

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

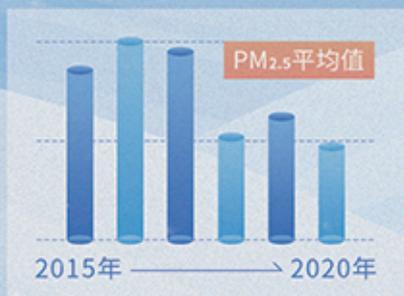
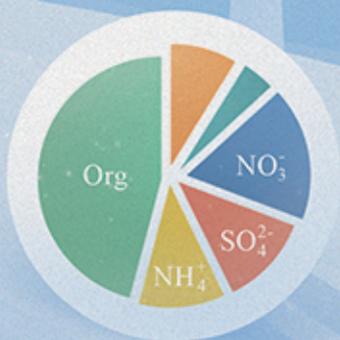
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM_{2.5} 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析..... 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响..... 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价..... 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源..... 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估..... 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征..... 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子..... 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价..... 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例..... 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算..... 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响..... 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源..... 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价..... 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策..... 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例..... 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析..... 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N₂O)排放特征及潜在驱动因素..... 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价..... 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果..... 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素..... 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价..... 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征..... 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素..... 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法..... 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估..... 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测..... 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险..... 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性..... 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力..... 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力..... 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响..... 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响..... 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响..... 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系..... 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响..... 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响..... 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响..... 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子..... 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较..... 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素..... 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响..... 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响..... 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响..... 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响..... 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比..... 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素

王莹^{1,2}, 刘海燕², 王泽晶^{2*}, 张晓东², 王登红³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 宁夏回族自治区基础地质调查院, 银川 750021; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 石嘴山市是典型的枯竭型资源城市, 为发展富硒农产品种植业和促进城市绿色可持续发展转型, 在石嘴山市开展富硒土壤调查。采集农用地中7 399个表层(0~20 cm)土壤样、30个大气沉降样和9个成土母岩样, 运用GS⁺、ArcGIS和SPSS软件通过构建半方差变异函数模型、普通克里金插值、统计学的相关分析和均值分析等方法对土壤硒(Se)的含量、空间分布和富集因素进行分析, 对碱性土壤区Se的富集特征进行探索归纳。结果表明, 石嘴山市农用地表层土壤 $\omega(\text{Se})$ 为(0.26 ± 0.12) mg·kg⁻¹, 空间分布自相关性极强, Se含量变化与自然因素相关, 离贺兰山山前煤矿聚集地近者Se含量较高; 成土母质是控制土壤Se富集的首要因素, 土壤理化性质如有机质、pH和铁锰氧化物等均对Se在表生环境中富集有一定影响; 相比强碱性环境, 碱性条件更利于Se的富集。

关键词: 土壤硒; 特征; 富集因素; 碱性土壤; 石嘴山

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4179-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109180

Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia

WANG Ying^{1,2}, LIU Hai-yan², WANG Ze-jing^{2*}, ZHANG Xiao-dong², WANG Deng-hong³

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. Ningxia Institute of Elementary Geological Survey, Yinchuan 750021, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Shizuishan is a typical exhausted resources-based city in the northern area of the Ningxia Hui autonomous region in China. In order to develop the planting industry of selenium (Se)-rich agricultural products and promote green and sustainable urban development and transformation, investigations on the quality of Se-rich land were carried out in Shizuishan City, where 7 399 surface soil (0-20 cm) samples of farmlands, 30 atmospheric precipitation samples, and nine parent rocks were collected. By means of semi variogram model construction by GS⁺, Kriging interpolation in ArcGIS and statistics via SPSS, such as correlation analysis and mean-value analysis, the content, spatial distribution, and enrichment factors of Se-soil were analyzed. Further, the enrichment characteristics of soil Se in alkaline conditions were summarized. The results indicated that $\omega(\text{Se})$ in surface soil was (0.26 ± 0.12) mg·kg⁻¹, and its spatial distribution was highly auto-correlated. The variation in Se content was related to natural factors. Along Helan Mountain, the content of Se in the surface soil was comparatively higher than that where coal mines were located. The parent rock was the principal factor that controlled the enrichment of soil Se. The physical and chemical properties of soil such as organic material, pH, and iron and manganese oxides had crucial effects on the enrichment of soil Se in a surficial environment. Compared to a strong alkaline environment, alkaline conditions were beneficial for the enrichment of Se in the surface soil.

Key words: soil-Se; characteristics; enrichment factors; alkaline soil; Shizuishan City

硒(Se)是人类和动物必需的微量元素,但只有在适当的微克剂量下才能在提高人体免疫力、预防和降低癌症发病率和地方病等方面有重要的功效,其丰缺都会引发各类疾病从而影响人类健康^[1-3]。而人体所需要的Se主要通过食物链从土壤获取,土壤Se是人类摄取Se的最终来源^[4,5]。因此,研究土壤中Se的丰缺、空间分布和富集因素,不仅事关人体健康,而且对天然富Se食品所依赖的富Se土壤进行更准确地评价和更有效的长期开发利用具有重要的意义。

地质高背景下富Se成土母质导致的Se富集、表生地球化学作用引起的Se次生富集和人为活动致使外源Se叠加是土壤Se富集的三大主因,但通常是这三者此消彼长共同作用的结果^[6-9]。地质高背景主导的成因类型最为多见,成土母质多以富有机质黑色岩系、煤及煤系地层等为主^[10],如“世界硒都”湖北恩施、陕西紫阳和安徽宁国县^[11-13]; Se

次生富集主导的成因类型中,表生环境如气候、地形和地貌等地理特征以及有机质和pH等土壤理化性质对Se富集有关键性的作用^[14-19],这在风化淋滤作用较强的南方潮湿土壤中较为常见,如广西、贵州和江苏等^[20-24];人为活动导致外源Se叠加主导的成因类型中,多以燃煤和工矿企业气体排放致使大气降尘富Se从而导致土壤富Se,如石家庄藁城区和天津蓟州区^[25,26]。

随着文献[27,28]的实施,揭示银川平原贺兰山山前地带大面积的富Se土壤分布^[29]。而宁夏地区仅文献[30,31]提出青铜峡和中宁土壤Se的分布和含量主要受土壤理化性质如pH、铁锰氧化物和有机质等影响,石嘴山市作为宁夏唯一持有国

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2021-12-16

基金项目: 宁夏第二批青年人才托举工程项目

作者简介: 王莹(1986~),女,博士研究生,工程师,主要研究方向为土壤地球化学, E-mail: wangying_win@163.com

* 通信作者, E-mail: 44195606@qq.com

家首批天然富硒土地认定的城市,却仍未有土壤 Se 富集因素的研究.同时,石嘴山属于因煤而建、因煤而兴又因煤而困的典型枯竭型资源老工业城市,土壤 Se 的研究对富 Se 农作物的培育乃至促进功能农业的推广、推进老工业城市和资源型城市产业转型示范区建设都有重要意义.基于此,本文通过 GS⁺ 构建半方差变异函数模型、ArcGIS 进行普通克里金插值和 SPSS 实现统计学的相关分析和均值分析等,对石嘴山市土壤 Se 的地球化学特征及富集因素进行深入研究.

