



## 土壤-水稻系统中重金属等元素的相互作用 ——以黑龙江庆安地区为例

柳 震<sup>1</sup>, 孙振伟<sup>2,3</sup>, 刘 婷<sup>2,3</sup>, 张 立<sup>2,3</sup>

1. 黑龙江省地球物理地球化学勘查院, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036;

3. 黑龙江省黑土地水土资源研究重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150036

**摘 要:** 在土壤-作物系统中, 农作物吸收 Cd、As 等元素的影响因素非常复杂, 其中, 元素间的相互作用是影响生物富集系数的主要因素之一。为了研究土壤-水稻系统中重金属等元素之间的相互作用, 在黑龙江省典型水稻生产基地庆安地区采集了 89 组水稻籽实及根系土样品, 测试了样品中重金属元素含量, 运用相关分析, 探讨了水稻籽实及根系土中重金属等元素之间的相互关系。结果表明: 水稻籽实重金属元素富集系数之间多呈正相关关系; 籽实 Cd 元素富集系数与土壤 Se, 籽实 Cu 元素富集系数与土壤 TOC 均呈负相关关系; 籽实重金属元素之间多呈正相关关系; 籽实 Zn 与土壤 As 呈正相关关系, 籽实 Cu 与土壤 Cd 呈负相关关系。研究区土壤-水稻系统中, 水稻籽实对重金属元素吸收的影响因素非常复杂, 元素间协同或拮抗作用多样, 其作用机理有待深入研究。

**关键词:** 水稻籽实; 根系土; 重金属; 相关分析; 黑龙江省

## INTERACTION OF HEAVY METAL AND OTHER ELEMENTS IN SOIL-RICE SYSTEM: A Case Study of Qing'an area in Heilongjiang Province

LIU Zhen<sup>1</sup>, SUN Zhen-wei<sup>2,3</sup>, LIU Ting<sup>2,3</sup>, ZHANG Li<sup>2,3</sup>

1. Heilongjiang Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Harbin 150036, China;

2. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin 150036, China;

3. Key Laboratory of Black Soil and Water Resources Research of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China

**Abstract:** In soil-crop system, the absorption of elements such as Cd and As by crops is related to complicated factors, among which the interaction between elements is one of the majors affecting the bio-enrichment coefficient. To study the interaction between heavy metal elements in soil-rice system, 89 groups of rice seed and root soil samples are collected in Qing'an area, a typical rice production base in Heilongjiang Province, and heavy metal contents in the samples are tested. The correlation analysis is used to study the relationship between heavy metals in rice seed and root soil. The results show a positive correlation between heavy metal enrichment coefficients of rice seed. The enrichment coefficient of Cd in seed is negatively correlated with Se in soil, as well as the enrichment coefficient of Cu in seed with TOC in soil. Heavy metals in seed mostly have a positive correlation. There is a positive correlation between Zn in seed and As

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-02-03. 编辑: 张哲.

基金项目: 黑龙江省地质勘查专项“黑龙江省庆安地区富硒土地环境地球化学调查”项目(黑国土资函[2017]454号).

作者简介: 柳震(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事地质勘查、环境地球化学研究工作, 通信地址 黑龙江省哈尔滨市香坊区湘江路1号, E-mail//24977078@qq.com

通信作者: 孙振伟(1986—), 男, 工程师, 主要从事生态地球化学研究工作, 通信地址 黑龙江省哈尔滨市香坊区中山路65号, E-mail//243787117@qq.com

in soil, and a negative correlation between Cu in seed and Cd in soil. In the soil-rice system of the study area, the factors affecting the absorption of heavy metals by rice seed are very complex, with various synergistic and antagonistic interactions between elements, and their interactions need to be further studied.

**Key words:** rice seed; root soil; heavy metal; correlation analysis; Heilongjiang Province

## 0 引言

土壤中重金属元素对生态环境的影响是当前环境地球化学、土壤污染防治、土壤生态修复等研究的重点内容,而研究土壤-作物系统中重金属元素的分布对粮食生产安全有着举足轻重的意义<sup>[1-7]</sup>。土壤-作物系统中元素存在着复杂的相互作用,土壤元素对农作物中元素的相互作用与农作物中元素之间的相互作用并非一致,农作物体内元素间的相互作用主要表现为协同或拮抗,这些相互作用能够改变元素在农作物中的含量分布<sup>[8]</sup>。由于重金属元素之间存在着复杂的相互作用,并由此产生的复合污染已成为当前重金属污染研究的热点<sup>[9-10]</sup>。

随着近年来土地质量地球化学评价工作的不断深入,获得了大量的土壤、农作物元素含量分布数据,为进一步研究土壤-作物系统中重金属等元素之间的相互作用提供了便利条件。如冯海艳等<sup>[11]</sup>利用土地质量地球化学评价数据对四川盆地中东部地区土壤-水稻系统中重金属元素相互作用进行了研究,为该地区土壤生态修复提供了新的思路;廖启林等<sup>[12]</sup>通过对江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素的富集系数进行研究,认为土壤理化性质对农作物籽实元素富集系数分布有一定的影响。元素的相互作用严重影响着土壤-作物系统中的物质循环和生态平衡,深入研究重金属等元素的相互作用,对降低土壤重金属复合污染、保障粮食安全都有重要的意义。因此,笔者基于黑龙江省1:5万土地质量地球化学评价数据,以黑龙江省主要水稻生产基地庆安地区水稻籽实及根系土为研究对象,探讨水稻籽实及根系土中重金属等元素之间的相互关系,以期为当地农产品安全评价和土壤污染防治提供科学参考依据。

