

地质高背景区土壤硒镉的伴生关系及作物吸收^①

王 锐^{1,2}, 王佳彬^{1,2}, 蒋玉莲^{1,2}, 朱世林^{1,2}, 周 皎^{1,2}, 贾中民^{1*}

(1 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038; 2 重庆市土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038)

摘要: 以重庆市黔江区为例, 开展地质高背景区土壤硒(Cd)、镉(Se)的来源、伴生关系及作物吸收研究, 结果显示: 研究区土壤 Se 资源丰富, 土壤 Cd 超过筛选值和管制值的比例分别为 30.81% 和 1.74%, 且土壤以酸性为主; 土壤 Se、Cd 含量主要受到二叠系、泥盆系及寒武系地层分布的影响, 在志留系地层中, 农业活动也对土壤 Cd 含量具有一定的影响; 土壤中 Cd 和 Se 伴生及表层富集现象明显, 可能与土壤中黏土矿物、有机质及铁锰氧化物的吸附作用有关。土壤铁锰氧化物及有机质含量对水稻 Cd 和 Se 的吸收有抑制作用, 土壤 pH 是影响水稻 Cd、Se 吸收的关键因子, 碱性条件下水稻对 Cd 的吸收降低但有利于水稻对 Se 的吸收, 因此, 土壤 pH 调节是富 Se 资源安全开发的关键。

关键词: 硒; 镉; 来源; 伴生关系; 作物吸收; 影响因素

中图分类号: X171.5 文献标志码: A

Soil Cd and Se Associated Relationship and Crop Absorption in Geological High Background Area

WANG Rui^{1,2}, WANG Jiabin^{1,2}, JIANG Yulian^{1,2}, ZHU Shilin^{1,2}, ZHOU Jiao^{1,2}, JIA Zhongmin^{1*}

(1 Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China;
2 Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China)

Abstract: Taking Qianjiang District of Chongqing City as an example, this paper studied the source, associated relationship and crop absorption of soil Cd and Se in the high geological background area. The results showed that soil Se resources were abundant in the study area, the proportions of soil Cd exceeding the selected value and the controlled value were 30.81% and 1.74%, respectively, and soil was mainly acidic. Soil Se and Cd contents were mainly affected by the distribution of Permian, Devonian and Cambrian strata, and in Silurian strata, agricultural activities had a certain influence on soil Cd content. The associated and surface enrichment of Cd and Se in soil were obvious, which may be related to the adsorption of clay minerals, organic matter and Fe/Mn oxides in soil. The contents of Fe and Mn oxides and organic matter in soil inhibit Cd and Se absorption in rice, and soil pH is a key factor affecting the absorption of Cd and Se in rice. Alkaline conditions could reduce Cd absorption and promote Se absorption by rice. Therefore, the regulation of soil pH is key to the safe development of Se-rich resources.

Key words: Se; Cd; Source; Associated relationship; Crop absorption; Influence factor

土壤是人类赖以生存的基础, 是动植物生长的重要载体, 由于土壤是大气圈-生物圈-岩石圈的过渡地带, 使其成为各类污染物的源和汇^[1-2]。土壤供应和协调植物生长发育所需水分、养分、部分空气和热量, 其质量直接影响着农产品的产量和质量, 进而影响人类的身体健康和生存状况^[3-6], 而土壤中的硒(Se)、镉(Cd)等微量元素是影响土壤质量、农产品安全和人体健康的主要因子^[7]。

Se 被称为长寿元素, 富 Se 资源是助力乡村振兴的重要手段之一, 但“Se、Cd 伴生”现象限制了多地富 Se 资源的开发利用^[8]。张运强等^[9]研究发现, 浙江金华地区土壤 Se 资源丰富, 主要与地质背景有关, 具有较好的富 Se 资源开发潜力, 但存在明显的土壤 Cd 污染问题。湖北恩施被称为“世界硒都”, 土壤 Se 继承了二叠系茅口组黑色页岩的地球化学特征, 但土壤 Se、Cd 含量呈显著正相关, 土壤 Cd 超标限

①基金项目: 渝规资[2022]61-9-2 号和重庆市地矿局川东南地质大队自立科研项目(CDNKY-2023003)资助。

* 通讯作者(578314957@qq.com)

作者简介: 王锐(1994—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 工程师, 主要从事环境地球化学及土壤污染防治研究。E-mail: 1372661182@qq.com

