

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

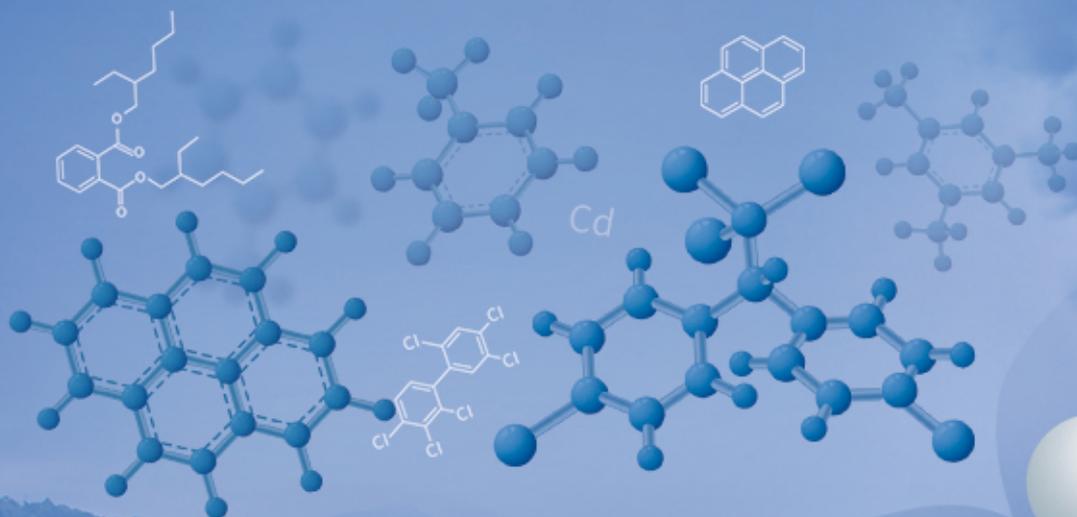
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM_{2.5}化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM_{2.5}空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O₃ 来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9月 O₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素

刘飞^{1,2,3}, 杨柯^{1,2,3*}, 徐仁廷^{1,2,3}, 唐世琪^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 廊坊 065000)

摘要: 为发展富硒水稻种植和巩固脱贫成果, 在广西都安县百旺镇开展水稻种植区地球化学调查, 采集 21 件岩石和 193 件水稻根系土-籽实协同调查样品, 利用统计学和相关分析方法研究水田土壤硒的分布特征和影响因素. 结果表明, 百旺镇水田土壤和水稻籽实富硒率分别为 67.4% 和 64.8%, 但富硒土壤和富硒水稻籽实样品中镉含量普遍较高; 对比显示百旺镇南部种植区水稻籽实富硒率达到 61.1%, 重金属风险低, 发展无污染富硒水稻种植优势明显. 相关分析表明次生富集作用是研究区土壤富硒的主要原因, 根系土 pH 和质地不同程度影响土壤硒含量; 水稻籽实硒含量主要受根系土硒含量、有效硒含量、pH 和 Al_2O_3 等影响. 镉膳食暴露风险评估显示研究区水稻整体安全, 但中部区域水稻膳食暴露风险较高.

关键词: 都安县百旺镇; 硒; 水稻; 相关分析; 影响因素; 暴露风险

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4897-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012118

Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi

LIU Fei^{1,2,3}, YANG Ke^{1,2,3*}, XU Ren-ting^{1,2,3}, TANG Shi-qi^{1,2,3}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: This study used 21 rock samples and 193 sets of paddy soil and rice grain samples collected from Baiwang Town, an area of clastic sedimentary rocks in Guangxi, China, to evaluate the potential for selenium-rich agriculture. We analyzed the concentrations of selenium and heavy metals in the soil and rice samples, and discuss the influencing factors by means of statistics and correlation analysis. The results showed that the selenium-rich rate of paddy soil and rice grain in Baiwang Town were 67.4% and 64.8%, respectively, but the content of cadmium in the selenium-rich soil samples was generally higher than the baseline value for China and the background value for Guangxi. In comparison to the screening value of soil pollution risk for agricultural land (GB 15618-2018), the over-standard rate of cadmium was 46.1%, while the over-standard rates of other heavy metals were negligible. The comparison shows that the selenium-rich rate of rice was 61.1% in the southern area of Baiwang Town with a negligible heavy metal content, and the advantages of green selenium-rich rice planting were clear. The correlation analysis showed that secondary enrichment was the main form of selenium enrichment in the study area. The soil pH and texture of the root-zone soil also affected the selenium content of the soil. The selenium content of rice seeds was mainly affected by the selenium content, active selenium content, pH, and aluminum oxide content of the root-zone soil. The risk assessment showed that the level of dietary exposure to cadmium is generally within safe limits, but it is still necessary to strengthen the monitoring of cadmium in rice and control cadmium pollution to reduce the levels of dietary exposure, especially in the central region of Baiwang Town.

Key words: Baiwang Town, Du'an County; selenium; rice; correlation analysis; influence factors; exposure risk

硒(Se)是人体必需的微量营养元素之一, 国内外大量研究证实硒在提高人体免疫力、预防癌症和地方病等方面有重要功效^[1,2], 但硒属于分散元素, 在地表的分布也极不均匀, 世界土壤硒含量范围为 0.01 ~ 2.0 $mg \cdot kg^{-1}$, 平均含量约 0.4 $mg \cdot kg^{-1}$ ^[3], 我国表层土壤硒含量背景基准值仅为 0.17 $mg \cdot kg^{-1}$ ^[4], 同时空间上硒分布极不均衡, 调查显示全国 51% 的区域处于缺硒或低硒带^[5], 但湖北恩施和陕西紫阳等局部地区环境硒高度富集^[6,7]. 食物是人体摄入硒的主要来源, 稻米作为我国主要粮食作物, 富硒稻谷一直是硒和人体健康领域研究的热点^[8,9].

广西壮族自治区 A 层土壤硒含量平均值高达 0.65 $mg \cdot kg^{-1}$, 是我国土壤硒背景值最高的省份^[10], 自治区土地质量地球化学调查过程中发现了

大批富硒土地资源^[11-13], 为推动传统农业向现代农业转变, 助力脱贫攻坚提供了契机. 都安瑶族自治县是广西贫困程度最深的县之一, 有“石山王国”之称, 全县石漠化区域占 89%, 人均耕地仅 0.05 hm^2 (0.73 亩)^[14], 宜耕地少, 贫瘠地多, 农产品科技含量低, 严重影响农民脱贫. 广西壮族自治区组织实施的 1:5 万土地质量地球化学评价项目成果显示, 都安县农用地土壤硒含量平均值达到了 0.63 $mg \cdot kg^{-1}$ (数据未发表), 高于广西农用地 0.49 $mg \cdot kg^{-1}$ 的平均值^[15], 超过全国背景基准值的 3 倍

收稿日期: 2020-12-15; 修订日期: 2021-03-13

基金项目: 全国土壤污染状况详查项目(121201108000168530); 中国地质调查局项目(DD20190518)

作者简介: 刘飞(1979~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为土地质量地球化学调查, E-mail: 29619105@qq.com

* 通信作者, E-mail: yangkejs@qq.com

以上,具有较高的富硒农业开发潜力.本研究选择都安县水田相对集中分布的百旺镇开展富硒水稻调查,分析岩石、水稻根系土和水稻籽实样品的硒等元素含量特征及其影响因素,以期为当地发展富硒水稻种植和巩固脱贫攻坚成果提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

百旺镇位于都安县东部,全镇下辖 10 个行政村,总面积 267 km²,辖区大部分位于刁江和红水河冲积带,为半丘陵半石山地貌,境内无污染型工业企业,百旺镇在河池有“鱼米之乡”之称,农业耕作条件在河池市相对较好.

