

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘煊武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征

孙厚云¹, 卫晓锋¹, 甘凤伟¹, 王恒¹, 何泽新¹, 贾凤超¹, 张竞²

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 选择承德市滦河流域为研究区, 系统采集了 351 个表层土壤样品(0~20cm), 测定了 Cu、Ni、Cd、Cr、Pb、Zn、Hg、V、Ti、Mn、As 和 Co 共 12 种重金属的含量, 运用基于参比元素的标准化方法和累积频率曲线法确定了 12 种重金属元素的地球化学基线值, 结合主成分分析法与地统计方法统计结果, 分析了重金属的空间结构和分布特征, 利用地累积指数法对不同土壤类型和土地利用方式表层土壤重金属累积程度进行了分类评价。结果表明, 滦河流域表层土壤 V、Ti、Cd、Pb、Mn 和 Co 元素地球化学基线值高于河北省背景值, As、Zn、Cr、Cu、Ni 和 Hg 元素地球化学基线值低于河北省背景值。表层土壤重金属总体累积程度由强至弱为: Cd > Pb > Cu > Ti > Mn > Zn > Cr > Ni > Co > V > Hg > As, 80% 以上的土壤样品中 Pb、Ti、V、As 和 Co 元素属无累积-中度累积水平, 70% 以上土壤样品中 Hg、Mn、Ni、Cu、As、Cd 和 Cr 元素属无累积-中度累积水平。土壤重金属总体累积程度在棕壤、褐土和潮土中依次增大; 在工矿用地、灌木林地中较高, 林地、草地中相对最低。农用地表层土壤中 Pb、Cd 元素累积程度相对较高, 分别有 27.69% 和 25.38% 的样品属中等以上累积水平。滦河流域表层土壤 Ti、V、Co、Ni 和 Cr 元素同源性较高, 与原生高地质背景相关; Cd、Pb、Zn、Mn、Cu 和 As 元素污染累积受成土母岩和人为因素共同作用影响, Hg 元素累积则主要来源于人为活动。

关键词: 重金属污染; 地球化学基线; 累积特征; 滦河流域; 承德

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3753-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201901056

Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde

SUN Hou-yun¹, WEI Xiao-feng¹, GAN Feng-wei¹, WANG Heng¹, HE Ze-xin¹, JIA Feng-chao¹, ZHANG Jing²

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: A total of 351 surface soil samples (0-20 cm) were collected from the Luanhe River Basin in Chengde City (a typical area of concentrated mineral resources) and analyzed for 12 heavy metals (Cu, Ni, Cd, Cr, Pb, Zn, Hg, V, Ti, Mn, As, and Co). The geochemical baseline values of the heavy metals were determined using the reference element method and the cumulative frequency curve method. Furthermore, the spatial structure and distribution characteristics of the heavy metals were assessed based on PCA and geostatistical analysis. The accumulation of heavy metal pollution in different types of soil and in association with different land use patterns was also evaluated using a geological accumulative index. The results showed that the geochemical baseline values of V, Ti, Cd, Pb, Mn, and Co in the surface soils of the Luanhe River Basin were higher than their background values for Hebei Province. In contrast, the geochemical baseline values of As, Zn, Cr, Cu, Ni, and Hg were lower than their background values. The average accumulation index of the surface soils followed the order of Cd > Pb > Cu > Ti > Mn > Zn > Cr > Ni > Co > V > Hg > As. More than 80% of the soil samples were categorized as having no accumulation or moderate accumulation of Pb, Ti, V, As, and Co, while over 70% of the soil samples were categorized as having no accumulation or moderate accumulation of Hg, Mn, Ni, Cu, As, Cd, and Cr. With respect to different soil types, the average accumulation index of heavy metals followed the order of fluvo-aquic soil > cinnamon soil > brown soil. With respect to land use types, the accumulation index of heavy metals followed the order of industrial and mining land > shrub forest land > agricultural land > woodland and grassland. The accumulation of Pb and Cd in the surface soils of agricultural land was relatively high in comparison to the other elements, with 27.69% and 25.38% of the samples being above the moderate accumulation level, respectively. The iron group elements Ti, V, Co, Ni, and Cr are likely to derive from naturally high geological background sources, while the spatial patterns of Cd, Pb, Zn, Mn, Cu, and As were associated with the combination of parent material and anthropogenic inputs. The accumulation of Hg was mainly influenced by human activities.

Key words: heavy metal pollution; geochemical baseline; accumulation characteristics; Luanhe River Basin; Chengde

由于土壤系统物质组成、理化性质和外部环境条件的复杂性, 重金属迁移转化影响因素、地球化学行为响应的不确定性, 使得土壤环境质量评价成为一项复杂工程, 科学、准确地评价标准是衡量土壤环境质量优劣的重要依据, 也是土壤环境污染监

测预警、土壤环境损益评估和生态环境修复等工作的基础^[1, 2]。以往重金属污染累积评价多以国家土

收稿日期: 2019-01-06; 修订日期: 2019-03-19

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160229-Z06)

作者简介: 孙厚云(1990~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土壤与地下水环境, E-mail: shyun2016@126.com

壤环境质量标准或历史数据、区域背景值和相邻区域对照值等作为评价标准,但不同区域原生土壤环境重金属天然丰度有所差异,不同主体功能区划或土地利用类型对土壤环境质量也有不同的要求,用统一的标准来评价土壤重金属累积程度缺乏一定的科学性,标准的适用性也有所差异^[3,4].在土壤环境管理与规划需求更为严格和多样化的背景下,越来越多的人建议采用区域性标准,土壤重金属评价基线值越来越受到广泛的重视^[5-8].

矿产资源集约型城市或流域矿集区属重金属元素天然高背景区,采用统一环境质量标准作为评价依据,而不考虑成土母质和成土过程不均一性^[9]等自然因素对土壤重金属自然丰度的影响,较难区分土壤重金属累积属原生地质背景还是不合理人为活动输入,容易在指导污染控制与治理时出现“过保护”或“欠保护”现象^[10].矿业开发活动前的土壤重金属元素丰度(污染起始浓度)是土壤质量污染评价理想基准,但在矿业活动较为频繁地区,重金属自然本底值(nature baseline)已很难获取,环境地球化学基线水平成为界定污染、判定污染程度的重要参考标准^[11-13].环境地球化学基线最早由国际地质对比计划欧美地球化学填图项目(ICGP259)和全球地球化学基线(ICGP360)项目提出^[14,15],旨在通过地球化学基线评价区分人类活动对环境的影响,是研究矿产资源集中区土壤环境演变的基础,也是土壤重金属污染累积评价的前提^[16,17].

承德市处于国家生态文明建设重大战略布局、京津冀协同发展战略的交汇节点,是京津地区生态安全的绿色屏障和重要生态缓冲带^[18].同时,承德市矿产资源分布较多,以铁矿资源最为丰富,是我

国重要的钒钛磁铁矿产地^[19].在长期的矿产资源开发利用过程中,土壤重金属污染成为区域生态环境保护的重要威胁之一.本文分析了承德市滦河流域表层土壤12种重金属元素的空间分布特征与变异结构;通过参比元素标准化方法和累计频率法厘定了流域土壤重金属地球化学基线,并将基线值合理应用到土壤重金属累积特征评价中,分类对比了不同土壤类型、土地利用方式表层土壤的重金属累积程度,旨在为矿业活动重金属高背景值区域重金属污染累积评价提供参考基准和定量标尺,并为生态环境监管提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

承德市滦河流域地势北高南低,地形复杂,山脉纵横,河流交错;地貌由北向南从坝上高原、燕山山脉中低山、燕山南麓丘陵逐步过渡为华北平原区^[20].承德市境内滦河流域集水面积为28 878 km²,占承德全市总面积的72.5%;耕地主要沿山间沟谷和河川宽缓谷地分布,总面积约4 377.99 km².研究区成土母质类型包括冲积物、洪积物、风沙沉积物、黄土、人工堆垫物和各种岩石残坡积物;流域北部土壤类型为森林土、草甸土和栗钙土,中北部为棕壤、中部为褐土,南部为褐土和棕壤(图1).承德市是我国仅次于攀枝花^[21]的第二大钒钛磁铁矿资源基地,区内分布有大量铁矿、金矿、银矿、铜矿、钼矿、铅锌矿和非金属矿,矿业活动频繁.作为京津生态屏障,重要的农业、蔬菜和水果基地,承德市土壤重金属环境质量评价对研究区环境管理具有重要意义.