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

石嘴山市位于宁夏北部,东临鄂尔多斯台地,

西踞银川平原北部,与首府银川相距 80 km(图 1);地处西北内陆,属典型的中温带大陆干旱性气候,年均气温 8.4~9.9℃,年均降水量在 167.5~188.8 mm,年蒸发量 1 708.7~2 512.7 mm,冬季风力强、盛行西北风而夏季风力较弱,土地荒漠化、盐渍化和水资源严重缺乏导致生态环境恶劣.石嘴山市矿产资源分布广、储量大,主要矿种有煤炭、硅石和黏土等,还有铁、铜等小型矿床产出.农业人口人均占有耕地面积居宁夏灌区首位,主要农作物以玉米、小麦、稻谷和枸杞等为主,目前正处于由工业向农业转型的起步阶段.研究区位于石嘴山市境内(图 1),总面积 1 050 km²,以农用地为主,东依黄河、西靠贺兰山,地势西高东低相对平坦.

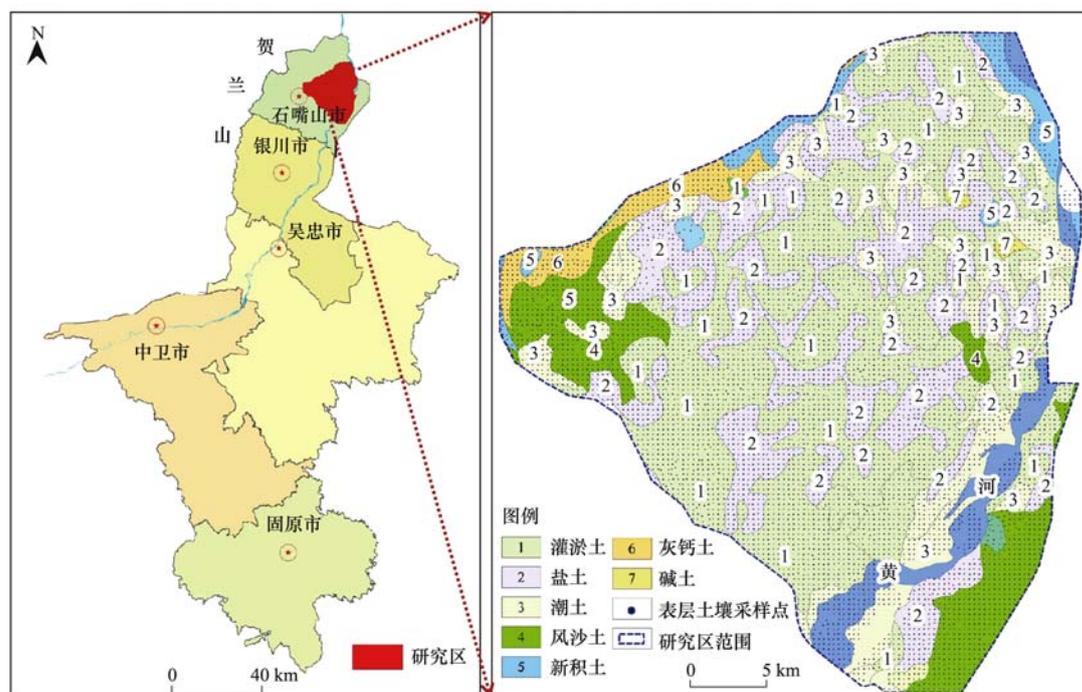


图 1 研究区位置及取样点位

Fig. 1 Location of research area and sample sites

1.2 样品采集与分析

样品采集严格执行《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016),采集石炭系岩石样 9 件;如图 2 所示,采用 9 件·km⁻² 网格布点法,采集深度 0~20 cm 土壤农用地样品 7 399 件;采集大气干沉降样品 30 件.

样品测试分析严格执行《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258-2014),均由湖北省地质试验测试中心完成,样品分析项目及其分析方法、检出限见表 1,其中土壤样品选用 6 个国家一级标准物质(GBW07407、GBW07447、GBW07449、

GBW07451-53、GBW07455 和 GBW07431-35) 监控准确度;因缺乏大气干沉降物样品匹配的质量控制样品,实际分析选择国家一级土壤成分分析标准物质 GBW07409 和 GBW07431 监控,因此与土壤样品分析方法和检出限相同.

土壤 Se 形态的测试严格执行《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD 2005-03),由湖北省地质试验测试中心完成,采用七部浸提法使用 AFS 完成,先后析出水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰结合态、强有机结合态和残渣态,选用国家形态一级标准物质

表 1 样品分析项目及其测试方法和检出限¹⁾

Table 1 Analyzed items and its testing method and detection limits of samples

项目	样品类型	分析方法	检出限
$\omega(\text{Se})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	岩石、土壤和大气干沉降物	AFS	0.01
$\omega(\text{有机质})/\%$	土壤	VOL	0.02
$\omega(\text{Mn})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		ICP-OES	5
$\omega(\text{As})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		AFS	0.2
$\omega(\text{Cr})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤和大气干沉降物	ICP-OES	1.5
$\omega(\text{Ni})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		ICP-OES	0.2
$\omega(\text{Cu})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		ICP-MS	0.1
pH		ISE	0.01
$\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	土壤	ICP-OES	0.02
$\omega(\text{S})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		HFIR	15
$\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		ICP-MS	0.02
$\omega(\text{Hg})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤和大气干沉降物	AFS	0.000 5
$\omega(\text{Pb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		ICP-MS	0.02
$\omega(\text{Zn})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		ICP-MS	1

1) AFS: 原子荧光光谱法; ISE: 离子选择性电极法; VOL: 容量法; ICP-OES: 电感耦合等离子体原子发射光谱; HFIR: 高频燃烧红外吸收法; ICP-MS: 电感耦合等离子体质谱法

GBW07442 控制测试结果的准确度。

1.3 数据处理与分析

采用 IBM SPSS Statistics23 进行数据描述性统计和数据分析,使用方案如图 2 所示,原始异常数据用平均值 ± 3 倍离差替代;所有数据使用 P-P 图结合带正态曲线的直方图进行正态性检验,均大致符合正态分布,元素含量用平均值 \pm 标准差描述. 以 GS⁺ 软件建立的半方差变异函数模型为基础,使用 ArcGIS10.2 软件进行普通克里金空间插值制作形成石嘴山市土壤 Se 含量等级的空间分布图. 使用 Origin2021 绘制其他相关图件.

2 结果与讨论

2.1 表层土壤理化特征

7 399 件表层土壤理化指标统计结果见表 2, 参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016) 土壤单指标地球化学标准分级, 研究区表层土壤理化特征为: 呈碱性; 有机质较缺乏、分布较

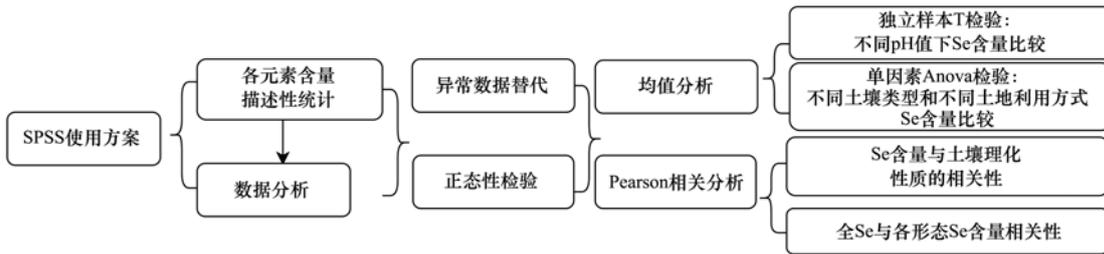


图 2 SPSS 使用方案

Fig. 2 Usage scenario of SPSS

表 2 研究区表层土壤主要理化参数 ($n=7\ 399$)

Table 2 Main physical and chemical parameters in the surface soil in study area ($n=7\ 399$)