百旺镇地处右江再生地槽都阳山隆起东侧的百旺向斜,研究区位于二叠系-三叠系碎屑岩分布区,主要地层单元为板纳组(T₂b)和南洪组(T₁n),主要岩性为泥岩夹细砂岩、粉砂岩和泥灰岩等.研究区外围主要是石炭系-二叠系碳酸盐岩建造,自研究区由近及远主要地层及岩性分别是合山组大隆组并层(P₂h-d,灰岩、硅质岩和泥岩夹砂岩)、茅口组(P₁m,厚层灰岩夹燧石团块灰岩和白云岩)、栖霞组(P₁q,深灰至灰黑色泥晶灰岩,含泥质条带、硅质条带和结核)和马平组(CPm,灰白色泥晶灰岩、微晶灰岩、生物屑灰岩和白云质灰岩)等(图 1).研究区地貌以剥蚀侵蚀低山丘陵为主,水土条件较好的沟谷多开垦为梯田,水田以潜育性水稻土为主,水稻种植历史较长.

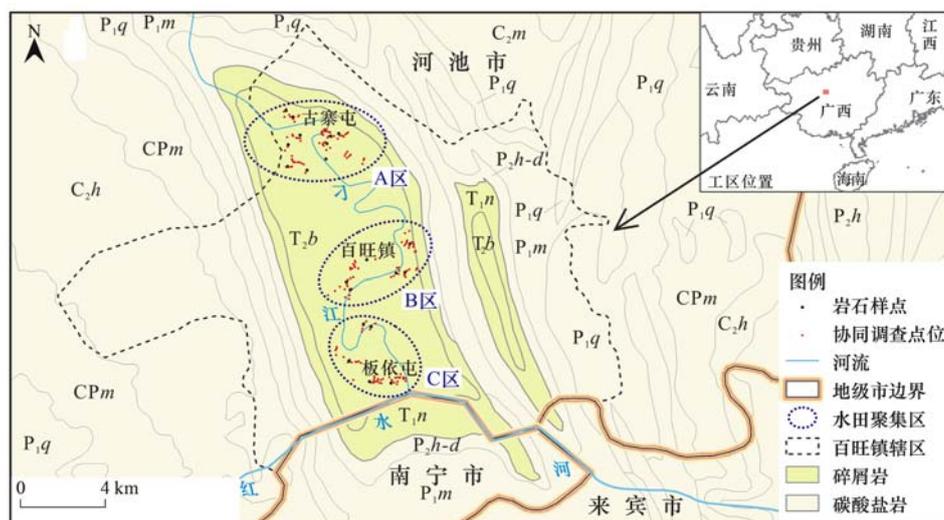


图 1 研究区地质及样点分布示意

Fig. 1 Geological sketch map of the study area and the sampling locations

1.2 样品采集和预处理

本研究于 2018 年 5 月进行野外踏勘,确定相对集中的 3 个水稻种植聚集区域开展调查工作,分别位于北部古寨屯(A 区)、中部百旺镇(B 区)和南部板依屯(C 区),同年 7 月水稻成熟期采集样品.根系土和水稻籽实样品取样方法按照文献[16]的规定执行;岩石采样选择水田周边人工开挖断面的新鲜露头土,清除表土和风化层后取样.根系土和岩石样品保存在布质样袋内,外套塑料袋防止沾污;水稻籽实使用尼龙网袋保存.研究区共采集水稻根系土-水稻籽实 193 套,岩石 21 件(图 1),其中 A 区 80 套协同调查样品,10 件岩石样品;B 区 59 套协同调查样品,6 件岩石样品;C 区 54 套协同调查样品,5 件岩石样品.

采集的土壤和水稻籽实样品悬挂于室内木架上自然风干,期间用木锤反复敲打根系土样品防止黏结成块,加速干燥,根系土风干后的样品统一过

目尼龙筛,按照缩分法分出 400 g 送实验室分析,分析 pH 直接使用过 20 目筛样品,分析其他元素含量的统一在石英玛瑙罐中进一步细磨至 200 目以下.水稻籽实样品使用小型脱粒机脱粒,经精米机处理得到精米,再用粉碎机粉碎,过 100 目后送实验室分析.岩石样品采用以刚玉质为内衬的颚式破碎机粗碎至 20 目,缩分出 80 g 样品,用无污染行星磨粉粉碎至 200 目送实验室分析.

1.3 样品分析与质量控制

水稻根系土、水稻籽实和岩石分析由湖北省地质实验测试中心(国土资源部武汉矿产资源监督检测中心)承担,岩石、土壤和水稻籽实中各指标的分析测试方法和检出限见表 1,分析过程执行 DZ/T 0258-2014^[17]和 DD 2005-03^[18]技术标准,采用国家一级标准物质控制分析测试结果的准确度和精确度,其中土壤样品使用 5 件标准物质(GSS-1、GSS-2、GSS-3、GSS-5 和 GSS-8);

岩石样品使用 3 件标准物质 (GSR-1、GSR-2 和 GSR-7), 水稻籽实样品使用 2 件一级标准物质 (GBW10014 和 GBW10015), 采用重复样监控分析精密度, 所有元素标准物质合格率为 100%, 合格率符合文献[17]中的样品分析质量控制要求,

分析数据质量可靠.

为分析土壤硒的生物有效性, 参照文献[19]分析了土壤有效硒含量, 分析过程中采用加标回收控制准确率, 标样回收率介于 93.8% ~ 107.3%, 符合文献[17]质量要求.

表 1 样品分析测试方法和检出限

Table 1 Instrumental methods and detection limits for samples

项目	元素	分析方法	检出限	项目	元素	分析方法	检出限	
土壤	As/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.2	岩石	As/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.2	
	Cd/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.02		Cd/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.02	
	Cr/mg·kg ⁻¹	X-射线荧光光谱	1.5		Cr/mg·kg ⁻¹	X-射线荧光光谱	1.5	
	Cu/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.1		Cu/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.1	
	Hg/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.0005		Hg/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.0005	
	Ni/mg·kg ⁻¹	电感耦合原子发射光谱法	0.2		Ni/mg·kg ⁻¹	电感耦合等离子体发射光谱法	0.2	
	N/mg·kg ⁻¹	容量法	15		水稻籽实	Pb/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.2
	P/mg·kg ⁻¹	X-射线荧光光谱	5			Se/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.01
	Pb/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.2			Zn/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	1
	S/mg·kg ⁻¹	容量法	15			SiO ₂ /%	X-射线荧光光谱	0.05
	Zn/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	1			Al ₂ O ₃ /%	X-射线荧光光谱	0.03
	Se/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.01			TFe ₂ O ₃ /%	X-射线荧光光谱	0.02
	质地/%	湿筛-沉降法	0.1			CaO/%	电感耦合原子发射光谱法	0.02
	SiO ₂ /%	X-射线荧光光谱	0.05			Se/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.002
	Al ₂ O ₃ /%	X-射线荧光光谱	0.03			As/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.04
	TFe ₂ O ₃ /%	X-射线荧光光谱	0.02			Cd/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.005
	MgO/%	电感耦合原子发射光谱法	0.02		Cr/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.04	
	CaO/%	电感耦合原子发射光谱法	0.02		Cu/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	1	
	Na ₂ O/%	电感耦合原子发射光谱法	0.02		Hg/mg·kg ⁻¹	原子荧光光谱法	0.0005	
	K ₂ O/%	X-射线荧光光谱	0.03		Ni/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.01	
有机碳/%	容量法	0.02	Pb/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	0.05			
pH	离子选择性电极法	0.01	Zn/mg·kg ⁻¹	等离子体质谱法	1			

1.4 数据处理

本文采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 对数据进行统计和相关系数统计, 散点图所用数据按平均值 ± 3 倍离差方法先剔除异常值, 使用 ArcGIS 10.2 和 CorelDRAW X3 绘制相关图件.