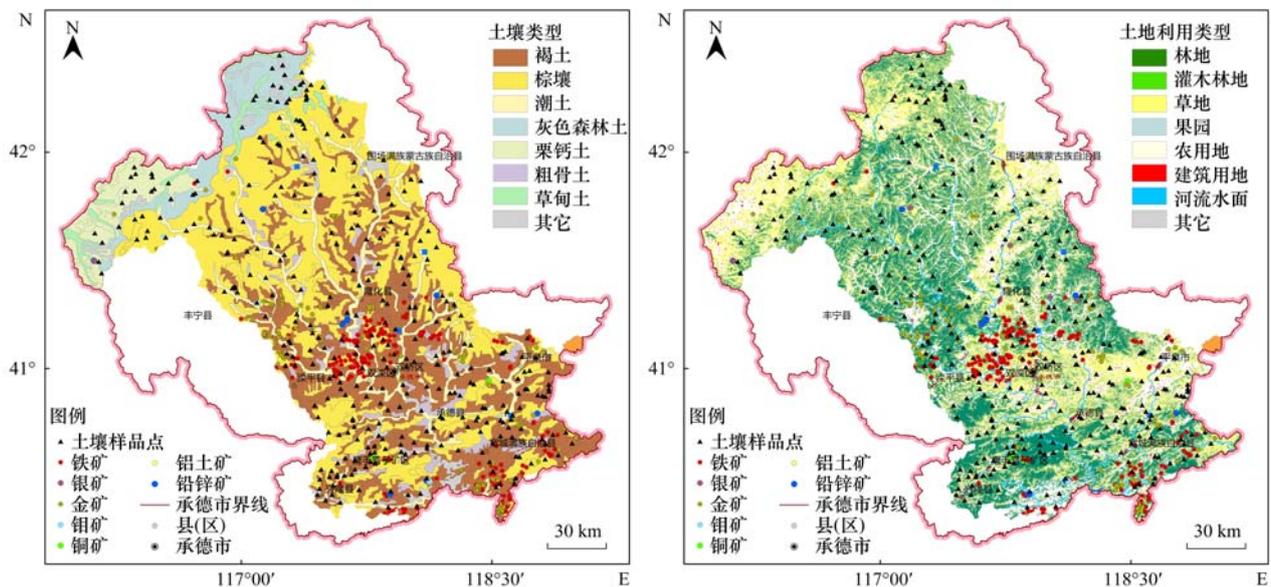


图1 承德市滦河流域位置与样品采集分布示意

Fig. 1 Map of the Luanhe River Basin in Chengde and the sampling sites

1.2 样品采集及检测

土壤样品于 2017 年 6 月~8 月集中采集, 综合考虑土壤类型、土地利用方式以及样品的代表性、典型性; 以小流域为分区, 土地利用类型为采样单元采集表层土壤样品(0~20 cm), 主要采样位置为流域汇水区域农用地, 水田、旱地, 园地采样密度适当加大, 草地和林地采样密度相对放稀, 共采集样品 351 件(图 1); 其中褐土样品 161 件、棕壤样品 101 件、潮土 39 件、灰色森林土 15 件、栗钙土 14 件、粗骨土 8 件、草甸土 7 件和沼泽土等其它样品 6 件; 农用地样品 130 件、草地样品 82 件, 林地 73 件、灌木林地 40 件、果园 18 件、工矿用地与铁路建设用地等其它样品 8 件. 样品采集使用 GPS 结合地形图定点, 采用“S”或“X”形采集组合样点进行混合, 去除碎石、杂物、植物残体后自然风干, 研磨、过筛加工成 200 目进行测试. 测试指标为重金属元素 Cu、Ni、Cd、Cr、Pb、Zn、Hg、V、Ti、Mn、Mo、Li、Sc、Rb、Ce 及土壤 pH, 类重金属元素 As. 土壤样品 As 含量使用氢化物发生原子荧光仪测定, 其它重金属含量使用 ICP-OES(PE, USA) 测定. 样品分析测试按规范要求加 10% 空白样与平行样控制, 分析方法准确度和精密度采用国家一级土壤标准物质(GBW07349)控制, 各重金属的加标回收率均在国家标准参比物质的允许范围内.

1.3 基线值厘定方法

根据文献[22], 基线水平是指污染环境或破坏生态行为未发生时, 区域内土壤环境质量及其生态服务功能的水平. 基线厘定时优先使用历史数据作为基线水平, 或以对照区调查数据、参考环境质量标准作为基线水平. 本次重金属基线水平采用现状调查数据经参比元素标准化方法、累计频率法统计处理后对比确定.

1.3.1 参比元素标准化方法

标准化方法的基本思想是将地球化学过程中的惰性元素作为参比元素, 根据其其与重金属元素的线性相关关系, 建立标准化方程确定重金属环境地球化学基线^[7, 23], 从而判断重金属元素的累积状况. 标准化处理能够消除粒度和其他矿物学因素对元素

含量的影响, 标准因子选择时要排除受矿业活动影响较大的元素, 选择主要来源于自然母质、质量分数对人为输入敏感的惰性元素^[24, 25]. 如高杨等^[11]和赵新儒等^[17]选择 Fe 元素, 卢新哲等^[6]选择 Eu、Li、Sc 和 Sm 这 4 种元素; 朱晓东等^[10]选择 Li、V、Rb、Cs、Sc 和 Al 这 6 种元素, 范凯等^[26]选择 La、V、Ti、Se 和 Sc 这 5 种元素作为参比元素; 滕彦国等^[23]选择 Sc 作为参比元素, 厘定了攀枝花钒钛磁铁矿地区的重金属地球化学基线. 承德分布大量钒钛磁铁矿, Fe、Ti 和 V 不适宜作为参比元素, 综合前人研究和参比元素与重金属元素的相关性系数对比筛选后, 采用 Li、Sc、Rb 和 Ce 作为参比元素, 使用样本数据 95% 置信限以内的点建立回归线性方程以确定基线值.

1.3.2 累计频率法

累计频率曲线是用以展示地球化学数据分布特征的理想方式之一, 可以敏感地反映数据的异常^[27], Bauer 等^[28]将累计频率曲线引入土壤环境质量评价中, 用以确定环境地球化学基线. 累积频率-元素含量分布曲线若存在一个拐点, 则拐点以上的值代表了受人类活动影响的部分, 通过拐点以下元素含量(95% 置信区间内数据)的平均值确定基线值. 若存在两个拐点, 则较高点代表异常下限, 即人类活动影响部分; 较低点代表基线值的上限, 低于此点元素含量(95% 置信区间内数据)的平均值确定为基线值^[5, 16].

1.4 地累积指数评价方法

地累积指数法 (geo-accumulation index, I_{geo}) 由德国学者 Müller^[29]提出, 能反映土壤中重金属元素潜在污染程度, 被广泛应用于重金属污染累积程度定量评价中^[5, 26], 其计算方法为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_n 为沉积物中第 n 种元素的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_n 为第 n 种元素的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 常数 k 为考虑到成土母岩差异可能引起的背景值变动系数, 本次取值为 1.5. 根据 I_{geo} 的计算结果, 重金属的污染累积程度共分为 7 级^[28].

