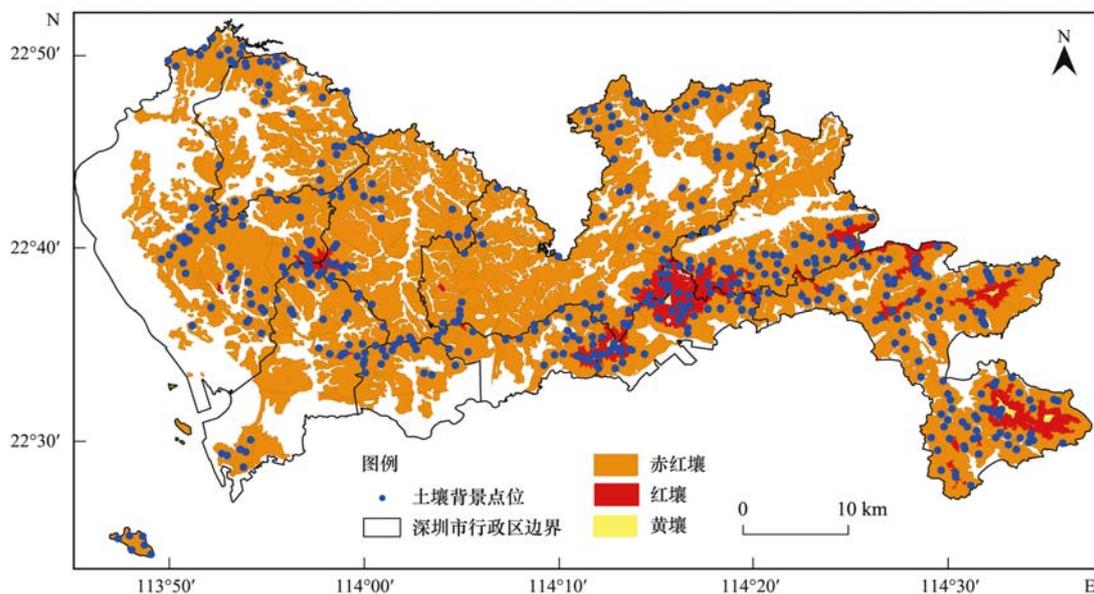


图 1 土壤环境背景调查采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in soil environmental background survey

碎石,研磨过 10 目筛后充分混合,再研磨过 100 目筛后置于密封袋中备用.土壤重金属和理化性质样品的分析方法参考文献[27].Cr、Cu、Zn、Ni、Co 和 V 参照《固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 781-2016)的方法,实验室检出限分别为 0.5、0.4、1.2、0.4、0.5 和 1.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Pb 和 Cd 参照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141-1997)的方法,实验室检出限为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Hg 参照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105.1-2008)第 1 部分:土壤中总汞的测定的方法,实验室检出限为 0.001 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.土壤 pH 和有机质背景值参照《土壤检测》(NY/T 1121.2-2006)第 2 部分:土壤 pH 的测定的方法,阳离子交换量参照《森林土壤阳离子交换量的测定》(LY/T 1243-1999)的方法,机械组成参照《森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定》(LY/T 1225-1999)的方法.

Cd 和 Co 的检出率分别为 90.8% 和 90.0%,其余重金属的检出率均为 100%.采用现场密码平行样和统一监控样(由深圳市土壤环境质量详查质控实验室制备)进行实验室外部质量控制,采用室内密码平行样和国家一级标准物质(GSS-13、GSS-14 和 GSS-28)进行实验室内部质量控制.现场密码平行样和室内密码平行样的合格率为 99%,统一监控样和标准物质准确度合格率为 100%,结果符合文献[27]的要求.

2.3 土壤背景值确定方法

对于低于分析方法检出限的测定结果以“ND”报出,统计分析时按 1/2 检出限计算.每种土类重金属数据先进行分布类型检验,再剔除异常值,表征每种土类重金属的环境背景值.

2.3.1 检验数据分布类型

采用偏度-峰度法和 Shapiro-Wilk 检法,对不同土类的重金属数据进行分布状态检验.

2.3.2 剔除异常值

在计算 95% 分位值时,不剔除任何异常值,在计算算术平均值(arithmetic mean, AM)和几何平均值(geometric Mean, GM)时,剔除异常值^[2].样本量大于 100 的,重金属数据呈正态分布的,剔除平均值 ± 3 倍标准偏差以外的异常值;呈对数正态分布的,剔除 $\text{GM}/D^3 \sim \text{GM}\cdot D^3$ (其中,GM 为几何平均值, D 为几何标准差);对于样本量小于和等于 100 的,用 Grubb's 检验法和 T (thompson)法剔除异常值^[28].在剔除异常值时,需要根据点位位置、周边环境、分析测试过程等对异常值进行逐一核实,对于周

边没有明显污染源、采样时也没有发现有明显污染痕迹的异常值予以保留.

