



# 山东五莲东部地区硒元素 在土壤-作物系统中迁移富集规律

范伟顺<sup>1,2</sup>, 郑成光<sup>1</sup>, 刘元忠<sup>1\*</sup>, 周立国<sup>1</sup>

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队(山东省第八地质矿产勘查院), 山东 日照 276826; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

**摘要:**本文以山东五莲县东部地区为研究区, 通过系统采集代表性农作物小麦、玉米及其根系土等样品, 开展有益、有害元素等指标的分析测试, 旨在查明研究区硒元素在土壤-作物系统中迁移富集规律及其影响因素。结果表明农作物体内硒元素的主要来源于土壤, 代表性农作物不同部位对硒的富集能力也不同, 遵循根系>叶>茎>籽实的特征。农作物籽实中硒元素与土壤硒元素正相关, 其中小麦籽硒元素与根系土中硒元素相关系数为 0.57, 玉米籽硒元素与根系土中硒元素相关系数为 0.32, 说明小麦籽实对硒的富集能力比玉米籽实对硒元素的富集能力强。农作物对硒的吸收除了与硒全量值有关还与硒的赋存形式有关, 例如硒酸盐等水溶性硒最易被植物吸收, 此外还与有机质、pH 有关, 以及受重金属元素、成土母岩以及其他土壤理化性质的影响。其研究成果对于高标准农田建设、科学营养施肥、环境质量评价等方面具有重要的指导意义。

**关键词:**硒元素; 土壤; 作物; 迁移; 富集; 五莲地区

中图分类号:S151.9+3

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.08.005

## 0 引言

硒是人体所必需的微量元素, 是具有生理功能的生命元素, 对人体具有多种益处, 包括抗氧化、免疫调节、抗肿瘤、抗病毒等, 硒还是一种天然的解毒剂<sup>[1]</sup>。正是基于硒的这些功效, 硒元素也受到人们越来越多的关注。此外, 人体硒元素水平失衡也会导致多种健康问题。硒元素在土壤中的来源主要包括岩石圈和大气干湿沉降。土壤中的硒可以通过地表水径流、地下水淋滤、农作物收割、植物和微生物的挥发等方式流失。土壤中硒的迁移作用主要归因于水动力迁移作用、固相吸附作用和动植物循环作用<sup>[2]</sup>。研究表明不同农作物对土壤中硒元素的吸收富集能力存在差异。例如在黑龙江拜泉地区, 黄豆和水稻富硒占比相对较高<sup>[3]</sup>。硒元素在土壤-作物系统中的迁移富集受多种因素影响, 包括成土母岩、土壤性质、土壤中硒的

存在形态、土壤理化性质以及农业管理措施等。其中, 土壤理化性质对硒全量、硒形态及其迁移富集具有重要影响<sup>[4]</sup>。在碱性-中性土壤中硒含量基本不受 pH 制约<sup>[5]</sup>。硒全量与有机质呈显著正相关关系, 但有机质含量超过某一界限后, 虽然可以提高硒含量水平, 但也抑制硒元素的迁移富集<sup>[6]</sup>。

本文通过采集表层土壤、农作物根系土、农作物等样品, 对硒元素等指标进行分析测试, 采用 Excel 对样品中硒含量进行描述性统计分析, 利用 MapGIS 和 Access 为基础的信息平台, 将采样及样品信息资料数字化, 采用 ArcGIS 10.7 进行 Kriging 差值分析并建立半方差变异函数模型, 形成空间分布图, 利用 GeoIPAS V4.5 软件进行相关性分析, 并用 MapGIS 6.7 绘制相关图件, 解析土壤中硒元素的来源, 分析代表性农作物及根系土硒元素含量, 探索硒元素在土壤-作物系统中迁移富集规律及其影响。可以为富硒土地的开发利用提供科学依据, 为现代

收稿日期:2025-02-10; 修订日期:2025-03-28; 编辑:武昕普

作者简介:范伟顺(1984—), 男, 山东日照人, 高级工程师, 主要从事资源与环境, 地球物理勘查等研究工作; E-mail: 815063930@qq.com

