

西南红层山间盆地典型农耕区土壤-作物系统锌铜有益元素生物有效性及影响因素

徐磊^{1,2}, 赵萌生^{1,2,3}, 陈伟志^{1,2}, 巴永^{1,2}, 张亚^{1,2}, 侯青叶⁴, 陆芳芳^{1,2}, 钱坤^{1,2}

(1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南, 昆明 650100; 2. 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南, 昆明 650100; 3. 中国地质大学(武汉)高等研究院, 湖北, 武汉 430078; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】在滇中楚雄地区开展的土壤质量地球化学调查发现了大面积富锌富铜土壤, 为研究西南地区红层山间盆地富锌富铜土壤农耕区土壤-作物系统 Zn、Cu 等有益元素的迁移转化机制, 【研究方法】本文选取滇中姚安典型农耕区为研究区, 依据所获得的表层土壤、农作物籽实-根系地球化学数据, 通过分析表层土壤、作物籽实及根系土中 Zn、Cu 含量特征, 探讨影响水稻和玉米吸收富集 Zn、Cu 的主控因素, 建立作物 Zn、Cu 生物富集系数预测模型。【研究结果】结果表明: 姚安平坝区表层土壤 Zn、Cu 含量均值为 105.40mg/kg 和 42.67mg/kg, 富锌和富铜土地(一等)面积占比分别为 84.86%和 90.59%, 水稻籽实 Zn、Cu 含量均值为 19.28mg/kg 和 2.92mg/kg, 富集率为 100%和 70%, 生物富集系数为 0.20 和 0.07, 玉米籽实 Zn、Cu 含量均值为 21.42mg/kg 和 2.06mg/kg, 富集率为 80.00%和 6.70%, 生物富集系数为 0.20 和 0.07。【结论】影响水稻和玉米籽实 Zn、Cu 富集的因素存在差异, 主控水稻 Zn、Cu 生物富集系数的因素分别为 Soil-Zn、N、TFe₂O₃ 和 Soil-Cu、OM、S, 主控玉米 Zn 生物富集系数的因素为 Soil-Zn、SiO₂/Al₂O₃、TFe₂O₃。建立滇中红层山间盆地典型农耕区水稻和玉米籽实 Zn、Cu 生物富集系数的多元线性回归方程, 最优模型决定系数均大于 0.495, 水稻的预测效果优于玉米, Zn 的预测效果优于 Cu。预测出姚安县典型农耕区富 Zn 水稻、富铜水稻、富锌玉米种植面积分别为 72.87km²、70.47km² 和 69.71km², 可优化研究区水稻和玉米种植结构规划, 服务高原特色农业发展与乡村振兴战略实施。

关键词: 锌; 铜; 水稻玉米; 生物富集系数; 影响因素; 模型预测; 农业地质调查工程; 环境地质调查工程; 滇中

创新点: 依据系统的土壤质量地球化学调查数据, 运用多元统计分析方法, 开展滇中富锌富铜土地地区土壤-作物系统 Zn、Cu 生物有效性及影响因素研究, 建立预测模型, 为富锌富铜农产品开发及农业种植规划提供科学依据。

Bioavailability and influencing factors of Zn and Cu beneficial elements in soil-crop system in typical farming areas of red layer intermountain basin in the southwest China

XU Lei^{1,2}, ZHAO Mengsheng^{1,2}, CHEN Weizhi^{1,2}, BA Yong^{1,2}, ZHANG Ya^{1,2}, HOU Qingye⁴,
LU Fangfang^{1,2}, QIAN Kun^{1,2},

(1. Kunming General Survey of Natural Resources Center, CGS, Kunming, 650100, Yunnan, China; 2. Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming, 650100, Yunnan, China; 3. Institute of Advanced Research, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

基金项目: 中国地质调查局项目(编号: ZD20220211, ZD20220210, DD20230482)资助。

作者简介: 徐磊, 男, 1992年生, 硕士, 工程师, 主要从事地质矿产与生态地质调查研究工作; E-mail:1790968844@qq.com。

Abstract: This paper is the result of agricultural geological survey engineering.

[Objective] A land quality geochemical survey carried out in Chuxiong area of central Yunnan Province had found a large area of zinc and copper-rich soil. The purpose of this study is to study the migration and transformation mechanism of Zn, Cu and other beneficial elements in the soil-crop system in the farming area of zinc and copper-rich red bed mountain basin in southwest China. **[Methods]** In this paper, the typical farming area of Yao'an in central Yunnan is selected as the research area. Based on the geochemical data of surface soil and crop seed-root soil, the main control factors affecting the absorption and enrichment of Zn and Cu in rice and corn are discussed by analyzing the content characteristics of Zn and Cu in surface soil, crop seed and root soil, and the prediction model of crop Zn and Cu bioconcentration coefficient is established. **[Results]** The results showed that the average Zn and Cu contents in the surface soil of Yao 'an alluvial basin are 105.40 mg/kg and 42.67 mg/kg, the proportion of zinc-rich and copper-rich land (first-class) area are 84.86% and 90.59%, the average Zn and Cu contents in rice seeds are 19.28 mg/kg and 2.92 mg/kg, the enrichment rates are 100% and 70%, and the bioconcentration coefficients are 0.20 and 0.07, the average Zn and Cu contents in corn seeds are 21.42 mg/kg and 2.06 mg/kg, the enrichment rates are 80.00% and 6.70%, and the bioconcentration coefficients are 0.20 and 0.07. **[Conclusions]** There are differences in factors affecting Zn and Cu enrichment in rice and corn seeds. The main factors controlling Zn bioconcentration coefficients in rice are Soil-Zn, N, TFe_2O_3 , and the main factors controlling Cu bioconcentration coefficients in rice are Soil-Cu, OM and S. The main factors controlling Zn bioconcentration coefficients in corn are Soil-Zn, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and TFe_2O_3 . The multi-linear regression equation of Zn and Cu bioconcentration coefficients of rice and corn seeds in the typical farming area of the red layer mountain basin in Yunnan was established, and the optimal model decision coefficient was greater than 0.495, the prediction effect of rice is better than corn, and the prediction effect of Zn is better than Cu. The optimal model predicted that the planting area of Zn-rich rice, copper-rich rice and zn-rich corn in Yao'an County are 72.87 km², 70.47 km² and 69.71 km². Therefore, the planting structure planning of rice and corn in the study area can be optimized to serve the development of plateau characteristic agriculture and the implementation of rural revitalization strategy.

Key words: Zinc; Copper; rice and corn; bioaccumulation coefficient; influencing factors; model prediction; Agricultural geological survey engineering; Environmental geological survey engineering; central Yunnan

Highlights: Based on the systematic geochemical survey data of land quality, using multivariate statistical analysis method, The bioavailability and influencing factors of Zn and Cu in soil-crop system in zinc-rich and copper-rich soil area of central Yunnan were studied, and a prediction model was established to provide scientific basis for the development of zinc-rich and copper-rich agricultural products and agricultural planting planning.

About the first author: XU Lei, male, born in 1992, master's degree, engineer, mainly engaged in geological and mineral resources and ecological geological investigation and research; E-mail: 1790968844@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. ZD20220211 , ZD20220210 , DD20230482).

1 引言

Zn、Cu 是人体必需的微量元素，缺乏或过量对人体健康均会产生影响，而适量摄入对于保障健康生活、提高生活品质均具有重要意义（黄泽春等，2006；王登峰等，2013；Lock K et al., 2005），因此，人们将 Zn、Cu 分别誉为“生命的常青树”、“健康多面手”。大量的研究结果显示，人体普遍缺乏 Zn、Cu 等微量元素，市场上出现了很多 Zn、Cu 等微量元素保健品或药物，以解决因食物摄入不足而引起的健康问题（戈启军等，2020；Welch R M et al., 2004；Alloway B J., 2009）。因此，粮食中微量元素含量水平直接关系到人体健康状况，人体摄入的锌、铜主要通过食物链获取（王敬时，2012；张永清，2002），土壤是植物锌、铜营养的主要来源（王昌宇等，2019）。近年来，已有学者对土壤锌、铜的地球化学特征（于炎炎，2021）、形态分布（谢忠雷等，2006）、有效性（刘合满等，2008；夏伟等，2022）、富集机制（王琛，2021）及其影响因素（李明辉等，2019）进行了研究，对富锌富铜土壤进行土地资源区划及开发利用（吴价，2019；刘久臣等，2021）。Zn 和 Cu 是植物生长所必须的微量营养元素，土壤中 Zn、Cu 含量的高低直接影响农作物的产量与质量（李荣兴等，2017），间接影响人体健康，因此查清表层土壤中 Zn、Cu 等有益元素储备充足与否（于炎炎，2021）、农作物的吸收转化情况具有重要的意义。