2.3.3 背景值的表征方法

土壤环境背景值是一个表征元素背景值集中分布趋势的特征值,而不是一个具体的数值^[28].土壤环境背景值的统计方法包括 AM、GM、95% 分位值和 95% 置信上限(upper confidence level, UCL)^[29].AM 和 GM 多用于表征地球元素的丰度,AM 易受到极端值的影响,GM 能够更好地体现元素背景值分布的集中趋势^[2];95% 分位值表示有 95% 的数据低于这个值,用来表示近似最大值;95% UCL 表示真实平均值等于或低于该值的概率为 95%.不同统计方法可以更好地表征土壤重金属背景值的分布趋势^[30,31].本研究采用 AM、GM、95% 分位值和 95% UCL 表征不同土类重金属的环境背景值.

利用 Excel 2016 软件计算 AM、GM 和 95% 分位值.根据数据的分布形态选择合适的方法计算 95% UCL^[32],数据呈正态分布时选用 Student's t -test 方法,数据呈对数正态分布时选择 Land's H 方法,数据呈偏态分布时选用切比雪夫不等式法,相关计算过程在 Pro UCL 5.0 软件进行.

2.4 相关性分析

利用 SPSS 19 软件对不同土类重金属背景值与理化性质参数进行相关性统计分析,计算 Pearson 相关系数并进行检验.

2.5 逐步回归分析

根据相关性分析结果,利用 SPSS 19 软件将不同理化性质参数引入模型进行逐步回归分析($P = 0.05$),以确认重金属背景值的主要影响因素.逐步回归分析在普通的回归法基础上增加了对自变量的筛选,先对每个自变量和因变量建立一元简单线性回归模型,将其中 P 值最小且有统计学意义的简单线性回归模型对应的自变量引入模型,检验自变量是否仍有统计学意义,有则保留在模型中,没有则剔除出模型,如此反复进行,直至既无显著的自变量不被引入,又无不显著的自变量被引入时,回归方程才建立完^[33].

3 结果与讨论

3.1 不同土类重金属的背景值

赤红壤样本中剔除了 5 个异常值,红壤和黄壤样本中未剔除异常值.剔除异常值后不同土类重金属背景值的箱线图见图 2,数据统计结果见表 1.不同土类重金属的背景值存在显著差异,红壤重金属的背景值整体偏低,赤红壤的 Cr、Ni、Co 和 V 以及黄壤的 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Hg 背景值明显高于其他

土类. 采用 AM、GM、95% 分位值和 95% UCL 分别表征不同土类重金属背景值, GM 的计算结果较小, 95% 值的计算结果较大, 不同统计方法计算的重金属背景值大小顺序为 $GM < AM < 95\% UCL < 95\%$ 分位值, GM 和 95% 分位值的计算结果差异在 1~6 倍之间. 在确定背景值标准时 GM 的结果较为保守, 95% 分位值的结果则较为宽松, AM 和 95% UCL 则介于两者之间, 采用哪种统计方法作为土壤背景值标准需要根据当地土壤环境管理情况进一步确定.

为了解深圳市的高背景值重金属, 将本研究结

果与“七五”期间全国赤红壤、红壤和黄壤中重金属的背景值进行比较, 3 种土类中 Cr、Cu、Zn、Ni、Co 和 V 的背景值较低, Cd 和 Hg 的背景值与全国“七五”背景值接近. Pb 的背景值明显高于全国“七五”背景值, 其 AM、GM 和 95% 分位值比全国“七五”背景值高 1.4~3.0 倍. 土壤 Pb 具有不断累积的趋势, 这与其他学者的研究结果一致^[2,15], 原因可能是城市汽车使用量增加导致含 Pb 汽油排放的气体和颗粒物通过自然沉降和降水的方式进入土壤, 造成城市表层土壤 Pb 不断累积^[15,34].

表 1 不同土类重金属背景值的统计结果¹⁾

Table 1 Statistical results of background values of heavy metals in different soils