## 1 研究区概况

研究区位于黑龙江省庆安县境内,地理坐标为东经127°13'27"—127°54'23",北纬46°32'48"—47°11'

45",总面积1 985 km<sup>2</sup>。庆安县地处松嫩平原与小兴安岭余脉的交汇地带,小兴安岭西南麓,北与绥棱县一河之隔,东部与伊春市、铁力市相接,南部与巴彦县、木兰县和通河县接壤,西部与绥化市北林区相连。庆安县主要地貌为低山丘陵平原,属寒温带大陆性季风气候,土壤类型有黑土、草甸土、水稻土、暗棕壤和风沙土等,土地利用类型多为耕地。境内9条河流均属呼兰河水系,主要有呼兰河、欧根河、泥尔根河、依吉密河、安邦河和拉林青河等。庆安县耕地面积约15×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,适宜种植水稻、玉米、大豆、高粱、烤烟、甜菜、亚麻和瓜菜等农作物,是国家水稻绿色高质高效示范县,享有“中国绿色食品之乡”的称号。

## 2 样品采集与处理

样品采集方法参照DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》执行,考虑了庆安地区水稻种植的分布状况,结合表层土壤硒元素含量分布特征,选择硒元素高背景地区进行采样,共采集水稻籽实及相应的根系土样品各89件,研究区位置及采样点位见图1。水稻籽实样品采用“梅花点法”进行取样,即选取1个主样方作为中心点,在四周布设4个子样方,每个样方面积约为0.7 m×0.7 m。采样时用剪刀截取整株稻穗,采集5个样方10~20个谷穗混合组成1件样品,新鲜样品重量不低于1 kg。同时利用竹铲采集对应水稻0~20 cm根系土壤,采集各样方等量根系土壤子样混合组成一件样品,将采集的土壤掰碎,挑出根系、秸秆等杂物,充分混合后用四分法留取约1 kg装入样品袋。

在室内通风场地将土壤样品悬挂于样品架上自然风干,在风干过程中,适时进行翻动,并对较大的土块用木棒敲碎以防止黏结。将风干后的土壤样品平铺在制样板上,用木棒进行碾压,并将植物残体等杂质剔除,土壤中夹杂的植物须根采用静电吸附的方法去除。压碎过的土样全部过10目(2 mm)尼龙筛混匀称

重 500 g 后装入纸袋送实验室. 取 100 g 过 2 mm 尼龙筛的土样直接进行土壤 pH 的测定, 将剩余过 2 mm 尼龙筛的土样继续碾磨, 过 60 目(0.25 mm)、200 目(0.074 mm)尼龙筛分别用于其他项目的测定. 水稻籽实脱粒后自然风干, 去稻壳前先用清水清洗, 再用蒸馏水清洗 3 次, 放入烘箱 50 ℃ 烘干, 然后用粳米机去稻壳, 再用蒸馏水轻轻淘洗, 将残留的稻壳去除, 放入样品盘烘干后, 用粉碎机粉碎后装入样品袋备用.

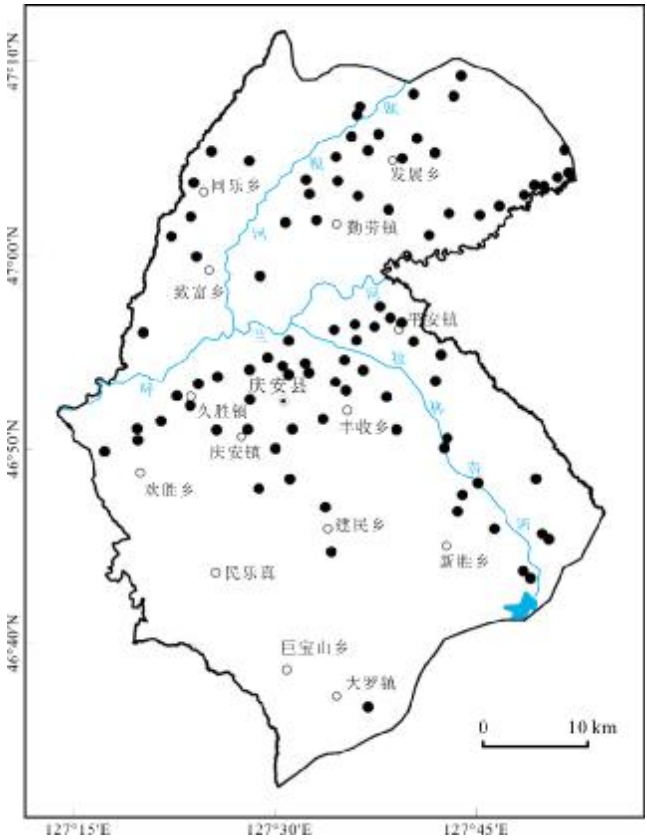


图 1 研究区样品采集点位置图

Fig. 1 Location map of sampling sites in the study area

3 样品分析测试

3.1 分析测试方法

样品分析测试工作由黑龙江省地质矿产实验测试研究中心完成, 样品分析方法及质量要求按照 DD2005—03《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》执行. 土壤样品分析指标为 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、Hg、As、Se、TOC、pH 等, 农作物样品分析指标为 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、Hg、As 和 Se. 样品分析方法及检出限见

表 1, 分析方法准确度和精密度见表 2、3.