近年来，随着中国地质调查局土地质量地球化学调查工作的大力开展，在滇中楚雄红层地区发现了大面积的富锌和富铜土壤，在此基础上，本文拟选取滇中红层山间盆地典型农耕区富锌富铜土壤以及农作物为研究对象，通过研究表层土壤 Zn、Cu 地球化学特征，分析土壤-农作物系统中 Zn、Cu 有益元素的迁移转化特征，探讨不同主要作物有益元素的生物有效性及影响因素，建立作物籽实 Zn、Cu 生物富集系数预测模型，利用面积性调查获得的地球化学数据进行预测，对红层山间盆地农耕区农业种植规划提供科学依据，提高富锌和富铜等特色土地资源开发规划的准确性和科学性，同时为当地富锌和富铜农产品开发提供依据，助力乡村振兴。

2 研究区概况

研究区位于云南省中部姚安县栋川镇和光禄镇所处的山间平坝区，地处云贵高原西部的滇中楚雄盆地（图 1a）。该区平均海拔 1870 m，气候温和，雨量集中，地势平坦，土壤肥沃，区位优势明显，自然条件优越。区内河流为蜻蛉河，属金沙江上游水系，发源于县境南部太平地区，纵贯姚安坝子、向北流经大姚元谋的蜻蛉河径流较长，是姚安平坝区的主要冲积河流及灌溉河流，被誉为姚安人民的“母亲河”。姚安平坝区是重要的粮食和蔬菜生产基地，区内主要种植水稻、玉米、石榴、西瓜、食用玫瑰花等经济作物，是滇中城市群的重要组成部分。

研究区出露地层为第四系冲积物（图 1b），研究区周围为白垩系紫红色碎屑岩，岩性主要为紫红色砂岩、粉砂岩、泥岩，研究区南部太平地区出露喜山期的碱性粗面岩和正长斑岩，研究区冲积物来源主要为白垩系碎屑岩和碱性侵入岩，蜻蛉河及平坝区周围水系的冲积为平坝区提供了源源不断的物质。研究区碱性侵入岩区位于沿金沙江-哀牢山-红河深大断裂带展布的新生代高钾富碱侵入岩带中段，因其内部发育斑岩岩浆系统老街子浅层低温热液铅、银和深部斑岩型铜钼矿化，岩体接触带及围岩内产出姚安岩浆热液脉型金、铜、铁、铅、锌等多金属矿床，发育的矿床以老街铅-银矿床和白马直金（铜）矿床等为典型，碱性侵入岩区母质及土壤具有 Zn、Cu、Pb、As、Ag、Hg 等高背景的特征。

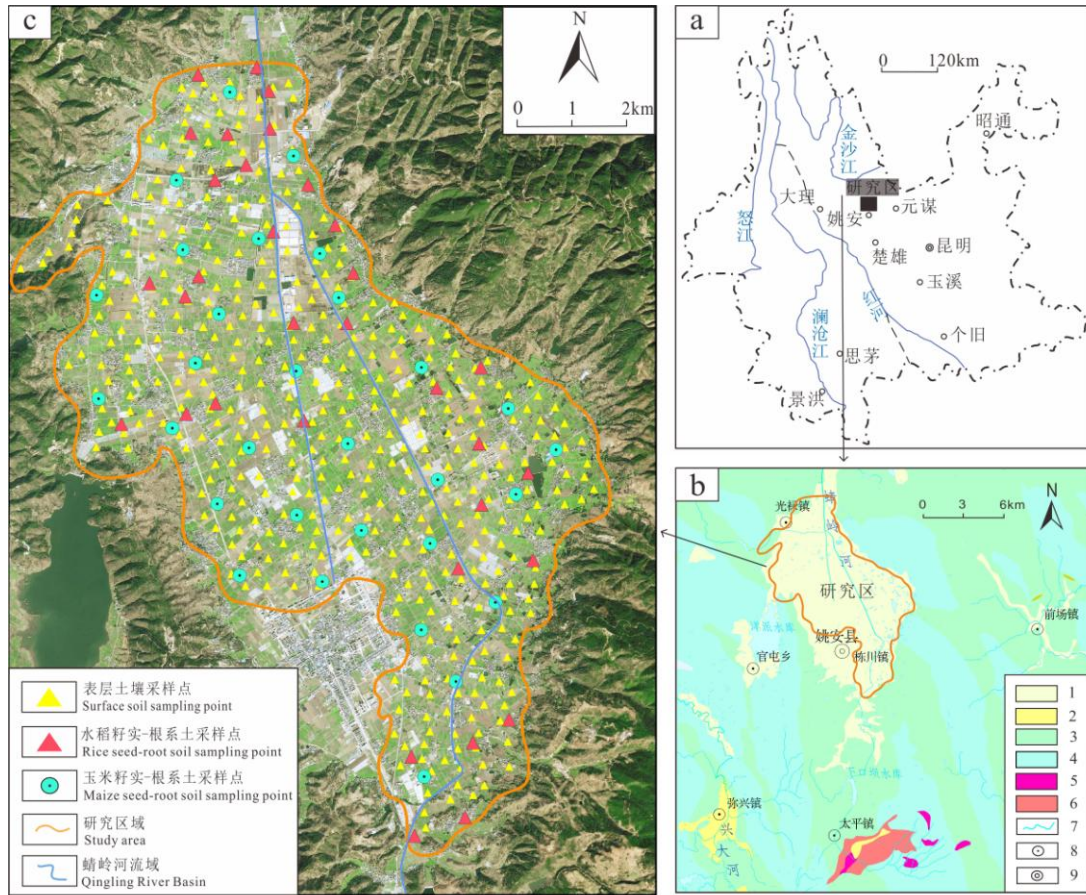


图 1 研究区地理地质简图及采样点位图

1—第四系冲积物；2—第三系碎屑岩；3—白垩系上统碎屑岩；4—白垩系下统碎屑岩；5—喜山期正长斑岩；6—喜山期碱性粗面岩；7—水系；8—乡镇名；9—县名；a, b, c 解释见正文

Fig. 1 Geographic geological sketch and sampling point bitmap of the study area

1—Quaternary alluvium; 2—Tertiary clastic rock; 3—Upper Cretaceous clastic rock; 4—Lower Cretaceous clastic rock; 5—Himalayan-Yanshanian orthophyry; 6—Himalayan-Yanshanian alkaline trachyte; 7—River system; 8—Township name; 9—County name; a,b,c explanations see the text

3 样品采集与分析

3.1 样品采集

按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)采集了 456 件表层土壤样品(图 1c), 表层土壤样品采集密度为 7 点/ km^2 , 采样点布设于农用地, 远离污染源, 样品自然阴干后过 10 目(2mm)尼龙筛。

在农作物成熟期, 按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)采集了 34 套水稻籽实与根系土样品、30 套玉米籽实与根系土样品。依据采集地块形状, 采用棋盘法、蛇形法、对角线法等多点采集子样, 等量混合组成 1 件样品。以 $0.1\sim 0.2\text{hm}^3$ 为采样单元, 一个采样单元分为 5 个子样点, 每个子样点采集 10~20 个水稻穗或 2 根玉米棒, 采集时避开病虫害和特殊植株, 而后将 5 个子样等量混匀为 1 件农作物籽实样品, 最后在室内自然晾干, 脱粒装袋, 每件样品干重量大于 500g。根系土样品采集与农作物样品采集相同, 农作物样品采集后连同植株拔起, 把植株根系上的土壤抖落到干净塑料布上, 由 5 个分样点等量混匀。在通风阴凉处, 自然阴干后, 过 10 目尼龙筛, 采用四分法后装入样袋, 每件样品重

量大于 2000g。

3.2 分析测试

表层土壤样品及根系土样品分析测试在中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心分析测试实验室完成，执行《地质矿产实验室测试质量管理规范（DZ/T 0130-2006）》标准，农作物样品分析测试在四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心完成，方法按照《生态地球化学评价样品分析技术要求》（DD2005-03）执行。表 1 为样品各元素指标相关检测方法和检出限。

表层土壤样品中密码插入 12 个 GBW 标准物质进行分析，每个元素每次分析结果单独计算测定值与标准值的对数误差 $\Delta \lg C$ (GBW) 来控制分析的准确度，其方法精密度和准确度均满足《地质矿产实验室测试质量管理规范（DZ/T 0130-2006）》要求。农作物样品分析测试插入 5 个 GBW 标准物质，每件样品分析 8 次，计算分析平均值与标准物质推荐值的相对误差 RE，并计算单个标样 8 份分析的相对标准偏差 RSD，方法符合《生态地球化学评价样品分析技术要求》（DD2005-03）。元素分析方法的报出率、检出限、准确度、精密度等指标均满足相关规范要求，分析数据质量可靠。