项目	平均值 ¹⁾	标准差	变幅	变异系数 ²⁾	银川盆地背景值 ^[28]	全国表层土壤基准值 ^[32]
pH	8.56	—	7.65 ~ 10.39	0.04	—	8
$\omega(\text{有机质})/\%$	1.51	0.67	0.06 ~ 9.06	0.44	0.74	—
$\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	4.21	0.73	0.03 ~ 6.51	0.17	3.35	4.2
$\omega(\text{Mn})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	800.72	124.98	4.69 ~ 2 725.8	0.16	472.53	569
$\omega(\text{S})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	918.46	2 424.75	34.58 ~ 28 922	2.64	267.66	245
$\omega(\text{As})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	12.18	10.68	3.15 ~ 893.90	0.88	9.46	9
$\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.19	0.06	0.04 ~ 0.70	0.31	0.13	0.137
$\omega(\text{Cr})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	60.91	11.73	2.86 ~ 92.48	0.19	54.13	53
$\omega(\text{Hg})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.032	0.024	0.002 ~ 1.029	0.77	0.024	0.026
$\omega(\text{Ni})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	29.85	6.39	8.87 ~ 46.70	0.21	23.25	24
$\omega(\text{Pb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	21.62	3.50	11.44 ~ 84.01	0.16	18.28	22
$\omega(\text{Cu})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	22.65	4.91	7.44 ~ 49.08	0.21	17.60	20
$\omega(\text{Zn})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	65.81	14.19	0.91 ~ 138.60	0.22	48.83	66

1) pH 为氢离子活度的负对数, 用中位数表征, 其余均为算数平均值; 2) 变异系数: 反映数据离散程度的绝对值, 无量纲, 下同

均匀; 全铁中等、分布基本均匀; 锰丰富、分布基本均匀; 全硫很丰富、但分布不均匀、高值突变点主要分布在简泉农场—燕子墩一带; 相较银川平原, 有机质和铁锰氧化物较富集, 硫富集程度较高。

对研究区土壤重金属含量统计(表 2), 认为土壤中 As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、Cu 和 Zn 总体上未超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 中土壤污染风险筛选值 ($\text{pH} >$

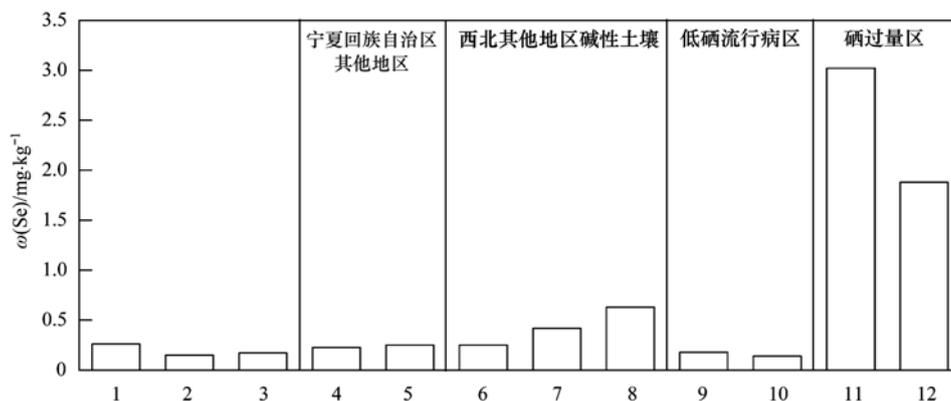
7.5), 较为富集且分布较均匀, 仅 As 和 Hg 因存在部分高值点而变异系数较高, 但经重复采样复核并未超标.

2.2 表层土壤 Se 的特征

2.2.1 土壤 Se 的含量特征和空间分布

表层土壤 Se 含量可衡量土壤中 Se 的储量和供

应能力. 研究区 $\omega(\text{Se})$ 为 $(0.26 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化范围为 $0.018 \sim 1.804 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Se 含量均值高于银川盆地 Se 含量背景值^[28], 高于全国表层土壤 Se 含量背景基准值^[32]; 高于宁夏中宁和青铜峡^[30,31]; 基本低于其他西北碱性土壤^[33~35]; 高于缺 Se 引起的地方病区^[36,37]; 远低于 Se 过量区^[11,12] (图 3).



1. 石嘴山市; 2. 银川平原; 3. 全国土壤基准值; 4. 宁夏青铜峡; 5. 宁夏中宁长山头; 6. 青海平安; 7. 青海囊谦; 8. 新疆乌沙; 9. 张家口克山病区; 10. 四川阿坝大骨节病区; 11. 陕西紫阳双安硒中毒区; 12. 湖北恩施沙地富硒区

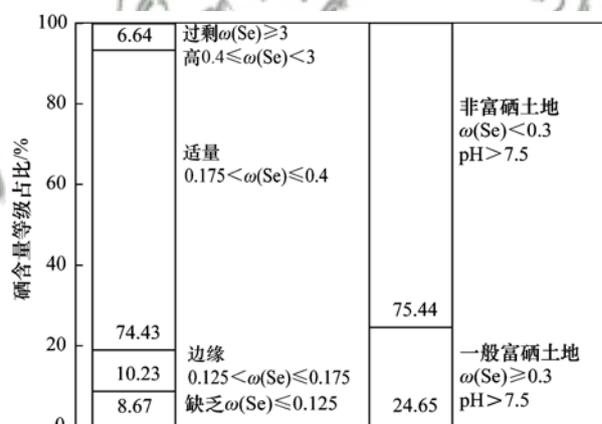
图 3 石嘴山市表层土壤 Se 含量均值与其他地区比较

Fig. 3 Comparison of the mean value of Se content in surface soils between Shizuishan City and other regions

参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)和《天然富硒土地划定与标识(试行)》(DD 2019-10)分别对研究区进行 Se 含量等级划分, 各个等级所占比例如图 4 所示. 结合以上富硒标准阈值, 利用半变异函数模型和普通克里金插值绘制出表层土壤 Se 含量的空间分布(图 5), 可以看出: 惠农区沟口-简泉农场-燕子墩一带、平罗县高庄-黄渠桥镇一带和渠口-头闸镇一带等地区 Se 含量高, 而此地恰离宁夏北部煤矿聚集地较近; Se 含量从贺兰山山前地区向北呈阶梯性逐渐下降. 而且半变异函数模型确定的块金系数小于 0.25, Se 含量空间自相关性极强, 其变异性主要与自然因素有关, 人为活动性外源输入对 Se 的富集贡献不大^[38].