表 1 样品分析方法及检出限

Table 1 Analytical methods and detection limits of samples

| 土壤指标 | 分析方法   | 检出限   | 农作物指标 | 分析方法   | 检出限   |
|------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Cu   | XRF    | 0.89  | Cu    | ICP-MS | 1.0   |
| Pb   | XRF    | 1.86  | Pb    | ICP-MS | 0.1   |
| Zn   | XRF    | 1.78  | Zn    | ICP-MS | 1.0   |
| Cd   | ICP-MS | 0.007 | Cd    | ICP-MS | 0.03  |
| Ni   | ICP-MS | 0.5   | Ni    | ICP-MS | 0.1   |
| Cr   | ICP-MS | 0.204 | Cr    | ICP-MS | 0.2   |
| Hg   | AFS    | 0.005 | Hg    | AFS    | 0.01  |
| As   | AFS    | 0.65  | As    | AFS    | 0.3   |
| Se   | AFS    | 0.01  | Se    | AFS    | 0.005 |
| TOC  | VOL    | 0.05  |       |        |       |
| pH   | 玻璃电极法  | 0.1   |       |        |       |

注: XRF 为 X 射线荧光光谱法, ICP-MS 为等离子体质谱法, AFS 为原子荧光光谱法, VOL 为容量法; 含量单位: TOC 为%, 其余元素为 10<sup>-6</sup>.

3.2 分析测试质量

土壤样品分析过程中插入 8 个一级标准物质(GSS-1—GSS-8)进行分析测试, 用选定的分析方法对每一个标准物质进行 12 次分析, 并分别计算每个标准物质平均值与标准值之间的对数偏差( $\Delta \lg C$ )和相对标准偏差(RSD)来检验分析方法的准确度和精密度(表 2、3). 结果表明, 各元素检测值的准确度和精密度合格率均为 100%, 内检样品合格率为 99.19%, 异常值抽检合格率为 96.90%, 报出率为 100%. 农作物样品分析加入标准物质进行准确度控制, 标准物质检测值与推荐值的相对误差(RE)均小于 20%. 采用重复分析的方法控制精密度, 确保样品质量控制限相对双差(RD)均小于 30%. 综上所述, 所有样品分析配套方案选择合理, 精密度、准确度、检出限等质量监控参数均达到规范要求, 保障了分析结果的准确性和可靠性.

3.3 数据处理

统计分析采用 SPSS 19 软件完成, 采样点位图、散点图采用 ArcGIS 10.2 和 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理和绘制.

表 2  土壤样品分析方法准确度  
Table 2  Accuracy of soil sample analysis method

| 标样号   | Cu    | Pb    | Zn    | Cr     | Ni   | Cd    | Hg     | As    | Se    | TOC   |
|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| GSS-1 | 0.02  | 0     | 0     | 0.002  | 0    | 0     | -0.003 | -0.02 | 0.01  | -0.03 |
| GSS-2 | 0.01  | -0.03 | -0.01 | -0.006 | 0    | 0.02  | -0.005 | 0.01  | 0.01  | -0.02 |
| GSS-3 | -0.02 | 0     | 0     | 0.004  | 0.01 | 0.01  | -0.003 | -0.01 | 0     | 0.01  |
| GSS-4 | 0.03  | 0.01  | 0.03  | 0.002  | 0.01 | 0     | 0.01   | -0.03 | -0.01 | 0.01  |
| GSS-5 | -0.02 | 0     | 0     | -0.006 | 0.01 | 0     | -0.01  | 0.01  | 0     | 0     |
| GSS-6 | 0.01  | -0.01 | 0     | 0.004  | 0.03 | -0.01 | 0.005  | -0.01 | 0     | -0.01 |
| GSS-7 | 0.02  | -0.01 | 0.02  | -0.002 | 0    | 0.01  | -0.02  | 0     | 0.01  | 0     |
| GSS-8 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | 0.013  | 0    | 0     | 0.006  | 0.02  | 0.02  | -0.01 |

表 3  土壤样品分析方法精密度  
Table 3  Precision of soil sample analysis method

| 标样号   | Cu   | Pb   | Zn   | Cr   | Ni   | Cd   | Hg    | As   | Se   | TOC  |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| GSS-1 | 5.02 | 0.99 | 1.06 | 0.92 | 3.12 | 4.33 | 6.317 | 5.95 | 7.8  | 0.99 |
| GSS-2 | 4.41 | 7.87 | 2.84 | 1.31 | 5.19 | 4.84 | 8.544 | 4.31 | 7.88 | 4.62 |
| GSS-3 | 5.57 | 2.66 | 2.08 | 1.82 | 5.74 | 3.73 | 7.69  | 4.39 | 8.29 | 5.14 |
| GSS-4 | 6.28 | 2.14 | 6.07 | 0.79 | 3.71 | 5.78 | 5.404 | 3.85 | 6.3  | 5.23 |
| GSS-5 | 5.51 | 0.39 | 0.37 | 1.79 | 3.26 | 3.67 | 6.314 | 6.83 | 5.43 | 9.83 |
| GSS-6 | 1.51 | 1.44 | 0.84 | 1.53 | 4.83 | 4.45 | 5.533 | 4.53 | 3.45 | 2.65 |
| GSS-7 | 4.5  | 7.31 | 4.15 | 1.83 | 3.67 | 4.7  | 6.13  | 6.89 | 8.94 | 4.56 |
| GSS-8 | 3.48 | 6.53 | 3.33 | 1.82 | 4.2  | 5    | 7.866 | 3.09 | 9.32 | 8.26 |

相对标准偏差单位:%.