表 1 元素分析方法及检出限

Table 1 Element analysis methods and detection limits

样品	元素指标	实验室检出限	规范检出限	分析方法
土壤	Pb	1.00	2.00	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)
	Cu	0.46	1.00	
	Zn	2.00	4.00	电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES)
	P	6.00	10.00	
	Mn	5.00	10.00	
	SiO ₂ *	0.06	0.1	
	Al ₂ O ₃ *	0.03	0.05	X 射线荧光光谱法 (XRF)
	TFe ₂ O ₃ *	0.01	0.05	
	N	6.60	20.00	容量法 (Vap-Vol)
	Corg*	0.04	0.10	
	S	20.40	30.00	高频燃烧红外吸收法 (HFIR)
	pH**	0.10	0.10	离子选择电极法 (ISE)
	As	0.63	1.00	原子荧光光谱法 (AFS)
	Hg	0.0003	0.0005	
农作物	Cu	0.05	0.005	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)
	Zn	0.50	0.50	

注：*计量单位为%，**为无量纲，其余计量单位为 mg/kg。

4 结果与讨论

4.1 研究区土壤 Zn、Cu 富集特征

表 2 为研究区内 456 件表层土壤样品 Zn、Cu 及 Pb、As、Hg 元素含量统计特征值。土壤 Zn 含量变化范围为 41.70~162.00mg/kg，中位值为 100.00mg/kg，变异系数为 0.24，平均值为 105.40mg/kg，显著高于全国、西南和云南地区表层土壤 Zn 背景值（侯青叶等，2020）。土壤 Cu 含量变化范围为 27.00~75.90mg/kg，中位值为 42.30mg/kg，变异系数为 0.17，平均

值为 42.67mg/kg，显著高于全国和西南地区表层土壤 Cu 背景值，略高于云南表层土壤 Cu 背景值。

图 2 为研究区表层土壤 Zn、Cu 元素的地球化学空间分布图，Zn、Cu 高值区域主要分布在蜻蛉河干流与支流之间，低值区域主要分布在蜻蛉河干流以东的平坝区西侧。研究区成土母质为第四系冲积物，冲积物质来源于平坝区周围的白垩系红层和姚安太平地区的碱性侵入岩，白垩系红层主要为紫红色砂岩、粉砂岩、泥岩，太平地区的碱性侵入岩是蜻蛉河的发源地，冲沟水系密集，且该区域分布有包括老街铅-银矿床和白马苴金（铜）矿床在内的多个多金属矿床，与富碱火山-岩浆热液密切相关（吴鹏等，2019）。蜻蛉河是研究区内典型的冲积河流，也是农耕区内重要的灌溉河流，因此研究区表层土壤 Zn、Cu 等元素主要来源于富含矿质元素的碱性侵入岩区，土壤 Zn、Cu 元素的空间分布受区内蜻蛉河流向与物源区岩性的控制。

根据《土地质量地球化学评价规范》（DZ/T 0295—2016）给出的土壤 Zn、Cu 元素等级划分标准，进行土壤 Zn、Cu 元素地球化学等级划分（表 3），研究区表层土壤 Zn 含量整体上为丰富水平，一等（丰富）土地面积为 54.98km²，占全区比例为 84.86%，二等（较丰富）土地面积为 9.46，占全区比例为 9.46%，一等和二等土地占全区比例为 94.33%，三等、四等和五等占全区比例仅为 5.67%，存在污染风险（超出上限值）的土地比例为 0。研究区表层土壤 Cu 含量整体上为丰富水平，一等（丰富）土地面积为 58.69km²，占全区比例为 90.59%，二等（较丰富）土地面积为 0.23，占全区比例为 0.36%，不存在三等、四等和五等土地，存在污染风险（超出上限值）的土地面积为 5.87km²，占全区比例为 9.05%。

由于 Zn、Cu 主要来源于碱性侵入岩区，Pb、As、Hg 与 Zn、Cu 同属中低温热液元素组合，因此也需分析研究区表层土壤 Pb、As、Hg 元素含量特征（表 2）及是否存在污染风险。研究区表层土壤 Pb 含量范围为 17.40~187.00mg/kg，算数均值为 58.81mg/kg，显著高于中国、西南和云南地区的背景值，As 含量范围为 2.97~27.50mg/kg，算数均值为 9.17mg/kg，略低于中国、西南和云南地区的背景值，Hg 含量范围为 0.02~0.44mg/kg，算数均值为 0.05mg/kg，显著低于中国、西南和云南地区的背景值。依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB15618-2018）中的农用地土壤污染风险筛选值与管制值，研究区表层土壤 Pb 超过风险筛选值的土地占比为 6.59%，但均没有超过风险管制值，As 和 Hg 均未超过风险筛选值。综上所述可以看出，研究区大面积为绿色富锌富铜土壤，仅 Cu、Pb 存在点状的污染风险。

表 2 研究区表层土壤 Zn、Cu 及 Pb、As、Hg 元素含量特征（mg/kg）

Table 2 Content characteristics of Zn and Cu elements in surface soil of study area (mg/kg)

元素	最大值	最小值	中位值	平均值	标准差	CV	偏度	峰度	云南	西南	中国
Zn	162.00	41.70	100.00	105.40	25.16	0.24	0.20	-0.63	96.00	92.00	71.00
Cu	75.90	27.00	42.30	42.67	7.30	0.17	1.04	2.63	40.00	35.00	25.00
Pb	187.00	17.40	29.80	58.81	44.95	0.76	0.99	0.23	39.00	38.00	30.00
As	27.50	2.97	7.86	9.17	3.77	0.41	0.79	0.70	10.60	10.90	10.30
Hg	0.44	0.02	0.05	0.05	0.04	0.8	5.07	40.11	0.07	0.13	0.076

注：云南、西南、中国土壤 Zn 元素背景值来源于文献（侯青叶等，2020）。

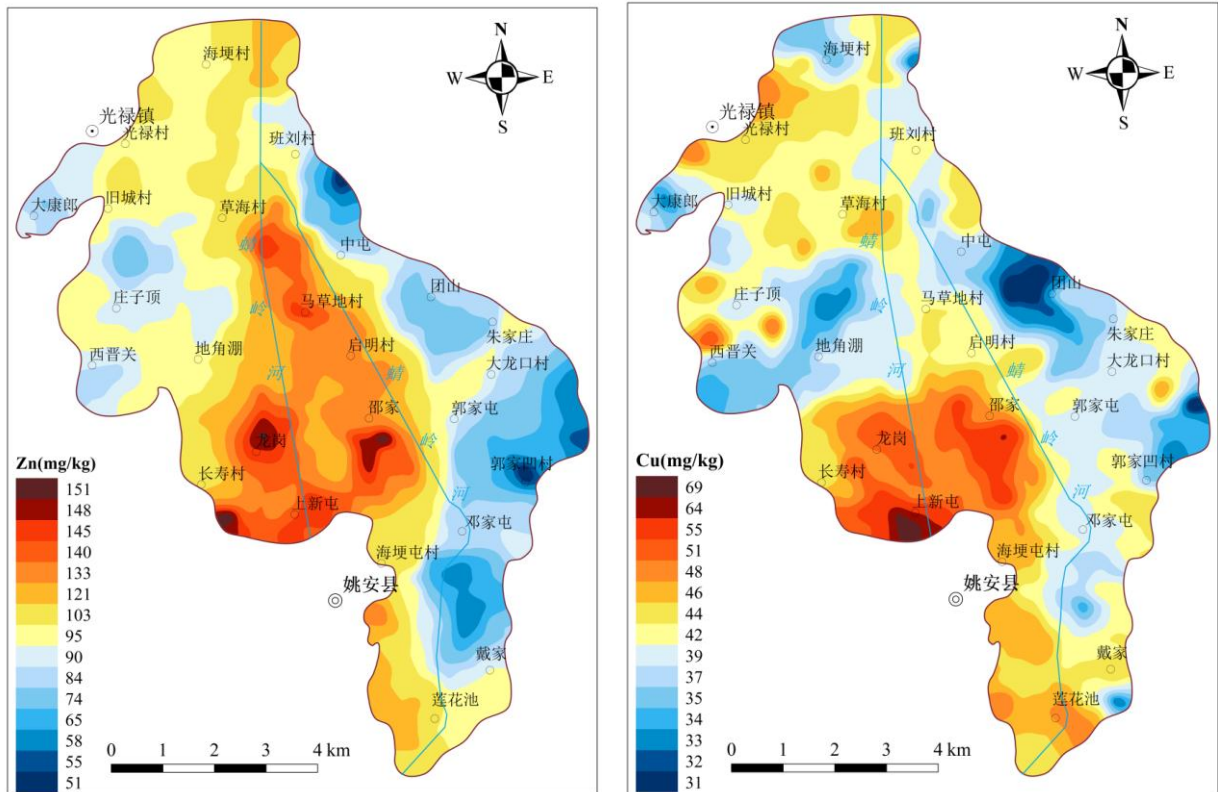


图 2 研究区表层土壤 Zn、Cu 元素空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of Zn and Cu elements in surface soil in the study area