制了富 Se 土地资源的利用^[10]。此外, 海南^[11]及陕西紫阳地区^[12]虽然土壤 Se 含量达到富 Se 标准, 但部分地区仍存在土壤 Cd 超标的问题。土壤的“Se、Cd 伴生”现象同样会延续到农产品中, 进而影响农产品品质, 王锐等^[13]对恩施地区沙地乡辣椒、土豆等进行了采样分析, 发现农产品中 Se 含量均较高, 部分达到了富 Se 标准, 具有生产高山富 Se 辣椒、土豆的潜力, 但同时部分样品存在一定程度的 Cd 超标情况。覃建勋等^[14]对广西岩溶地区土壤及农产品 Se、Cd 的地球化学特征进行了研究, 同样发现了上述问题。目前, 关于土壤-农产品中 Se、Cd 的研究主要集中在含量特征的评价方面, 关于 Se、Cd 伴生及其原因, 以及如何趋利避害利用地质高背景区富 Se 土地资源鲜有探讨, 严重限制了富 Se 土地资源的利用。

重庆市黔江区已开展的 1:25 万土地质量调查结果显示, 该地区土壤中 Se 含量丰富, 但部分地区土壤 Cd 存在超标情况。因此, 本研究选择以

黔江区为例, 通过系统分析表层土壤中 Cd 和 Se 的含量及空间分布特征对其来源进行了解析, 通过分析二者在垂直剖面上的变化规律及相关性探讨了二者伴生的机理, 以及通过研究影响该区水稻籽实吸收二者的因素探究了影响富 Se 农产品安全生产的关键因子, 以期为研究区富 Se 资源的安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔江区位于重庆市东南部, 地处 $108^{\circ}28'E \sim 108^{\circ}56'E$, $29^{\circ}04'N \sim 29^{\circ}52'N$, 是渝、鄂、湘、黔四省市的结合部, 东临湖北省的咸丰县, 西接彭水县, 南连酉阳土家族苗族自治县, 北接湖北利川市。区内主要分布地层有寒武系、奥陶系、志留系、二叠系和三叠系等, 岩性以灰岩、砂岩和泥页岩为主, 其中志留系是黔江区耕地资源的主要分布区域(图 1)。黔江