4  结果与讨论

4.1  水稻籽实及土壤重金属等元素地球化学特征

4.1.1  元素含量及富集系数

水稻籽实富集系数为水稻籽实元素含量与根系土中相对应元素含量之比<sup>[13]</sup>,本次研究某种元素的富集系数是将所有采样点水稻籽实该元素富集系数取平均值作为该元素的富集系数.由庆安地区 89 组水稻籽实及根系土样品的重金属等元素基本参数统计结果(表 4)可见,水稻根系土中各元素的含量分布较均匀,差异不明显,仅 TOC 的变异系数达到 39.44%,其他元素的变异系数均小于 30%;水稻籽实中各元素含量分布不均匀,差异较明显,其中 Cr 元素的变异系数达到 133.33%,Cd、Ni、Hg 和 Se 的变异系数分别达到

62.50%、57.14%、50.00%和 40.00%.从各元素富集系数来看,Zn 的富集能力最强,富集系数为 28.07%,其次是 Se 和 Cu,Pb 的富集系数最小,为 0.23%.水稻籽实中重金属元素富集系数按从大到小顺序排列为:Zn>Cu>Hg>Cd>Ni>As>Cr>Pb.研究区土壤 pH 变化范围在 5.19~7.39 之间,多呈酸性和中性.

4.1.2  元素富集系数之间的关系

为了研究水稻籽实中各元素富集系数之间的关系,对各元素富集系数进行了相关性分析(图 2).结果表明:水稻籽实 Cd 与 Cu、Ni 富集系数呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),相关系数分别为 0.56 和 0.58;与 Zn、Se 富集系数呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),相关系数分别为 0.27 和 0.25.水稻籽实 Cu 与 Ni、Zn、Se 富集系数

表 4 研究区水稻籽实及根系土元素含量特征统计

Table 4 Element content characteristics statistics of rice seed and root soil in the study area

| 元素  | 根系土  |      |       |      |       | 水稻籽实  |       |       |       |        | 富集系数  |
|-----|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|     | 最大值  | 最小值  | 平均值   | 标准差  | 变异系数  | 最大值   | 最小值   | 平均值   | 标准差   | 变异系数   |       |
| As  | 23.9 | 7.4  | 10.89 | 2.26 | 20.75 | 0.31  | 0.06  | 0.11  | 0.03  | 27.27  | 1.06  |
| Cd  | 0.19 | 0.05 | 0.11  | 0.03 | 27.27 | 0.026 | 0.002 | 0.008 | 0.005 | 62.50  | 7.97  |
| Cr  | 78.7 | 50.5 | 60.96 | 4.97 | 8.15  | 1.66  | 0.07  | 0.18  | 0.24  | 133.33 | 0.29  |
| Cu  | 31.6 | 18.7 | 24.53 | 2.50 | 10.19 | 5.24  | 1.44  | 3.00  | 0.69  | 23.00  | 12.40 |
| Hg  | 0.08 | 0.02 | 0.04  | 0.01 | 25.00 | 0.011 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | 50.00  | 9.79  |
| Ni  | 37.4 | 20.7 | 28.1  | 2.97 | 10.57 | 2.08  | 0.16  | 0.42  | 0.24  | 57.14  | 1.52  |
| Pb  | 33.9 | 22.2 | 25.98 | 2.11 | 8.12  | 0.13  | 0.02  | 0.06  | 0.02  | 33.33  | 0.23  |
| Se  | 0.52 | 0.18 | 0.31  | 0.06 | 19.35 | 0.13  | 0.02  | 0.05  | 0.02  | 40.00  | 14.93 |
| Zn  | 98.1 | 56.7 | 70.91 | 6.85 | 9.66  | 28.6  | 13.9  | 19.78 | 3.39  | 17.14  | 28.07 |
| TOC | 7.77 | 1.06 | 3.22  | 1.27 | 39.44 | —     | —     | —     | —     | —      | —     |
| pH  | 7.39 | 5.19 | —     | —    | —     | —     | —     | —     | —     | —      | —     |

数值单位:TOC、变异系数、富集系数为%,其余元素为 10<sup>-6</sup>。

呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),相关系数分别为 0.71、0.45、0.47;与 As 富集系数呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),相关系数为-0.27。水稻籽实 Ni 与 Zn 富集系数呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),相关系数为 0.37;与 As 富集系数呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),相关系数为-0.30。水稻籽实 Hg 与 Zn 富集系数呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),相关系数为 0.44;Hg 与 Pb 富集系数呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),相关系数为 0.24。以上结果可知,水稻籽实重金属等元素富集系数之间多呈正相关关系,这与赵秀芳等<sup>[8]</sup>研究发现山东安丘地区小麦籽实中重金属元素富集系数之间多数呈正相关的报道一致,植物对重金属元素的吸附和解吸量不仅与平衡溶液中元素浓度有关,而且还明显地受共存元素及其交互作用的影响。

4.2 土壤理化性质对水稻籽实重金属元素富集系数的影响

元素富集系数与农作物生长环境密切相关,如土壤 pH、TOC、质地等,这些因素影响重金属元素在土壤-水稻系统中的迁移和富集。分别对重金属元素富集系数与土壤 TOC、Se 含量等进行了相关性分析(图 3)。结果发现,水稻籽实 Cd 富集系数与土壤 Se 含量呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),相关系数为-0.30;Cu

富集系数与 TOC 呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),相关系数为-0.43。研究区土壤 TOC 含量较高(平均含量 3.22%),可能是土壤 TOC 对 Cu 的吸附固定作用明显,导致土壤中 Cu 的活性下降,降低了水稻对 Cu 的吸收。

4.3 土壤-水稻系统中重金属等元素之间的相互作用

4.3.1 水稻籽实中元素含量之间的关系

农作物生长是一个漫长而复杂的过程,重金属元素之间协同或拮抗作用的存在,比单一重金属元素对农作物的危害更大,最终影响农作物的生物量和安全性。因此必须考虑重金属元素所造成的复合污染。