表 1 Müller 地累积指数分级

Table 1 Grading of the geoaccumulation index

I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
累积程度	无累积	无-中度累积	中度累积	中-强累积	强累积	强-极强累积	极强累积

1.5 数据处理方法

采用 SPSS 19 软件计算土壤样品各元素检测值的平均值与标准偏差. 利用 GS +9 地统计学模型分

析土壤重金属分析的空间结构特征, 运用主成分分析法分析各重金属元素的相关关系. 利用参比元素标准化方法和累计频率曲线确定地球化学基线, 分

析研究区各重金属元素的总体累积程度;对比分析不同土壤类型、土地利用方式土壤重金属的累积特征.

2 结果与讨论

2.1 重金属总体分布特征

2.1.1 土壤重金属含量特征

对 351 组表层土壤样品数据进行 Kolmogorov-Smirnov 检验与描述性统计,统计信息见表 2. 样品重金属含量均有检出,数据符合正态分布,Cu、Hg 和 Pb 部分偏移、峰值较高. 与河北省重金属背景值^[30](表 3)相比,研究区土壤 As、Cr 和 Ni 含量平

均值低于河北省背景值,土壤 Zn、Co、Cu 和 Hg 含量平均值与河北省背景值基本一致,土壤 Cd、V、Ti、Mn 和 Pb 含量平均值高于河北省背景值. 土壤重金属含量变异系数由大到小依次为 Cd、Hg、Cu、Pb、Cr、As、Mn、Ni、Zn、Co、V 和 Ti; 其中 Cd、Hg、Cu 和 Pb 变异系数大于 1.0,空间分异较大,初步判断 Cd、Hg、Cu 和 Pb 含量可能受人为活动影响,存在点源污染. 土壤 Co、V 和 Ti 变异系数分别为 0.57、0.57 和 0.60,空间分异特征不显著,其重金属来源具有地球化学同源性,总体含量较高,与区内分布大量钒钛磁铁矿、超贫磁铁矿,成土母质 Co、V 和 Ti 元素丰度较高相一致.

表 2 表层土壤重金属含量分析统计

Table 2 Statistical data for heavy metals in the studied surface soils

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏移	峰值	K-S 系数
As/mg·kg ⁻¹	0.80	84.98	8.30	7.11	0.86	4.831	41.276	0.18
Co/mg·kg ⁻¹	2.23	55.26	13.27	7.51	0.57	9.418	99.871	0.17
Cu/mg·kg ⁻¹	4.39	536.10	24.49	36.66	1.50	6.88	79.435	0.31
Zn/mg·kg ⁻¹	11.55	710.57	76.80	49.56	0.65	16.192	281.556	0.18
Hg/μg·kg ⁻¹	4.00	1982.00	37.91	127.27	3.36	3.282	13.763	0.40
Mn/mg·kg ⁻¹	116.52	9236.00	836.08	686.88	0.82	9.835	120.379	0.20
Ni/mg·kg ⁻¹	3.98	141.17	27.48	20.28	0.74	2.478	8.01	0.18
Cr/mg·kg ⁻¹	5.75	433.09	61.74	57.00	0.92	13.157	184.602	0.24
Pb/mg·kg ⁻¹	7.61	409.25	27.82	33.42	1.20	1.867	7.114	0.32
Ti/mg·kg ⁻¹	896.00	14593.20	3973.38	1866.15	0.47	2.16	7.223	0.17
V/mg·kg ⁻¹	14.24	368.69	84.43	48.48	0.57	6.937	71.516	0.11
Cd/mg·kg ⁻¹	0.03	14.67	0.21	0.82	3.90	1.93	6.024	0.41

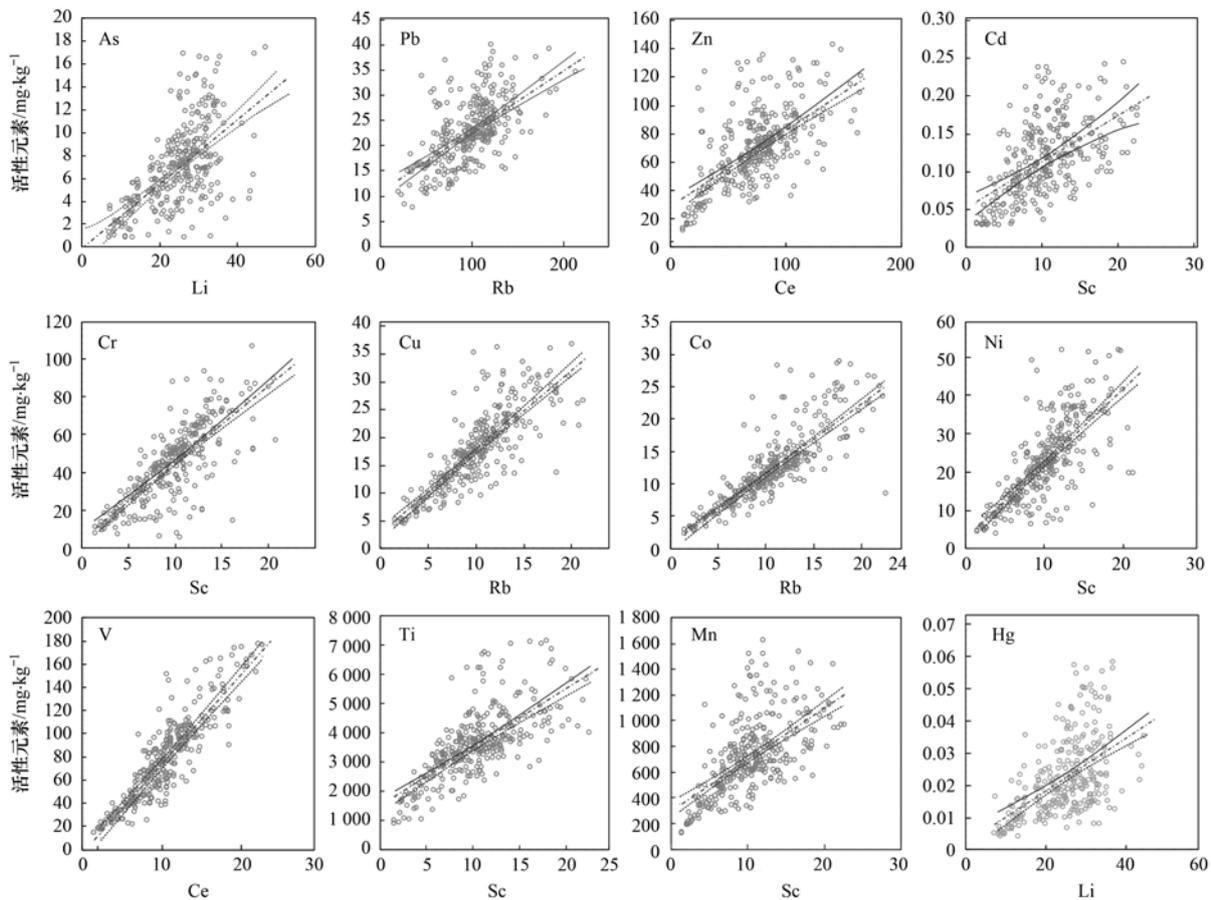
2.1.2 土壤重金属基线值厘定

标准化方法的核心在于参比元素的选择,本研究参照文献^[6,10,23]等确定参比元素的方法,选择表生带中地球化学活动性较弱的 Li、Ce、Sc、Rb、Cs 和 La 作为待选参比元素. 通过 Pearson 相关性分析,计算 12 种重金属元素与参比元素的相关系数,选取相关性较好的作为参比元素. 相关性是衡量线性回归曲线拟合度的关键指标,相关性越高,表明曲线拟合度愈高,基线值计算相对越合理. Sc 元素与 Cd、Cr、Cu、Mo、Co、Ni、Ti 和 Mn 相关性优于其它元素; Li 元素与 As、Hg 相关性优于其它元素,相关系数分别为 0.383 和 0.275; Ce 元素与 Zn、V 相关性优于其它元素,相关系数分别为 0.398 和 0.804; Rb 元素与 Pb 相关性最优,相关系数为 0.360. 利用置信限 95% 以内数据进行回归分析(图 2),建立线性回归方程,将对应参比元素含量的平均值代入回归方程,即得到 12 种重金属元素的地球化学基线值(表 3).