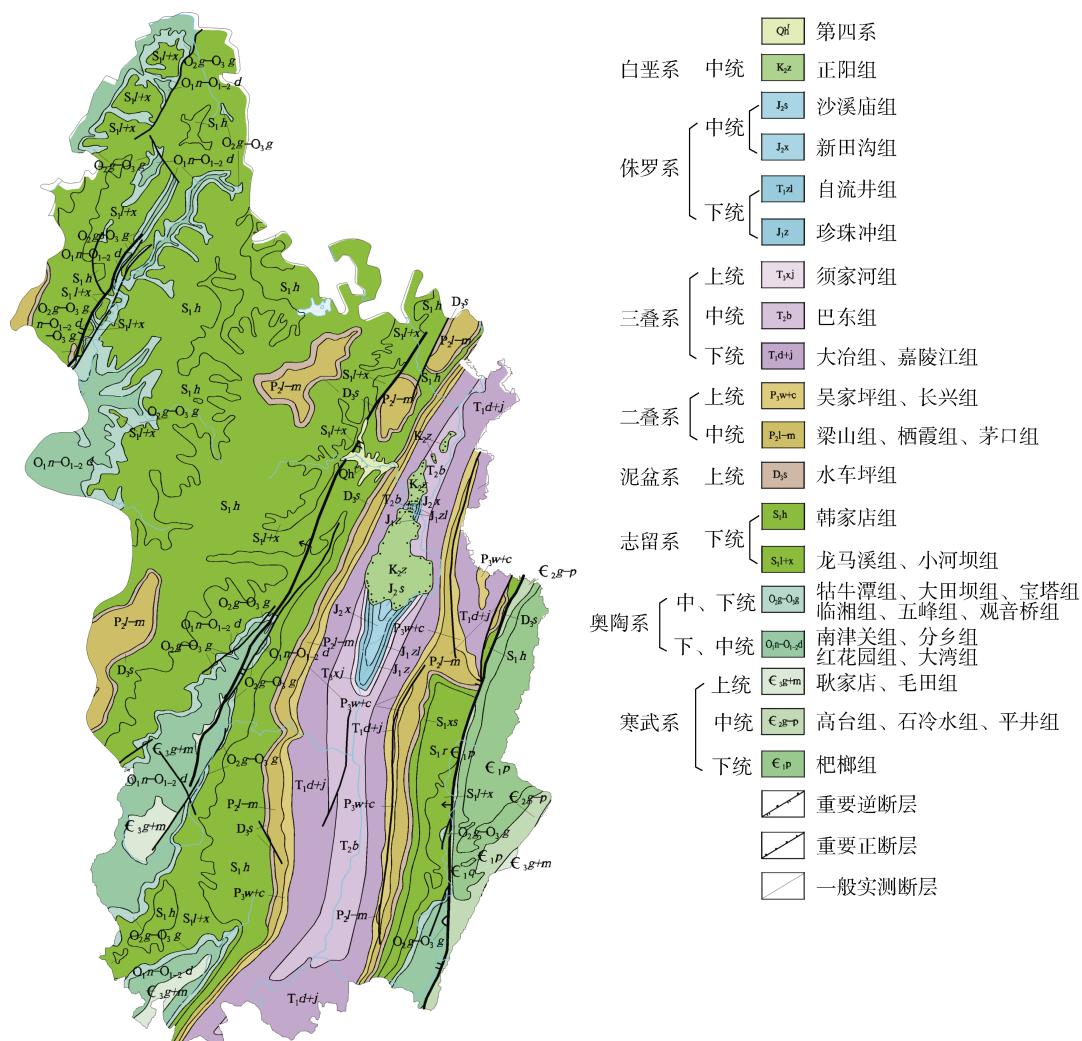


图 1 黔江区地层分布
Fig. 1 Stratigraphic distribution in Qianjiang District

区属中亚热带湿润季风性气候, 境内地势较为复杂, 相对高度差较大, 气候具有随海拔高度变化的立体规律, 是典型的山地气候, 多年平均降水量为1200.1~1389 mm, 主要集中在夏季。地貌总体景观为褶皱山, 背斜大部为山、向斜多数为谷, 山脉走向与地质构造线方向总体一致, 呈北北东—南南西向。区内土壤分布有黄壤土、紫泥土、红壤土、黄棕壤土、石灰岩土、冲积土、水稻土7个土类, 黄壤土占总面积的80%以上。受成土母质和气候的影响, 区内土地资源水土流失严重, 耕地不断减少, 后备资源缺乏, 主产作物为水稻、小麦、油菜、柑橘等。

1.2 样品采集与分析

采用1:50 000比例尺, 参照DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[15]进行样点布设, 样点覆盖研究区主要的地层分布, 共采集表层土壤(0~20 cm)样品8 789件, 同一样点采集4~6个子样充分混合均匀, 去除样品内的石块、植物根系等杂质, 利用四分法取样约1~1.5 kg装袋。根据田块特点采用星形法、蛇形法等, 采集大宗农作物水稻样品160件, 多株水稻籽实样品充分混合均匀后, 四分法

留取样品。同时, 在水稻样点的同一点位采集根系土样品, 采样时将水稻植株连根拔出, 将附着在根系上的土壤抖落在干净的一次性塑料布上, 多株农作物根系土充分混合均匀后, 四分法留取1~1.5 kg装入样品袋。在自然林地布设2个土壤垂向剖面, 挖掘深度直至母岩层, 采样间隔20 cm, 每件样品为等体积采集, 样品采集后按照由上至下顺序编号, CP01和CP02剖面挖掘深度分别为160和220 cm。

土壤样品在自然条件下阴干, 在此过程中经常揉搓, 以免胶结, 并去除土壤中的砾石以及植物根系。晾干后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打, 以便使土壤样品恢复至自然粒级状态, 随后研磨所有样品过2 mm(10目)粒级的尼龙筛, 取500 g装瓶待测。水稻样品在无污染、无扬尘、通风的条件下自然风干后, 脱粒, 送至实验室进一步处理。各类样品分析测试由国土资源部重庆矿产资源监督检测中心完成。土壤样品分析方法及检出限见表1。

水稻样品利用微波消解法进行处理, 分析方法为等离子质谱法(ICP-MS), Cd、Se的检出限分别为0.000 2、0.005 mg/kg, 符合文献[16]的要求。

表1 土壤指标分析方法检出限
Table 1 Detection limits of soil index analysis methods

指标	分析方法 ^[16]	样品处理方法	要求检出限 ^[17]	配套方法检出限	测定范围
Cd	等离子质谱法(ICP-MS)	HCl-HNO ₃ -HF-HClO ₄ 溶样	0.03	0.02	0.02~4.0
Mn		粉末压片法	10	5	5~2 500
Se	原子荧光法(AFS)	王水溶样	0.01	0.008	0.008~100
S	X射线荧光光谱法(XRF)	粉末压片法	30	20	20~2 000
SiO ₂			0.1	0.05	0.05~90
TFe ₂ O ₃			0.05	0.05	0.05~30
Al ₂ O ₃			0.05	0.05	0.05~30
Corg	氧化还原容量法(VOL)	重铬酸钾氧化	1.0	0.5	0.5~100
土壤pH	离子电极法(ISE)	蒸馏水浸提	0.10	0.1	0.1~14.0