\* 通信作者:刘元忠(1978—), 男, 山东日照人, 工程师, 主要从事煤层气钻探工作; E-mail: 63301422@qq.com

农业发展、高标准农田建设、污染防治、基础地质研究等提供地质资料支撑,具有广阔的应用前景。

## 1 研究区概况

研究区位于日照市五莲县东部,包括洪凝街道、松柏镇、街头镇、叩官镇、许孟镇、潮河镇以及户部乡,总面积 987 km<sup>2</sup>。地处西环太平洋多金属成矿带的外带,华北地台沂沭断裂带之昌邑-大店断裂东侧,胶莱盆地西南缘,胶南断块隆起西北<sup>[7]</sup>。位于鲁东低山丘陵与鲁中南低山丘陵交接地带,属温带季风气候,一年四季周期性变化明显,冬无严寒,夏无酷暑,雨量充沛,季节性降水明显,日照充足,热能丰富。年平均气温 12.6℃,历年平均降雨量 767.1 mm,6—9 月为雨季,年平均日照时数 2 449.3 h,年蒸发总量平均为 1 740.2 mm。主要种植农作物有小麦、玉米、红薯等,主要经济作物有板栗、苹果、樱桃等。

## 2 样品分析

### 2.1 样品采集

根据《土地质量生态地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)的样品采集要求,在主要代表性作物和典型土壤区布置采样点(图 1),期间避开农作物施肥、种植、生长、收割期及雨季,共采集土壤根系土样品 120 件,植物样品 120 件。

**土壤样品:**土壤样品分为表层土壤样品以及各作物的根系土,样品采集方法相同。土壤样采样深度 0~20 cm,4 点等量混合采样,去除动植物残体、砾石、肥料团块及植物根系等<sup>[8]</sup>,四分法留取约 1 000 g 装入布袋。土壤样品风干后,用碎样机磨碎,过 200 目筛后,密封在干燥样品袋中备用。

**植物样品:**采集的植物种类有玉米、小麦等,采样时避开病虫害以及其他特殊的植株,样品采集完成后立刻装入聚乙烯袋中,并扎紧袋口<sup>[9-10]</sup>。在实验室内,用水洗净植株后,将植株按不同部位(根、茎、叶、籽粒)分离后风干,用植物碎样机粉碎,过 60 目筛后,密封在干燥样品袋中备用。

### 2.2 分析测试

农作物根系土样品由山东省第八地质矿产勘查院岩矿测试中心完成,表层土壤有效态样品由武汉矿产资源检测中心测试完成,农作物样品由山东省

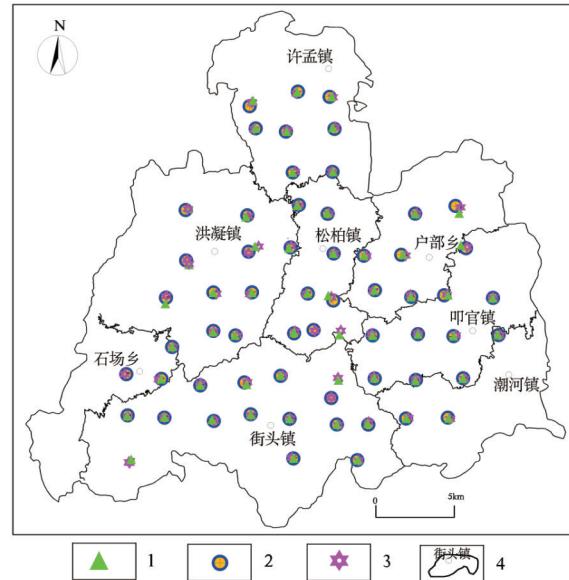


图 1 作物及根系土采样点位图

图 1 作物及根系土采样点位图

物化探院岩矿测试中心测定完成,测试过程中加入土壤国家标准样品 GBW07401 进行质量控制,样品报出率为 100.00%。主要指标测试方法:土壤有机质测定采用外加热法,依据标准《NY/T 1121.6—2006》;土壤 pH 测定采用电位计测定法,依据标准《NY/T 1377—2007》;土壤全硒含量测定采用原子荧光光谱法,依据标准《GB/T 22105.2—2008》;植物果实硒含量测定用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>—HNO<sub>3</sub> 消解后,采用微波消解—原子荧光光谱法,依据标准《GB/T 5009.93—2017》<sup>[11]</sup>。各项指标的准确度和精密度均符合《土地质量生态地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)要求。

### 2.3 评价方法

为分析农作物对硒元素的富集程度,将农作物中硒元素含量与富硒标准含量的下限的比值定义为富硒系数 SEF<sup>[12]</sup>,其计算公式(1)为:

$$SEF = \frac{[X_{se}]_{\text{农作物}}}{[X_{se}]_{\text{标准值下限}}} \quad (1)$$

式中:SEF 表示农作物富硒系数, [X<sub>se</sub>]<sub>农作物</sub> 表示农作物硒含量, [X<sub>se</sub>]<sub>标准值下限</sub> 表示相关规范给出的标准值下限。本次研究区富硒农作物下限值采用《山东省 1:5 万土地质量地球化学调查评价技术要求》规范标准,农作物富硒标准值下限为 0.04 mg/kg。按照富硒系数的大小对农作物富硒等级进行划分<sup>[13]</sup>: SEF<1 时,为不富硒; 1≤SEF<2 时,表示轻度富硒; 2≤SEF<3 时,为中度富硒; SEF≥3 时,为高