由水稻籽实中元素含量间的相关分析结果(表 5)可见,水稻籽实中重金属元素含量之间多呈极显著正相关关系,仅 As 与 Cu 呈极显著负相关关系。元素之间的相互作用主要表现为协同作用,例如当籽实中 Cd、Cu 含量增加时,Ni 的含量也会增加;当籽实中 Cu、Hg、Ni 含量增加时,Zn 的含量也会增加;当籽实中 Cd 含量增加时,Cu 的含量也会增加。籽实中 As 与 Cu 的相互作用表现为拮抗作用,当籽实中 As 的含量增加时,Cu 的含量会减少。重金属元素之间的复合效应较复杂,影响因素众多,其相互作用机制有待进一步研究<sup>[14]</sup>。

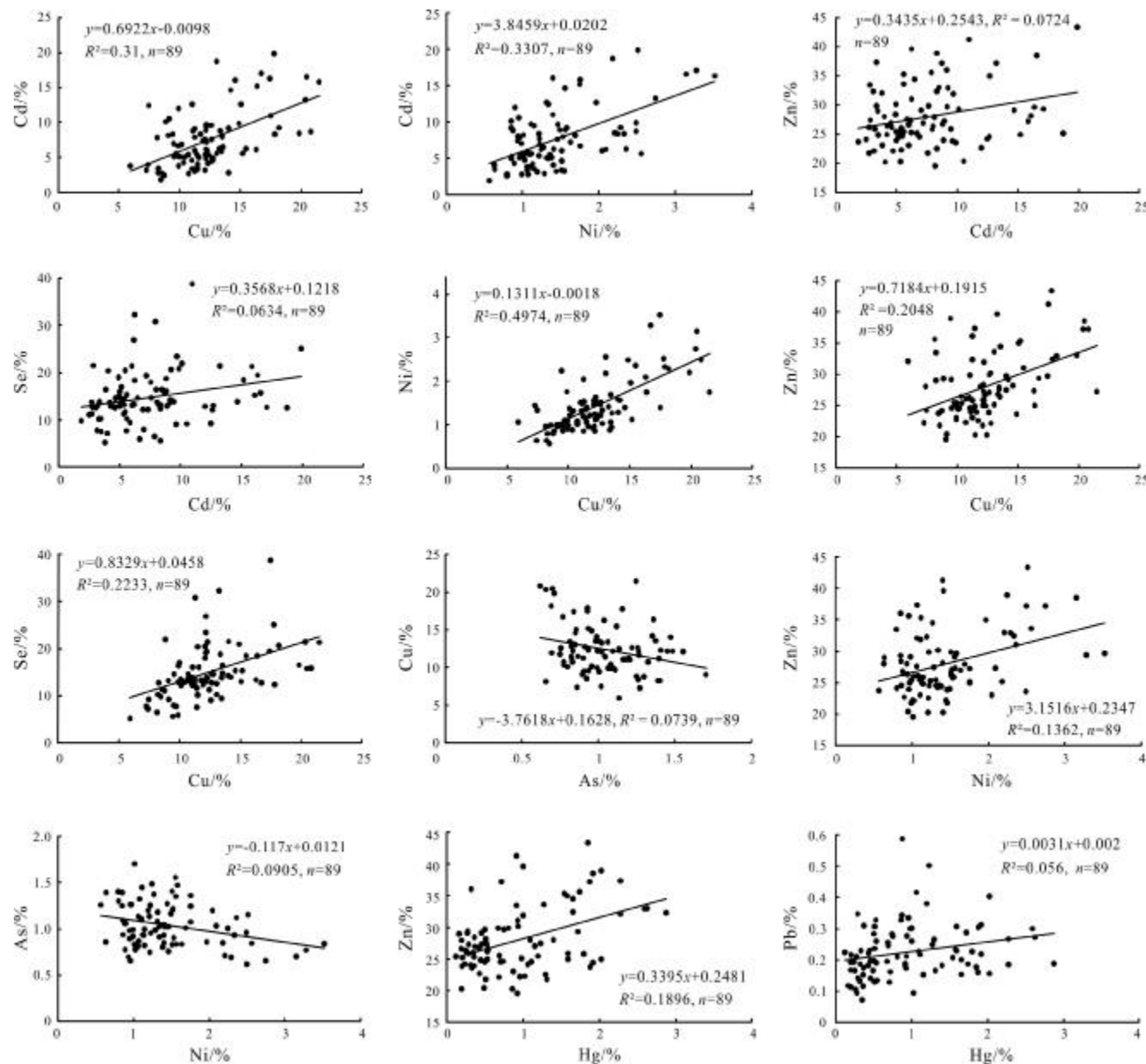


图 2 水稻籽实 9 种元素富集系数相关性散点图

Fig. 2 Correlation scatter diagram for enrichment coefficients of nine elements in rice seed

4.3.2 土壤重金属元素含量对水稻籽实重金属元素含量的影响

土壤中的重金属元素是农作物中重金属元素的主要来源,农作物籽实中重金属元素含量的高低不仅取决于土壤中对对应重金属元素含量的高低,而且受土壤其他重金属元素影响明显<sup>[15-17]</sup>.通过对水稻籽实中重金属元素含量与土壤中重金属元素含量进行相关性分析(图 4),结果表明,水稻籽实 Zn 与土壤 As 呈极显著正相关关系,水稻籽实 Cu 与土壤 Cd 呈极显著负相关