注: 除土壤pH外, 其余指标均为土壤全量。氧化物计量单位为质量分数(%); Corg为有机质, 计量单位g/kg; pH无量纲; 其余指标为mg/kg。

1.3 数据处理方法

数据整理利用Excel 2010及SPSS 25.0完成, 数据空间结构分析利用GS⁺ 9.0完成, 图件绘制利用ArcGIS 10.2和Excel 2010完成, 数据检验、相关性分析利用SPSS 25.0完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤Cd、Se的含量

统计研究区土壤中Cd和Se的含量及土壤pH, 结果见表2。土壤中Cd、Se的平均值和中位值均大

于全国背景值^[18], 说明研究区土壤中Cd和Se的背景含量较高。土壤Cd、Se的平均值均大于中位值且变异系数均大于1, 说明土壤中Cd和Se的含量呈右偏分布, 存在异常高值点, 空间分布不均匀^[19]。

与GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[20]中给出的风险筛选值和管制值对比发现, 研究区土壤Cd超过筛选值的比例为30.81%, 超过管制值的比例为1.74%, 说明黔江区部分地区土壤中Cd含量较高, 对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境

可能存风险。

参照文献[15]对土壤中 Se 的含量及 pH 等级进行划分,结果显示,研究区土壤 Se 处于过剩、高、适量点位占比分别为 0.13%、40.44% 和 55.67%,可见,黔江区土壤 Se 资源丰富。研究区强酸性和酸性土壤点位所占比例分别为 50.11% 和 25.05%,土壤以酸

性为主。

2.2 土壤 Cd、Se 的来源解析

对土壤 Cd 及 Se 元素含量进行正态分布检验发现,二者均不符合正态分布;将两数据进行自然对数变换后发现,Cd 和 Se 数据的 K-S 检验结果分别为 0.03 和 0.04,接近 0.05(表 3),基本符合正态分布。

表 2 土壤中 Cd、Se 含量及 pH
Table 2 Cd and Se contents and pH in soil

指标	最小值	最大值	平均值	中位值	变异系数	全国背景值 ^[18]
Cd(mg/kg)	0.009	47.46	0.44	0.29	1.89	0.14
Se(mg/kg)	0.02	52.19	0.43	0.30	1.66	0.17
pH	4.07	9.68	-	5.51	-	8.0

表 3 土壤 Cd 和 Se 正态分布检验结果
Table 3 Test results of soil Cd and Se normal distribution

指标	原始数据			自然对数变换后		
	偏度	峰度	K-S(P)	偏度	峰度	K-S(P)
Cd(mg/kg)	31.45	1513.40	0.00	0.58	1.19	0.03
Se(mg/kg)	45.62	3131.61	0.00	0.81	1.06	0.04

利用 GS⁺ 9.0 软件,对土壤 Cd 及 Se 含量进行空间结构分析,结果见表 3。土壤 Cd 和 Se 含量均以指数函数拟合效果较好,决定系数分别为 0.907 和 0.894。块金系数表示元素空间异质性程度,是反映区域化变量空间相关性程度的指标。块金系数小于 0.25,说明区域化变量空间变异性主要受自然因素控制(成土母质、地形等),各变量之间具有强烈的空间自相关性;0.25<块金系数<0.75,说明区域化变量空间自相关性中等,受到自然因素和随机因素(耕作、施肥、点状污染等)的共同影响;块金系数大于 0.75,

说明区域化变量空间自相关性较弱,主要受随机因素的影响^[21]。从本研究分析结果看,土壤 Cd 含量的块金系数为 0.498,说明其受到自然因素和随机因素的共同影响,Se 含量的块金系数为 0.139,说明其空间自相关性强,主要受到自然因素的影响。

利用 ArcGIS 10.2 软件,对土壤 Cd 和 Se 含量进行空间插值,结果见图 2,可以看出,土壤 Se、Cd 含量的空间分布趋势与地层分布规律基本一致,土壤 Cd、Se 高含量区基本集中在二叠系及以下的老地层区。

表 4 土壤 Cd 及 Se 含量空间结构分析结果
Table 4 Analysis results of soil Cd and Se spatial structure

指标	函数模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	块金系数($C_0/(C_0+C)$)	变程(m)	R ²	RSS
Cd(mg/kg)	指数函数	0.269	0.540	0.498	20 760	0.907	0.005
Se(mg/kg)	指数函数	0.053	0.380	0.139	6 210	0.894	0.018