2.2.2 不同土壤类型 Se 的含量特征

土壤类型不同, 其成因、组分和理化性质均不同; 即使同一土壤类型, 其性质千差万别, 进而导致 Se 的分布不同. 如图 1 所示, 研究区土壤类型按分布面积依次为: 灌淤土、盐土、潮土、风沙土、新积土、灰钙土和碱土, 其中前三类占研究区面积的 81.8%、取样占比 86.2%. 对不同类型土壤 Se 含量进行统计(表 3), 并进行方差分析表明: 土壤类型对 Se 含量有显著性影响 ($F = 17.55, P < 0.05$); 选用塔姆黑尼 (T2) 进行两两事后比较, 灰钙土和碱土 Se 含量均值分别位居最大和最小, 均与其他类型 Se 含量有显著性差异 ($P < 0.05$), 分布广泛的灌淤土、



《土地质量地球化学评价规范》《天然富硒土地划定与标识(试行)》(DZ/T 0295-2016) (DD 2019-10)

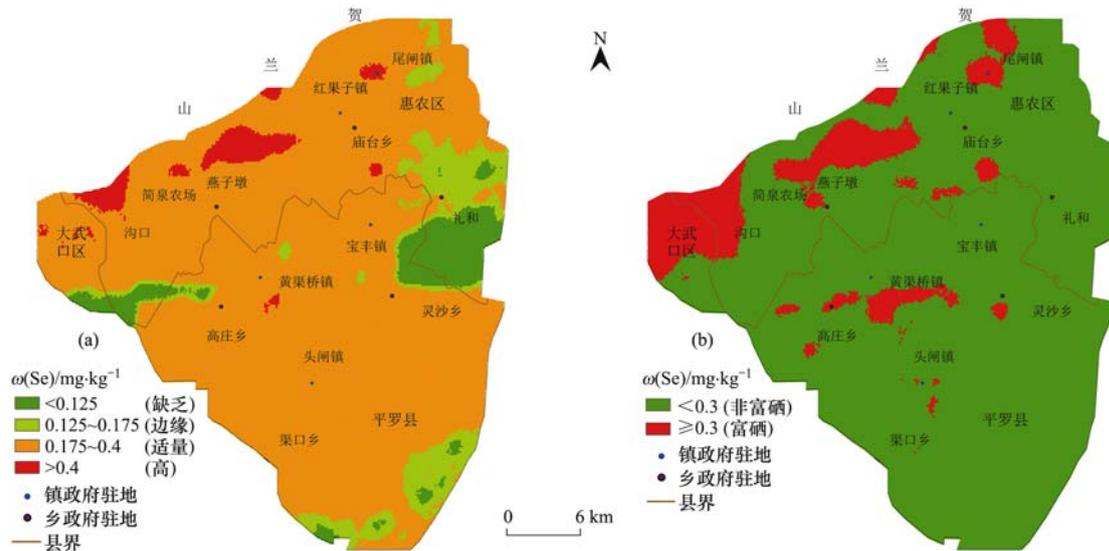
图 4 样品中 Se 含量占比及等级划分 ($n = 7399$)

Fig. 4 Proportion and grade of Se content in samples ($n = 7399$)

盐土和潮土中 Se 的含量并无显著性差异 ($P > 0.05$).

2.2.3 不同土地利用方式下 Se 的含量特征

人类主要通过土地利用影响土壤环境, 不同的土地利用方式对土壤理化性质影响显著, 进而影响土壤中 Se 的环境行为特征^[39]. 研究区内农用地按土地利用方式分布面积依次为: 耕地、林地和牧草地, 其中耕地占研究区农用地面积的 79.32%, 林地和牧草地占 10.54%. 对不同利用方式下土壤 Se 含量统计(表 4), 并进行单因素 ANOVA 方差分析表明: 土地利用方式对土壤表层 Se 含量有显著性影响 ($F = 7.41, P < 0.05$); 选用塔姆黑尼 (T2) 进行两



(a)参照 DZ/T 0295-2016 Se 含量等级划分; (b)参照 DD 2019-10 Se 含量等级划分

图 5 石嘴山市表层土壤 Se 元素含量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution map of Se in surface soils in Shizuishan City

表 3 不同类型土壤表层 Se 含量

Table 3 Content of Se in surface soils of different geotype

土壤类型	样品数	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变幅/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数
灌淤土	3 397	0.26	0.11	0.02 ~ 1.80	0.41
盐土	1 816	0.27	0.13	0.02 ~ 1.29	0.49
潮土	1 163	0.24	0.12	0.02 ~ 1.06	0.49
风沙土	755	0.26	0.12	0.03 ~ 1.11	0.49
新积土	154	0.27	0.17	0.06 ~ 1.20	0.63
灰钙土	91	0.38	0.15	0.13 ~ 0.87	0.38
碱土	23	0.18	0.05	0.09 ~ 0.33	0.29
研究区	7 399	0.26	0.12	0.02 ~ 1.80	0.46

表 4 不同利用方式土壤表层 Se 含量

Table 4 Content of Se in surface soils of different use conditions

土地利用类型	样品数	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变幅/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数
耕地	6 252	0.26	0.11	0.02 ~ 1.8	0.44
林地	286	0.28	0.16	0.02 ~ 1.2	0.56
牧草地	861	0.25	0.13	0.02 ~ 1.24	0.52
研究区	7 399	0.26	0.12	0.02 ~ 1.80	0.46

两事后比较,耕地和林地、牧草地并无显著差异($P > 0.05$),这与四川沐川县提出的林地中 Se 平均含量显著高于耕地的结果不同^[40]。

2.2.4 土壤 Se 的形态特征

通过对石嘴山市表层土壤中各形态 Se 含量统计发现(表 5),Se 的赋存形式以残渣态和有机态(强有机态和腐殖酸结合态加和)为主、在全 Se 中占比均值达 84.3%,铁锰结合态占比均值仅为 2.4%。通过对全 Se 含量与各形态 Se 含量进行相关性分析得出(图 6),全 Se 含量与残渣态、强有机结合态、腐殖酸结合态和铁锰结合态 Se 成显著正相关,随着残渣态、强有机结合态和腐殖酸结合态 Se

表 5 土壤中不同形态 Se 含量在全 Se 含量中占比¹⁾/%

Table 5 Proportion of different morphologicals

in the total Se of soil-Se/%

形态	平均值	标准差	最小值	最大值
水溶态	5.40	2.20	3.40	12.50
离子交换态	5.30	1.60	3.70	9.70
碳酸盐结合态	2.60	0.70	1.90	4.60
铁锰结合态	2.40	0.60	1.60	4.20
腐殖酸结合态	11.20	3.90	1.60	15.40
强有机结合态	23.00	6.00	12.70	29.80
残渣态	50.10	8.20	42.00	69.60

1)在涉及 Se 的形态时,土壤 Se 用全 Se 代替,表示土壤中各种形态 Se 之和

含量的增加而增加. 这与恩施建始县以有机 Se 为首要占比不同^[15], 与青海东部土壤 Se 形态特征基本一致^[41].

2.3 土壤 Se 的富集因素

结合研究区实际, 土壤 Se 的富集因素是: 在不考虑输出的情况下, 土壤 Se 的“最终含量”是在成土母质 Se“初始含量”自然背景下, 随着地理环境和土壤性质等因素的持续影响, 表生环境中的 Se 元素的迁移循环, 同时累加人为活动外源 Se 的输入, 即成土母质、土壤表生作用和外源输入三者此消彼长下 Se 的净累积.

2.3.1 成土母质

成土母质是土壤形成的物质基础, 是制约土壤中元素含量的重要因素. 土壤中 Se 的含量主要受成

土母质控制, 富 Se 母质的风化淋滤是土壤 Se 富集的重要因素^[11-13].

石嘴山市 Se 的来源主要与贺兰山北部煤系地层有关^[29], 采集石炭系煤系地层样品 9 件, 对比测试结果发现(表 6): 碳质页岩 $\omega(\text{Se})$ 均值达 $1.192 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 这与陕西紫阳富 Se 区富 Se 岩石以石煤、碳质板岩和钙质板岩等为主类似^[12]. 在石嘴山成煤环境研究中亦发现石炭-二叠系煤中的轻富集^[42], 这也印证了岩石 Se 含量很大程度受岩性和岩石沉积层位控制. 研究区富 Se 土壤分布与贺兰山山前石嘴山煤田聚集地耦合较好, 土壤 Se 对成土母质有很好的继承性, 与成煤作用相关的黑色岩系有关, 相关程度和具体岩系层位还需进一步采样确定.