本研究累积频率-元素含量分布曲线的拐点(图 3)通过伍福琳等^[5]和范凯等^[26]改进应用的直线拟合的可决系数(R^2)确定,通过累计曲线上部点的

逐步剔除-迭代递归,在直线拟合可决系数最大处确定为曲线拐点,再将选定拐点以下的样品数据的平均值作为地球化学基线值.

由参比元素标准化方法与累计频率曲线法确定的地球化学基线值,再结合河北省重金属元素^[31]背景值和中国地球化学基准计划(CGB)^[14]确定的全国重金属元素背景基准值进行对比分析. 由表 3 可见,两种方法确定的重金属环境地球化学基线值相差较小. 除 Pb 和 Cd 外,标准化方法计算的重金属基线值均略高于累计频率计算值,可能是由于累积频率曲线拐点上部 Pb 和 Cd 样本数据分布相对较多,数据剔除后样本均值计算则相对较低造成的,一定程度上表明土壤重金属 Pb 和 Cd 含量受人为影响较大. 土壤 As、Zn、Cr、Cu、Ni 和 Hg 元素基线值低于河北省背景值,土壤 V、Cd、Pb、Mn 和 Co 元素基线值高于河北省背景值. 土壤 V、Ti、Mn 和 Co 元素基线值明显高于全国背景基准值, Pb、Zn、Ni 和 Cr 元素与全国背景基准值相差不大, Cd、As 和 Hg 元素背景值则略低于全国背景基准值. 通过滦河流域、河北省、全国不同空间尺度的元素地球化学基线值对比可知, V、Ti、Mn 和 Co 元素基



横坐标为参比元素含量, 单位 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

图2 重金属与其参比元素 95% 置信限内的回归曲线

Fig. 2 Regression curves for heavy metals and their respective normalizers (reference elements) within 95% confidence intervals

表3 采用不同方法确定的地球化学基线值¹⁾

Table 3 Geochemical baseline values as determined by different methods

项目	参比元素标准化方法			累计频率曲线法		河北省背景值 ^[30]	全国背景基线值 ^[14]
	回归方程	R^2	P	基线值	基线值		
As	$\text{As} = 0.282\text{Li} - 0.126$	0.383	0.01	8.528	7.556	13.600	9.0
Pb	$\text{Pb} = 0.120\text{Rb} + 10.886$	0.360	0.01	23.312	24.100	21.500	22.0
Zn	$\text{Zn} = 0.537\text{Ce} + 29.072$	0.398	0.01	72.652	72.093	78.400	66.0
Cd	$\text{Cd} = 0.006\text{Sc} + 0.052$	0.306	0.01	0.122	0.129	0.094	0.137
Cr	$\text{Cr} = 4.071\text{Sc} + 4.391$	0.598	0.01	50.782	48.860	68.300	53.0
Cu	$\text{Cu} = 1.460\text{Rb} + 2.948$	0.678	0.01	19.585	18.108	21.800	0.020
Ni	$\text{Ni} = 1.947\text{Sc} + 2.805$	0.547	0.01	24.986	22.589	30.800	24.0
Hg	$\text{Hg} = 0.817\text{Li} + 1.889$	0.275	0.05	26.968	25.865	36.000	26.0
V	$\text{V} = 7.746\text{Ce} - 3.582$	0.805	0.01	84.678	81.993	73.200	70.0
Ti	$\text{Ti} = 199.600\text{Sc} + 1535.700$	0.497	0.01	3810.158	3765.616	—	3498.000
Mn	$\text{Mn} = 40.221\text{Sc} + 296.160$	0.365	0.01	754.482	742.430	608.00	569
Co	$\text{Co} = 1.088\text{Rb} + 0.697$	0.701	0.01	13.095	11.685	12.400	11.0

1) 基线值 Hg 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其它为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

线值的升高反映了地质背景等自然因素对土壤重金属元素丰度的影响, 与区域钒钛磁铁矿较为集中分布相一致, 以地球化学方法确定的基线值作为评价标准能相对客观地反映滦河流域重金属污染累积程度, 具有实际指导意义。