土类	项目	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	Co	V	Cd	Hg
赤红壤 (n=400)	分布类型	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态	偏态	对数正态	偏态	对数正态	对数正态
	MIN	3.1	1.9	6.4	1.2	4.6	0.55	1.9	0.005	0.007
	MAX	190	78.3	186	73.4	358	32	340	0.31	0.217
	AM	31.1	14.3	49.3	9.69	51.6	5.5	52.9	0.053	0.083
	GM	20.4	10.4	41.2	6.93	40.8	3.53	40.9	0.041	0.076
	95% 分位值	92.2	43.9	112	32.9	130	17.6	125	0.12	0.151
	95% UCL	37.43	17.15	52.45	11.83	65.04	6.80	55.8	0.063	0.090
	SD	29.4	13.2	30.1	9.9	40	6.01	40.1	0.039	0.033
	CV	94.53	92.31	61.05	102.17	77.52	109.27	75.80	73.58	39.76
	“七五”AM ^[28]	41.5	17.1	49.0	13.1	35.0	6.6	73.1	0.048	0.056
	“七五”GM ^[28]	31	11.5	39.2	9.6	28.4	4.6	54.2	0.033	0.046
“七五”95% 分位值 ^[28]	103.6	41.1	126.8	40.4	92.2	19.5	186.5	0.148	0.137	
红壤 (n=77)	分布类型	对数正态	对数正态	正态	对数正态	正态	对数正态	正态	对数正态	对数正态
	MIN	1.7	1.6	7.2	0.8	11.8	0.55	7.8	0.005	0.049
	MAX	104	127	149	64.1	354	26.8	127	0.120	0.150
	AM	20.1	15	48.8	8.15	55.1	4.15	41.3	0.05	0.091
	GM	13.8	10.2	44.2	5.84	45.3	3	33.3	0.041	0.088
	95% 分位值	70.2	42.4	84.1	19.4	124	10.6	93.5	0.11	0.131
	95% UCL	30.65	17.97	52.57	12.95	80.06	4.921	46.84	0.063	0.095
	SD	21.05	17.03	22.36	9.59	49.9	4.15	27	0.027	0.023
	CV	104.98	113.33	45.90	117.67	90.56	100.00	65.38	54.00	25.27
	“七五”AM ^[28]	62.6	24.4	80.1	25.7	29.1	12.3	103.2	0.065	0.078
	“七五”GM ^[28]	49.7	18.4	71.7	19.3	26.8	9.5	88.1	0.047	0.045
“七五”95% 分位值 ^[28]	150.5	56.8	170.6	64.0	71	29	201.8	0.201	0.065	
黄壤 (n=18)	分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态
	MIN	2.7	1.6	16.1	1.4	9.6	0.5	7.9	0.01	0.037
	MAX	41.1	54.9	116	6.5	446	12.5	81.6	0.120	0.156
	AM	14.7	15	58.7	4.8	70.52	2.4	45.5	0.054	0.095
	GM	12.6	9.23	54.2	4.46	44.7	1.75	35.7	0.046	0.089
	95% 分位值	23.42	54.3	96.5	6.41	180	4.76	79.3	0.086	0.153
	95% UCL	18.04	24.13	68.17	5.42	111	3.53	57.03	0.064	0.108
	SD	7.99	16.32	22.35	1.49	96.64	2.61	27.35	0.027	0.032
	CV	54.35	108.67	38.16	31.04	137.02	108.75	60.22	50.00	33.68
	“七五”AM ^[28]	55.5	21.4	79.2	25.3	29.4	12.7	91.1	0.080	0.102
	“七五”GM ^[28]	49.6	17.5	71.5	21.5	26.9	10	80.9	0.642	0.089
“七五”95% 分位值 ^[28]	102.2	45.1	156.1	51.2	61.2	26.3	212.1	0.181	0.208	

1) MIN 表示最小值 (minimum), MAX 表示最大值 (maximum), SD 表示标准差 (standard deviation), CV 表示变异系数 (coefficient variation); “七五”表示全国土壤背景调查中 3 种土类 (赤红壤、红壤和黄壤) A 层重金属的统计结果; MIN、MAX、AM、GM、95% 分位值、95% UCL 和 SD 的单位均为 $mg \cdot kg^{-1}$, CV 的单位为 %