表 3 研究区表层土壤 Zn、Cu 元素等级划分

Table 3 Classification of Zn and Cu elements in surface soil of study area

元	项目	上限	一等	二等	三等	四等	五等
素			(丰富)	(较丰富)	(中等)	(较缺乏)	(缺乏)
	值域/(mg/kg)	≥ 200	84~200	71~84	62~71	50~62	≤ 50
Zn	面积/km ²	0.00	54.98	6.13	2.44	1.13	0.11
	比例/%	0.00	84.86	9.46	3.76	1.75	0.16
	值域/(mg/kg)	≥ 50	29~50	24~29	21~24	16~21	≤ 16
Cu	面积/km ²	5.87	58.69	0.23	0.00	0.00	0.00
	比例/%	9.05	90.59	0.36	0.00	0.00	0.00

4.2 作物 Zn、Cu 富集特征

目前没有富锌富铜农作物的相关标准规范，因此本文根据《中国食物成分表—标准版》（杨月欣，2018）和《粮食（含谷物、豆类、薯类）及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》（NY 861—2004），界定富锌水稻和富锌玉米的划分标准，富锌水稻籽实 Zn 的含量范围为 15.4~50mg/kg，富铜水稻籽实 Cu 的含量范围为 2.5~10mg/kg，富锌玉米籽实 Zn 的含量范围为 17~50mg/kg，富铜玉米籽实 Cu 的含量范围为 2.5~10mg/kg。

表 4 为研究区玉米和水稻籽实的 Zn、Cu 含量及富集率，研究区水稻籽实 Zn 的含量变化范围为 15.4~25.7mg/kg，平均值为 19.28mg/kg，Cu 的含量变化范围为 1.54~4.35mg/kg，平均值为 2.92 mg/kg，水稻 Zn、Cu 含量经对数化后呈正态分布，整体上水稻籽实均富 Zn 富 Cu，尤其是 Zn，水稻籽实 Zn 元素富集率达 100%，Cu 元素富集率为 70%。研究区玉米籽实 Zn 的含量变化范围为 14.70~34.00mg/kg，平均值为 21.42mg/kg，Cu 的含量变化范围为 1.39~2.62mg/kg，平均值为 2.06mg/kg，玉米 Zn 含量经对数化后呈正态分布，整体上玉米籽实富 Zn 程度较高，Zn 元素富集率达 80%，富铜程度偏低，Cu 元素富集率仅为 6.70%。

表 4 作物籽实与根系土 Zn、Cu 含量及富集率

Table 4 Zn and Cu contents and enrichment rate in crop seed and root soil

项目	样品类型	样品数	最大值	最小值	平均值	标准差	富集率
		件	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
水稻 Zn	籽实	34	25.70	15.40	19.28	2.70	100.00
	根系土		53.8.0	162.00	101.46	19.46	
水稻 Cu	籽实	34	4.35	1.54	2.92	0.67	70.00
	根系土		67.20	31.50	42.85	7.38	
玉米 Zn	籽实	30	34.00	14.70	21.42	4.61	80.00
	根系土		166.00	38.90	110.30	30.19	
玉米 Cu	籽实	30	2.62	1.39	2.06	0.30	6.70
	根系土		221.00	9.48	46.30	34.20	

为研究 Zn、Cu 元素从根系土迁移至作物籽实的迁移富集能力，采用生物富集系数(*BCF*)来表征（宋波等，2022；廖启林等，2013），*BCF* 值越大，作物对土壤种元素的富集能力越强（沈体忠等，2014）。*BCF* 的计算公式为：

$$BCF_i = C_{i \text{ 作物籽实}} / C_{i \text{ 根系土}} \quad (1)$$

式中， BCF_i 为元素 *i* 的生物富集系数， $C_{i \text{ 作物籽实}}$ 为作物籽实中元素 *i* 的含量， $C_{i \text{ 作物籽实}}$ 为作物根系土中元素 *i* 的含量。图 3 为作物 Zn、Cu 元素的生物富集系数箱线图，水稻 Zn 元素生物富集系数变化范围为 0.10~0.36，平均值为 0.20，Cu 元素生物富集系数变化范围为 0.02~0.11，平均值为 0.07。玉米 Zn 元素生物富集系数变化范围为 0.13~0.42，平均值为 0.21，Cu 元素生物富集系数变化范围为 0.02~0.28，平均值为 0.06。由图 3 可知，对于同种作物，作物 Zn 元素的富集系数显著大于 Cu，说明作物对土壤中 Zn 的富集能力远大于 Cu，与前人的研究结果一致（马旭东等，2022）。对于同种元素，玉米对土壤中 Zn 的富集能力略高于水稻，玉米对土壤中 Cu 的富集能力略低于水稻。

4.3 作物 Zn、Cu 富集系数控制因素

影响农作物对土壤中 Zn、Cu 等有益元素的吸收与农作物种类、品种、农业活动以及土壤等诸多因素密切相关，图 4 为作物籽实中 Zn、Cu 含量与根系土中 Zn、Cu 含量的散点图，可以看出，水稻、玉米两种作物籽实与根系土中 Zn、Cu 含量相关性较差，说明水稻和玉米籽实中 Zn、Cu 元素的富集并不简单地依赖于土壤中 Zn、Cu 含量，还取决于其他因素。

研究表明土壤理化性质是影响元素在土壤—植物系统中的迁移转化以及生物可利用性的重要因素（马宏宏等，2020）。表 5 为两种作物 Zn、Cu 元素富集系数与土壤理化性质经对数化后的皮尔逊相关系数，可以看出，同一种作物 Zn 和 Cu 生物富集系数的影响因素存在显著差异，不同作物的同一种元素生物富集系数的影响因素也存在显著差异，说明不同作物的不同元素生物富集系数的控制因素不同。

水稻和玉米的 BCF_{Zn} 和 BCF_{Cu} 与其根系土 Zn、Cu 含量 (Soil-Zn) 呈显著的负相关, 说明并不是土壤 Zn 含量越高, 作物的吸收富集能力越强, 马旭东 (马旭东等, 2022) 的研究也表明玉米、水稻籽实中 Zn 含量并不简单地依赖于土壤 Zn 含量, 还受其他因素的控制 (商和平等, 2015)。水稻的 BCF_{Zn} 与 TFe_2O_3 、Mn 的皮尔逊相关系数分别为 -0.61 和 -0.60, 玉米的 BCF_{Zn} 与 TFe_2O_3 、Mn 的皮尔逊相关系数分别为 -0.55 和 -0.63, 均表现为在 0.01 水平上显著负相关, 土壤铁锰氧化物的活化作用产生新的吸附表面, 吸附固定 Zn (成杰民等, 2001; 刘洪涛等, 2008; 李荣兴等, 2017), 且 Mn 在表生作用下通常为带负电的氧化物胶体, 对 Zn 有吸附作用 (姜勇等, 2003)。与 Zn 相比, 土壤铁锰氧化物对水稻、玉米吸收 Cu 的吸收影响要弱得多。