度富硒。

生物富集系数(BCF),是指农作物中元素含量值与其根系土壤中元素含量值的比值,能够定量的分析农作物吸收和富集硒元素的能力。其计算公式(2)如下<sup>[14]</sup>:

$$BCF = \frac{[X_{se}]_{plant}}{[X_{se}]_{soil}} \quad (2)$$

式中:BCF 表示生物富集系数,  $[X_{se}]_{plant}$  表示农作物硒含量,  $[X_{se}]_{soil}$  表示同点位根系土壤中硒含量。根据农作物对硒元素的吸收能力分为 4 个等级<sup>[15]</sup>:  $BCF \leq 0.01$  时, 为极弱吸收;  $0.01 < BCF \leq 0.1$ , 为弱吸收;  $0.1 < BCF \leq 1$  时为中等吸收;  $BCF > 1$  时, 为强吸收。

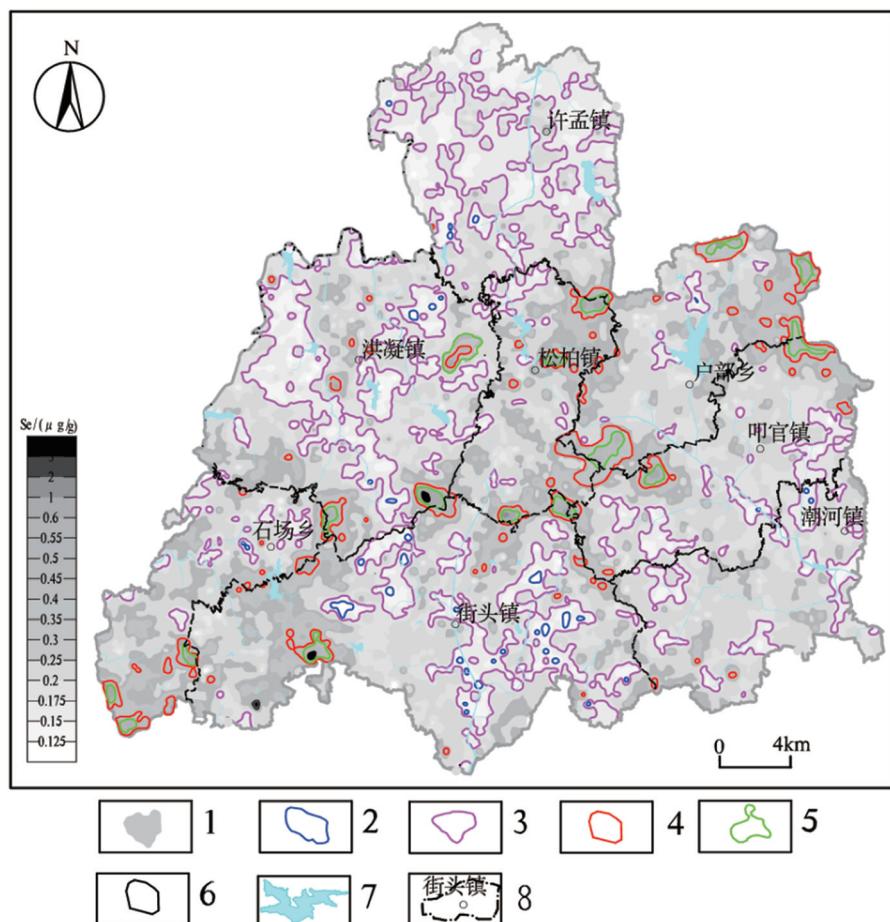
### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤硒元素

##### 3.1.1 土壤硒全量

五莲县北部地区表层土壤硒的含量范围为 0.03~5.11 mg/kg, 平均含量为 0.19 mg/kg, 略高于全省表层土壤平均值(0.18 mg/kg)。

如土壤硒元素地球化学图(图 2)所示, 足硒区分布最广, 研究区绝大部分区域均为足硒区(表 1), 分布面积为 578.15 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 58.57%; 潜在硒不足区分布较广, 潜在硒不足区主要分布在许孟镇周边、潮河镇大部等, 分布面积为 290.73 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 29.46%; 硒缺乏区分布较少, 呈零散分布, 分布在许孟镇周边、潮河镇西南部等, 分布面积为 63.50 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 6.43%; 富硒区在研究区内零星分布, 主要分布在松柏乡东北部、户部乡东部、街头镇西南部等区域, 总体分布面积为 54.55 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 5.53%。