利用 ArcGIS 10.2 对土壤点位和地层进行空间连接,获取每个土壤点位所在地层,统计不同地层土壤中 Cd、Se 等元素的含量,结果见图 3。由图 3 可以看出,土壤 Cd、Se 含量均表现为在二叠系、泥盆系和寒武系等地层中相对富集。说明土壤中 Cd 和 Se 的含量与地层分布密切相关,其受到成土母质的影响。

空间结构分析结果表明,土壤 Cd 元素的来源可能受到一定程度的随机性因素的影响。从图 3 可知,志留系地层中,Cd 含量相对较低,成土母质对 Cd

元素含量贡献较低。志留系是耕地主要分布的地层,统计志留系地层分布区不同用地类型土壤 Cd 含量,发现耕地土壤 Cd 的平均含量为 0.37 mg/kg,林地土壤 Cd 的平均含量为 0.31 mg/kg,说明农业活动对土壤 Cd 含量具有一定的影响。

2.3 土壤 Cd、Se 的伴生关系

从空间分布可以看出,黔江区土壤 Cd、Se 的空间分布规律相似,且表层土壤中 Cd、Se 含量存在明显的正相关关系(Sig.=0.000, P<0.01)(图 4),说明黔江区存在土壤 Se、Cd 伴生的现象。