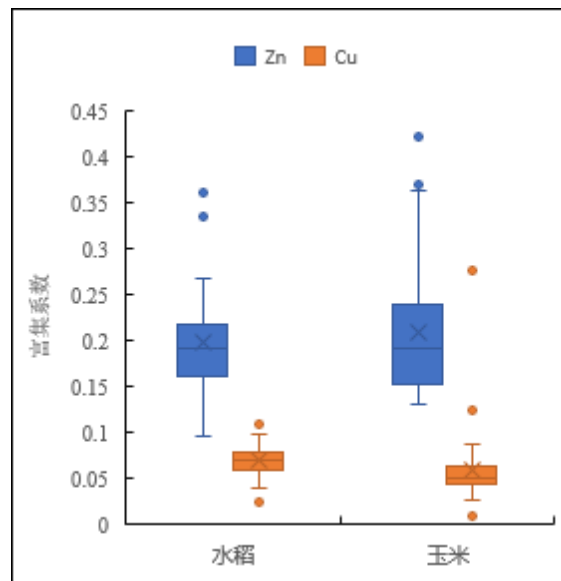


图 3 作物籽实 Zn、Cu 元素富集系数箱线图

Fig. 3 Box chart of enrichment coefficient of Zn and Cu elements in crop seeds

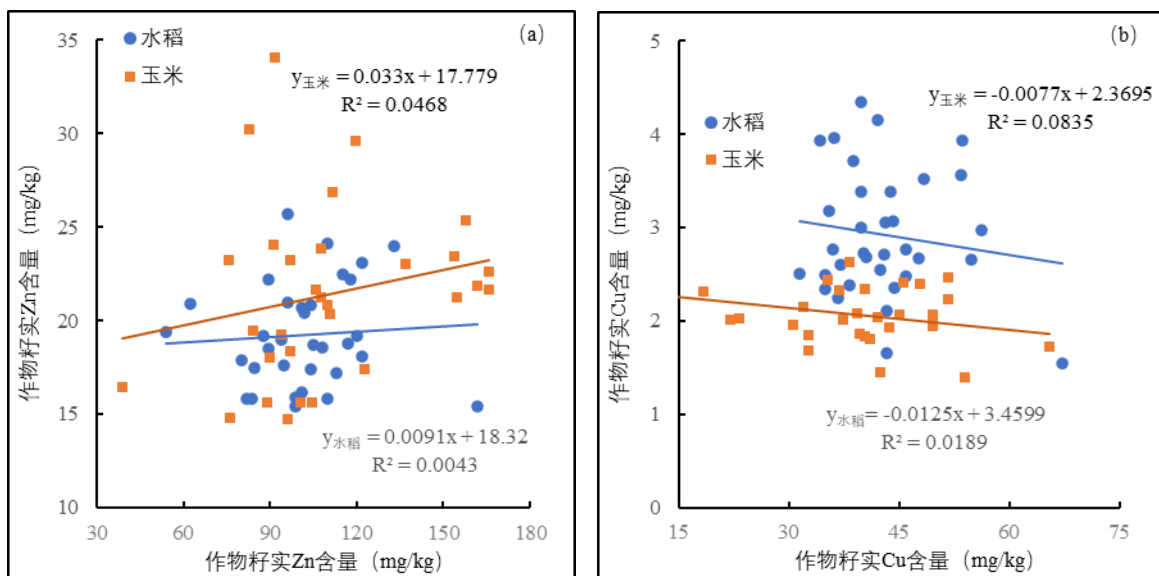


图 4 水稻、玉米籽实与根系土 Zn (a)、Cu (b) 含量散点图

Fig.4 Scatter plot of Zn (a) and Cu (b) contents in rice, corn seeds and root soil

水稻的 BCF_{Zn} 与 N、P、S 的皮尔逊相关系数分别为-0.66、-0.61、-0.59，均在 0.01 水平上显著负相关，而玉米的 BCF_{Zn} 仅与 P 呈较显著的负相关，与 N、S 线性关系不显著，水稻的 BCF_{Cu} 与 N、S 的皮尔逊相关系数分别为-0.47、-0.48，与 P 无线性关系，而玉米的 BCF_{Cu} 与 N、P、S 无线性关系，说明 N、P、S 等养分元素的升高会降低水稻 Zn 生物富集能力，已有研究表明全氮对有效锌及锌活化的影响结论不尽相同，林琼（林琼等，2012）研究表明土壤全氮越高，有效 Zn 含量越高，Zn 活化率也越高，而黄德明（黄德明等，2007）研究认为施氮降低了土壤有效 Zn 的含量，研究区相关系数表明土壤中 N 含量的升高会降低 Zn、Cu 的活性，从而抑制水稻对土壤中 Zn、Cu 的吸收，但对玉米的 Zn、Cu 富集能力无显著影响。P 作为一种养分元素，杨志敏（杨志敏等，1999）认为 P、Zn 之间存在一定的拮抗作用，林琼（林琼等，2012）研究认为全磷提高的直接效应是降低了 Zn 的有效性，因此土壤中 P 含量的升高会降低水稻和玉米 Zn 的有效性，对 Cu 的有效性无明显影响。查丽娟（查丽娟等，2020）的研究发现 Zn 的残渣态与 S 含量呈极显著正相关，S 的含量升高更容易与 Zn 形成难溶性 Zn（陈艳龙，2017），而 Cu 与 S 更容易形成极难溶性 Cu，因此 S 的升高会降低 Zn、Cu 的有效性，从而降低研究区水稻 Zn、Cu 生物有效性。

水稻的 BCF_{Zn} 和 BCF_{Cu} 与有机质（OM）均呈显著的线性负相关，皮尔逊相关系数分别为-0.61 和 -0.55，而玉米的 BCF_{Zn} 和 BCF_{Cu} 与有机质（OM）无显著线性关系。土壤有机质具有大量的吸附位点，例如含氧基团—羧基，通过吸附作用与重金属金属形成络合物而降低重金属的活性和生物可利用性（杜明阳等，2016），Frohne（Frohne T et al., 2013）的研究认为有机质可以向土壤溶液提供低分子量的有机物，与重金属形成螯合物进而提高重金属生物有效性，贺行良等（贺行良等，2008）研究表明有机质对提高有效铜含量有一定促进作用。由于有机质对土壤中 Zn、Cu 有效性的影响较为复杂，因此不同作物的对 Zn、Cu 的吸收富集也更为复杂。

水稻和玉米的 BCF_{Zn} 与 SiO_2/Al_2O_3 呈显著的线性正相关，皮尔逊相关系数分别为 0.53 和 0.69，而 BCF_{Cu} 与 SiO_2/Al_2O_3 无线性关系， SiO_2/Al_2O_3 值越大，说明土壤中砂质成分高、黏土和有机质含量低，降低黏土和有机质对 Zn、Cu 的吸附作用（李鱼等，2009），进而增加土壤中 Zn、Cu 的有效含量，由于水稻和玉米对不同元素的生物有效性差异，表现出 SiO_2/Al_2O_3 对作物 Zn 生物有效性有影响，而对 Cu 影响不显著。水稻、玉米的 BCF_{Zn} 和 BCF_{Cu} 与 pH 无显著的线性关系，而大量研究表明，土壤 pH 是影响 Zn、Cu 等元素有效性的重要因素（李永富等，2015；邢飞，2014；韦继康等，2021；唐豆豆等，2018），说明 pH 并不是影响研究区作物 Zn、Cu 生物有效性的主要因素。

土壤中 Zn、Cu 含量是控制水稻和玉米生物富集系数的主控因素，控制不同作物不同元素的生物富集系数的因素还包括不同的土壤理化指标，因此可以根据控制因素运用到农事活动中，例如减少氮肥和磷肥的施用可以提高水稻籽实对土壤中 Zn 的吸收富集。

表 5 Zn、Cu 生物富集系数与土壤理化指标相关系数

Table 5 Correlation coefficient of Zn and Cu bioconcentration coefficient with soil physical and chemical indexes

作物	BCF	Soil-Cu	Soil-Zn	TFe ₂ O ₃	Mn	N	P	S	OM	Si/Al	pH
水稻	Zn	-0.31	-0.81**	-0.61**	-0.60**	-0.66**	-0.61**	-0.59**	-0.61**	0.53**	-0.21
	Cu	-0.65**	-0.27	-0.09	-0.08	-0.47**	-0.04	-0.48**	-0.55**	0.10	0.26
玉米	Zn	-0.15	-0.76**	-0.55**	-0.63**	-0.29	-0.40*	-0.29	-0.24	0.69**	-0.08
	Cu	-0.96**	-0.10	0.06	0.06	-0.07	-0.28	-0.11	-0.02	0.01	-0.07

注：**在 0.01 水平（双侧）上显著相关，*在 0.05 水平（双侧）上显著相关，除 pH 外，其余数据经对数化处理。

4.4 主成分分析与预测模型

本文以水稻和玉米的 BCF_{Zn} 和 BCF_{Cu} 为因变量（预测结果），以土壤各个理化指标为自变量（控制因素），利用 SPSS 软件进行多元线性回归，建立研究区水稻和玉米籽实 Zn、Cu 有益元素生物富集系数的最优经验预测模型。由表 5 可知，影响水稻和玉米的 Zn、Cu 生物富集系数因素较多且存在显著差异，而土壤是一个复杂的系统，土壤各理化指标之间也会互相影响，而多元线性回归的重要条件是自变量之间不存在多重共线性，因此采用主成分分析，降低各影响因素数据维度得出对因变量影响最大的因子。