3.2 不同土类重金属的空间分布特征

利用 ArcGIS 10.3 软件, 在确定最佳半方差函

数模型的基础上, 选取 Kriging 最优空间插值法, 对 9 种重金属背景值进行估算, 最后形成了重金属背

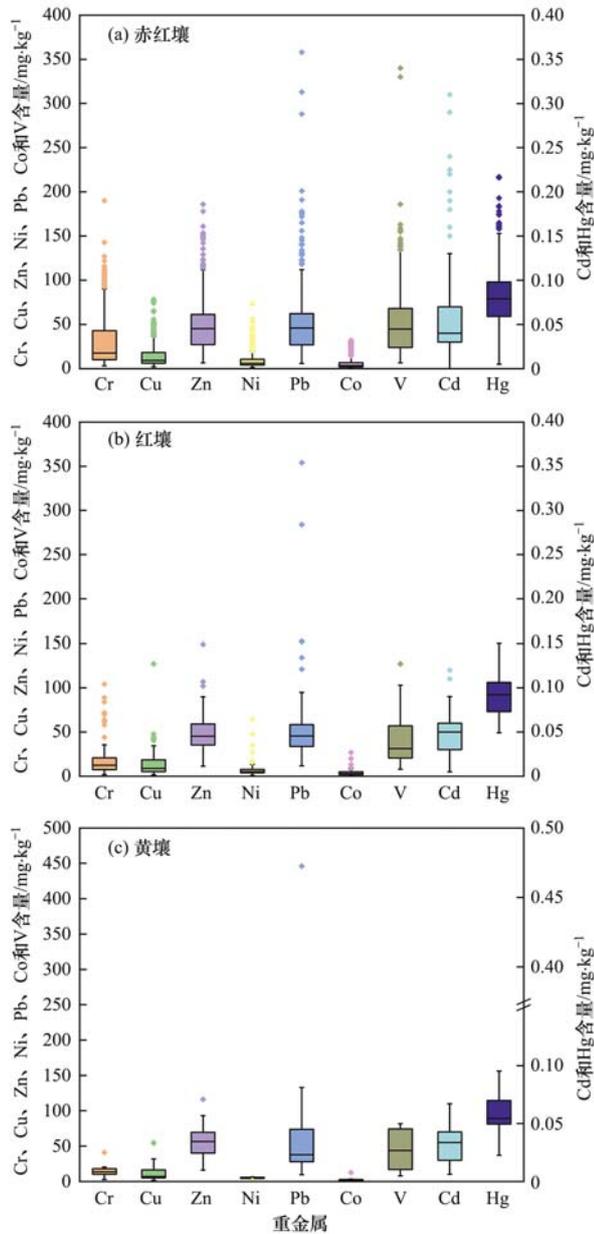


图2 不同土类重金属背景值数据箱线图

Fig. 2 Box-plot diagrams of heavy metal concentrations in different soil types

景值的空间分布(图3)。

从图3可以看出,9种重金属背景值的空间分布规律差异较大。Pb、Zn和Co背景值的空间分布呈现明显的地带性分布格局,Pb表现为东部向西部逐渐较少的趋势,高值区(背景值大于95%的分位值)土类为黄壤,主要分布在梧桐山东部;Zn和Co则相反,Zn高值区土类为赤红壤,分布在梅林公园、羊台山等区域;Co高值区土类为赤红壤,分布在中西部的西丽水库、梅林公园等区域。Cr、Cu、Ni、V、Cd和Hg表现为点状分布格局,各区域均有高值区。Cr、Cu和Ni高值区土类为赤红壤,分布在罗田森林公园和排牙山;V高值区土类为赤红壤,分布于罗田森林公园、排牙山西部等区域,Cd和Hg高值区土类为红壤和黄壤,Cd分布于清林径水库和龙华西北部,Hg分布在银湖山。9种重金属背景值的空间分布差异可能与母质母岩石有关,深圳西部主要母质母岩为花岗岩,中东部主要母质母岩为砂砾页岩,不同母质母岩含有的矿物种类不同,会导致不同成土条件下向土壤释放的重金属背景值也有所不同。代杰瑞等^[35]的研究发现,土壤Co、Ni、Mn、Cu和Cr等元素的富集是由砂岩、粉砂岩和泥岩等风化成土所致。赵述华等^[36]研究深圳市不同成土母质条件下土壤砷的环境背景值发现,深圳砂砾页岩和凝灰熔岩母质发育的土壤中砷的背景值较高,花岗岩和片麻岩发育的土壤中砷的背景值较低。

3.3 不同土类重金属背景值与理化性质的关系

剔除异常值后不同土类pH、容重、阳离子交换量、有机质和机械组成(黏粒、粉粒、砂粒)的统计结果见表2。土壤理化性质的变化规律与其所处的海拔、发育程度、植被覆盖程度有关。与赤红壤和红壤相比,黄壤处于较高的山地,温度较低、湿度较大,植被覆盖度较大,水化作用强烈,脱硅富铝化作用较弱,导致其阳离子交换量和有机质背景值偏高,pH、

表2 不同土类的理化性质统计结果

Table 2 Statistical results of physicochemical properties in different soils

土类	项目	pH	容重 /g·cm ⁻³	阳离子交换量 /mol·kg ⁻¹	有机质/%	机械组成/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
赤红壤 (n=400)	MIN	4.03	0.67	3.15	0.42	3.80	6.70	14.10
	MAX	8.20	2.10	19.00	26.40	41.90	67.60	87.50
	AM	4.74	1.21	10.01	3.90	18.15	26.13	55.72
	SD	0.47	0.16	3.07	3.42	6.90	11.11	13.69
红壤 (n=77)	MIN	4.35	0.81	4.59	0.45	4.30	17.00	30.40
	MAX	6.63	1.57	23.05	9.82	33.90	59.60	77.70
	AM	4.75	1.14	11.51	4.23	15.09	31.79	53.12
	SD	0.35	0.19	3.81	1.92	5.45	10.47	11.42
黄壤 (n=18)	MIN	4.15	0.60	6.24	0.81	3.80	25.30	32.10
	MAX	4.82	1.59	24.40	8.31	25.30	57.90	66.90
	AM	4.51	1.09	16.53	6.07	12.66	45.38	41.96
	SD	0.18	0.28	4.65	1.81	4.81	8.72	8.03