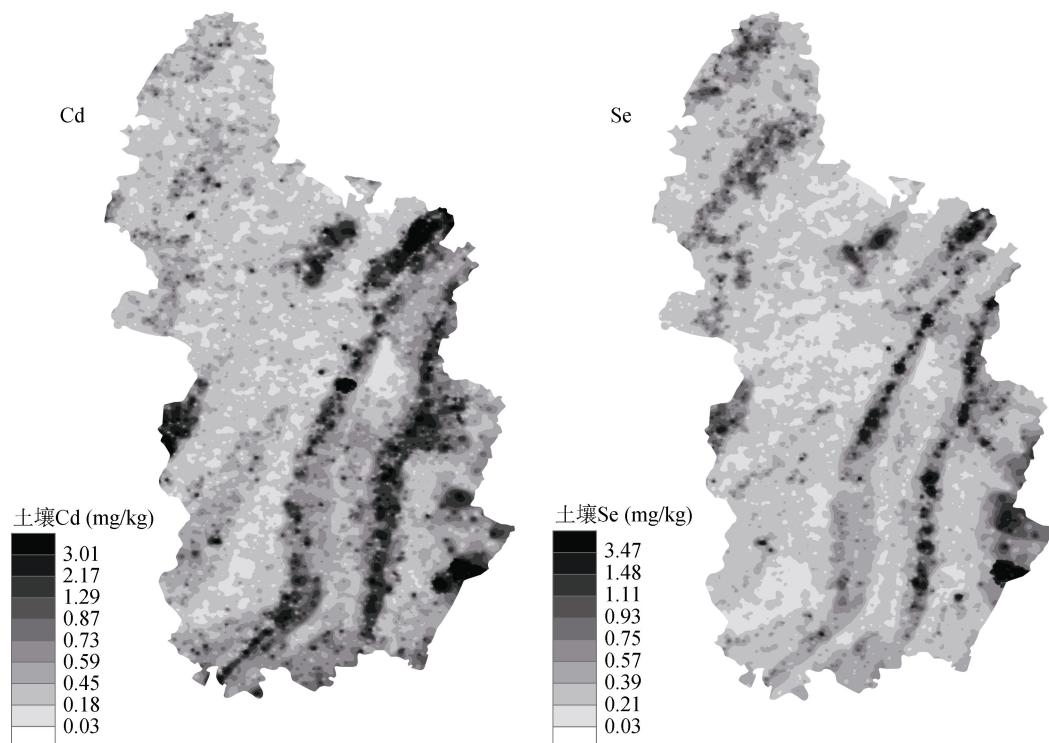


图2 土壤Se、Cd含量空间分布
Fig. 2 The spatial distributions of soil Se and Cd contents

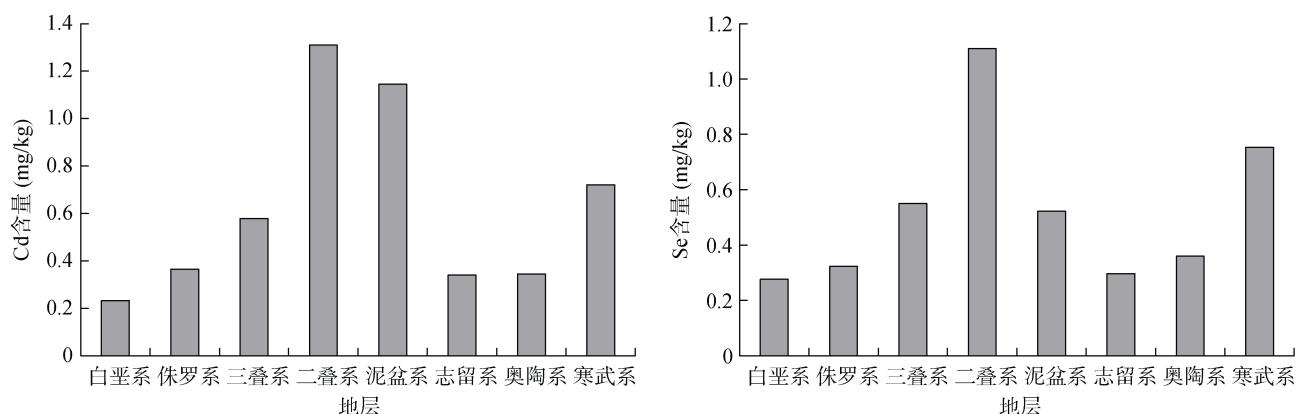


图3 不同地层土壤Cd、Se元素含量
Fig. 3 Soil Cd and Se contents in different strata

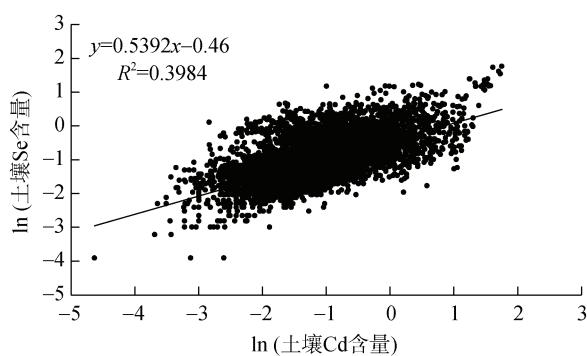


图4 土壤Se、Cd含量的相关关系
Fig. 4 Correlation between soil Se and Cd contents

图5为土壤Cd、Se含量在垂直方向上的变化情况(均为二叠系地层,母质为灰岩),可以看出,40 cm以下深度的样品中,土壤Cd、Se的含量变化程度不大,但在0~40 cm深度,Cd、Se元素含量骤增,说明土壤Cd、Se元素表现出明显的表层次生富集现象。

现场调查发现,研究区二叠系和寒武系地层主要以灰岩为主。由于黔江区降水丰富,且地形以山地为主,灰岩在风化过程中,一些可溶性的矿物,如白云石、方解石等发生淋溶作用而流失,而一些难溶性成分,如三水铝石、针铁矿等则残留在表层,Cd、Se

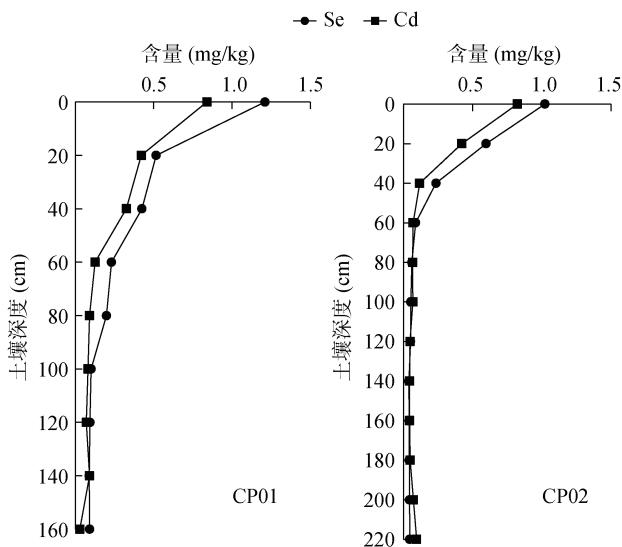


图 5 土壤 Se、Cd 含量在垂直方向上的变化
Fig. 5 Vertical changes of soil Se and Cd contents

被束缚在矿物晶格中, 迁移能力减弱, 造成表层土壤中 Cd、Se 的富集^[22]