2.1.3 主成分分析

主成分分析可以通过降维方式把多个变量转化

为用少数几个主成分所表示的综合指标, 同一种主成分的元素可能具有相同来源, 常用以判断区域土壤重金属元素的相关程度, 辨识重金属污染源^[31]。

从表4主成分矩阵表中看出, 从12个元素中获取4个主成分, 其累计贡献率达到80.260%。其中第一主成分贡献率为39.917%, 第二主成分贡献

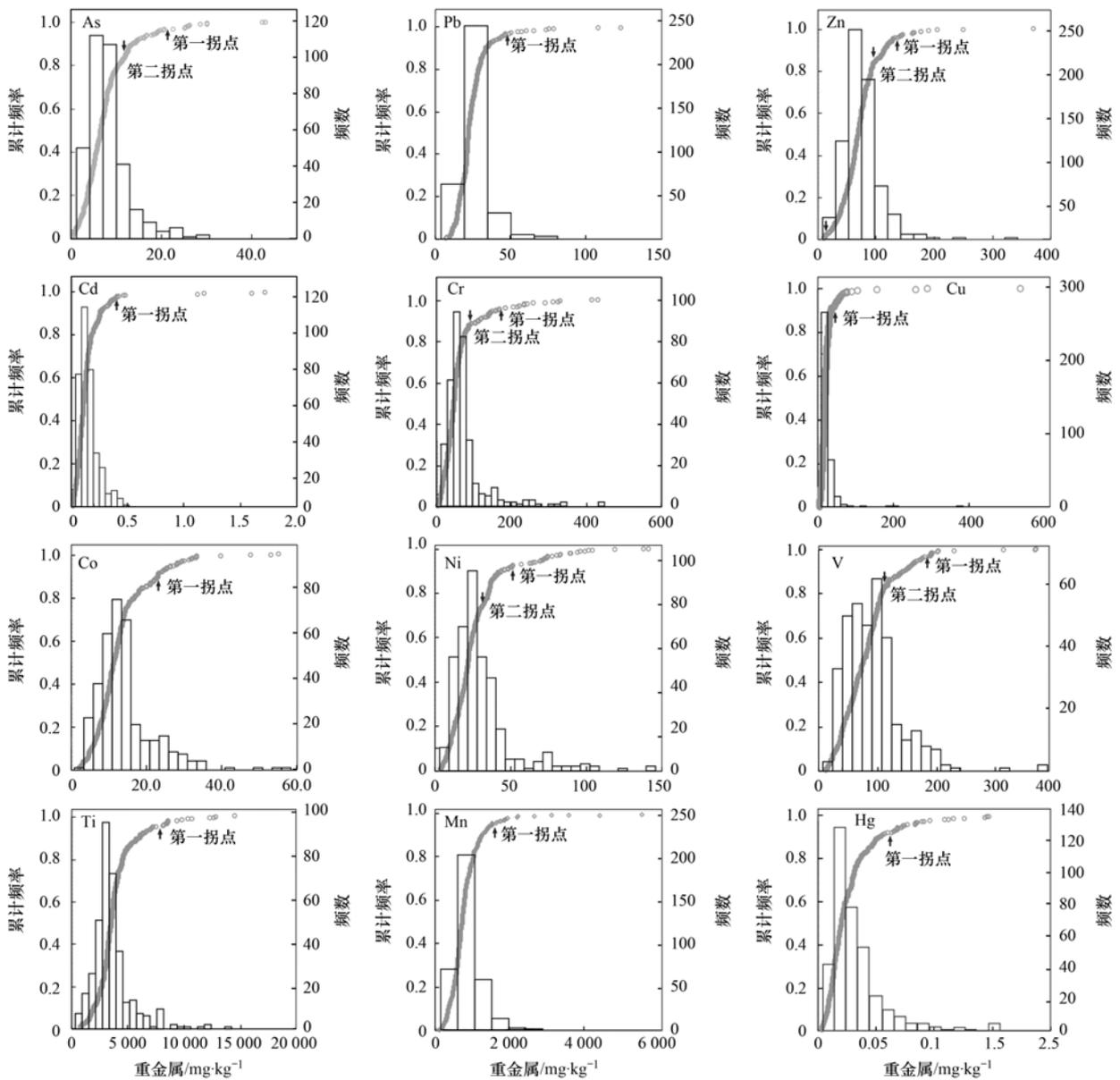


图3 土壤重金属含量频率分布、累积频率分布及其拐点示意

Fig. 3 Frequency distribution and cumulative frequency curves for heavy metals in the study soils and arrows indicate the positions of inflexion

率为 20.114%，第三主成分贡献率为 11.296%，第四主成分贡献率为 8.933%。根据因子载荷绘制主成分载荷图(图 4)，可将 12 种重金属元素分为四组，V-Ti-Co-Cr-Ni 为第一组，As-Cu-Mn 为第二组，Pb-Cd-Zn 为第三组，Hg 为第四组。V-Ti-Co-Cr-Ni 组元素属于相伴互生的铁族元素^[14]，其分布主要与铁矿床基性岩分布密切相关。第三组元素中，Pb 和 Zn 的地球化学性质极为相似且一般有相同来源，Cd 污染常见于铅锌矿周边，承德市内除钒钛磁铁矿外，银铅锌矿亦有分部，Pb、Cd 和 Zn 元素污染累积来源于人类活动和成土母质原岩风化共同作用。将分析结果与地质背景较为类似的攀枝花地区^[23, 32]的土壤重金属累积特征进行对比，攀钢工业区以 Ni、Cu、Cd 和 Cr 污染为主，重金属元素组合特征分为 As-Cd-Cu-Ni-Pb 和 Cr-Zn 两组，与滦河

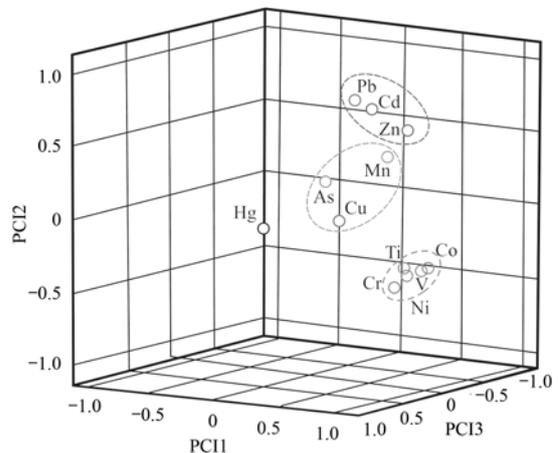


图4 表层土壤重金属主成分载荷

Fig. 4 Factor loading analysis of heavy metals in surficial soils

流域铁矿集区元素环境地球化学行为较为一致。滦

河流域土壤 V-Ti-Co-Cr-Ni 同源性较高, 与成土母岩元素丰度高相关; 土壤 As-Cu-Mn 和 Pb-Cd-Zn 受人为活动和自然因素共同影响, 土壤 Hg 污染可能主要来自于人类活动影响。

表 4 表层土壤重金属主成分荷载矩阵

Table 4 Factor matrix of heavy metals in surficial soils

项目	因子荷载			
	PCI1	PCI2	PCI3	PCI4
Co	0.908	-0.305	-0.111	0.001
V	0.870	-0.326	-0.098	0.029
Ni	0.804	-0.354	-0.023	0.059
Cr	0.711	-0.443	-0.008	-0.029
Zn	0.706	0.604	-0.170	-0.144
Cu	0.697	0.090	0.606	-0.074
Ti	0.595	-0.368	-0.295	-0.125
Mn	0.499	0.390	-0.229	0.353
Pb	0.368	0.798	-0.032	-0.194
Cd	0.487	0.739	-0.073	-0.160
Hg	0.281	0.043	0.889	0.093
As	0.134	0.217	-0.035	0.910
特征值	4.790	2.414	1.356	1.072
贡献率/%	39.917	20.114	11.296	8.933
累计贡献率/%	39.917	60.031	71.327	80.260

2.1.4 土壤重金属空间变异性

地统计学方法基于区域化变量理论, 通过变异函数定量刻画重金属在空间分布上的结构性和相关性, 能很好地描述重金属含量的空间变异结构, 进行空间格局识别^[33]。对研究区表层土壤 12 种重金属元素进行半方差函数分析, 以块金值、基台值及变程等参数表征土壤重金属空间变异性, 具体统计参数见表 5。

表 5 土壤重金属含量变异函数模型统计

Table 5 Variation function model of soil heavy metal content

项目	理论模型	块金值 (Co)	基台值 (Still)	块金系数 (Co/Still)	变程/km	决定系数 (R ²)
As	线性模型	51.01	51.01	1.000	132.55	0.232
Pb	球状模型	50.00	1 095.00	0.046	7.90	0.126
Zn	线性模型	2 529.92	2 529.92	1.000	128.75	0.148
Cd	线性模型	0.80	0.80	1.000	128.75	0.312
Cr	球状模型	60.00	3 241.00	0.019	6.00	0.008
Cu	高斯模型	1.00	1 238.00	0.001	7.97	0.556
Ni	球状模型	15.00	391.40	0.038	9.30	0.284
Hg	线性模型	14 086.53	14 086.53	1.000	128.75	0.008
V	球状模型	1.00	2 210.00	0.000	6.40	0.446
Ti	指数模型	10 000.00	3 698 000.00	0.003	17.10	0.340
Mn	线性模型	475 691.47	475 691.47	1.000	132.55	0.342
Co	指数模型	4.60	54.42	0.085	6.60	0.285

2.2 重金属累积特征分析

2.2.1 重金属含量总体累积特征

与累计频率法相比, 基于参比元素的标准化方法数据分析受拐点选取因素影响较小, 本次评价选取标准化方法确定的基线值作为最终评价

块金系数 (Co/Still) 可以用来度量所研究变量的空间相关性强弱, 能反映自然和人为因素的作用。若 Co/Still < 0.25, 表明变量的空间变异以结构变异为主, 变量具有强烈的空间相关性, 表明元素空间分异主要受自然因素影响; 若 0.25 < Co/Still < 0.75, 变量具有中等程度空间自相关, 元素空间变异受到自然和人为因素共同作用影响; 若 Co/Still > 0.75, 变异主要以随机变异为主, 空间自相关很弱, 主要受人为因素影响。决定系数 (R²) 表示理论模型的拟合精度, 而变程 (range) 表示了在某观测尺度下空间自相关的作用范围, 即在变程范围内, 变量有空间自相关性^[33]。经过 GS + 9 模型拟合分析, 研究区土壤 As、Zn、Cd、Hg 和 Mn 含量的变异函数理论模型符合线性模型, Pb、Cr、Ni 和 V 的变异函数理论模型符合球状模型, Ti 和 Co 符合指数模型, Cu 符合高斯模型。As、Zn、Cd、Hg 和 Mn 块金系数大于 0.75, 变量的空间分异以随机性变异为主, 可能主要受人为因素影响。Pb、Cr、Ni、Co、V 和 Ti 块金系数均小于 0.25, 变量具有强烈的空间相关性, 空间变异以结构性变异为主, 主要受成土母质等自然因素影响。Cu、V 和 Ti 的决定系数分别为 0.556、0.446、0.340, 模型的拟合精度较高, 变程相对较小, 表明其空间自相关程度较高, 主要受成土母质地质背景影响。As、Zn、Cd 和 Hg 表现出较强的独立性和随机性, 变程相对较大, 可能与土壤 As、Zn、Cd 和 Hg 元素受人为因素影响重金属空间分布不均, 主要以点源污染形式存在有关。