1—硒元素含量分区; 2—硒缺乏范围; 3—硒不足范围; 4—足硒范围; 5—富硒范围; 6—硒中毒范围; 7—水域范围;  
8—乡镇范围。

图 2 表层土壤硒元素地球化学图

表 1 五莲县北部地区土壤硒含量分级及面积统计

| 评价等级               | 硒缺乏    | 潜在硒不足       | 足硒         | 富硒       | 硒中毒  |
|--------------------|--------|-------------|------------|----------|------|
| 含量/(mg/kg)         | ≤0.125 | 0.125~0.175 | 0.175~0.40 | 0.40~3.0 | >3.0 |
| 面积/km <sup>2</sup> | 63.5   | 290.73      | 578.15     | 54.55    | 0.07 |
| 比例/%               | 6.43   | 29.46       | 58.57      | 5.53     | 0.01 |

### 3.1.2 不同土壤类型单元土壤硒元素分布特征

不同土壤类型单元因土壤成土母质、物理性质、化学性质不同,导致硒元素含量差异性较大。研究区从低山丘陵到平原,形成石质土或粗骨土—粗骨

土—棕壤—潮土的垂直分布规律,本次将区内土壤划分为 7 个土类。表层土壤硒含量按不同土壤单元分类统计分析,绘制了表层土壤硒元素地球化学柱状图(图 3)。

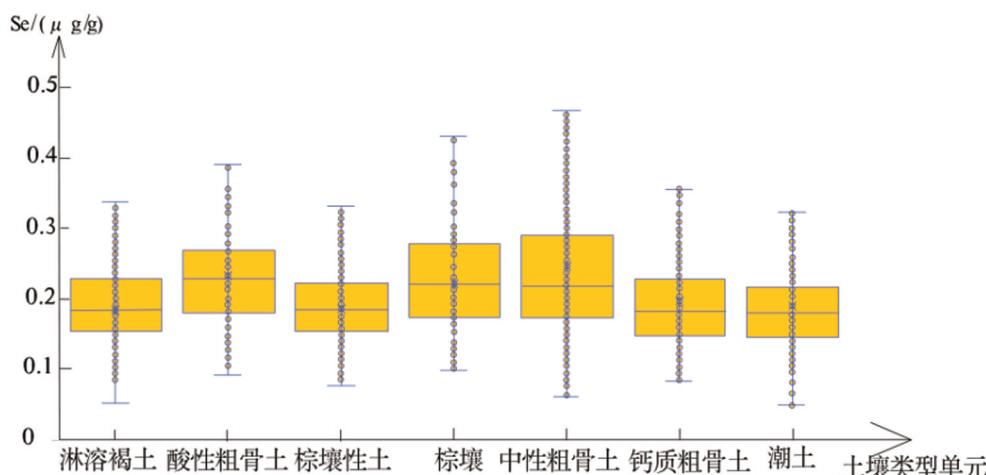


图 3 表层土壤硒元素地球化学柱状图

酸性粗骨土硒元素含量平均值为 0.25 mg/kg,含量偏高于研究区平均值(0.21 mg/kg);棕壤与中性粗骨土硒元素含量平均值为 0.21 mg/kg,含量与研究区平均值相等;棕壤性土硒元素含量平均值为 0.19 mg/kg,略低于研究区平均值;钙质粗骨土硒元素含量平均值 0.18 mg/kg,略低于研究区平均值;潮土硒元素含量平均值 0.17 mg/kg,偏低于研究区平均值;淋溶褐土硒元素含量平均值 0.16 mg/kg,为研究区最低。

## 3.2 农作根系土硒含量及分布特征

### 3.2.1 农作根系土元素含量特征

研究区主要农作物有小麦、玉米,试验过程中随机选择特色农作物样品及其根系土,其中采集小麦样品 60 件,玉米样品 60 件;同点位采集根土系小麦样品 60 件,玉米样品 60 件。将作物根系土与作物籽实中各元素含量做统计分析(表 2),可见元素 P、S 在籽实中含量高于或接近土壤全量,因其受土壤有效态限制,作物通过主动吸收富集这些元素以满足生长需求。作物籽实 Mn 含量显著低于土壤全锰

值,籽实重金属元素(As、Cd、Pb、Cr、Hg、Ni)含量远低于土壤全量。作物籽实中氧化物( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ )含量极低,因其几乎不参与生物代谢,主要反映土壤矿物组成或环境粉尘污染。