2 结果与讨论

2.1 根系土理化性质

193 件水稻根系土的理化性质统计结果见表 2. 正态分布检验显示, 研究区水稻根系土 Cd、Cr、Pb、Zn、SiO₂、Al₂O₃ 和有机碳 (TOC) 等含量数据既不符合正态分布, 也不符合对数正态分布, 因此以中位值代表整体含量状况. 统计结果显示研究区水稻根系土 pH 范围 4.47 ~ 7.83, 中位值为 5.03, 整体呈酸性-强酸性, 中性和碱性样品比例极低. 氮和有机碳含量显著高于全国平均含量, 磷含量略高于全国平均值, 但钾含量缺乏; 有机碳和土壤黏粒 (粒径 < 0.002 mm) 占比均低于广西平均水平, 表明该地区水田土壤保肥能力有限, 是影响土壤养分的重要因素; 硅含量与全国平均水平接近; 铝铁氧化物含量

显著高于全国含量水平, 而钙、镁、钠和钾含量明显低于全国含量水平, 反映了湿热条件下研究区土壤经历了明显的富铝铁化过程.

2.2 根系土硒与重金属

研究区水稻根系土硒含量均值为 (0.46 ± 0.11) mg·kg⁻¹, 低于广西土壤背景值, 但明显高于全国土壤背景值 (0.290 mg·kg⁻¹)^[4], 也显著高于全国水稻土硒含量水平 (0.201 mg·kg⁻¹)^[20], 依据标准 DD 2019-10^[21] 评价, 研究区水稻根系土有 130 件达到富硒标准, 富硒率 67.4%, 具有较高的富硒潜力. 根系土有效硒含量为 (13.06 ± 5.94) mg·kg⁻¹, 有效硒占全量硒的比例均值为 2.8%, 在相同提取方法下, 高于广西池州市硒地质高背景区茶园土壤有效硒的占比^[22], 但低于桂林富硒区土壤有效硒的占比^[23].

研究区 8 种重金属元素平均含量均高于全国背景基准值, 除砷外其余 7 种重金属含量均高于广西背景值 (表 3); 依据 GB 15618-2018^[24] 评价, 有 84 件样品镉含量超风险筛选值低于风险管制值, 占 43.5%, 5 件样品超风险管制值, 占总样品数的

表 2 研究区水稻根系土理化性质($n=193$)

Table 2 Descriptive statistics of physicochemical properties of rice root-zone soil

项目	最小值	最大值	算术平均值	中位值	绝对中位差	几何平均值	标准离差	变异系数	全国背景基准值 ^[4]	广西背景值 ^[10]
pH	4.47	7.83	5.07	5.03	0.16	5.06	0.33	0.06	8	4.9
N/mg·kg ⁻¹	1 038	3 792	2 195	2 180	215	2 161	386	0.18	707	— ¹⁾
P/mg·kg ⁻¹	392	1 192	601	573	71	588	132	0.22	570	—
TOC/%	1.42	4.15	2.21	2.14	0.23	2.17	0.44	0.20	0.6	2.9
SiO ₂ /%	57.95	82.49	68.30	67.42	1.85	68.19	3.90	0.06	66.7	—
Al ₂ O ₃ /%	8.44	17.78	15.29	15.79	0.66	15.20	1.55	0.10	11.9	11.45
TFe ₂ O ₃ /%	3.39	9.34	6.27	6.36	0.42	6.21	0.91	0.14	4.2	5.03
MgO/%	0.38	1.38	0.86	0.89	0.16	0.82	0.24	0.28	1.43	0.38
CaO/%	0.10	1.16	0.25	0.24	0.04	0.24	0.11	0.42	2.74	0.10
Na ₂ O/%	0.12	0.39	0.18	0.17	0.03	0.18	0.06	0.31	1.75	0.08
K ₂ O/%	0.98	2.36	1.75	1.8	0.18	1.72	0.28	0.16	2.36	0.99
黏粒/%	0.3	33.1	10.1	6.9	2.9	7.6	0.1	0.7	—	33.5

1) “—”表示文献中没有相关数据

2.6%,其他重金属超标(高于风险筛选值)率较低,砷、铜、汞、铅和锌的安全利用类比例分别为4.1%、4.1%、1.6%、5.2%和2.6%,仅有1件样品铅含量超过风险管制值,生态风险较低,因此,镉含量较高是影响百旺镇水田土壤环境的主要问题。

对130件富硒水稻根系土进行统计发现,镉含

量均值为0.46 mg·kg⁻¹,显著高于63件非富硒水稻根系土均值0.25 mg·kg⁻¹,全区镉含量超管制值的5件根系土样品均富硒,因此研究区水稻根系土整体富硒的同时还伴有一定程度的镉生态风险,是发展绿色富硒农业面临的主要地球化学问题。

表 3 研究区水稻根系土 Se 和重金属含量($n=193$)

Table 3 Descriptive statistics of contents of selenium and heavy metals of rice root-zone soil

项目	最小值	最大值	算术平均值	中位值	绝对中位差	几何平均值	标准离差	变异系数	全国背景基准值 ^[4]	广西背景值 ^[10]
Se/mg·kg ⁻¹	0.25	0.91	0.46	0.46	0.08	0.45	0.11	0.23	0.17	0.678
有效 Se/ μ g·kg ⁻¹	5.06	33.98	13.06	10.86	3.15	11.91	5.94	0.45	— ¹⁾	—
As/mg·kg ⁻¹	2.32	74.27	10.84	6.95	2.88	8.36	10.58	0.98	9	12.2
Cd/mg·kg ⁻¹	0.16	2.18	0.39	0.29	0.20	0.33	0.31	0.79	0.137	0.073
Cr/mg·kg ⁻¹	67.9	129.8	80.7	77.3	76.84	80.05	11.03	0.14	53	65.3
Cu/mg·kg ⁻¹	23.53	68.39	37.26	36.9	36.44	36.75	6.4	0.17	20	23.1
Hg/mg·kg ⁻¹	0.06	1.25	0.14	0.1	0.02	0.11	0.14	1.04	0.026	0.099
Ni/mg·kg ⁻¹	21.6	52.13	32.1	31.6	2.43	31.76	4.85	0.15	24	18.2
Pb/mg·kg ⁻¹	23.35	462.77	37.36	29.55	2.98	32.88	36.37	0.97	22	19.5
Zn/mg·kg ⁻¹	73.39	285.78	104.82	95.02	8.11	101.87	29.84	0.28	66	51.8