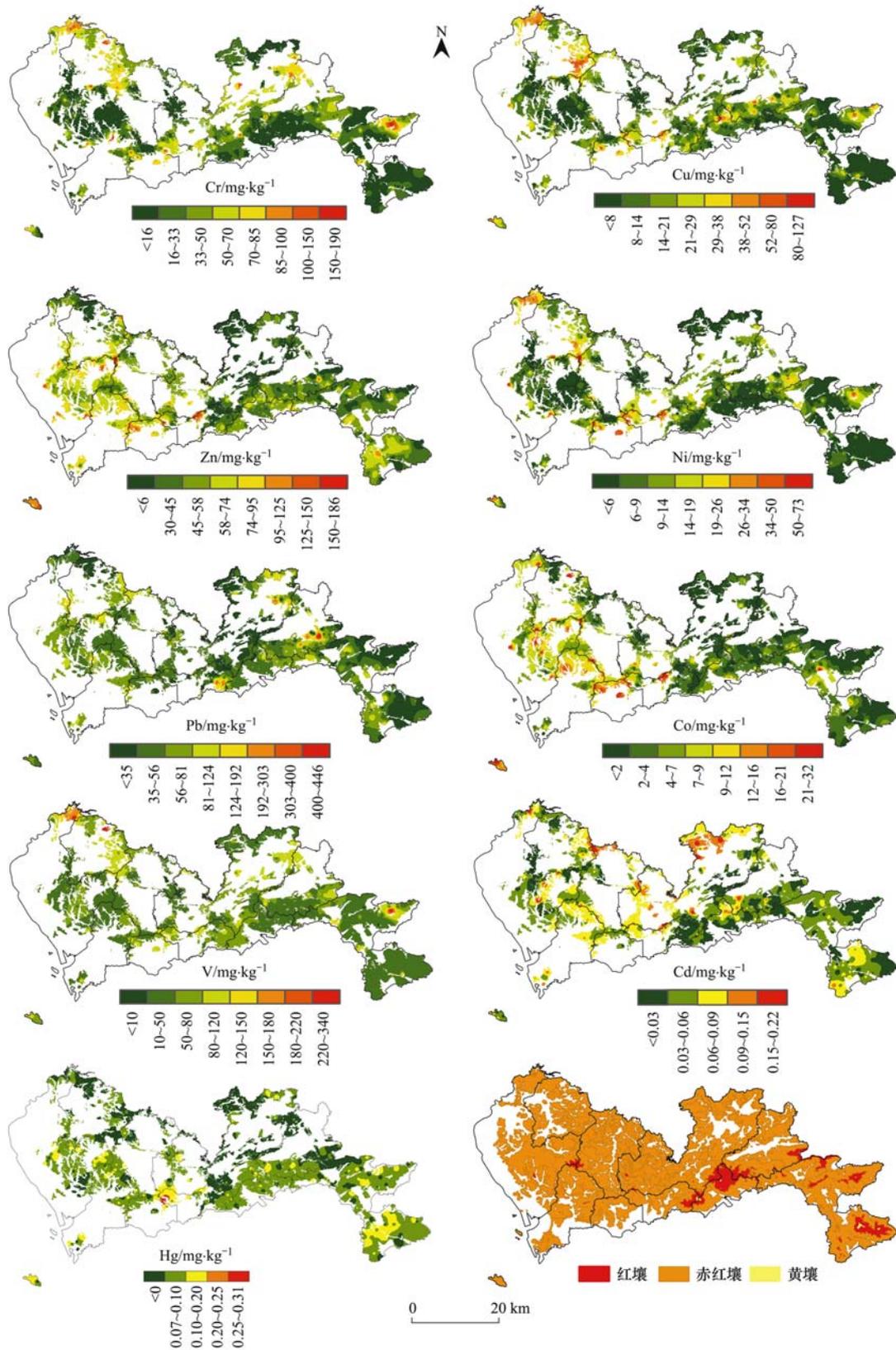


图 3 不同土类重金属空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of heavy metals in different soils

容重和黏粒背景值偏低。

从相关性分析结果可以看出(表 3),赤红壤大部分重金属与理化性质的相关性较为显著,而红壤和黄壤大部分重金属与理化性质的相关性不显著。

在赤红壤中,Zn、Co、V、Cd 和 Hg 与 pH 呈显著相关($P < 0.01$),Cr 和 V 与阳离子交换量呈显著正相关($P < 0.01$),Zn、Pb 和 Co 与粉粒背景值呈显著负相关($P < 0.01$),与砂粒背景值呈显著正相关($P <$

0.01). 在红壤中, V 与 pH、阳离子交换量、砂粒背景值呈显著负相关($P < 0.05$). 在黄壤中, Hg 与阳离子交换量呈显著正相关($P < 0.01$).