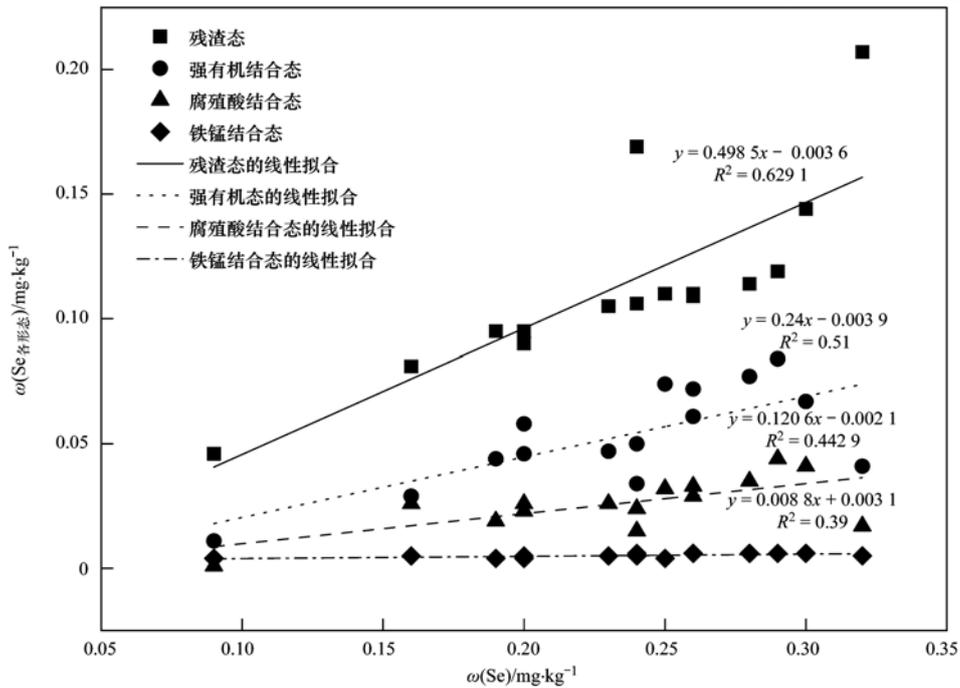


图 6 土壤中全 Se 与各形态 Se 含量的相关关系

Fig. 6 Correlation between total Se and different morphological Se

表 6 岩石样品中 Se 的含量及其他特征

Table 6 Content of Se and other characters of rock samples

样品编号	地层	岩性	$\omega(\text{Se})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	长城系黄旗口组(Pt_2^{h})	水系沉积物, 石英砂岩	0.535
2	石炭系太原组($\text{C}_2\text{P}_1\text{t}$)	页岩、砂岩和碳质页岩	1.594
3	石炭系太原组($\text{C}_2\text{P}_1\text{t}$)	页岩、砂岩和碳质页岩	0.587
4	石炭系太原组($\text{C}_2\text{P}_1\text{t}$)	煤层	0.737
5	石炭系羊虎沟组(C_2y)	页岩、砂岩和碳质页岩	1.62
6	石炭系羊虎沟组(C_2y)	煤和炭质页岩	1.439
7	石炭系羊虎沟组(C_2y)	页岩和残坡积物	0.953
8	石炭系靖远组(C_2j)	炭质页岩和砂岩	2.055
9	石炭系靖远组(C_2j)	炭质页岩和煤线	1.209
平均值			1.192
表层土壤平均值			0.26

2.3.2 外源 Se 输入

(1) 大气干湿沉降物 在 Se 生物地球化学循环中, 大气中 Se 沉降进入土壤是 Se 的又一重要来源^[17,26]. 已有研究表明, 欧洲沿海国家和我国东南沿海地带土壤中 Se 含量和分布与降水量呈显著正相关, 亚热带季风气候造成的湿沉降是该类地区土壤高 Se 的重要来源^[17]. 而一些干旱气候地区, 虽降水量少但因人类燃煤、油和工业化进程以及邻近沙漠等因素导致大气干沉降物中富 Se^[25,26], 进而导致表层土壤富 Se. 石嘴山属大陆性干旱气候, 年蒸发量远大于年降水量, 是曾以能源化工为支柱产业的老工业城市, 大气干沉降物的输入可能会是 Se 的重要来源. 对研究区大气干沉降物中 Se 和重金属含量统计(表 7) 得到, 大气干沉降中 $\omega(\text{Se})$ 平均值为 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 输入通量为 $0.074 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 远低于河北石家庄藁城和天津蓟州区^[25,26], 大气干沉降并非研究区土壤 Se 和重金属富集的主要贡献者.

表 7 研究区大气干沉降物中 Se 和重金属的含量 ($n=30$)

Table 7 Content of Se and heavy metals in the atmospheric dry deposition of research area ($n=30$)

项目	变幅 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数
$\omega(\text{Se})$	0.14 ~ 1.97	0.70	0.37	0.53
$\omega(\text{Cr})$	15.40 ~ 67.86	30.41	9.54	0.31
$\omega(\text{Cd})$	0.36 ~ 2.47	0.80	0.41	0.51
$\omega(\text{Pb})$	17.40 ~ 204.40	44.99	34.30	0.76
$\omega(\text{As})$	3.99 ~ 12.74	7.22	2.15	0.30
$\omega(\text{Hg})$	0.01 ~ 0.12	0.05	0.03	0.58

(2) 灌溉水和施肥 研究区农业灌溉以引黄自流灌溉为主, 仅局部辅以净水灌溉, 这使得该区灌溉

表 8 不同 pH 值下表层土壤的理化性质

Table 8 Physical and chemical properties in surface soil under different pH values

类别	样品数	pH	$\omega(\text{有机质})$ /%	$\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ /%	$\omega(\text{Mn})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{Se})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
碱性 pH ≤ 8.5	2 946	8.34 ± 0.12	1.81 ± 0.61	4.47 ± 0.52	642.63 ± 100.19	0.29 ± 0.13
强碱性 pH > 8.5	4 453	8.77 ± 0.27	1.31 ± 0.63	4.04 ± 0.79	573.20 ± 131.60	0.24 ± 0.10

(2) 有机质 有机质通过两种途径影响 Se 在土壤中的积累, 一是有机质本身含有有机硒, 二是有机质对 Se 具有强烈的吸附与固定作用, 使 Se 能够与腐殖质结合的形式存在. 研究区表层土壤 $\omega(\text{有机质})$ 为 $(1.51 \pm 0.77)\%$, 与 Se 含量呈显著性线性正相关 [$R^2 = 0.408, P < 0.05$, 图 7(d)], Se 含量随着有机质含量的增加而增加, 这可能是由于有机质增加的情况下, 有机质本身含有的有机硒含量提高, 加上土壤微生物活性提高, 加强了对 Se 的固定和吸附; 再者由于研究区地处西北干旱区, 降雨量少, 最终导致土壤中积聚的 Se 远高于淋溶的 Se. 这与江

土广泛分布. 据文献[27,28]得知, 地下水样品中 Se 含量均低于检测限以下. 调研农户施肥情况, 施肥以尿素和二胺等富含 N、P 和不含 Se 的无机肥为主, 这也使得研究区全 N 和全 P 含量分布与耕作程度高地区相对应. 因此, 灌溉水和施肥对研究 Se 的富集贡献较小.