关系,其他籽实重金属元素与土壤元素之间的关系未达到显著性相关水平.曾路生等<sup>[18]</sup>对山东寿光蔬菜大棚土壤有效态 As、Zn 含量变化研究发现,随着种植年限的延长,土壤中有效态 Zn 含量不断增加,而有效态 As 含量正好相反,表明 As 促进农作物吸收 Zn,其复合效应表现为协同作用.季冬雪等<sup>[19]</sup>在研究 Cu-Cd 复合污染对水稻毒性的影响中认为 Cu-Cd 对水稻毒性因浓度配比不同而表现出不同的作用方式,当 Cu-Cd 浓度配比为 4:1 时,Cu-Cd 拮抗作用最强.以往研

表 5 水稻籽实元素含量间相关关系

| 元素 | As       | Cd      | Cu       | Hg      | Ni      | Zn      |
|----|----------|---------|----------|---------|---------|---------|
| As | —        | —       | -0.350** | —       | —       | —       |
| Cd | —        | —       | 0.309**  | —       | 0.350** | —       |
| Cu | -0.350** | 0.309** | —        | —       | 0.683** | 0.429** |
| Hg | —        | —       | —        | —       | —       | 0.490** |
| Ni | —        | 0.350** | 0.683**  | —       | —       | 0.418** |
| Zn | —        | —       | 0.429**  | 0.490** | 0.418** | —       |

\*\*表示在 0.01 水平上显著相关,—表示未达到显著性水平,其他相关系数不显著的指标未列出;n=89.

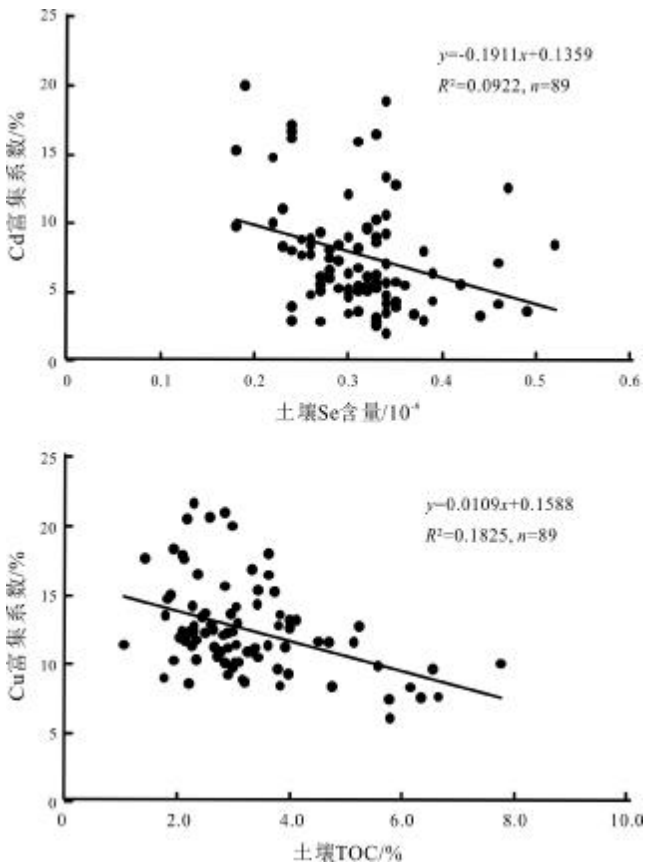


图 3 水稻籽实重金属元素富集系数与土壤 Se、TOC 相关性散点图

Fig. 3 Correlation scatter diagram of enrichment coefficients of heavy metals in rice seed vs. Se and TOC in soil

究表明,低浓度 Cu 可提高水稻对 Cd 的吸收,Cu–Cd 表现出协同作用<sup>[20-21]</sup>,在高浓度 Cu 条件下,Cu、Cd 间的相互作用可能与其竞争生物吸附点位能力有关,Cu 与农作物根系结合的能力强于 Cd,尤其是 Cu 浓度较高

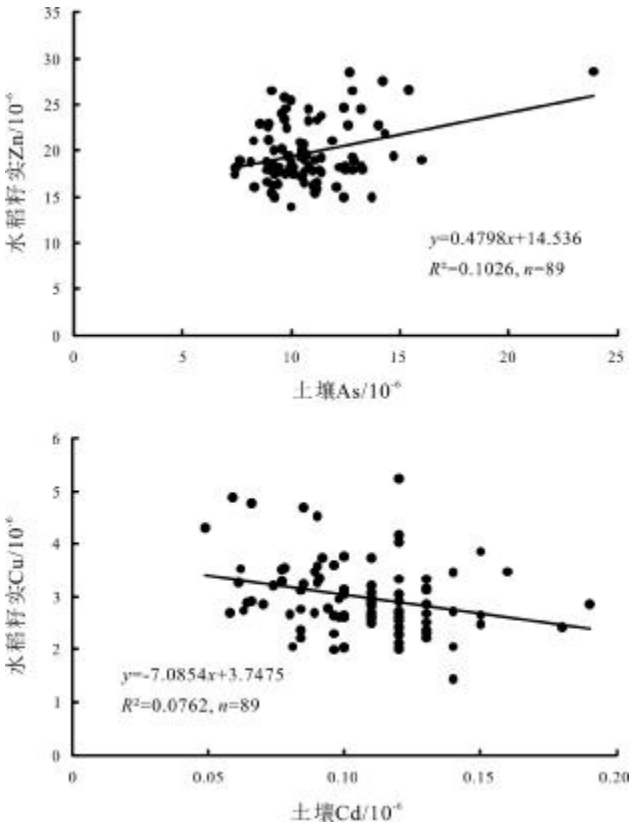


图 4 水稻籽实重金属元素与土壤重金属元素相关性散点图  
Fig. 4 The correlation scatter diagram for heavy metals in rice seed and in soil

时,农作物根系优先吸附Cu,从而抑制了对 Cd 的吸收.