在表 3 中, 赤红壤中 V 与阳离子交换量呈显著正相关, 而红壤中 V 与阳离子交换量呈显著负相关, 这可能与不同土类中 V 的赋存形态不同有关. 土壤阳离子

交换量是指土壤胶体所能吸附各种阳离子的总量, 土壤阳离子交换量增加, 土壤对重金属阳离子的吸附固持作用增强, 对阴离子的专性吸附作用减弱. 陈江军等^[37]通过研究重金属的赋存形态及其影响因素发现, Cd、Pb 和 Hg 的可交换态与阳离子交换量呈现负相关, 而 As 的可交换态与之呈现正相关.

表 3 不同土类理化性质参数与重金属背景值的相关性¹⁾

Table 3 Correlation between the physicochemical properties and heavy metal concentrations in different soils

土类	项目	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	Co	V	Cd	Hg
赤红壤 (n=400)	pH	-0.196 **	-0.123 *	0.247 **	-0.109 *	0.092	0.184 **	-0.019 **	0.162 **	0.160 **
	容重	-0.031	-0.037	0.058	-0.002	0.038	0.107 *	-0.042	0.023	-0.016
	阳离子交换量	0.160 **	0.108 *	-0.084	0.106 *	-0.146 **	-0.056	0.243 **	0.012	0.027
	有机质	-0.025	-0.081	-0.021	-0.027	-0.011	-0.058	0.036	-0.014	0.097
	黏粒	0.110 *	0.140 **	0.054	0.137 **	0.029	-0.003	0.251 **	0.002	0.015
	粉粒	0.244 **	0.005	-0.280 **	0.140 **	-0.248 **	-0.167 **	0.246 **	-0.101 *	-0.235 **
	砂粒	-0.254 **	-0.075	0.201 **	-0.183 **	0.187 **	0.138 **	-0.327 **	0.081	0.184 **
红壤 (n=77)	pH	-0.197	0.093	0.060	-0.129	0.048	-0.056	-0.444 *	0.157	-0.027
	容重	-0.058	-0.047	0.018	0.025	0.142	0.206	0.025	-0.193	-0.205
	阳离子交换量	0.205	0.130	0.187	0.137	0.068	0.129	-0.365 *	0.073	0.279 *
	有机质	-0.136	-0.172	-0.071	-0.221	0.014	-0.113	-0.009	0.076	0.169
	黏粒	0.190	0.006	0.178	0.171	-0.015	0.115	0.213	0.004	0.108
	粉粒	0.170	-0.050	-0.124	0.061	0.182	-0.048	0.158	-0.174	-0.158
	砂粒	-0.104	-0.042	-0.067	-0.186	-0.160	-0.128	-0.448 *	0.157	0.012
黄壤 (n=18)	pH	-0.007	-0.086	-0.077	-0.147	-0.102	-0.077	-0.423	0.444	0.113
	容重	-0.051	-0.219	-0.238	-0.234	0.333	-0.317	0.326	-0.137	-0.267
	阳离子交换量	-0.011	-0.348	0.434	0.145	-0.049	0.361	-0.053	0.402	0.629 **
	有机质	-0.322	-0.403	0.645 **	0.368	0.306	0.373	0.127	0.354	0.253
	黏粒	0.103	0.309	-0.146	0.115	-0.270	0.252	0.071	0.035	0.285
	粉粒	-0.280	-0.133	0.154	0.128	0.117	-0.119	0.140	0.005	0.126
	砂粒	-0.074	-0.041	-0.079	-0.447	0.035	-0.022	-0.194	-0.026	-0.308

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, 未标记表示未通过显著性检验

3.4 赤红壤重金属背景值与理化性质参数的回归分析

由于赤红壤重金属与理化性质的相关性较为显著, 选择赤红壤中重金属环境背景值与理化性质进行逐步多元线性回归分析, 以偏相关系数的大小序列, 确定重金属背景值的主要影响因素(表 4). 由表 4 可以看出, 影响 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、V 和 Hg 背景值的

第一因素为粉粒、砂粒和黏粒, 可归结为机械组成, Co 和 Cd 的第一影响因素为 pH. 纵观主要因素的排序, 机械组成(粉粒、砂粒和黏粒)占据 7 个第一, 1 个第二, 为第一影响因素; pH 占据 2 个第一和 4 个第二, 为第二影响因素; 第三和第四影响因素依次为有机质和阳离子交换量. 粒径是影响土壤重金属分配的重要因素, 不同粒径大小, 其结构、表面活性吸附电位、

表 4 赤红壤的理化性质参数对重金属背景值的贡献¹⁾

Table 4 Contribution of physicochemical properties to heavy metal concentrations in latosolic red soil