相关分析表明(表 5), 土壤 Cd、Se 和土壤 Mn 和 Al_2O_3 的相关性较高, 主要原因可能是土壤在成土过程中, 会发生淋滤作用, 尤其是在雨水充沛且气温较高的地区, 土壤中的盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+})会不断淋失, 而 Mn、Al 的氧化物和氢氧化物不易溶于水而残留在原地, 这些物质能提供化学吸附的表面位点, 使得 Cd 等元素在土壤中出现专性吸附, 不易淋失, 导致在表层出现富集现象。土壤有机质是吸附重金属离子的主要土壤组分之一, 其含有多种类型的含氧官能团, 例如羟基、羧基等, 这些官能团会与重金属离子发生配位反应或者螯合反应, 使得重金属离子被固定^[23]。因此, 铁锰氧化物、土壤有机质和黏土矿物可能是造成研究区表层土壤 Cd、Se 等元素伴生和富集的主要原因。

表 5 土壤各指标间的相关系数
Table 5 Correlation coefficients of soil indicators

	Cd	Se	Mn	Al_2O_3	TFe_2O_3	Corg
Cd	1					
Se	0.402**	1				
Mn	0.164**	0.046	1			
Al_2O_3	0.180**	0.132**	0.188**	1		
TFe_2O_3	0.011	0.007	0.386**	0.729**	1	
Corg	0.193**	0.228**	0.113**	0.069*	0.042	1

注: *、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关; 下同。

2.4 水稻对土壤 Cd、Se 的吸收

水稻对土壤 Cd、Se 的吸收程度可以从两个方面

进行解释, 一方面是土壤中元素的生物有效态(即可以直接被植物吸收的形态)含量, 有效态含量越高, 越易被植物吸收, 其生物有效性越高; 另一方面是元素在农作物中的迁移系数(K), $K=C_{\text{crop}}/C_{\text{soil}}$ ^[24], 其中, C_{crop} 表示农作物籽实中某元素的含量, C_{soil} 表示土壤中对应元素的含量, K 值越大, 植物吸收能力越强。

计算研究区水稻对 Se、Cd 的迁移系数, 结果显示, 水稻 Se 的迁移系数变化范围为 0.023 ~ 0.507, 平均值为 0.127, 水稻 Cd 迁移系数的变化范围为 0.007 ~ 1.766, 平均值为 0.55, 说明水稻对 Se 的富集能力小于 Cd。

分析水稻 Cd、Se 迁移系数(K)与根系土中其他化学指标的相关性, 结果见表 6。由表 6 数据可知, 土壤 pH 与 Cd、Se 的迁移系数相关性显著, 酸性条件下, Cd 的迁移系数较高, 随着 pH 的升高, Cd 的迁移系数下降, 而 Se 的迁移系数不断升高。其主要原因在于酸性条件下, 土壤中 H^+ 含量较高, H^+ 的电负性远高于 Cd^{2+} , 使得土壤颗粒表面的吸附位点多被 H^+ 占据, 导致土壤中的 Cd 多以游离态形式存在于土壤溶液当中, 生物有效性提高, 而在碱性条件下, 土壤中的胶体、团聚体和金属氢氧化物含量增加, 对 Cd^{2+} 具有较强的吸附作用, 使得其生物有效性降低^[25]。在酸性条件下, 土壤中的 Se 主要以亚硒酸盐的形态存在, 不易被植物直接吸收利用, 而在碱性条件下, Se 主要以硒酸盐的形式存在, 该形态的 Se 溶解和迁移能力强, 易被植物吸收^[26]。因此, 土壤 pH 的调节是趋利避害利用富 Se 资源的关键因素之一。土壤有机质对 Se、Cd 的吸收均具有抑制作用, 主要原因为有机质对 Se、Cd 具有吸附作用, 从而形成难溶的络合物, 难以被农作物吸收。因此, 适当施用有机肥能一定程度控制农作物的 Cd 污染^[27]。 SiO_2 含量对 Se、Cd 的吸收具有促进作用, Al_2O_3 含量对 Se、Cd 的吸收具有抑制作用, 主要原因为土壤 Si 含量较高时, 土壤偏砂质, 黏性物质含量下降, 土壤颗粒对 Se、Cd 的吸附作用减少, 土壤 Al 的作用则相反^[28]。土壤中铁锰氧化物会形成结核, 对土壤元素有着明显的吸附固定作用, 从而土壤铁锰含量对 Se、Cd 的吸收均具有抑制作用^[29]。因此, 在黔江区开展富 Se 农作物的安全开发, 调节土壤 pH、防止土壤酸化是十分必要的。

3 结论

1) 研究区土壤中 Cd、Se 含量的平均值和中位值均大于全国背景值, 背景含量较高, 且其空间分布不

表6 水稻Cd、Se生物有效性的影响因素
Table 6 Factors affecting the bioavailability of Cd and Se in rice

	pH	S	SiO ₂	Mn	TFe ₂ O ₃	Corg	Al ₂ O ₃
K_{Cd}	-0.568**	-0.357**	0.473**	-0.483**	-0.294	-0.319*	-0.325**
K_{Se}	0.309**	-0.524*	0.408**	-0.262*	-0.244	-0.612**	-0.107*