1) “—”表示文献中没有相关数据

研究区94.3%的根系土pH低于5.5,将pH划分为pH \leq 5.0($n=82$)、5.0<pH \leq 5.2($n=67$)和pH>5.2($n=44$)3个区间分别统计镉超标率和富硒率.结果显示pH \leq 5.0区间镉超标率最高,pH>5.2区间次之,5.0<pH \leq 5.2区间最低(图2),大致呈现镉超标率与pH呈负相关的趋势,且土壤富硒率与镉超标率呈现同步变化趋势.进一步相关分析显示水稻根系土硒含量与镉、砷、铬、汞、铅和锌等重金属含量存在显著正相关,各重金属含量之间也有明显的正相关性(表4).研究区无污染型企业,因此可以推断硒与重金属具有相同的来源,即主要来源于母岩,这与恩施等地质背景成因的富硒土壤同时富集重金属的特征相一致^[25,26].

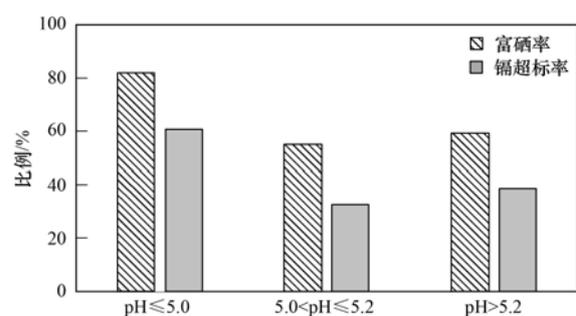


图 2 水稻根系土分 pH 区间富硒率和镉超标率对比

Fig. 2 Histogram of the ratio of selenium-rich and exceeding-standard rate of Cd by pH ranges

为便于各区不同数量级元素含量可对比,以全区元素含量中位数为本底,将A、B和C区根系土

表 4 水稻根系土硒元素与重金属元素间相关系数¹⁾ (n = 193)

Table 4 Correlation coefficients between selenium and heavy metals in rice root-zone soil

	Se	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb
As	0.705 **							
Cd	0.637 **	0.899 **						
Cr	0.269 **	0.192 **	0.077					
Cu	-0.153 *	-0.030	-0.054	0.718 **				
Hg	0.257 **	0.230 **	0.222 **	0.141	-0.003			
Ni	-0.130	0.062	0.069	0.696 **	0.757 **	0.279		
Pb	0.460 **	0.495 **	0.525 **	0.0616	-0.027	0.111	0.039	
Zn	0.596 **	0.895 **	0.897 **	0.220 **	0.150 *	0.237 **	0.244 **	0.523 **

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

主要元素含量中位数做归一化处理,结果显示 3 个区根系土 pH 无明显差异;各区硒含量有较大差异, B 区水稻根系土全硒含量最高, C 区次之, A 区最低;有效硒 C 区最高, B 区次之, A 区最低;各区镉含量差异明显, A 区最高, C 区最低;养分元素各区差异不显著, A 区钾含量最高,但氮、磷和有机碳含量均最低, B 区磷含量略高,钾元素缺乏明显, C 区氮和有机碳含量最高,但钾含量有所不足(图 3),综合判断 A 区发展富硒水稻不利因素最多, C 区相对优势明显,需对水稻籽实数据做进一步判断。

2.3 水稻籽实元素含量特征

研究区 193 件水稻籽实硒和 8 种重金属检出率及含量见表 5。水稻籽实硒全部检出,硒含量范围 0.015 ~ 0.339 mg·kg⁻¹,均值 0.076 mg·kg⁻¹,中位值 0.055 mg·kg⁻¹,远高于 GB/T 22499-2008^[27]的大米富硒标准(0.04 mg·kg⁻¹),总体富硒率 64.8%。依据 GB 2672-2017^[28]和 NY 861-2004^[29]重金属限量值,研究区水稻籽实镉和铬超标率分别为 6.7%和 1.6%,其他重金属无超标,镉是影响该区水稻籽

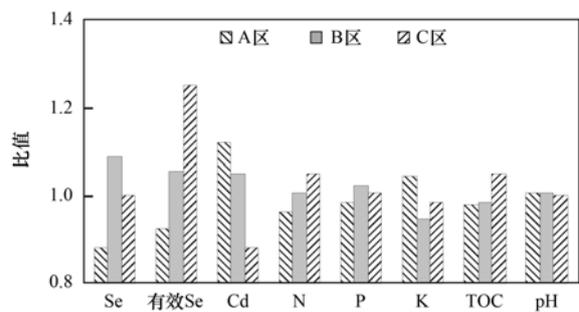


图 3 各区水稻根系土主要元素相对含量对比

Fig. 3 Comparison of the relative contents of main elements in the rice root-zone soil in different regions

实的首要污染物,整体上水稻籽实镉超标率低于全国主要产粮区和广西石灰岩地区^[30-32]。调查区 125 件富硒水稻包含了全部 14 件重金属含量超标水稻(其中 1 件镉和铬同时超标),显然受根系土硒和重金属伴生的影响。剔除水稻籽实重金属含量超标样品,研究区无污染富硒水稻占全部样品的 57.5%,仍然高于全国和广西水稻富硒率^[33,34],具有很好的市场价值。

表 5 水稻籽实元素含量(n = 193)/mg·kg⁻¹

Table 5 Descriptive statistics of the elemental content of rice/mg·kg⁻¹

项目	检出率/%	最小值	最大值	算数平均值	中位值	几何平均值	标准差	变异系数	限量标准	超标率/%
Se	100	0.015	0.339	0.076	0.055	0.059	0.058	0.764	— ¹⁾	—
As	100	0.06	0.41	0.20	0.20	0.20	0.05	0.26	0.2 ^{[28] 2)}	0
Cd	87.0	0.003	1.575	0.069	0.014	0.020	0.177	2.569	0.2 ^[28]	6.7
Cr	100	0.15	1.06	0.56	0.58	0.51	0.21	0.37	1 ^[28]	1.6
Cu	64.8	0.50	5.56	1.86	1.68	1.37	1.31	0.71	10 ^[29]	0
Hg	93.8	0.0003	0.0054	0.0017	0.0017	0.0015	0.0008	0.4611	0.02 ^[28]	0
Ni	100	0.07	2.36	0.29	0.17	0.21	0.30	1.02	—	—
Pb	22.3	0.03	0.10	0.03	0.03	0.03	0.02	0.54	0.2 ^[28]	0
Zn	100	7.79	26.57	18.40	18.08	18.17	2.85	0.15	50 ^[29]	0

1) “—”表示现行规范没有规定相关限量值,相应的无超标率数据; 2) 砷的限量标准为无机砷,分析结果显示水稻籽实总砷含量均低于无机砷限量,因此可判定无机砷均未超标,本研究未测定无机砷