元素	回归方程	复相关系数	第一影响因素		第二影响因素		第三影响因素		第四影响因素	
			名称	偏相关系数	名称	偏相关系数	名称	偏相关系数	名称	偏相关系数
Cr	$Y = 99.78 - 0.47X_7 - 8.94X_1$	0.289	砂粒	-0.217	pH	-0.144	— ²⁾	—	—	—
Cu	$Y = 23.78 + 0.23X_5 - 2.91X_1$	0.174	黏粒	0.124	pH	0.104	—	—	—	—
Zn	$Y = 41.68 - 1.15X_6 + 13.56X_1 - 0.478X_7$	0.38	粉粒	-0.223	pH	0.215	砂粒	-0.115	—	—
Ni	$Y = 16.53 - 0.125X_7$	0.18	砂粒	-0.18	—	—	—	—	—	—
Pb	$Y = 74.90 - 0.89X_6$	0.248	粉粒	-0.025	—	—	—	—	—	—
Co	$Y = -2.043 + 1.995X_1 - 0.073X_6$	0.227	pH	-0.155	粉粒	-0.135	—	—	—	—
V	$Y = 150.13 - 0.87X_7 - 10.24X_1$	0.34	砂粒	-0.29	pH	-0.12	—	—	—	—
Cd	$Y = -0.10 + 0.13X_1$	0.162	pH	0.162	—	—	—	—	—	—
Hg	$Y = -0.036 - 0.01X_6 + 0.001X_4 + 0.1X_1 + 0.002X_3$	0.324	粉粒	-0.264	有机质	0.116	pH	0.143	阳离子交换量	0.134

1) X_1 表示 pH; X_2 表示容重; X_3 表示阳离子交换量; X_4 表示有机质; X_5 表示黏粒; X_6 表示粉粒; X_7 表示砂粒; 2) “—”表示该数据空缺

有机质背景值、比表面积等均会有所不同. 本研究中重金属背景值随砂粒和粉粒背景值的增加而减小, 随黏粒背景值的增加而增大, 重金属更容易在黏粒中富集, 这与文献[38]的研究结果较为一致.

4 结论

(1) 红壤重金属的背景值整体偏低, 赤红壤 Cr、Ni、Co 和 V 以及黄壤 Cu、Zn、Hg、Pb 和 Cd 的背景值高于其他土类. 与“七五”期间全国赤红壤、红壤和黄壤中重金属的背景值进行比较, 3 种土类 Cr、Cu、Zn、Ni、Co 和 V 的背景值低于全国“七五”背景值, Cd 和 Hg 与全国“七五”背景值接近, Pb 高于全国“七五”背景值.

(2) 9 种重金属背景值的空间分布规律差异较大, Pb、Zn 和 Co 背景值的空间分布呈明显的地带性分布格局, Cr、Cu、Ni、V、Cd 和 Hg 表现为点状分布格局.

(3) 与赤红壤和红壤相比, 黄壤的阳离子交换量和有机质背景值偏高, pH 值和黏粒背景值偏低. 赤红壤大部分重金属背景值与理化性质的相关性显著. 红壤和黄壤中除 V 和 Hg 外, 其他重金属与理化性质的相关性不显著.

(4) 选择赤红壤中重金属环境背景值与理化性质进行逐步多元线性回归分析, 探明影响赤红壤重金属背景值的理化性质参数依次为机械组成、pH、有机质和阳离子交换量.

参考文献:

- [1] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [2] da Silva E B, Gao P, Xu M, *et al.* Background concentrations of trace metals As, Ba, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Se, and Zn in 214 Florida urban soils: different cities and land uses [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114737.
- [3] Chirenje T, Ma L Q, Chen M, *et al.* Comparison between background concentrations of arsenic in urban and non-urban areas of Florida [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, **8**(1): 137-146.
- [4] Chirenje T, Ma L Q, Hornsby A G, *et al.* Protocol development for assessing arsenic background concentrations in Florida urban soils [J]. *Environmental Forensics*, 2001, **2**(2): 141-153.
- [5] Cheng H X, Li M, Zhao C D, *et al.* Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 31-52.
- [6] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 117-122.
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 117-122.
- [7] Castro J E, Fernandez A M, Gonzalez-Caccia V, *et al.* Concentration of trace metals in sediments and soils from protected lands in south Florida: background levels and risk evaluation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(8): 6311-6332.
- [8] 刘江生, 王仁卿, 戴九兰, 等. 山东省黄河故道区域土壤环境背景值研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1699-1704.
Liu J S, Wang R Q, Dai J L, *et al.* Soil environmental background concentrations in old course of the yellow river in Shandong Province [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(6): 1699-1704.
- [9] dos Santos S N, Alleoni L R F. Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazônia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(7): 5737-5748.
- [10] 沈城, 刘馥雯, 吴健, 等. 再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5125-5132.
Shen C, Liu F W, Wu J, *et al.* Distribution and ecological risk of heavy metals in the soil of redevelopment industrial sites [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5125-5132.
- [11] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4180-4196.
Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, *et al.* Quantitative assessment of human health risks based on soil heavy metals and PAHs sources: take a polluted industrial site of Beijing as an example [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4180-4196.
- [12] Kuzmanoski M M, Todorović M, Urošević M P A, *et al.* Heavy metal content of soil in urban parks of Belgrade [J]. *Hemijaska Industrija*, 2014, **68**(5): 643-651.
- [13] Wang X S, Qin Y. Some characteristics of the distribution of heavy metals in urban topsoil of Xuzhou, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, **29**(1): 11-19.
- [14] Khan S, Munir S, Sajjad M, *et al.* Urban park soil contamination by potentially harmful elements and human health risk in Peshawar City, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **165**: 102-110.
- [15] Liu L L, Liu Q Y, Ma J, *et al.* Heavy metal(loid)s in the topsoil of urban parks in Beijing, China: concentrations, potential sources, and risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114083.
- [16] 马建华, 董运武, 陈彦芳. 开封市周边地区地表灰尘重金属背景值研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(5): 1798-1806.
Ma J H, Dong Y W, Chen Y F. Background values of heavy metals in surface dusts in the vicinity of Kaifeng, Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1798-1806.
- [17] Khademi H, Gabarrón M, Abbaspour A, *et al.* Distribution of metal(loid)s in particle size fraction in urban soil and street dust: influence of population density [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(12): 4341-4354.
- [18] 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.
- [19] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [20] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [21] Environmental Protection Agency. Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil for CERCLA sites [R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency,