456 件表层土壤样品 11 种理化指标经 SPSS 软件进行主成分分析，采用主成分分析法提取因子，KMO 的计算结果为 0.68 (>0.5)，Bartlett 的近似卡方为 3389.41，显著性为 0.00 (<0.05)，因此可以进行主成分分析（徐磊等，2022）。表 6 为各主成分特征值及方差贡献率，3 个主成分对变量具有较好的解释性，累计贡献率达 92.95%，其中第一主成分 F1 为 57.92%，第二主成分 F2 为 21.21%，第三主成分 F3 为 13.82%。由表 7 可知，第一主成分 F1 为 N、OM，在 F1 上的数值分别为 0.95 和 0.86，第二主成分 F2 为 S，在 F2 上的数值为 0.70；第三主成分 F3 为 Mn、P、Zn，在 F3 上的数值分别为 0.71、0.67、0.55。

由表 5 可知，影响水稻籽实 Zn 生物富集系数的因素有 Soil-Zn、 TFe_2O_3 、Mn、N、P、S、OM、 SiO_2/Al_2O_3 ，均在 0.01 水平上显著相关，结合主成分提出的 3 个因子组合，选取 Soil-Zn、N、 TFe_2O_3 作为 BCF_{Zn} 的主控因素；影响水稻籽实 Cu 生物富集系数的因素有 Soil-Cu、N、S、OM，选取 Soil-Cu、OM、S 作为 BCF_{Cu} 的主控因素；影响玉米籽实 Zn 生物富集系数的因素有 Soil-Zn、 TFe_2O_3 、Mn、P、 SiO_2/Al_2O_3 ，选取 Soil-Zn、 SiO_2/Al_2O_3 、 TFe_2O_3 作为 BCF_{Zn} 的主控因素。

由于玉米籽实 Cu 含量经对数化后仍未呈正态化分布，因此本次研究除了玉米籽实 BCF_{Cu} 外，利用 SPSS24.0 软件对水稻籽实 Zn、水稻籽实 Cu 和玉米籽实 Zn 的生物富集系数进行多元线性回归方程拟合（表 8），拟合效果由软件给出的模型精确度决定系数 (R^2) 来确定， R^2 越大，拟合效果越好。为表征不同因素对控制作物籽实 BCF 的差异性，选择出最优拟合模型，对 3 个主控因素按相关性大小（表 5）排序成第一主控因素、第二主控因素和第三主控因素，分别选第一个主控因素、前两个主控因素和三个主控因素进行 3 次多元线性回归方程拟合。由于采集的水稻和玉米籽实-根系土样品数量有限，因此所有样品均用于预测。

由表 8 可知，模型均达到极显著相关水平，但模型精确度决定系数 (R^2) 存在差异，总体上对水稻 BCF_{Zn} 的拟合效果最好，其次是玉米 BCF_{Zn} ，水稻 BCF_{Cu} 的拟合效果稍差。对水稻 BCF_{Zn} 拟合效果最好的的是方程 3，决定系数为 0.725，对水稻 BCF_{Cu} 拟合效果最好的的是方程 5，决定系数为 0.495，对玉米 BCF_{Zn} 拟合效果最好的的是方程 9，决定系数为 0.571。这三个模型具有较好的预测效果，但也存在一定差异，多作物来说，预测效果最好的是水稻，对元素来说，预测效果做最好的是 Zn。

表 6 土壤理化指标主成分特征值与贡献率

Table 6 Principal component characteristic value and contribution rate of soil physical and chemical indexes

成分	初始特征值 ^a			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积%	总计	方差百分比	累积%
1	197473.18	57.92	57.92	197473.18	57.92	57.92
2	72315.62	21.21	79.13	72315.62	21.21	79.13
3	47113.00	13.82	92.95	47113.00	13.82	92.95

4	23708.79	6.95	99.90
5	293.92	0.09	99.99
6	32.07	0.01	100.00
7	0.77	0.00	100.00
8	0.37	0.00	100.00
9	0.22	0.00	100.00
10	0.05	0.00	100.00
11	0.03	0.00	100.00

表 7 土壤理化指标主成分荷载矩阵

Table 7 Principal component load matrix of soil physical and chemical indexes

指标	成分		
	1	2	3
CaO	0.27	0.18	-0.03
Cu	0.10	0.00	0.21
Mn	-0.11	0.41	0.71
N	0.95	-0.32	0.03
P	0.50	0.26	0.67
S	0.66	0.70	-0.27
TFe ₂ O ₃	0.23	0.09	0.32
Zn	0.06	0.24	0.55
pH	-0.12	0.18	0.10
OM	0.86	-0.32	-0.02
Si/Al	-0.26	-0.12	-0.32

表 8 水稻和玉米籽实富集系数多元回归预测方程

Table 8 Multiple regression prediction equation of rice and maize Seed enrichment coefficient

类型	回归方程	R ²	P	编号
水稻籽实 Zn	$\lg(\text{BCF}) = -0.968 \lg(\text{Soil-Zn}) + 1.218$	0.653	<0.005	1
	$\lg(\text{BCF}) = -0.767 \lg(\text{Soil-Zn}) - 0.369 \lg(\text{N}) + 2.042$	0.724	<0.005	2
	$\lg(\text{BCF}) = -0.904 \lg(\text{Soil-Zn}) - 0.400 \lg(\text{N}) + 0.329 \lg(\text{TFe}_2\text{O}_3) + 2.166$	0.725	<0.005	3
水稻籽实 Cu	$\lg(\text{BCF}) = -1.226 \lg(\text{Soil-Cu}) + 0.821$	0.398	<0.005	4
	$\lg(\text{BCF}) = -0.966 \lg(\text{Soil-Cu}) - 0.453 \lg(\text{OM}) + 0.617$	0.495	<0.005	5
	$\lg(\text{BCF}) = -1.039 \lg(\text{Soil-Cu}) - 0.599 \lg(\text{OM}) + 0.145 \lg(\text{S}) + 0.410$	0.489	<0.005	6
玉米籽实 Zn	$\lg(\text{BCF}) = -0.793 \lg(\text{Soil-Zn}) + 0.902$	0.559	<0.005	7
	$\lg(\text{BCF}) = -0.795 \lg(\text{Soil-Zn}) - 0.004 \lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) + 0.908$	0.543	<0.005	8
	$\lg(\text{BCF}) = -0.795 \lg(\text{Soil-Zn}) + 1.229 \lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) + 1.296 \lg(\text{TFe}_2\text{O}_3) - 0.886$	0.571	<0.005	9

积 100%；预测水稻 Cu 含量范围为 2.20~5.71mg/kg，不富铜水稻种植地块零星分布于研究区西北部，富铜水稻种植面积为 70.47km²，占研究区面积 69.71%；预测玉米 Zn 含量范围为 11.91~26.43mg/kg，不富锌玉米种植地块主要呈连片小块分布于研究南部的海埂屯村附近及东北部的班刘村附近，富锌玉米种植面积为 69.51km²，占研究区面积 95.39%。综上，研究区除了零星地块均能规划种植富锌、富铜水稻和玉米，具有极高的富锌、富铜土地资源利用潜力。

5 结论

(1) 研究区表层土壤 Zn、Cu 含量均值为 105.40mg/kg 和 42.67mg/kg，显著高于全国和西南地区土壤 Zn、Cu 平均值，全区大面积为富锌和富铜（一等）土地，面积占比分别为 84.86%和 90.59%。

(2) 研究区水稻籽实 Zn 含量范围在 15.4~25.7mg/kg，平均值为 19.28mg/kg，Zn 富集率 100%，Zn 生物富集系数平均值为 0.20；水稻籽实 Cu 含量范围为 1.54~4.35mg/kg，平均值为 2.92mg/kg，Cu 富集率 70%，生物富集系数平均值为 0.07；玉米籽实 Zn 含量范围为 14.70~34.00mg/kg，平均值为 21.42mg/kg，Zn 富集率 80%，生物富集系数平均值为 0.14；玉米籽实 Cu 含量范围为 1.39~2.62mg/kg，平均值为 2.06mg/kg，Cu 富集率 6.70%，生物富集系数平均值为 0.06。