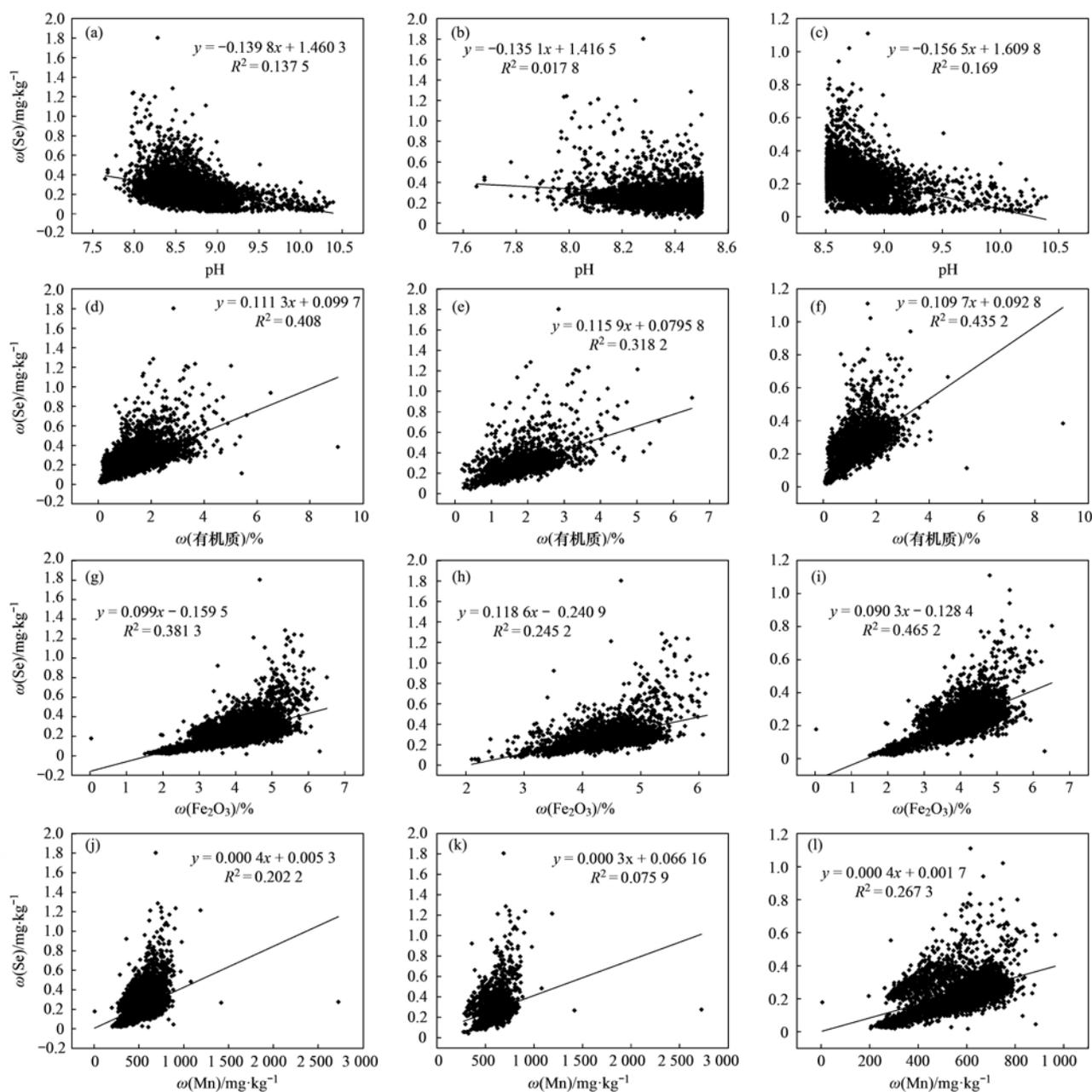
2.3.3 土壤理化性质

(1) 酸碱性(pH) pH 通过控制 Se 与土壤组分的吸附和解吸作用进而影响 Se 的形态和有效性^[43]. 研究区 pH > 8.5 的强碱性样品占 60.18%, pH 与 Se 含量呈显著线性负相关 [$R^2 = 0.1375, P < 0.05$, 图 7(a)], 碱性越强对表层 Se 富集有抑制作用. 这可能是因为碱性土壤中, Se 主要以极易溶于水的硒酸盐形式存在, 碱性越强 Se 的迁移淋滤作用较强, Se 更易淋失, 加上硒酸盐在植物中的主动吸收模式使其易被植物吸收, 双重因素作用下导致 Se 含量在碱性越强时降低. 这与谢薇等^[26]和周殷竹等^[33]的研究结果一致, 与杨忠芳等^[44]的研究结果相反.

对研究区土壤以 pH = 8.5 作为强碱性和碱性的界限进行分类统计(表 8), 并对不同碱性程度下各理化指标进行均值方差分析表明: 碱性强弱对理化性质有显著性影响 ($F = 19.82, P < 0.05$); 碱性条件下, 有机质、 TFe_2O_3 、Mn 和 Se 含量均较高, 有利于土壤 Se 的吸附、固定和富集; 强碱性条件下, 随着 pH 增加 Se 的甲基化增强、Se 在土壤中的迁移性增强^[10,38], 使土壤 Se 贫化, Se 的含量随 pH 升高显著降低[表 8、图 7(a)、7(b)和 7(c)]. 这与周殷竹等^[33]的调查结果相同.

苏、四川、贵州、广西和广东等地均表现出的有机质越丰富的土壤, 对 Se 的吸附能力越强, 土壤中 Se 含量越高的结论相一致^[20-23,38,40,45]. 相比强碱性条件, 碱性土壤有机质含量较高、Se 含量较高[图 7(d)、7(f)和 7(g)]. 结合研究区 Se 的形态分析结果(表 5 和图 6) 看出, 有机 Se 占全 Se 含量均值为 34.2%, 腐殖酸结合态 Se 和强有机结合态 Se 与全 Se 含量均呈显著正相关 ($R^2_{\text{腐殖酸结合态}} = 0.44, R^2_{\text{有机结合态}} = 0.51, P < 0.01$), 这从侧面进一步说明有机质对 Se 的积累有重要的影响作用.

(3) 铁锰氧化物 在富铁、锰的环境中, Se 容



(a)、(d)、(g)和(j)为研究区土壤理化指标与Se含量的相关关系；(b)、(e)、(h)和(k)为pH < 8.5时的相关关系；
(c)、(f)、(i)和(l)为pH ≥ 8.5时的相关关系

图7 Se与pH、有机质、TFe₂O₃和Mn的相关关系

Fig. 7 Correlation of Se with pH, organic matter, TFe₂O₃, and Mn

易与铁锰氧化物形成 $\text{Fe}_2(\text{OH})_4\text{SeO}_3$ 等难溶化合物而次生富集^[44]。图7(g)和7(j)显示,研究区土壤Se含量与 TFe_2O_3 ($R^2 = 0.38, P < 0.01$)和Mn ($R^2 = 0.2, P < 0.01$)含量显著正相关,铁锰氧化物对Se有较强的吸附力和亲和力。结合表5和图6看出,虽然铁锰结合态Se含量较低,仅占全Se含量的2.4%,但与全Se呈较显著的正相关($R^2 = 0.39, P < 0.01$)。图7显示,碱性条件下,铁锰氧化物含量更高,这与徐文坡等^[46]做出的随pH的增加、铁锰氧化物对Se的吸附率降低的结论一致。

(4) 重金属元素 形成富Se土壤的成土母

质——黑色岩系和煤系地层等以富集Mo、Ni、Co、As、Cd和Hg等重金属而显著区别于其他岩系^[6,8,45,47,48]。相关分析显示(表9):Se与As、Cd、Hg、Pb和Zn等呈显著的正相关,各重金属之间互呈显著的正相关,可以推断土壤Se与重金属具有相同的来源,均来自于成土母质,即土壤中Se和重金属均对成土母质有较好的继承性,二者呈现出较好的协同作用,重金属元素的增加将会随之带来更多的Se,这与湖北恩施、陕西紫阳和广西都安等高地质背景成因的富Se土壤同时富集重金属的特征一致^[11,12,20],与尹炳等^[49]在西南某矿业废弃地中提出