5 结论与展望

庆安地区水稻根系土各元素的含量分布较均匀,水稻籽实中各元素含量分布不均匀,差异较明显,其中 Cr、Cd、Ni、Hg 和 Se 的变异系数均超过 40%. 从各元素富集系数来看,水稻籽实中重金属元素富集系数按从大到小顺序排列为:Zn>Cu>Hg>Cd>Ni>As>Cr>Pb.

水稻籽实重金属等元素富集系数之间多呈正相关关系,水稻籽实 Cd 元素富集系数与土壤 Se,水稻籽实 Cu 元素富集系数与土壤 TOC 均呈负相关关系. 水稻籽实 Zn 含量受土壤 As 含量制约,两者呈正相关关系;水稻籽实 Cu 含量受土壤 Cd 含量制约,两者呈明显的负相关关系. 水稻籽实中重金属等元素含量之间多呈正相关关系,元素间的相互作用表现为协同作用,仅 As 与 Cu 呈负相关关系,元素间的相互作用表现为拮抗作用.

土壤-水稻系统中,农作物吸收 Cd、Se、Cu 等元素的影响因素非常复杂,既与土壤中元素的含量、赋存形式有关,还受土壤 pH、TOC 等指标的制约,同时还与元素间的协同或拮抗作用有关。因此,在进行农产品安全性评价时,不能只考虑单一重金属元素带来的污染,还应考虑到由于重金属等元素相互作用所造成的复合污染。

### 参考文献:

- [1] 郑冬梅,王起超,张仲胜,等. 葫芦岛市五里河土壤-植物系统中汞的迁移[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 676-680.  
Zheng D M, Wang Q C, Zhang Z S, et al. Transfer of mercury in soil-plant system of Wuli River, Huludao City [J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 676-680.
- [2] 姚德,孙梅,杨富贵,等. 青岛城区土壤重金属环境地球化学研究[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 539-550.  
Yao D, Sun M, Yang F G, et al. Environmental geochemistry of heavy metals in urban soils of Qingdao City [J]. Geology in China, 2008, 35(3): 539-550.
- [3] Lee S. Geochemistry and partitioning of trace metals in paddy soils affected by metal mine tailings in Korea [J]. Geoderma, 2006, 135: 26-37.
- [4] Calace N, Campisi T, Iaconi A, et al. Metal-contaminated soil remediation by means of paper mill sludges addition: Chemical and ecotoxicological evaluation [J]. Environmental Pollution, 2005, 136 (3): 485-492.
- [5] Sterckeman T, Douay F, Baize D, et al. Factors affecting trace element concentrations in soils developed on recent marine deposits from northern France [J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(1): 89-103.
- [6] 赵鑫娜,杨忠芳,余涛. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. 中国地质, 2023, 50(1): 84-101.  
Zhao X N, Yang Z F, Yu T. Review on heavy metal pollution and remediation technology in the soil of mining areas [J]. Geology in China, 2023, 50(1): 84-101.
- [7] 李秋燕,魏明辉,戴慧敏,等. 锦州市土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地质与资源, 2021, 30(4): 465-472.  
Li Q Y, Wei M H, Dai H M, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and ecological risk assessment of Jinzhou City [J]. Geology and Resources, 2021, 30(4): 465-472.
- [8] 赵秀芳,王艺璇,张永帅,等. 山东安丘地区土壤-小麦系统重金属等元素间的相互作用[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 936-944.  
Zhao X F, Wang Y X, Zhang Y S, et al. Interaction of heavy metals and other elements in soil-wheat system in Anqiu area, Shandong Province [J]. Geoscience, 2020, 34(5): 936-944.
- [9] 朱波,青长乐,牟树森. 紫色土 Zn、Cd 复合污染生态效应研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 639-644.  
Zhu B, Qing C L, Mu S S, et al. Ecological effect of exotic Cd-Zn compound pollution on purple soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(6): 639-644.
- [10] 韩桂琪,王彬,徐卫红,等. 重金属 Cd、Zn、Cu 和 Pb 复合污染对土壤生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1236-1242.  
Han G Q, Wang B, Xu W H, et al. Effects of heavy metal compound contamination of Cd, Zn, Cu and Pb on soil biological activity [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1236-1242.
- [11] 冯海艳,杨忠芳,杨志斌. 土壤-水稻系统中重金属元素与其他元素之间的相互作用[J]. 地质通报, 2007, 26(11): 1429-1434.  
Feng H Y, Yang Z F, Yang Z B. Interaction among heavy metals and other elements in the soil-paddy rice system [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(11): 1429-1434.
- [12] 廖启林,刘聪,蔡玉曼,等. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 331-340.  
Liao Q L, Liu C, Cai Y M, et al. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheat meal in some typical areas of Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2013, 40 (1): 331-340.
- [13] 方如康. 环境学词典[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 127-128.  
Fang R K. Dictionary of environmental science [M]. Beijing: Science Press, 2003: 127-128.
- [14] 罗厚枚,王宏康. 土壤重金属复合污染对作物的影响[J]. 环境化学, 1994, 13(5): 427-432.  
Luo H M, Wang H K. Effect of compound pollution of heavy metals on crops in calcareous soil [J]. Environmental Chemistry, 1994, 13 (5): 427-432.
- [15] 周国华,汪庆华,董岩翔,等. 土壤-农产品系统中重金属含量关系的影响因素分析[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(S1): 226-231, 12.  
Zhou G H, Wang Q H, Dong Y X, et al. Factors affecting heavy metal concentrations in the soil-agricultural product system [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(S1): 226-231, 12.
- [16] 余涛,杨忠芳,钟坚,等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 67-73.  
Yu T, Yang Z F, Zhong J, et al. Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 67-73.