(3) 影响水稻和玉米籽实 Zn、Cu 富集的因素存在差异，主控水稻 Zn、Cu 生物富集系数的因素分别为 Soil-Zn、N、TFe₂O₃ 和 Soil-Cu、OM、S，主控玉米 Zn 生物富集系数的因素为 Soil-Zn、SiO₂/Al₂O₃、TFe₂O₃，以主控因素为自变量，建立滇中红层山间盆地典型农耕区水稻和玉米籽实 Zn、Cu 生物富集系数的多元线性回归拟合方程，最优模型决定系数均大于 0.495，有较好的预测效果。根据模型预测出姚安县典型农耕区富 Zn 水稻、富铜水稻、富锌玉米种植面积分别为 72.87km²、70.47km² 和 69.71km²。

(4) 经过对研究区水稻和玉米 Zn、Cu 富集率、生物富集能力特征的研究，结合影响因素的分析，可加强研究区水稻和玉米种植的规划，同时适量减少氮肥和磷肥的施用，富锌富铜水稻和富锌玉米生物有效性。

References

- Alloway B J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5): 537-548.
- Cha Lijuan, Zhao Shuyuan, Feng Hongjuan, Zhou Dandan. 2020. Study on influencing factors of heavy metal forms in wild fungi growth soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 29(12): 2457-2464(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanlong. 2017. Effects of straw returning on Zn migration and transformation in calcareous soil and Zn absorption in winter wheat[D]. Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University: 4-7(in Chinese with English abstract).
- Cheng Jiemin, Pan Genxing, Canglong. 2001. Effect of simulated acid rain on chemical behavior of copper in paddy soils and plant of Taihu Lake region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 21(4): 459-464(in Chinese with English abstract).

- Du Mingyang, Zhao Xiulan. 2016. Literature review on the relationship between soil organic matter and heavy metal migration and transformation[J]. Southern Agriculture, 10(17): 92-94(in Chinese with English abstract).
- Frohne T, Rinklebe J. Biogeochemical fractions of mercury in soil profiles of two different floodplain ecosystems in Germany[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2013, 224(6): 1591.
- Ge Qijun, Mayila Yusuyin, Chai Zhongping, Xiao Xue, Liao Xinyu, Gong Yudi, Yusufujiang Yusuyin. 2020. Analysis of Relationship between Distribution and Availability of Soil Zn and pH in Korla Fragrant Pear Orchard[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 43(5): 361-367(in Chinese with English abstract).
- He Xingliang, Liu Changling, Ren Hongbo, Zhu Zhigang. 2008. Available contents of trace element and factors influencing their availability in Qingdao Laoshan tea garden soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 39(5): 1131-1134(in Chinese with English abstract).
- Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Cheng Hangxin, Zhou Guohua. 2020. Soil geochemical parameters in China [M]. Beijing: Geological Publishing House: 16-2573(in Chinese).
- Huang Deming, Xu Qiuming, Li Yaxing, Yao Zhidong. 2007. Influence of soil N and P excess on the availability of Zn, Mn, Fe, Cu and their content in plant[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 13(5): 966-970(in Chinese with English abstract).
- Huang Zechun, Song Bo, Chen Tongbin, Zheng Yuanming, Yang Jun. 2006. A survey of zinc concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk [J]. Geographical Research, 25(3): 439-448(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yong, Zhang Yuge, Liang Wenju, Wen Dazhong. 2003. Correlations of exchangeable Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn in cultivated soils[J]. Ecology and Environment, 12(2): 160-163(in Chinese with English abstract).
- Li Minghui, Chen Furong, Zhang Xiaorong, Wu Zheng, Liu Chao, Du Guoqiang. 2019. Distribution characteristics and genetic analysis of Zinc-enriched soil in the Dabie Mountain area, western Anhui province[J]. Geological Survey and Research, 42(3): 235-240(in Chinese with English abstract).
- Li Rongxing, Wang Dongyan, Li Wenbo. 2017. Available state transformation efficiency of soil copper and zinc in central-western Jilin and its natural impact factors[J]. Global Geology, 36(1): 316-326(in Chinese with English abstract).
- Li Yongfu, Deng Xiaohua, Binbo, Zhang Guangli, Zou Kai, Yu Qingtao, Dai Yongqiang. 2015. Spatial-temporal characteristics of available zinc content in tobacco-growing soil in Shaoyang of Hunan province and its influencing factors thereof[J]. Acta Tabacaria Sinica, 21(1): 53-59(in Chinese with English abstract).
- Li Yu, Gao Xi, Li Hongye, Wang Xiaoli, Wang Ting, Wang Yanping. 2009. Study of Cu and Zn adsorption on the Clay and its main components in surficial sediments[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 36(2): 89-93(in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Liu Cong, Cai Yuman, Zhu Bowan, Wang Cheng, Hua Ming, Jin Yang. 2013. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 40(1): 331-340(in Chinese with English abstract).
- Lin Qiong, Yan Mingjuan, Li Xiaoling, Cai Shunxiang, Qiu Xiaoxuan, Chen Zicong. 2012. Zn Content and related factors of tea garden Soil in Fujian[J]. Ecology and Environmental Sciences, 21(2): 249-252(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiuchen, Wei Jixin, Zhang Ming, Ma Yilin, Tang Qifeng. 2021. Characteristics and effective utilization of natural zinc-enriched land resources in Shicheng County of Ganzhou City, Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 40(Z1): 442-450(in Chinese with English abstract).
- Liu Heman, Zhang Xingchang, Su Shaohua. 2008. Available Zinc content and related properties of main soil in the loess plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 27(3): 898-902(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Zheng Guoguo, Chen Tongbin, Gao Ding, Song Bo, Yang Jun, Cai Hong. 2008. Major input of

- copper to farmlands and control for its pollution risk[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(4): 1774-1785(in Chinese with English abstract).
- Lock K, Janssen C R. 2005. Influence of soil zinc concentrations on zinc sensitivity and functional diversity of microbial communities[J]. *Environmental Pollution*, 136(2): 275-281.
- Ma Honghong, Peng Min, Liu Fei, Guo Fei, Tang Shiqi, Liu Xiujin, Zhou Yalong, Yang Ke, Li Kuo, Yang Zheng, Cheng Hangxin. 2020. 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*, 41(1): 449-459(in Chinese with English abstract).
- Ma Xudong, Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhang Husheng, Wu Zhiliang, Wang Jue, Li Minghui, Lei Fenghua. 2022. Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of zinc content in maize and rice grains in Linshui County, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 49(1): 324-335(in Chinese with English abstract).
- Shang Heping, Yang Li, Zhang Tao, Su Dechun. 2015. Form tendency and bio-availability dynamics of Cu and Zn in different farm soils after application of organic fertilizer of livestock and poultry manures[J]. *Environmental Science*, 36(1): 314-324(in Chinese with English abstract).
- Shen Tizhong, Zhu Mingxiang, Xiao Jie. 2014. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil-rice system of tianmen and its health risk assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 45(1): 221-226(in Chinese with English abstract).
- Song Bo, Xiao Naichuan, Ma Lijun, Li Long, Chen Tongbin. 2022. Main control factors of cadmium content in rice in carbonate rock region of guangxi based on the DGT technique[J]. *Environmental Science*, 43(1): 463-471(in Chinese with English abstract).
- Tang Doudou, Yuan Xuyin, Wang Yimin, Ji Junfeng, Wen Yubo, Zhao Wanfu. 2018. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(1): 18-26(in Chinese with English abstract).
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Yang Junquan. 2019. Evaluation of the characteristic land resources with Zn, Se and their ecological effects in Raoyang county of Hebei province[J]. *Geological Survey and Research*, 42(1): 49-56(in Chinese with English abstract).
- Wang Dengfeng, Wei Zhiyuan, Han Miaojie, Qi Zhiping. 2013. Distribution characteristics of zinc in arable land soil of northwestern Hainan [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 44(3): 447-451(in Chinese with English abstract).
- Wang Jingshi. 2012. The geochemical characteristics of Zinc in soil and research of the development value in WanYuan area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-60(in Chinese with English abstract).
- Wang Chen. 2021. Soil copper enrichment mechanism and land use zoning in Linshui county, Guang'an city, Sichuan province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-87(in Chinese with English abstract).
- Wei Jikang, Yu Xiaoxia, Wang Baoxin, Wang Gang. 2021. The speciation, bioavailability and influence factors of soil heavy metals in typical areas along the eastern coast of Zhejiang[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 43(10): 1231-1237(in Chinese with English abstract).
- Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 353-364.
- Wu Jia. 2019. Selenium, zinc element geochemical characteristics and land resource zoning in Ruijin soil, Jiangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-72(in Chinese with English abstract).
- Wu Peng, Yang Hang, Han Runsheng, Jiang Longyan, Jiang Xiaojun, Wang Die, Guan Shenjin. 2019. Signature and geological significance of the specularite from the Laojiezi Pb-Ag deposit in the Chuxiong basin, central Yunnan, SW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1489-1502(in Chinese with English abstract).