3 个水稻集中种植区水稻籽实富硒率对比显示, B 区水稻籽实富硒率 81.4%,虽然高于 A 区(55.0%)和 C 区(61.1%),但同时 B 区水稻籽实镉

超标率 15.3%,显著高于全国主要产粮区镉超标率^[30],食用安全风险较高; C 区水稻虽然存在镉和铬超标样品,但镉和铬含量略高于限量标准(3 件超

标样品含量分别为: 镉 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铬 $1.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 整体上安全风险可控, A 区水稻籽实富硒率相对较低, 镉含量均值高于 C 区; 综合土壤对比结果, C 区是百旺镇发展无污染富硒水稻种植的理想区域。

2.4 影响土壤硒元素含量的因素

土壤是母岩在生物、气候和地形等综合作用下形成的, 成土过程直接影响各元素在土壤中的含量水平。有研究表明, 成土母岩^[35,36]、风化过程^[13,37]和土壤理化性质^[7,13,38]等都可能影响土壤硒含量。

研究区有 21 个协同调查采样点周边采集到了岩石样品, 均为粉砂质泥岩或泥页岩, 造岩元素标准

差均较低, 表明研究区成岩环境和时代相同。岩石硒含量 $0.037 \sim 0.305 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值 $0.123 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 6), 低于我国东部泥(页)岩的硒含量 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[39], 但高于桂林土壤富硒区岩石硒含量^[23]。8 种重金属除砷和铬外, 其余 6 种重金属均高于我国东部泥(页)岩, 反映重金属地质高背景区特征。岩石同点位的 21 件水稻根系土硒含量均值为 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 接近研究区 193 件水稻根系土的硒含量水平, 同点位根系土硒含量与岩石硒含量无明显相关性[图 4(a)], 与武鸣和桂林研究区结论相同^[13,23], 表明有其他主导因素掩盖了母岩和土壤硒含量的继承关系。

表 6 岩石元素含量 ($n=21$)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 6 Descriptive statistics of the elemental content of rocks/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	最小值	最大值	算术平均值	中位数	标准差	我国东部泥(页)岩 ^[39]
Se	0.037	0.305	0.123	0.117	0.058	0.17
As	1.34	9.01	4.67	3.88	2.30	7.8
Cd	0.082	0.655	0.211	0.193	0.130	0.11
Cr	62.80	78.80	71.58	71.80	3.58	72
Cu	31.12	61.80	46.38	46.24	6.85	29
Hg	0.020	0.113	0.043	0.035	0.022	0.027
Ni	28.99	68.93	45.93	43.79	10.08	34
Pb	14.09	61.41	31.18	29.46	12.91	23
Zn	87.37	129.10	105.61	103.70	10.71	80

风化作用是改变地表化学组成的重要过程, 也是岩石元素含量显著变化的过程, 通常采用土壤风化淋溶系数 (ba) 来表征土壤的风化程度^[40], ba 值是土壤钾、钠、钙和镁氧化物分子数之和与氧化铝分子数的比值, 计算见式(1):

$$ba = \left[\frac{N(\text{K}_2\text{O}) + N(\text{Na}_2\text{O})}{N(\text{Al}_2\text{O}_3)} + \frac{N(\text{CaO}) + N(\text{MgO})}{N(\text{Al}_2\text{O}_3)} \right] \times 100\% \quad (1)$$

ba 值越小表明土壤风化程度越高, 图 4(b) 显示研究区 193 件水稻根系土风化淋溶系数与硒含量呈显著负相关 ($R = -0.725, P < 0.01$), 表明随着风化程度增加, 土壤硒含量增大, 因此次生富集是研究区土壤富硒的主要原因。这与重庆典型农业区研究结果相一致^[35]。研究区岩石风化成壤过程中, 母质对土壤硒浓度的影响逐渐降低, 而风化淋溶的作用趋于增加, 次生富集掩盖了母岩和土壤硒含量的继承关系^[13,41]。

土壤酸碱度是土壤各种化学性质的综合反映, 它在很大程度上决定了硒存在的化学形态^[35]。图 4(c) 显示研究区水稻根系土 pH 与硒含量呈弱负相关, 与其他研究的结论一致^[12,35,42]。土壤中的硒在酸性和中性条件下主要以亚硒酸盐形式存在, 易于和黏土矿物形成稳定的络合物; 随着 pH 升高, 易溶的

硒酸盐比重增高^[35,43], 硒酸盐易被植物吸收, 但同时也易淋失, 从而使土壤中的硒减少, 因此水田土壤酸性条件下有利于硒的富集。

质地是土壤重要的物理性质之一, 图 4(d) 显示, 根系土黏粒含量与硒含量呈正相关, 表明随着黏粒的增加, 土壤硒含量有增加的趋势, 这与广西其他研究结论相一致^[23,44]。研究区水田根系土均呈酸性, 土壤硒以亚硒酸盐为主, 通常认为亚硒酸根离子易被黏粒矿物和倍半氧化物固定, 因此土壤中黏粒含量越多, 硒含量往往较高^[45,46]。

2.5 影响水稻籽实硒含量的主要因素

土壤富硒仅代表了具备产出富硒农产品的可能, 水稻籽实是否富硒则直接影响了水稻营养价值, 在不考虑水稻品种的情况下, 水稻籽实硒的量主要取决于土壤供硒水平和 pH 等理化性质^[26]。

水稻根系土全硒和有效硒含量均与水稻籽实硒含量显示了显著的正相关关系[图 5(a) 和图 5(b)], 与室内栽培试验和野外研究结论一致^[47~49]。反映了土壤营养元素对籽实的继承性。研究区水稻籽实硒含量随根系土 pH 升高而降低[图 5(c)], 与陈锦平等^[50]在广西浔郁平原研究结论相近, 但与付中彪等^[49]在赣南地区获得的研究结论相反。酸性条件下, 土壤硒主要以亚硒酸盐的形式存在, 易于和金

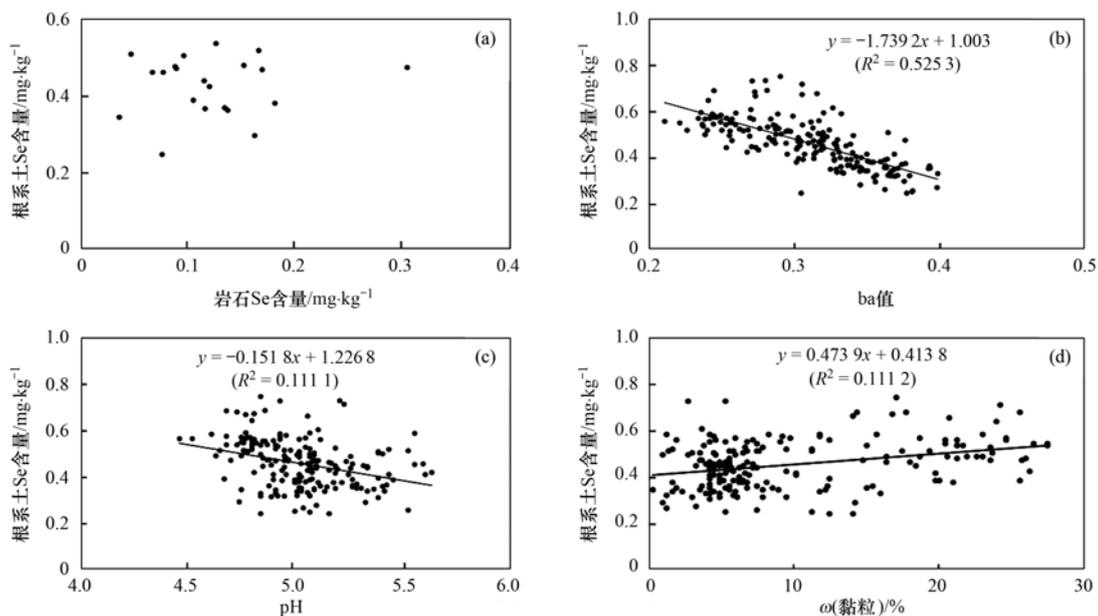


图4 根系土硒含量与主要影响因素之间的相关关系

Fig. 4 Correlation diagrams between soil selenium content and influencing factors