- [14]王克晓,陈刚,陈伟涛,等.生态地质环境评价方法研究[J].测绘科学,2015,40(7):78-82.  
Wang K X, Chen G, Chen W T, et al. Comprehensive assessment of eco-geological environment[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(7): 78-82.
- [15]孙张涛,余正伟,舒思齐,等.中国省域生态系统服务价值评价与生态地质调查工作建议[J].中国地质,2023,50(2):479-494.  
Sun Z T, Yu Z W, Shu S Q, et al. Evaluation of ecosystem services of Chinese provincial land and suggestions for ecological geological survey[J]. Geology in China, 2023, 50(2): 479-494.
- [16]孟晖,李春燕,张若琳,等.全国地质环境承载能力评价[J].地质通报,2021,40(4):451-459.  
Meng H, Li C Y, Zhang R L, et al. Assessment of carrying capacity of national geological environments in China[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(4): 451-459.
- [17]魏路,刘建奎,肖永红,等.安徽省地质环境承载能力评价[J].地质通报,2020,39(1):102-107.  
Wei L, Liu J K, Xiao Y H, et al. The evaluation on the bearing capacity of geological environment in Anhui Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(1): 102-107.
- [18]高玄或.地貌基本形态的主客分类法[J].山地学报,2004,22(3):261-266.  
Gao X Y. The subjective and objective classification of geomorphologic forms[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3): 261-266.
- [19]张君,蔡德宝,杨树琼,等.丹江口库区不同坡度对土壤肥力特征的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):32-38.  
Zhang J, Cai D B, Yang S Q, et al. Soil fertility characteristics of different slopes in the Danjiangkou Reservoir area[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(2): 32-38.
- [20]徐婷,赵成章,段贝贝,等.兰州北山刺槐不同等级叶脉密度与叶大小关系的坡向差异性[J].生态学杂志,2016,35(1):41-47.  
Xu T, Zhao C Z, Duan B B, et al. Slope-related variations of different levels of vein density and leaf size in *Robinia pseudoacacia* in the northern mountains of Lanzhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 41-47.
- [21]盘远方,李娇凤,姚玉萍,等.桂林岩溶石山青冈群落植物功能多样性和环境因子与坡向的关联研究[J].生态学报,2021,41(11):4484-4492.  
Pan Y F, Li F J, Yao Y P, et al. Changes in plant functional diversity and environmental factors of *Cyclobalanopsis glauca* community in response to slope gradient in Karst hills, Guilin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4484-4492.
- [22]刘玉祯,刘文亭,冯斌,等.坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J].草地学报,2021,29(6):1166-1173.  
Liu Y Z, Liu W T, Feng B, et al. Effects of slope aspect and elevation on vegetation distribution pattern of alpine mountain meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6): 1166-1173.
- [23]刘旻霞,南笑宁,张国娟,等.高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系[J].生态学报,2021,41(13):5398-5407.  
Liu M X, Nan X N, Zhang G J, et al. Relationship between species diversity and functional diversity of plant communities on different slopes in alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5398-5407.
- [24]黄建军.生态环境与地质构造的耦合关系研究[J].地球环境学报,2015,6(4):231-237.  
Huang J J. Study on the coupling relation between eco-environment and geotectonic [J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 231-237.

(上接第 89 页/Continued from Page 89)

- [17]张开军,魏迎春,徐友宁.小秦岭某金矿区土壤-农作物重金属元素富集规律[J].地质通报,2015,34(11):2018-2023.  
Zhang K J, Wei Y C, Xu Y N. The discussion on heavy metal accumulation regularity in the soil and crop of the Xiaolinling gold mining area[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2018-2023.
- [18]曾路生,史衍玺.寿光蔬菜大棚土壤有效态 Hg、As、Cu 和 Zn 含量的变化[C]//第二届重金属污染防治技术及风险评价研讨会暨重金属污染防治专业委员会 2012 年首届学术年会论文集.中国环境科学学会,2012:244-249.  
Zeng L S, Shi Y X. Available Hg, As, Cu and Zn content in vegetable greenhouse soil of Shouguang[C]//The Second Symposium on Heavy Metal Pollution Prevention and Risk Assessment. Chinese Society for Environmental Sciences, 2012: 244-249.
- [19]季冬雪,华璐,王学东,等. Cu-Cd、Zn-Cd、Cu-Zn 复合污染对水稻毒性和重金属吸收的影响[J].环境污染与防治,2018,40(10):1141-1146.  
Ji D X, Hua L, Wang X D, et al. The effects of combined heavy metals (Cu-Cd, Zn-Cd, Cu-Zn) on the toxicity and uptake of metal elements in rice[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(10): 1141-1146.
- [20]吕笃康,巴音山,赵玉.铜、镉污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2012,31(9):108-111.  
Lv D K, Ba Y S, Zhao Y. Effects of copper and cadmium pollution on wheat seed germination and seedling growth[J]. Seed, 2012, 31(9): 108-111.
- [21]谢素,寇士伟,吴鹏辉,等. Cd-Cu-Pb 复合污染对芥菜吸收 Cd、Cu 和 Pb 及矿质元素的影响[J].环境科学研究,2012,25(4):453-459.  
Xie S, Kou S W, Wu P H, et al. Effects of Cd-Cu-Pb compound contamination on absorption of Cd, Cu, Pb and mineral elements in mustard [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(4): 453-459.