- Xia Wei, Xiang Cambridge, Yang Jun, Yang Liangzhe, Wang Fang, Wang Wenwen, Zhao Min, Wu Dongmei, Zou Hui, Yan Jiali. 2022. Characteristics of Soil selenium and zinc content and its bioavailability in Northwestern Xuan'en county[J]. Resources Environment & Engineering, 36(1): 29-36(in Chinese with English abstract).
- Xie Zhonglei, Yang Bailing, Bao Guozhang, Dong Deming. 2006. Distribution of forms of zinc and its affecting factors in tea garden soils[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 25(S1): 32-36(in Chinese with English abstract).
- Xing Fei, Fu Administration. 2014. Citrus leaf zinc nutrient level and its impact factors in the Three Gorges area of Chongqing[J]. Journal of Fruit Science, 31(4): 602-609(in Chinese with English abstract).
- Xu Lei, Huang Jiazhong, Zhang Ya, Xiang Jingwei, Ye Lei, Yang Minglong, Duan Xingwu, Guan Jiyun. 2022. Sources and influencing factors of soil heavy metals in the high mountain and hilly area of central Yunnan: taking Wuding county as an example[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 38(1): 82-92(in Chinese with English abstract).
- Yang Yuexin. 2018. China food composition tables standard edition[M]. Beijing: Beijing Medical University Press, 1-33(in Chinese).
- Yang Zhimin, Zheng Shaojian, Hu Aitang. 1999. Advances on the study of interactions of phosphorus with zinc and cadmium in plants[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 5(4): 366-376(in Chinese with English abstract).
- Yu Yanyan. 2021. Study on the fault structure in Donggaolingzijing section of Jiling deposit based on the ground high-precision magnetic survey data[J]. Mineral Resources and Geology, 35(6): 1147-1155(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqing. 2002. Research progress on improving nutritive value of vegetables using their luxury zinc absorption[J]. Journal of Shanxi Teacher's University (Natural Science Edition), 16(2): 76-79(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 茶丽娟, 赵淑媛, 冯鸿娟, 周丹丹. 2020. 野生菌生长土壤中重金属形态影响因素研究[J]. 生态环境学报, 29(12): 2457-2464.
- 陈艳龙. 2017. 秸秆还田对石灰性土壤 Zn 迁移转化及冬小麦 Zn 吸收的影响[D]. 陕西: 西北农林科技大学: 4-7.
- 成杰民, 潘根兴, 仓龙. 2001. 模拟酸雨对太湖地区土壤-植物系统中铜的化学行为的影响[J]. 环境科学学报, 21(4): 459-464.
- 杜明阳, 赵秀兰. 2016. 土壤有机质与重金属迁移转化关系文献综述[J]. 南方农业, 10(17): 92-94.
- 戈启军, 玛依拉·玉素音, 柴仲平, 肖雪, 廖鑫宇, 龚浚柒, 玉素甫江·玉素音. 2020. 库尔勒香梨园土壤锌的分布特征及其有效性与土壤 pH 的关系分析[J]. 新疆农业大学学报, 43(5): 361-367.
- 贺行良, 刘昌岭, 任宏波, 朱志刚. 2008. 青岛崂山茶园土壤微量元素有效量及其影响因素研究[J]. 土壤通报, 39(5): 1131-1134.
- 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成杭新, 周国华. 2020. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社: 16-2573.
- 黄德明, 徐秋明, 李亚星, 姚志东. 2007. 土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 13(5): 966-970.
- 黄泽春, 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 杨军. 2006. 北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估[J]. 地理研究, 25(3): 439-448.
- 李明辉, 陈富荣, 张笑蓉, 吴正, 刘超, 杜国强. 2019. 皖西大别山区富锌土壤分布特征及成因分析[J]. 地质调查与研究, 42(3): 235-240.

- 李荣兴, 王冬艳, 李文博. 2017. 吉林中西部土壤 Cu、Zn 元素有效态转化效率及自然影响因素分析[J]. 世界地质, 36(1): 316-326.
- 李永富, 邓小华, 宾波, 张光利, 邹凯, 于庆涛, 戴勇强. 2015. 湖南省邵阳烟区土壤有效锌含量时空特征及其影响因素[J]. 中国烟草学报, 21(1): 53-59.
- 李鱼, 高茜, 李鸿业, 王晓丽, 王婷, 王燕萍. 2009. 表层沉积物中粘土及其主要组分吸附 Cu 和 Zn 的行为研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 36(2): 89-93.
- 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 朱伯万, 王成, 华明, 金洋. 2013. 江苏典型地区水稻与小麦字实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 40(1): 331-340.
- 林琼, 颜明娟, 李小玲, 蔡顺香, 邱孝煊, 陈子聪. 2012. 福建茶园土壤 Zn 含量及其影响因素[J]. 生态环境学报, 21(2): 249-252.
- 刘久臣, 魏吉鑫, 张明, 马逸麟, 汤奇峰. 2021. 江西赣州市石城县天然富锌土地资源特征与开发利用[J]. 地质通报, 40(Z1): 442-450.
- 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 2008. 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 27(3): 898-902.
- 刘洪涛, 郑国砥, 陈同斌, 高定, 宋波, 杨军, 蔡红. 2008. 农田土壤中铜的主要输入途径及其污染风险控制[J]. 生态学报, 28(4): 1774-1785.
- 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新. 2020. 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, 41(1): 449-459.
- 马旭东, 余涛, 杨忠芳, 张虎生, 武芝亮, 王珏, 李明辉, 雷风华. 2022. 四川省邻水县土壤锌地球化学特征及玉米水稻籽实锌含量预测[J]. 中国地质, 49(1): 324-335.
- 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯. 2015. 畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化[J]. 环境科学, 36(1): 314-324.
- 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 2014. 天门市土壤-水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. 土壤通报, 45(1): 221-226.
- 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌. 2022. 基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素[J]. 环境科学, 43(1): 463-471.
- 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 季峻峰, 文字博, 赵万伏. 2018. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报, 37(1): 18-26.
- 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 邢怡, 杨俊泉. 2019. 河北省饶阳县富锌、硒特色土地及其生态效应评价[J]. 地质调查与研究, 42(1): 49-56.
- 王登峰, 魏志远, 韩妙杰, 漆智平. 2013. 海南西北部地区耕地土壤锌分布特征[J]. 南方农业学报, 44(3): 447-451.
- 王敬时. 2012. 四川万源地区土壤锌地球化学特征及开发价值研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-60.
- 王琛. 2021. 四川省广安市邻水县土壤铜富集机制及土地利用区划[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-87.
- 韦继康, 余晓霞, 王保欣, 王刚. 2021. 浙江东部沿海典型地区土壤重金属赋存形态、生物有效性及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 43(10): 1231-1237.
- 吴价. 2019. 江西瑞金土壤硒、锌元素地球化学特征及土地资源区划[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-72.
- 吴鹏, 杨航, 韩润生, 姜龙燕, 江小均, 王蝶, 管申进. 2019. 滇中楚雄盆地老街子铅-银矿床镜铁矿特征及地质意义[J]. 岩石学报, 35(5): 1489-1502.
- 夏伟, 项剑桥, 杨军, 杨良哲, 王芳, 王雯雯, 赵敏, 吴冬妹, 邹辉, 闫加力. 2022. 宣恩县西北部土壤硒锌含量特征及其生物有效性研究[J]. 资源环境与工程, 36(1): 29-36.
- 谢忠雷, 杨佰玲, 包国章, 董德明. 2006. 茶园土壤锌的形态分布及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 25(S1): 32-36.

- 邢飞, 付行政. 2014. 重庆三峡库区柑橘叶片锌营养状况及其影响因子分析[J]. 果树学报, 31(4): 602-609.
- 徐磊, 黄加忠, 张亚, 向经纬, 叶雷, 杨明龙, 段兴武, 管继云. 2022. 滇中高山丘陵区土壤重金属来源及影响因素-以武定县为例[J]. 中国农学通报, 38(1): 82-92.
- 杨月欣. 2018. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 1-33.
- 杨志敏, 郑绍建, 胡霁堂. 1999. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 5(4): 366-376.
- 于炎炎. 2021. 安徽砀山县土壤锌地球化学特征及影响因素[J]. 矿产与地质, 35(6): 1147-1155.
- 张永清. 2002. 蔬菜奢侈吸锌的研究进展[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 16(2): 76-79.