2002. 7-41.
- [22] HJ 25.2-2019, 建设用土壤污染风险管控和修复监测技术导则[S].
- [23] 深圳市统计局, 国家统计局深圳调查队. 深圳市统计年鉴(2019年)[EB/OL]. <http://tjj.sz.gov.cn/attachment/0/695/695422/7971762.pdf>, 2020-01-01.
- [24] 深圳市土壤普查办公室. 深圳土壤[R]. 深圳: 深圳市土壤普查办公室, 1986.
- [25] Liu Y G, Gao P, Su J, *et al.* PAHs in urban soils of two Florida cities: background concentrations, distribution, and sources[J]. *Chemosphere*, 2019, **214**: 220-227.
- [26] Brewer R, Peard J, Heskett M. A critical review of discrete soil sample data reliability: part 1—field study results[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2017, **26**(1): 1-22.
- [27] 中华人民共和国环境保护部办公厅, 中华人民共和国国土资源部办公厅, 中华人民共和国农业部办公厅. 关于印发全国土壤污染状况详查样品分析测试方法系列技术规定的通知[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201711/W020171106339408983483.pdf>, 2017-10-23.
- [28] 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.
- [29] Nogueira T A R, Abreu-Junior C H, Alleoni L R L, *et al.* Background concentrations and quality reference values for some potentially toxic elements in soils of São Paulo State, Brazil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **221**: 10-19.
- [30] Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, *et al.* Arsenic background concentrations in Florida, U. S. A. surface soils: determination and interpretation[J]. *Environmental Forensics*, 2001, **2**(2): 117-126.
- [31] Chen M, Ma L Q, Harris W G. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, **28**(4): 1173-1181.
- [32] 姜林, 张丽娜, 钟茂生, 等. 统计方法在污染场地修复验收评估中的应用[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(8): 873-878. Jiang L, Zhang L N, Zhong M S, *et al.* Case application of statistical analysis in remediation validation of contaminated sites [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(8): 873-878.
- [33] 张文彤, 邝春伟. SPSS 统计分析基础教程[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [34] 李小平, 刘洁, 夏舒楠, 等. 我国城市土壤铅与儿童血铅空间分布格局[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(1): 226-232. Li X P, Liu J, Xia S N, *et al.* Spatial distribution pattern of lead in urban soil and in children's blood, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(1): 226-232.
- [35] 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 等. 山东省东部地区土壤地球化学基准值与背景值及元素富集特征研究[J]. *地球化学*, 2011, **40**(6): 577-587. Dai J R, Pang X G, Yu C, *et al.* Geochemical baselines and background values and element enrichment characteristics in soils in eastern Shandong Province[J]. *Geochimica*, 2011, **40**(6): 577-587.
- [36] 赵述华, 罗飞, 郗秀平, 等. 深圳市土壤砷的背景含量及其影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 3061-3069. Zhao S H, Luo F, Xi X P, *et al.* Study of soil background content of arsenic and its impact factors in Shenzhen[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 3061-3069.
- [37] 陈江军, 刘波, 李智民, 等. 江汉平原典型场区土壤重金属赋存形态及其影响因素探讨[J]. *资源环境与工程*, 2018, **32**(4): 551-556. Chen J J, Liu B, Li Z M, *et al.* Soil heavy metal occurrence and its influencing factors in typical areas in Jianghan Plain [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, **32**(4): 551-556.
- [38] 岳希, 孙体昌, 黄锦楼. 某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3679-3683. Yue X, Sun T, Huang J L. Distribution characteristics of lead in different particle size fractions of surface soil of a lead-acid battery factory contaminated site[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3679-3683.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)