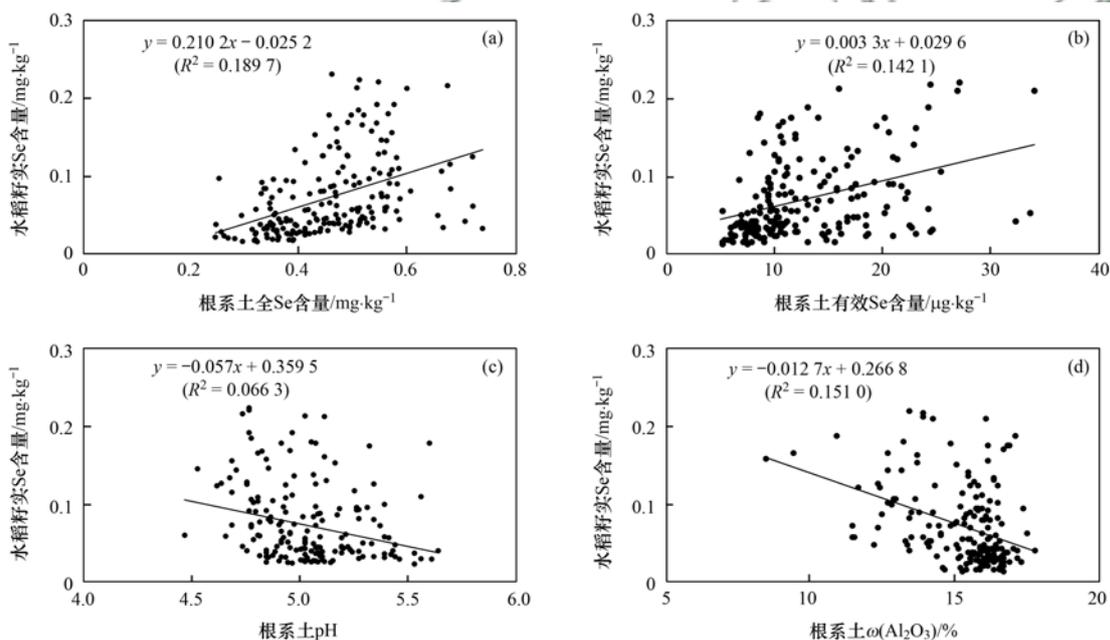


图5 水稻籽实硒含量与主要影响因素之间的相关关系

Fig. 5 Correlation diagrams between seed selenium content and influencing factors

属氧化物形成稳定结合态硒^[51],在碱性条件下,硒主要以硒酸盐形式存在,硒酸盐比亚硒酸盐更易溶于水并被植物吸收,因此,随着 pH 的升高,土壤硒的有效性应有所增高^[3],但另一方面研究区以梯田为主,由于亚硒酸盐更易淋失^[52],可能导致土壤 pH 偏高的地区水稻根系土硒淋失率较高,间接影响水稻籽实硒的含量,这可能是不同文献土壤 pH 与水稻籽实硒含量相关性不一致的原因。

南方岩石风化成壤过程中随着富铝化作用的加强,土壤中的 Al_2O_3 不断累积,图 5(d) 显示水稻籽实硒含量与土壤中的 Al_2O_3 呈显著负相关。Matos

等^[53]的研究表明铁铝氧化物对植物吸收硒起着重要的作用,铁铝氧化物带有正电荷,有较大的比表面积,硒离子可以与铁铝氧化物形成较稳定的球表面复合物,尤其酸性土壤中 Al_2O_3 对降低硒活性的影响更为明显。徐文坡等^[54]对铁铝氧化物吸附硒的行为研究发现随着 pH 值的降低,铁铝氧化物对硒氧阴离子团的吸附率显著增高,在 $\text{pH} < 6.0$ 时, Al_2O_3 对亚硒酸盐的吸附率高达 60% 以上。因此研究区土壤呈酸性有利于 Al_2O_3 对硒的吸附。

综上所述,水稻籽实硒含量主要受土壤全硒和有效硒含量的影响,同时还受到 pH 和 Al_2O_3 的共同

作用,pH 影响土壤硒的形态的同时还影响 Al_2O_3 对硒的吸附. 另外有报道显示不同品种的水稻吸收硒的能力差异很大^[26,55], 因此硒从土壤到水稻籽实的迁移过程十分复杂, 不同的研究可能会出现不同的结论.

2.6 稻谷中镉膳食暴露风险评估

有研究表明, 我国居民从大米及其制品中摄入的镉占总摄入量的贡献率最高^[56], 研究区水稻镉含量较高, 特别是 B 区水稻籽实镉超标率高于全国平均水平, 存在食用安全风险, 有必要对稻谷镉膳食暴露进行评估. 评估标准参照世界卫生组织 (WHO) 联合专家委员会 (JECFA) 制定的每月耐受摄入量 (PTMI, $25 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[57], 人群稻谷镉膳食暴露风险表达的计算见式(2):

$$\text{EMI} = C \times \text{MI} / \text{BW} \quad (2)$$

式中, EMI 为镉每月摄入量 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); C 为水稻籽实镉含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); MI 为每月稻谷消费量; BW 为标准人均体重. 研究区成人食物消费量数据和标准人均体重数据来自文献[58]. 以研究区水稻籽实镉含量中位值计算中位 EMI 值. 计算结果表明, 研究区成年居民膳食稻谷镉中位 EMI 值为 $1.60 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 WHO 规定 PTMI 值的 6.4%, 说明整体上研究区稻谷镉含量处于安全水平, 但 B 区成年居民膳食稻谷镉中位 EMI 值为 $4.29 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 WHO 规定 PTMI 值的 17.2%, 膳食暴露风险明显高于其他区域, 特别是长期食用当地镉含量超标 ($> 0.2 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻籽实情况下, EMI 将接近或高于 WHO 建议的 PTMI 值. 研究区水稻籽实镉超标样品主要分布在 B 区. 因此, B 区稻谷镉膳食暴露风险相对较高, 有必要加强水稻籽实镉含量监测和治理, 从源头上降低居民膳食中镉暴露水平.

根据文献[59], GB 2762 征求意见稿拟将食品加工用糙米的标准放宽到 $0.4 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但食用糙米和大米(粉)依然维持在 $0.2 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对镉轻度超标 ($0.2 \sim 0.4 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 稻谷进入市场放宽了条件. 根据现有研究资料, 高硒环境可降低镉的毒性, 生理学研究已证明硒对镉诱导的相关基因与蛋白的表达增高具有拮抗作用, 可有效减缓镉的毒性^[60,61], 例如富硒高镉稻米产区未见群体性镉膳食摄入中毒报告^[62], 因此建议对富硒稻谷产区食用大米的镉摄入风险开展专题评估研究, 对富硒高镉稻谷设置行业标准, 缓解富硒稻谷产区镉超标稻谷的利用难题.