表 9 石嘴山地区表层土壤中 Se 与重金属元素的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 9 Pearson's correlation coefficient of Se and heavy metals in surface soil in Shizuishan City

	Se	Cd	Hg	Pb	Zn	Cr	Ni
As	0.060 **						
Cd	0.403 **						
Hg	0.270 **	0.430 **					
Pb	0.583 **	0.714 **	0.397 **				
Zn	0.559 **	0.765 **	0.411 **	0.829 **			
Cr	0.525 **	0.716 **	0.372 **	0.787 **	0.920 **		
Ni	0.423 **	0.758 **	0.368 **	0.823 **	0.875 **	0.898 **	
Cu	0.421 **	0.768 **	0.392 **	0.836 **	0.896 **	0.895 **	0.962 **

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著

的土壤中 Se 对重金属为拮抗效应相反。

3 结论

(1)石嘴山市农用地表层土壤 $\omega(\text{Se})$ 为 $(0.26 \pm 0.12) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Se 空间分布变异受自然因素控制,赋存形态以残渣态、有机结合态和腐殖酸结合态为主。研究区重金属含量低于土壤污染风险筛选值,沟口-简泉农场-燕子墩一带可作为下一步天然富硒作物培育重点选区。

(2)不同土壤类型、土地利用方式对表层土壤 Se 含量有显著性影响。分布较广的灌淤土和盐土中 Se 含量并无显著性差异;耕地与林地、牧草地中 Se 含量并无显著性差异。

(3)石嘴山市表层土壤 Se 的富集是多因素此消彼长共同作用所致,主要受煤系地层等成土母质的自然背景控制,大气沉降、灌溉水和施肥等人为外源 Se 对土壤中 Se 富集影响较小;土壤理化指标如有机质和铁锰氧化物含量的增加促进 Se 的富集,而 pH 升高使 Se 易于流失。土壤 Se 富集各因素的贡献率为:成土母质 > 有机质 > pH > 铁锰氧化物。

(4)相比强碱性土壤,碱性土壤中有有机质、铁锰氧化物含量较高有利于 Se 的富集。

参考文献:

- [1] Wang Q, Zhan S, Han F, *et al.* The possible Mechanism of physiological adaptation to the low-Se diet and its health risk in the traditional endemic areas of Keshan diseases[J]. *Biological Trace Element Research*, 2021, doi: 10.1007/s12011-021-02851-7.
- [2] Al-Mubarak A A, van der Meer P, Bomer N. Selenium, selenoproteins, and heart failure; current knowledge and future perspective[J]. *Current Heart Failure Reports*, 2021, **18**(3): 122-131.
- [3] 梁飘飘,周珊珊,幸韵欣,等. ICP-AES 和 AFS 法对内蒙古低硒地区 156 名育龄妇女头发中微量元素的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, **39**(7): 2217-2222.
- Liang P P, Zhou S S, Xing Y X, *et al.* Quantification of trace elements in hair Samples from 156 women living in the low-selenium region of Inner Mongolia by ICP-AES and AFS[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, **39**(7): 2217-2222.
- [4] 杨忠芳,汤奇峰,成杭新,等. 爱恨交织的化学元素[M]. 北京:地质出版社,2019.
- [5] 王学求,柳青青,刘汉粮,等. 关键元素与生命健康:中国耕地缺硒吗?[J]. *地学前缘*, 2021, **28**(3): 412-423.
- Wang X Q, Liu Q Q, Liu H L, *et al.* Key elements and human health: is China's arable land selenium-deficient? [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(3): 412-423.
- [6] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. *岩矿测试*, 2020, **39**(3): 319-336.
- Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, **39**(3): 319-336.
- [7] 牛雪,何锦,庞雅婕,等. 三江平原西部土壤硒分布特征及其影响因素[J]. *物探与化探*, 2021, **45**(1): 223-229.
- Niu X, He J, Pang Y J, *et al.* Distribution feature of soil selenium in west Sanjiang plain and its influencing factors[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, **45**(1): 223-229.
- [8] Dinh D T, Cui Z W, Huang J, *et al.* Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review[J]. *Environment International*, 2018, **112**: 294-309.
- [9] Favorito J E, Grossl P R, Davis T Z, *et al.* Soil-plant-animal relationships and geochemistry of selenium in the western phosphate resource area (United States): a review [J]. *Chemosphere*, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128959.
- [10] Xiao K C, Lu L F, Tang J J, *et al.* Parent material modulates land use effects on soil selenium bioavailability in a selenium-enriched region of southwest China[J]. *Geoderma*, 2020, **376**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114554.
- [11] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2012.
- Guo Y. Geochemistry of selenium in Enshi area and experimental study of selenium-enriched crop cultivation[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2012.
- [12] 田欢. 典型富硒区岩石-土壤-植物中硒的赋存状态及环境行为研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2017.
- Tian H. The Occurrence state and speciation of selenium and its environmental behaviors in rock-soil-plant from typical high-Se areas[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2017.
- [13] 夏飞强,张祥,杨艳,等. 安徽省宁国市土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. *土壤*, 2021, **53**(3): 585-593.
- Xia F Q, Zhang X, Yang Y, *et al.* Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils and agricultural products in Ningguo City, Anhui Province[J]. *Soils*, 2021, **53**(3): 585-593.