基准, 分析研究区 351 件样品的 12 种元素地累积系数 (表 6)。通过对比各元素的地累积指数平均值 ($I_{geo-ave}$) 可知, 研究区 12 种重金属的总体污染累积程度由强至弱依次为: Cd > Pb > Cu > Ti > Mn > Zn > Cr > Ni > Co > V > Hg > As。除 V、Ti

和 Co 外, 其它重金属元素均有部分点达到强累积水平. 分别有 1.14%、0.85%、0.57% 和 0.57% 的土壤样品中 Cd、Cu、Hg 和 Mn 达到强-极强污染以上污染等级, 样点个数分别为 4、3、2 和 2. 80% 以上的土壤样品中 Pb、Ti、V、As 和

Co 属无累积-中度累积水平, 70% 以上土壤样品中 Hg、Mn、Ni、Cu、As、Cd 和 Cr 属无累积-中度累积水平, 承德市滦河土壤重金属环境质量总体属清洁水平, 重金属累积程度属无累积或无-中度累积水平.

表 6 研究区土壤重金属 I_{geo} 分级统计/%

Table 6 Statistical classification of heavy metals (I_{geo}) in the study area/%

项目	$I_{geo-ave}$	无累积	无-中度累积	中度累积	中-强累积	强累积	强-极强累积	极强累积
As	0.198	37.04	44.16	15.38	3.13	0.28	0	0
Pb	0.608	71.79	25.64	1.42	0.28	0.85	0	0
Zn	0.486	19.09	64.39	15.38	0.85	0.28	0	0
Cd	0.639	22.51	47.86	22.22	5.70	0.57	0.57	0.57
Cr	0.482	26.50	49.86	15.38	6.55	1.71	0	0
Cu	0.519	25.07	52.42	16.52	4.56	0.57	0.57	0.28
Hg	0.333	38.18	40.17	15.38	4.56	1.14	0	0.57
Ni	0.429	27.64	48.43	17.38	5.98	0.57	0	0
V	0.357	29.06	53.56	16.24	1.14	0	0	0
Ti	0.515	15.10	69.80	13.39	1.71	0	0	0
Mn	0.502	19.94	57.55	20.23	1.42	0.28	0.57	0
Co	0.406	25.07	55.56	18.23	1.14	0	0	0

2.2.2 不同土壤类型与土地利用方式土壤重金属累积特征

不同类型的土壤理化性质有所差异, 土地利用方式则与人类活动密切相关, 按土壤类型和土地利用方式分类评价土壤重金属地累积特征, 能反映成土母地质背景和人为活动因素对土壤重金属污染累积的影响.

以土壤类型进行分类评价, 统计各类土壤 12 种重金属的平均累积指数和中度累积程度以上样品的百分比(累积率), 结果显示(表 7), Ti、V、Co、Ni 和 Zn 元素的平均累积指数与累积率呈粗骨土 > 潮土 > 褐土 > 棕壤 > 栗钙土规律; Cu、Cr 和 Mn 元素平均累积指数与累积率呈潮土 > 粗骨土 > 褐土 > 棕壤 > 栗钙土趋势. 潮土、褐土、栗钙土、粗骨土和棕壤中 Cd 元素平均累积指数逐渐增加, 但均低于中度累积水平; 栗钙土、潮土、粗骨土、褐土和棕壤中 Pb 元素平均累积指数呈递增趋势; Hg 在褐土、棕壤、潮土、栗钙土和粗骨土中平均累积指数逐渐增大, 累积率在 14.29% ~ 26.71%; As 在粗骨土、栗钙土、褐土和棕壤中平均累积指数逐渐增大, 中度累积水平以上样品占总样品的 12.50% ~ 25.64%. 灰色森林土和草甸土中重金属累积指数平均值较小, 累积程度多属无累积或无-中度累积水平, 与草甸土和灰色森林土主体分布于流域上游, 承德西北部坝上草原景观区, 受人为影响较小有关. 研究区褐土、棕壤和潮土这 3 种土壤类型分布面积最广, 潮土中重金属平均累积指数关系为 Cu > Cd > Mn > Cr > Pb > Zn > Co > Ni > V > Ti > Hg

> As, Cu 和 Mn 中度累积水平以上样品占 35.90%, Cd 和 Ni 中度累积水平以上样品占 33.33%. 褐土中重金属平均累积指数关系为 Cd > Cr > Cu > Mn > Zn > Pb > Ni > Ti > Co > V > Hg > As, Cd 中度累积水平以上样品占 36.65%, Cr 和 Ni 中度累积水平以上样品各占 30.43%. 棕壤中 Pb、Cd、Ti、Cu、Zn 和 Mn 元素平均累积指数较其它重金属元素高, 中度累积水平以上样品占比均小于 20%; 栗钙土中 Cd 和 Pb 平均累积指数较其它重金属元素高, 中度累积水平以上样品占比分别为 35.71% 和 28.57%. 粗骨土主要分布于低山丘陵山坡上部, 由经水蚀后残留的粗骨碎屑物形成, 其 Ti、V、Co、Cr、Ni 和 Cu 平均累积指数较高, 其次为 Cd、Zn、Pb 和 Mn, As 和 Hg 累积程度最低. 粗骨土、棕壤、褐土和潮土总体上沿地表水汇流方向分布, 即沿山坡坡顶向宽缓河谷、沟系两侧分带分布, 12 种重金属平均累积指数呈潮土 > 褐土 > 棕壤规律; 而浅山区土壤地球化学元素分布具有定积母质特征, 山丘上部粗骨土的 Ti、V、Co、Cr、Ni 和 Cu 元素平均累积程度较高, 客观反映出这些元素的高地质背景特征, Cd、Pb 和 Zn 则在汇水方向下游分布的棕壤、褐土和潮土中平均累积程度逐渐增大.

以土地利用方式进行分类评价, 结果表明(表 8), 其它用地(铁路用地和工矿用地)的重金属平均累积程度相对较高, 为人类活动影响较明显区域. 12 种重金属平均累积程度相对较高的地类为灌木林地与果园, 其中 Cr、Ni 和 Hg 元素在果园表

层土壤中平均累积指数最高, 分别为 0.71、0.81 和 0.82; 其它重金属元素则在灌木林地表层土壤中平均累积指数相对最高. V、Ti、Mn、Co、Ni、Cr、Hg、Cd 和 Pb 元素在农用地表层土壤中平均累积程度总体低于灌木林地, Mn、Zn、Cu 和 As 元素在农用地中的累积程度低于灌木林地与果园. 林地与草地地类中重金属平均累积指数总体较低, 除 Cd、Pb 和 Zn 元素重金属平均累积指数草地地类高于林地地类外, 其余元素重金属平均累积指数均为草地地类中相对最低. 灌木林地中 Cd、Mn、Pb、Zn 和 Cu 元素平均累积程度相对较高, 45.00% 的灌木林地表

层土壤样品 Cd 元素超过中等累积水平, 分别有 30.00% 的灌木林地表层土壤样品 Mn、Pb 和 Zn 元素超过中等累积水平. 农用地中平均累积程度相对较高的元素为 Pb、Cd 和 Cu, 平均累积指数分别为 0.64、0.60 和 0.60; 其次为 Ti、Cr 和 Mn. 草地中 Pb 和 Cd 元素平均累积指数相对较高, 分别为 0.63 和 0.53, 29.27% 的表层土壤样品 Cd 元素超过中等累积水平. 林地中重金属平均累积指数关系为 Ti > Cd > Pb > Mn > Zn > Cr > Cu > Co > V > Ni > Hg > As, 平均累积指数最大值为 0.52, 总体累积程度均较低.