3 结论

(1) 百旺镇水田土壤富硒率 67.4%, 具有较高

的富硒水稻发展潜力, 镉含量较高是影响土壤质量的主要地球化学问题.

(2) 百旺镇水稻籽实整体富硒, 但镉含量较高, 无污染富硒水稻占全部样品的 57.5%; 百旺镇南部板依屯周边水田相对于北部和中部发展无污染富硒水稻种植的优势更明显.

(3) 研究区水田土壤在成土过程中发生了强烈的硒的次生富集, 土壤风化淋溶掩盖了母岩与土壤硒元素的继承关系, 是影响土壤硒含量的主要因素; 土壤酸碱度和质地也是影响土壤硒含量的因素; 水稻籽实硒含量主要受根系土硒含量、有效硒含量、pH 和 Al_2O_3 含量影响.

(4) 研究区整体上稻谷镉含量处于安全水平, 摄入暴露风险低于 WHO 规定 PTMI 值, 但 B 区水稻籽实镉超标样品相对集中, 长期食用摄入暴露风险较高, 建议采取措施降低该区居民稻谷镉的摄入水平.

(5) 本研究存在一定的不确定性, 受项目周期限制仅采集了早稻样品, 未采集晚稻, 未能反映多季作物的元素含量差异. 另外, 未开展研究区降雨和径流对土壤硒影响的研究, 后续将进行补充相关工作, 量化降雨对土壤硒的贡献, 更全面地反映研究区硒迁移状况.

致谢: 广西地质调查院李杰高级工程师为本文提供了研究资料, 并为野外工作提供帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Haug A, Graham R D, Christophersen O A, *et al.* How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food[J]. *Microbial Ecology in Health and Disease*, 2007, **19**(4): 209-228.
- [2] 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.
- [3] Fordyce F. Selenium geochemistry and health[J]. *Ambio*, 2007, **36**(1): 94-97.
- [4] 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.
- [5] Dinh Q 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.
- [6] 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 等. 高硒高镉区土地安全区划方法[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5524-5530.
Wang R, Hou W L, Li Y T, *et al.* Land safety zoning method in high-selenium and high-cadmium areas [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5524-5530.
- [7] 唐世琪, 万能, 曾明中, 等. 恩施地区土壤与农作物硒地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2020, **44**(3): 607-614.
Tang S Q, Wan N, Zeng M Z, *et al.* Geochemical characteristics

- of selenium and cadmium in soil and crops in Enshi area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, **44**(3): 607-614.
- [8] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5571-5578.
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Distribution characteristics of selenium in a soil-crop system and the threshold of selenium-rich soils[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5571-5578.
- [9] 陈思杨, 江荣凤, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 284-289.
Chen S Y, Jiang R F, Li H F. Uptake and translocation of selenate or selenite by wheat and rice seedlings [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 284-289.
- [10] 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.
- [11] 曾少尉, 何儒芳, 黄振国. 广西金秀县头排—柘木地区富硒土壤地球化学特征及生态效应研究[J]. 矿产与地质, 2020, **34**(1): 149-154.
Zeng S W, He R F, Huang Z G. Study on geochemical characteristics and ecological effect of selenium-rich soil in Toupai-Tongmu area of Jinxiu County, Guangxi [J]. Mineral Resources and Geology, 2020, **34**(1): 149-154.
- [12] 黄子龙, 林清梅, 范汝海. 广西全州县富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探, 2018, **42**(2): 381-385.
Huang Z L, Lin Q M, Fan R H. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Quanzhou county of Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, **42**(2): 381-385.
- [13] 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.
Qin 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.
- [14] 闫妍, 胡宝清, 韩清延, 等. 基于3S-ANN技术的县域农地石漠化预警分析——以广西壮族自治区都安瑶族自治县为例[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(1): 52-58.
Yan Y, Hu B Q, Han Q Y, *et al.* Early warning for karst rocky desertification in agricultural land based on the 3S and ANN technique: a case study in Du'an County, Guangxi [J]. Carsologica Sinica, 2012, **31**(1): 52-58.
- [15] 黄碧燕, 李小夏, 廖勇. 广西农产品产地土壤硒资源普查及分级评价研究[J]. 广西农学报, 2018, **33**(2): 19-29.
Huang B Y, Li X X, Liao Y. Investigation on soil selenium resources census in producing area of Guangxi agricultural products and graded evaluation [J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2018, **33**(2): 19-29.
- [16] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [17] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)[S].
- [18] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S].
- [19] 温国灿, 黄艳, 郭永玲, 等. 酸性土壤有效硒提取条件优化的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(5): 1996-2000.
Wen G C, Huang Y, Guo Y L, *et al.* Optimal conditions of extraction method for available selenium in acid soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(5): 1996-2000.
- [20] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, *et al.* Selenium in soil and endemic diseases in China [J]. Science of the Total Environment, 2002, **284**(1-3): 227-235.
- [21] DD 2019-10, 天然富硒土地划定与标识(试行)[S].
- [22] 杨程. 硒镉地质高背景区微量元素在茶叶中的积累、浸出特征及抗菌抗氧化作用研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2019.
Yang C. Trace elements in tea leaf and infusion of a green tea grown in a high geological background area of selenium (Se) and cadmium (Cd) and the antibacterial and antioxidant effects of Se-enriched tea[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2019.
- [23] 邵亚. 桂林富硒长寿区小流域地理环境中硒分布特征、控制因素及其生态效应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
Shao Y. Distribution characteristics, controlling factors and ecological effects of Se in the geographical environment of small watershed in Guilin Se-enriched longevity area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [24] 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].
- [25] Yu T, Hou W L, Hou Q Y. *et al.* Safe utilization and zoning on natural selenium-rich land resources: a case study of the typical area in Enshi County, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, **42**(9): 2803-2818.
- [26] 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.
- [27] GB/T 22499-2008, 富硒稻谷[S].
- [28] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [29] NY 861-2004, 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量[S].
- [30] 张荣. 中国主要产粮区稻米镉污染调查及镉污染稻米的加工利用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.
Zhang R. Cadmium investigation of rice in Chinese major agricultural regions and utilization of rice polluted by cadmium [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2017.
- [31] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 449-459.
Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 449-459.
- [32] 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 等. 桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1855-1863.
Chen T B, Pang R, Wang F P, *et al.* Safety assessment of rice planting in soil cadmium geological anomaly areas in southwest Guangxi [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1855-1863.
- [33] 何巧, 曹赵云, 张涵彤, 等. 我国部分市售富硒大米中硒含量与膳食暴露评估[J]. 农产品质量与安全, 2019, (3): 14-19.
He Q, Cao Z Y, Zhang H T, *et al.* Selenium content in some selenium-enriched rice from Chinese market and its dietary exposure assessment [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2019, (3): 14-19.
- [34] 黎少豪, 雷宁生, 吴训, 等. 广西部分地区市售大米中硒、锌含量调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, **9**(21): 5785-5788.
Li S H, Lei N S, Wu X, *et al.* Investigation and analysis of selenium and zinc content in commercial rice in parts of Guangxi [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, **9**(21): 5785-