- [14] do Nascimento C W A, da Silva F B V, de Brito Fabricio Neta A, *et al.* Geopedology-climate interactions govern the spatial distribution of selenium in soils; a case study in northeastern Brazil[J]. *Geoderma*, 2021, **399**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115119.
- [15] Lyu C H, Qin Y J, Zhao Z Q, *et al.* Characteristics of selenium enrichment and assessment of selenium bioavailability using the diffusive gradients in thin-films technique in seleniferous soils in Enshi, central China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116507.
- [16] 李海蓉, 杨林生, 谭见安, 等. 我国地理环境硒缺乏与健康研究进展[J]. *生物技术进展*, 2017, **7**(5): 381-386.
Li H R, Yang L S, Tan J A, *et al.* Progress on selenium deficiency in geographical environment and its health impacts in China[J]. *Current Biotechnology*, 2017, **7**(5): 381-386.
- [17] 孙国新, 李媛, 李刚, 等. 我国土壤低硒带的气候成因研究[J]. *生物技术进展*, 2017, **7**(5): 387-394.
Sun G X, Li Y, Li G, *et al.* Climatic causes of the selenium-deficient soil belt in China[J]. *Current Biotechnology*, 2017, **7**(5): 387-394.
- [18] Pisarek P, Bueno M, Thiry Y, *et al.* Selenium distribution in French forests; influence of environmental conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **774**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.144962.
- [19] Yang C M, Yao H, Wu Y J, *et al.* Status and risks of selenium deficiency in a traditional selenium-deficient area in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144103.
- [20] 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 等. 广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4897-4907.
Liu F, Yang K, Xu R T, *et al.* Selenium geochemical characteristics and influencing factors of paddy fields in Du'an County, Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4897-4907.
- [21] 息朝庄, 张鹏飞, 吴林锋, 等. 贵州省惠水县涟江大坝土壤硒分布特征及影响因素研究[J/OL]. *中国地质*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210301.1622.008.html>, 2021-09-16.
Xi C Z, Zhang P F, Wu L F, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of selenium in soil from Lianjiang Dam, Huishui County, Guizhou Province[J/OL]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210301.1622.008.html>, 2021-09-16.
- [22] 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 等. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源[J]. *中国地质*, 2020, **47**(6): 1813-1825.
Liao Q L, Cui X D, Huang S S, *et al.* Element geochemistry of selenium-enriched soil and its main sources in Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1813-1825.
- [23] 覃建勋, 付伟, 郑国东, 等. 广西岩溶区表层土壤硒元素分布特征与影响因素探究—以武鸣县为例[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(5): 1299-1310.
Tan J X, Fu W, Zheng G D, *et al.* Selenium distribution in surface soil layer of karst area of Guangxi and its affecting factors; a case study of Wuming County[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1299-1310.
- [24] Shao Y, Cai C F, Zhang H T, *et al.* Controlling factors of soil selenium distribution in a watershed in Se-enriched and longevity region of South China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(20): 20048-20056.
- [25] 赵燕, 栾文楼, 郭海全, 等. 河北省石家庄市藁城区富硒土壤特征、成因与生态环境健康评价[J]. *中国地质*, 2021, **48**(3): 764-776.
Zhao Y, Luan W L, Guo H Q, *et al.* Characteristics, causes and ecological environment health evaluation of Selenium-enriched soil in Gaocheng District of Shijiazhuang City, Hebei Province [J]. *Geology in China*, 2021, **48**(3): 764-776.
- [26] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区富硒土壤成因与土壤硒来源研究[J]. *物探与化探*, 2019, **43**(6): 1373-1381.
Xie W, Yang Y D, Hou J Y, *et al.* Studies on causes and influential factors of selenium-enriched soils in Jizhou district of Tianjin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, **43**(6): 1373-1381.
- [27] 高业新. 宁夏平原特色农业地质背景调查与利用研究成果报告[R]. 银川: 宁夏地质工程勘察院, 2006.
- [28] 李天斌. 宁夏回族自治区银川盆地多目标区域地球化学调查报告(比例尺: 1:250000)[R]. 银川: 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 2012.
- [29] 李新虎, 王志强. 银川平原硒的地球化学调查及评价[J]. *宁夏农林科技*, 2006, (5): 15-17.
- [30] 李晓慧, 高宇, 赵万伏, 等. 宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(5): 422-429.
- [31] Li X H, Gao Y, Zhao W F, *et al.* Distribution characteristics of selenium in cultivated soil and its influencing factors in Qingtongxia City of Ningxia [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(5): 422-429.
- [32] 高宇, 刘志坚. 宁夏长山头富硒区土壤硒地球化学特征研究[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(6): 628-633.
Gao Y, Liu Z J. Geochemical characteristics of soil selenium in selenium-rich area in Changshantou, Ningxia Province, China [J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(6): 628-633.
- [33] 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.
- [34] 周殷竹, 刘义, 王彪, 等. 青海省囊谦县农耕区土壤硒的富集因素[J]. *地质通报*, 2020, **39**(12): 1952-1959.
Zhou Y Z, Liu Y, Wang B, *et al.* Influence factors of soil selenium in cultivated area of Nangqian County, Qinghai Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, **39**(12): 1952-1959.
- [35] 宋晓珂, 李宗仁, 王金贵. 青海东部农田土壤硒分布特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2018, **50**(4): 755-761.
Song X K, Li Z R, Wang J G. Distribution and influential factors of soil Se in eastern Qinghai Province [J]. *Soils*, 2018, **50**(4): 755-761.
- [36] 魏振山, 涂其军, 唐蜀虹, 等. 天山北坡乌鲁木齐至沙湾地区富硒土壤地球化学特征及成因探讨[J]. *物探与化探*, 2016, **40**(5): 893-898.
Wei Z S, Tu Q J, Tang S H, *et al.* A discussion on the geochemical features and origin of selenium-rich soil on the northern slope of the Tianshan Mountains from Urumqi to Shawan County [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, **40**(5): 893-898.
- [37] 吕瑶瑶, 余涛, 杨忠芳, 等. 大骨节病区硒元素分布的调控机理研究——以四川省阿坝地区为例[J]. *环境化学*, 2012, **31**(7): 935-944.
Lv Y Y, Yu T, Yang Z F, *et al.* The regulation mechanism of selenium distribution in Kaschin-Beck disease area: a case study in Aba area, Sichuan Province [J]. *Environmental Chemistry*,

- 2012, **31**(7): 935-944.
- [37] 葛晓立, 李家熙, 万国江, 等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. 岩矿测试, 2000, **19**(4): 254-258.
Ge X L, Li J X, Wan G J, *et al.* Study on characteristics of selenium geochemical speciation in soil in Zhangjiakou Keshan disease area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, **19**(4): 254-258.
- [38] 陈东平, 张金鹏, 聂合飞, 等. 粤北山区连州市土壤硒含量分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(7): 2838-2848.
Chen D P, Zhang J P, Nie H F, *et al.* Selenium distribution in soils of Lianzhou city, mountain area of northern Guangdong Province and its influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(7): 2838-2848.
- [39] Liu Y L, Tian X L, Liu R, *et al.* Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: a case study in red beds of Sichuan Basin, China[J]. CATENA, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104926.
- [40] 韩伟, 王乔林, 宋云涛, 等. 四川省沐川县北部土壤硒地球化学特征与成因探讨[J]. 物探与化探, 2021, **45**(1): 215-222.
Han W, Wang Q L, Song Y T, *et al.* Geochemical characteristics and genesis of selenium in soil in northern Muchuan County, Sichuan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, **45**(1): 215-222.
- [41] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. 物探与化探, 2019, **43**(5): 1138-1144.
Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, *et al.* Distribution characteristics of Se speciation of alkaline soil in eastern Qinghai [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, **43**(5): 1138-1144.
- [42] 郝睿林, 黄文辉, 久博. 石嘴山地区煤中微量元素特征及成煤环境对比[J/OL]. 煤炭科学技术, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20210119.1103.002.html>, 2021-01-19.
Hao R L, Huang W H, Jiu B, *et al.* Characteristics of trace elements in coal and comparison of coal-forming environment in Shizuishan area[J/OL]. Coal Science and Technology, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20210119.1103.002.html>, 2021-01-19.
- [43] Sharma V K, Medonald T J, Sohn M, *et al.* Biogeochemistry of selenium. A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2015, **13**(1): 49-58.
- [44] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, **26**(5): 837-849.
Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, *et al.* Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island [J]. Geoscience, 2012, **26**(5): 837-849.
- [45] 蔡立梅, 王硕, 温汉辉, 等. 土壤硒富集空间分布特征及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(10): 83-90.
Cai L M, Wang S, Wen H H, *et al.* Enrichment spatial distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(10): 83-90.
- [46] 徐文坡, 朱建明, 秦海波, 等. 铁、锰和铝氧化物吸附硒的行为研究[J]. 矿物学报, 2017, **37**(3): 357-365.
Xu W B, Zhu J M, Qin H B, *et al.* A study on selenium oxyanions adsorbed onto iron/manganese/aluminum oxides [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2017, **37**(3): 357-365.
- [47] Christophersen O A, Lyons G, Haug A, *et al.* Selenium [A]. In: Alloway B J (Ed.). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability [M]. Dordrecht: Springer, 2013. 429-463.
- [48] 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.
- [49] 尹炳, 汪建飞, 师胜, 等. 矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1904-1913.
Yin B, Wang J F, Shi S, *et al.* Selenium uptake characteristics of reclaimed soil-crop from mining wasteland and its antagonistic effects on heavy metals [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1904-1913.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Comcob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)