均匀。土壤Cd含量超过筛选值和管制值的比例分别为30.81%和1.74%;土壤Se含量处于过剩、高、适量的点位占比分别为0.13%、40.44%和55.67%,土壤Se资源丰富,且土壤以酸性为主。

2) 土壤Se、Cd含量的空间自相关性强,主要受到二叠系、泥盆系及寒武系地层分布的影响。在志留系地层中,土壤Cd含量相对较低,成土母质对Cd元素含量贡献较低;该地层区域耕地土壤Cd含量明显高于林地土壤,说明农业活动对土壤Cd含量具有一定影响。

3) 土壤中Cd和Se含量的空间分布规律基本一致,且二者具有明显的正相关关系,伴生现象明显。土壤Cd、Se含量在0~40 cm土层深度显著高于40 cm以下,而土壤中黏土矿物、有机质及铁锰氧化物的吸附作用可能是造成Cd、Se表层富集的主要原因。

4) 研究区水稻对Cd的富集能力显著高于Se,土壤铁锰氧化物及有机质含量对Cd和Se的作物吸收有抑制作用,碱性条件下水稻对Cd的吸收程度会降低但有利于水稻对Se的吸收,因此,土壤pH调节是富Se资源安全开发的关键。

参考文献:

- [1] Bi X Y, Zhang M H, Wu Y J, et al. Distribution patterns and sources of heavy metals in soils from an industry undeveloped city in Southern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 205: 111115.
- [2] Kong X Y, Liu T, Yu Z H, et al. Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(10): 2281.
- [3] 姬超, 董文浩, 侯大伟, 等. 土壤重金属健康风险时空预测及管控目标研究[J]. 土壤, 2023, 55(3): 634–646.
- [4] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 82–91.
- [5] Long J, Liu Y L, Xing S H, et al. Effects of sampling density on interpolation accuracy for farmland soil organic matter concentration in a large region of complex topography[J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 562–571.
- [6] Rezapour S, Atashpaz B, Moghaddam S S, et al. Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system[J]. Chemosphere, 2019, 231: 579–587.
- [7] Spence A, Hanson R E, Grant C N, et al. Assessment of the bioavailability of cadmium in Jamaican soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(7): 4591–4603.
- [8] 周亚龙, 彭敏, 杨志斌, 等. 典型地质高背景区土壤硒-镉迁移累积特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4860–4869.
- [9] 张运强, 毛德玲. 金华富硒区菜地土壤重金属污染程度模糊综合评判[J]. 湖南农业科学, 2012(1): 47–49.
- [10] 唐世琪, 万能, 曾明中, 等. 恩施地区土壤与农作物硒-镉地球化学特征[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 607–614.
- [11] 耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等. 海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3477–3486.
- [12] Du Y Y, Wang X, Ji X H, et al. Effectiveness and potential risk of CaO application in Cd-contaminated paddy soil[J]. Chemosphere, 2018, 204: 130–139.
- [13] 王锐, 余涛, 杨忠芳, 等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1647–1654.
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行): DD 2005-03[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [17] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501–1511.
- [18] 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.
- [19] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 等. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统Cd等重金属生态风险评价[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(8): 1317–1331.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [21] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 941–951.
- [22] Aladesanmi O T, Oroboade J G, Osisiogu C P, et al. Bioaccumulation factor of selected heavy metals in *Zea*

- mays[J]. Journal of Health & Pollution, 2019, 9(24): 191207.
- [23] Zhao K L, Liu X M, Zhang W W, et al. Spatial dependence and bioavailability of metal fractions in paddy fields on metal concentrations in rice grain at a regional scale[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(7): 1165–1177.
- [24] Gu Q B, Yu T, Yang Z F, et al. Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: A case study of Guangxi, China[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, 70: 103199.
- [25] 刘永林, 吴梅, 刘睿, 等. 地质高背景区成土母岩对表土硒含量及其生物有效性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 834–840.
- [26] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH 和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1069–1077.
- [27] Han L F, Zhao X J, Jin J, et al. Using sequential extraction and DGT techniques to assess the efficacy of plant- and manure-derived hydrochar and pyrochar for alleviating the bioavailability of Cd in soils[J]. Science of the Total Environment, 2019, 678: 543–550.
- [28] 刘道荣, 周漪. 浙西水田土壤镉形态与有效性研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1239–1244.
- [29] Arao T, Kawasaki A, Baba K, et al. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9361–9367.