- 5788.
- [35] 余飞, 张风雷, 张永文, 等. 重庆典型农业区土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. 物探与化探, 2020, **44**(4): 830-838.
Yu F, Zhang F L, Zhang Y W, *et al.* Geochemical characteristics and influential factors of soil selenium in typical agricultural area, Chongqing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, **44**(4): 830-838.
- [36] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤, 2018, **50**(6): 1119-1125.
Yu T, Yang Z F, Wang R, *et al.* Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. Soils, 2018, **50**(6): 1119-1125.
- [37] Liu H L, Wang X Q, Zhang B M, *et al.* Concentration and distribution of selenium in soils of mainland China, and implications for human health [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2021, **220**, doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106654.
- [38] 郭莉, 杨忠芳, 阮起和, 等. 北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J]. 现代地质, 2012, **26**(5): 859-864.
Guo L, Yang Z F, Ruan Q H, *et al.* Content and distribution of selenium in soil of Beijing Plain[J]. Geoscience, 2012, **26**(5): 859-864.
- [39] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [40] Jenny H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology[M]. New York: McGraw-Hill, 1941.
- [41] 马明, 姚凌阳, 谢淑云, 等. 江西于都银坑-桥头-马安地区不同富硒农作物地球化学适生模型的建立[J]. 现代地质, 2019, **33**(5): 1063-1069.
Ma M, Yao L Y, Xie S Y, *et al.* Establishment of a geochemical model for different Se-enriched crops in Yinkeng-Qiaotou-Ma'an area, Yudu county, Jiangxi province[J]. Geoscience, 2019, **33**(5): 1063-1069.
- [42] 安永龙, 黄勇, 张艳玲, 等. 北京房山南部地区富硒土壤生物有效性特征及来源[J]. 地质通报, 2020, **39**(2-3): 387-399.
An Y L, Huang Y, Zhang Y L, *et al.* Bioavailability and source analyses of Se-enriched soil in the south of Fangshan district, Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2020, **39**(2-3): 387-399.
- [43] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(1): 75-81.
Zhu J M, Liang X B, Ling H W, *et al.* Advances in studying occurrence modes of selenium in environment [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, **22**(1): 75-81.
- [44] 田义超, 黄远林, 张强, 等. 北部湾钦江流域土壤侵蚀及其硒元素流失评估[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 257-273.
Tian Y C, Huang Y L, Zhang Q, *et al.* Soil erosion and selenium loss in Qinjiang River Basin in Beibu Gulf coastal zone [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 257-273.
- [45] Pyrzynska K. Selenium speciation in enriched vegetables [J]. Food Chemistry, 2009, **114**(4): 1183-1191.
- [46] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(5): 1423-1429.
Huang Q Q, Du W, Wang Q, *et al.* Uptake and accumulation of Se by rice in different soils supplied with selenite or selenate[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(5): 1423-1429.
- [47] 彭琴, 李哲, 梁东丽, 等. 不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1667-1674.
Peng Q, Li Z, Liang D L, *et al.* Dynamic differences of uptake and translocation of exogenous selenium by different crops and its mechanism[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1667-1674.
- [48] 郭璐, 满楠, 梁东丽, 等. 小白菜对外源硒酸盐和亚硒酸盐动态吸收的差异及其机制研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3272-3279.
Guo L, Man N, Liang D L, *et al.* Differences of selenium uptake pattern of pakchoi and the possible mechanism when amended with selenate and selenite[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3272-3279.
- [49] 付中彪, 何宁洁, 鲍征宇, 等. 赣南地区水稻-根系土系统中硒含量影响因素分析[J]. 地质科技情报, 2019, **38**(5): 220-229.
Fu Z B, He N J, Bao Z Y, *et al.* Analysis of influencing factors of selenium content in rice-root soil system in southern Jiangxi [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, **38**(5): 220-229.
- [50] 陈锦平, 刘永贤, 潘丽萍, 等. 浔郁平原不同作物的硒富集特征及其影响因素[J]. 土壤, 2018, **50**(6): 1155-1159.
Chen J P, Liu Y X, Pan L P, *et al.* Selenium accumulation characteristics and influential factors of different crops in Xunyu plain[J]. Soils, 2018, **50**(6): 1155-1159.
- [51] Fordyce F M. Selenium deficiency and toxicity in the environment [A]. In: Selinus O (Ed.). Essentials of Medical Geology [M]. Dordrecht: Springer, 2013. 375-416.
- [52] 陈锦平, 刘永贤, 曾成城, 等. 降雨对土壤硒迁移转化的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(6): 1909-1915.
Chen J P, Liu Y X, Zeng C C, *et al.* Research advances in the effects of rainfall on soil selenium migration and transformation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(6): 1909-1915.
- [53] Matos R P, Lima V M P, Windmüller C C, *et al.* Correlation between the natural levels of selenium and soil physicochemical characteristics from the Jequitinhonha Valley (MG), Brazil [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **172**: 195-202.
- [54] 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 P, 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.
- [55] 朱文东. 不同水稻品种的硒富集能力及品质分析[J]. 河南农业科学, 2014, **43**(10): 11-14.
Zhu W D. Enrichment ability of selenium and quality of different rice varieties [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, **43**(10): 11-14.
- [56] 邵慧, 郭建, 尚艳娥. 中国居民膳食中镉摄入量调查与分析 [J]. 粮食科技与经济, 2014, **39**(3): 43-45.
- [57] FAO/WHO. Joint FAO/WHO expert committee on food additives seventy-third meeting [EB/OL]. <http://www.who.int/foodsafety/publications/chem/summary73.pdf>, 2010-06-24.
- [58] 石萌萌, 梁江, 赵鹏, 等. 广西居民膳食中黄曲霉毒素暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, **32**(4): 432-436.
Shi M M, Liang J, Zhao P, *et al.* Dietary exposure assessment of aflatoxins of residents in Guangxi [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2020, **32**(4): 432-436.
- [59] 食品安全标准与监测评估司. 食品安全国家标准审评委员会秘书处关于征求食品中污染物限量等 16 项食品安全国家标准(征求意见稿)意见的函[EB/OL]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s3593/202008/c44ef007064e4aceaaa5e24bd9f3bb1.shtml>, 2020-08-31.

- [60] 聂晓兰, 林波, 温坤, 等. 锌、硒对镉中毒小鼠金属硫蛋白合成及脂质过氧化损伤的影响[J]. 山西医科大学学报, 2009, **40**(7): 577-579.
Nie X L, Lin B, Wen K, *et al.* Effects of zinc and selenium on metallothionein synthesis and lipid peroxidation in cadmium poisoning mice[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2009, **40**(7): 577-579.
- [61] 陈华洁. 端粒酶在硒拮抗镉致癌作用中的调控机制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Chen H J. Regulation mechanism of telomerase in joint action of selenium and cadmium on carcinogenesis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [62] 宋明义, 岑静, 胡艳华, 等. 高镉地质环境富硒土壤特征及其生态效应[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 354-360.
Song M Y, Cen J, Hu Y H, *et al.* Study on the characteristics of selenium-rich soil under geological environment with high contents of cadmium and its ecological effects [J]. Earth and Environment, 2012, **40**(3): 354-360.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2019年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2019年度总被引频次12 057,影响因子2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)