表 7 不同土壤类型重金属平均地累积指数与累积率¹⁾Table 7 Average values of heavy metals (I_{geo}) and their accumulation rates for different types of soil

土壤类型	项目	As	Pb	Cu	Zn	Ni	Hg	Ti	V	Cd	Cr	Mn	Co
褐土	$I_{geo-ave}$	0.28	0.61	0.64	0.63	0.60	0.46	0.58	0.52	0.81	0.67	0.64	0.54
	累积率/%	22.98	26.71	26.09	19.88	30.43	26.71	16.77	23.60	36.65	30.43	27.33	24.84
棕壤	$I_{geo-ave}$	0.14	0.59	0.36	0.36	0.22	0.33	0.47	0.21	0.49	0.24	0.35	0.27
	累积率/%	12.87	24.75	15.84	15.84	15.84	19.80	13.86	7.92	23.76	15.84	13.86	10.89
潮土	$I_{geo-ave}$	0.23	0.73	0.97	0.73	0.68	0.30	0.64	0.66	0.91	0.80	0.81	0.69
	累积率/%	25.64	23.08	35.90	17.95	33.33	20.51	15.38	28.21	33.33	30.77	35.90	28.21
灰色森林土	$I_{geo-ave}$	-0.41	0.15	-0.11	-0.27	0.04	-0.52	0.27	-0.33	-0.17	0.06	-0.11	-0.04
	累积率/%	6.67	0	13.33	0	20.00	6.67	20.00	6.67	0	13.33	13.33	20.00
栗钙土	$I_{geo-ave}$	0.29	0.92	0.17	0.35	-0.02	0.28	0.25	-0.09	0.74	0.11	0.40	-0.01
	累积率/%	14.29	28.57	7.14	14.29	7.14	14.29	0	0	35.71	7.14	21.43	0
草甸土	$I_{geo-ave}$	0.01	0.53	-0.34	-0.02	-0.33	0.05	0.02	-0.58	-0.16	-0.36	-0.22	-0.43
	累积率/%	14.29	0	0	0	0	14.29	0	0	14.29	0	0	0
粗骨土	$I_{geo-ave}$	0.31	0.65	0.88	0.76	0.90	0.16	0.87	0.84	0.73	0.78	0.70	0.85
	累积率/%	12.50	25.00	37.50	12.50	0	0	37.50	25.00	12.50	0	25.00	37.50

1) 累积率为中等累积水平以上样品占总样品数的百分比, 下同

表 8 不同土地利用方式土壤重金属平均地累积指数与累积率

Table 8 Average values of heavy metals (I_{geo}) and their accumulation rates for different land use types

土地利用方式	项目	As	Pb	Cu	Zn	Ni	Hg	Ti	V	Cd	Cr	Mn	Co
农用地	$I_{geo-ave}$	0.24	0.64	0.60	0.48	0.46	0.31	0.56	0.41	0.60	0.53	0.52	0.44
	累积率/%	19.23	27.69	20.00	11.54	26.15	18.46	14.62	17.69	25.38	22.31	23.08	19.23
草地	$I_{geo-ave}$	0.09	0.63	0.31	0.41	0.24	0.24	0.38	0.13	0.53	0.24	0.40	0.23
	累积率/%	15.85	3.66	21.95	18.29	21.95	18.29	13.41	15.85	29.27	23.17	20.73	17.07
林地	$I_{geo-ave}$	0.10	0.47	0.36	0.40	0.27	0.17	0.52	0.32	0.50	0.37	0.41	0.34
	累积率/%	15.07	20.55	17.81	15.07	16.44	19.18	15.07	13.70	26.03	20.55	19.18	17.81
灌木林地	$I_{geo-ave}$	0.31	0.77	0.73	0.75	0.64	0.61	0.60	0.52	1.09	0.71	0.79	0.58
	累积率/%	20.00	30.00	27.50	30.00	27.50	30.00	17.50	20.00	45.00	27.50	30.00	22.50
果园	$I_{geo-ave}$	0.21	0.49	0.67	0.51	0.81	0.82	0.48	0.50	0.72	0.76	0.41	0.49
	累积率/%	27.78	27.78	33.33	16.67	27.78	50.00	16.67	11.11	33.33	27.78	16.67	11.11
其它	$I_{geo-ave}$	0.95	0.57	1.33	0.72	1.40	0.71	0.78	1.17	1.29	1.37	0.88	1.07
	累积率/%	50.28	12.78	62.78	25.28	50.28	25.28	25.28	62.78	50.00	50.28	37.78	62.78

结合主成分分析、地统计学空间分异特征和不同土壤类型、不同土地利用方式地类中重金属的分布特征表明, Ti、V、Co、Ni 和 Cr 重金属的累积程度较高与元素高地质背景相关, 在灌木林地、林

地, 即粗骨土分布区域中累积程度较高, 其污染累积同源性较高, 主要与矿业活动加速重金属元素从岩石向土壤中的迁移转化速率相关. Cd、Pb、Zn; Mn、Cu 和 As 两组元素在农用地、灌木林地和林地

中均有不同程度累积,在棕壤、褐土和潮土中累积程度相对较高,其污染累积受农业活动和矿业活动输入等共同影响;Hg元素在表层土壤中总体累积程度较低,仅在果园中2处样点地累积指数较高,可能与化肥、农药施用有关。

3 结论

(1)研究区滦河流域表层土壤Ti、V、Cd、Pb、Mn和Co元素基线值高于河北省背景值,土壤As、Zn、Cr、Cu、Ni和Hg元素基线值低于河北省背景值,客观反映出流域矿集区的重金属元素自然丰度特征,确定的重金属地球化学基线值对重金属污染累积评价具有现实指导意义。

(2)研究区表层土壤重金属总体地累积程度由强至弱为: Cd > Pb > Cu > Ti > Mn > Zn > Cr > Ni > Co > V > Hg > As, 80%以上的土壤样品中Pb、Ti、V、As和Co属无累积-中度累积水平, 70%以上土壤样品中Hg、Mn、Ni、Cu、As、Cd和Cr属无累积-中度累积水平。棕壤、褐土、潮土的重金属平均累积指数依次增大,草甸土、灰色森林土和栗钙土重金属总体累积程度较低。土壤重金属总体累积程度在工矿用地、灌木林地中较高,其次为农用地,在林地和草地中相对最低。农用地表层土壤中Pb、Cd和Cu元素累积程度相对较高,平均累积指数分别为0.64、0.60和0.60。

(3)研究区表层土壤Ti、V、Co、Ni和Cr元素具强烈的空间相关性,同源性较高,与原生高地质背景密切相关。Cd、Pb、Zn和Mn、Cu、As空间结构以随机性变异为主,其污染累积受成土母岩和农业活动、矿业活动人为因素共同作用影响,表层土壤Hg元素累积则主要来源于人为活动。

参考文献:

- [1] 周启星,滕涌,展思辉,等. 土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 1-14.
Zhou Q X, Teng Y, Zhan S H, *et al.* Fundamental problems to be solved in research on soil-environmental criteria/standards [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 1-14.
- [2] Chen S B, Wang M, Li S S, *et al.* Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, **17**(4): 765-774.
- [3] 聂静茹,马友华,徐露露,等. 我国《土壤环境质量标准》中重金属污染相关问题探讨[J]. 农业资源与环境学报, 2013, **30**(6): 44-49.
Nie J R, Ma Y H, Xu L L, *et al.* Discussion about heavy metal pollution in soil environmental quality standard in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2013, **30**(6): 44-49.
- [4] 李敏,李琴,赵丽娜,等. 我国土壤环境保护标准体系优化研究与建议[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(12): 1799-1810.
Li M, Li Q, Zhao L N, *et al.* Optimizing the soil environmental protection standard system and suggestions [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(12): 1799-1810.
- [5] 伍福琳,陈丽,易廷辉,等. 重庆市农地重金属基线值的厘定及其累积特征分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5116-5126.
Wu F L, Chen L, Yi T H, *et al.* Determination of heavy metal baseline values and analysis of its accumulation characteristics in agricultural land in Chongqing [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5116-5126.
- [6] 卢新哲,谷安庆,张言午,等. 基于环境地球化学基线的农用地重金属累积特征及其潜在生态危害风险研究[J]. 土壤学报, 2019, **56**(2): 408-419.
Lu X Z, Gu A Q, Zhang Y W, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metal in agricultural soils based on the environmental geochemical baselines [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(2): 408-419.
- [7] 赵元艺,曾辉,徐友宁,等. 金属矿集区地球化学环境累积效应的理论与工作方法[J]. 地质通报, 2014, **33**(8): 1106-1113.
Zhao Y Y, Zeng H, Xu Y N, *et al.* Theory and work methods for the cumulative effects of environmental geochemistry in the metallic deposit cluster [J]. Geological Bulletin of China, 2014, **33**(8): 1106-1113.
- [8] Faust J C, Scheiber T, Fabian K, *et al.* Geochemical characterisation of northern Norwegian fjord surface sediments: a baseline for further paleo-environmental investigations [J]. Continental Shelf Research, 2017, **148**: 104-115.
- [9] 李艳,张薇薇,程永毅,等. 重庆紫色母岩及土壤As、Hg环境地球化学基线研究[J]. 土壤学报, 2017, **54**(4): 917-926.
Li Y, Zhang W W, Cheng Y Y, *et al.* Environmental geochemical baseline of As and Hg in purple soil and its parent rock in Chongqing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(4): 917-926.
- [10] 朱晓东,韦朝阳,杨芬. 包头-白云鄂博地区重金属基线值的厘定及其在重金属污染分级评价中的应用[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(2): 310-320.
Zhu X D, Wei C Y, Yang F. Determination of heavy metal baseline in Baotou and Bayan Obo and its application in the assessment of heavy metal contamination [J]. Journal of Natural Resources, 2016, **31**(2): 310-320.
- [11] 高杨,许东升,李琦. 宿州市表层土壤重金属元素环境地球化学基线研究[J]. 地球与环境, 2018, **46**(5): 444-450.
Gao Y, Xu D S, Li Q. A study on environmental geochemical baselines of heavy metals in the surficial soil of Suzhou [J]. Earth and Environment, 2018, **46**(5): 444-450.
- [12] Salminen R, Gregorauskiene V. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology [J]. Applied Geochemistry, 2000, **15**(5): 647-653.
- [13] Sultan K, Shazili N A. Distribution and geochemical baselines of major, minor and trace elements in tropical topsoils of the Terengganu River basin, Malaysia [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, **103**(2-3): 57-68.
- [14] 王学求,周建,徐善法,等. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 2016, **43**(5): 1469-1480.
Wang X Q, Zhou J, Xu S F, *et al.* China soil geochemical

- baselines networks; data characteristics[J]. *Geology in China*, 2016, **43**(5): 1469-1480.
- [15] Salminen R, Tarvainen T. The problem of defining geochemical baselines. a case study of selected elements and geological materials in Finland [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, **60**(1): 91-98.
- [16] 王济, 王世杰, 欧阳自远. 贵阳市表层土壤中镉的环境地球化学基线研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1344-1348.
Wang J, Wang S J, Ouyang Z Y. Geogenic distribution and baseline concentrations of cadmium in surficial soil of Guiyang, China [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1344-1348.
- [17] 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 等. 伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2392-2400.
Zhao X R, Nasier T, Cheng Y Y, *et al.* Environmental geochemical baseline of heavy metals in soils of the Ili River Basin and pollution evaluation [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2392-2400.
- [18] 李超, 杜哲, 陈亚恒, 等. 环京津地区土地生态服务价值时空分异特征[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(1): 42-47.
Li C, Du Z, Chen Y H, *et al.* Spatio-temporal differentiation of land ecosystem service value in the surrounding regions of Beijing and Tianjin [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(1): 42-47.
- [19] Yu C J, Li H Q, Jia X P, *et al.* Improving resource utilization efficiency in China's mineral resource-based cities: a case study of Chengde, Hebei province [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, **94**: 1-10.
- [20] Liu J Q, Yin P, Chen B, *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of the Luanhe River Estuary, northwest of the Bohai Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **109**(1): 633-639.
- [21] 滕彦国, 矫旭东, 左锐, 等. 攀枝花矿区表层土壤中钒的环境地球化学研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(2): 278-283.
Teng Y G, Jiao X D, Zuo R, *et al.* Environmental geochemistry of vanadium in topsoil in Panzhihua Mining Area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, **37**(2): 278-283.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境损害鉴定评估技术指南 土壤与地下水[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018. 11-22.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for identification and assessment of eco-environmental damage soil and groundwater [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2018. 11-22.
- [23] 滕彦国, 倪师军, 庾先国, 等. 应用标准化方法评价攀枝花地区表层土壤的重金属污染[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(3): 374-379.
Teng Y G, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Application of a normalization procedure in assessing heavy metal pollution in topsoil, Panzhihua Region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(3): 374-379.
- [24] Guillén M T, Delgado J, Albanese S, *et al.* Environmental geochemical mapping of Huelva municipality soils (SW Spain) as a tool to determine background and baseline values [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **109**(1-3): 59-69.
- [25] Islam M S, Hossain M B, Matin A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2018, **202**: 25-32.
- [26] 范凯, 韦朝阳, 杨晓松. 长沙市乔口镇土壤重金属地球化学基线值的厘定及应用[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3076-3083.
Fan K, Wei C Y, Yang X S. Geochemical baseline of heavy metals in the soils of Qiaokou town, Changsha city and its application [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3076-3083.
- [27] 章海波, 骆永明. 区域尺度土壤环境地球化学基线估算方法及其应用研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1607-1613.
Zhang H B, Luo Y M. Researches on the estimate methods and applications of soil environmental geochemical baseline at a regional scale [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1607-1613.
- [28] Bauer I, Bor J. Lithogene, geogene und anthropogene schwermetallgehalte von lößböden an den beispielen von Cu, Zn, Ni, Pb, Hg und Cd [J]. *Mainzer Geowiss Mitt*, 1995, **24**: 47-70.
- [29] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [30] 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.
- [31] 杨伟光, 王美娥, 陈卫平. 新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 445-452.
Yang W G, Wang M E, Chen W P. Effect of a mining and smelting plant on the accumulation of heavy metals in soils in arid areas in Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 445-452.
- [32] Cao X L, Diao M H, Zhang B G, *et al.* Spatial distribution of vanadium and microbial community responses in surface soil of Panzhihua mining and smelting area, China [J]. *Chemosphere*, 2017, **183**: 9-17.
- [33] 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 等. 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2875-2883.
Zheng J Z, Wang C D, Wang S H, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in Lin'an city and its potential risk evaluation [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2875-2883.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)