### 3.2.2 根系土硒形态分布特征

土壤硒全量代表土壤硒的储量总和,按浸提形态划分为水溶态、酸溶态(碳酸盐及铁锰氧化物结合态)、可交换态、有机物结合态、残渣态共计 5 种类型<sup>[16-18]</sup>。一般来说,土壤硒全量与有效量之间成正比,在土壤中水溶态、可交换态硒最容易被植物直接吸收,对富集产生直接影响。有机结合态硒能被生物有效利用,与人类健康密切相关,是评价硒生态效应的重要指标,为研究硒的生物有效性等方面的信息,更好地揭示硒有效性和生物地球化学行为,将土壤硒各形态含量与硒全量作相关性分析(表 3)。总体来看,水溶态硒与土壤硒全量呈负相关,其他各种形态硒与硒全量呈正相关。

表 2 作物根系土与作物籽实中元素含量统计

| 元素 | 土壤(平均值) | 小麦籽实(平均值) | 玉米籽实(平均值) | 元素                             | 土壤(平均值) | 小麦籽实(平均值) | 玉米籽实(平均值) |
|----|---------|-----------|-----------|--------------------------------|---------|-----------|-----------|
| As | 5.85    | 0.044     | 0.038     | Ni                             | 20.46   | 0.25      | 0.16      |
| B  | 28.8    | 1.5       | 0.56      | P                              | 40.43   | 55.48     | 42.12     |
| Cd | 0.13    | 0.024     | 0.038     | Pb                             | 29.01   | 0.078     | 0.089     |
| Co | 12.42   | 0.115     | 0.034     | S                              | 41.86   | 52.15     | 56.12     |
| Cr | 52.6    | 0.35      | 0.46      | Se                             | 0.19    | 0.028     | 0.018     |
| Cu | 20.43   | 3.66      | 3.2       | V                              | 83.55   | 0.016     | 0.015     |
| F  | 407.66  | 0.88      | 0.136     | Zn                             | 68.05   | 12.53     | 15        |
| Ge | 1.26    | 0.0098    | 0.0045    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.76   | 2.46      | 0.89      |
| Hg | 0.024   | 0.0087    | 0.0024    | CaO                            | 1.17    | 0.057     | 0.056     |
| I  | 1.92    | 0.069     | 0.058     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.62    | 0.91      | 0.23      |
| Mn | 648.66  | 29.35     | 32.35     | K <sub>2</sub> O               | 2.93    | 0.56      | 0.47      |
| Mo | 0.71    | 0.29      | 0.43      | MgO                            | 1.26    | 0.015     | 0.001     |
| N  | 78.37   | 89.87     | 10.56     | SiO <sub>2</sub>               | 66.17   | 0.56      | 0.25      |

注: As - Zn: mg/kg, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub>: %。

表 3 研究区农作物根系土不同形态硒分类统计表

| 农作物及件数   | 项目           | 全量        | 残渣态         | 有机结合态       | 酸溶态(碳酸盐及铁锰氧化物结合态) | 可交换态          | 水溶态           |
|----------|--------------|-----------|-------------|-------------|-------------------|---------------|---------------|
| 小麦(60 件) | 变化范围/(mg/kg) | 0.05~0.26 | 0.055~0.105 | 0.058~0.175 | 0.0056~0.0086     | 0.0045~0.0098 | 0.0007~0.0086 |
|          | 平均值/(mg/kg)  | 0.1778    | 0.0726      | 0.085       | 0.0096            | 0.0054        | 0.0052        |
|          | 标准差          | 0.026     | 0.0105      | 0.1425      | 0.0041            | 0.014         | 0.0015        |
|          | 均值占全量比例      | —         | 40.83%      | 47.81%      | 5.40%             | 3.04%         | 2.92%         |
|          | 与全量相关系数      | —         | 0.256       | 0.619       | 0.101             | 0.125         | -0.15         |
| 玉米(60 件) | 变化范围/(mg/kg) | 0.05~0.47 | 0.058~0.113 | 0.045~0.206 | 0.0052~0.0112     | 0.0039~0.0076 | 0.0013~0.0075 |
|          | 平均值/(mg/kg)  | 0.1895    | 0.0816      | 0.0862      | 0.0102            | 0.0061        | 0.0054        |
|          | 标准差          | 0.022     | 0.0075      | 0.0127      | 0.0054            | 0.012         | 0.0014        |
|          | 均值占全量比例      | —         | 43.06%      | 45.48%      | 5.38%             | 3.29%         | 2.85%         |
|          | 与全量相关系数      | —         | 0.078       | 0.081       | 0.429             | 0.233         | -0.03         |

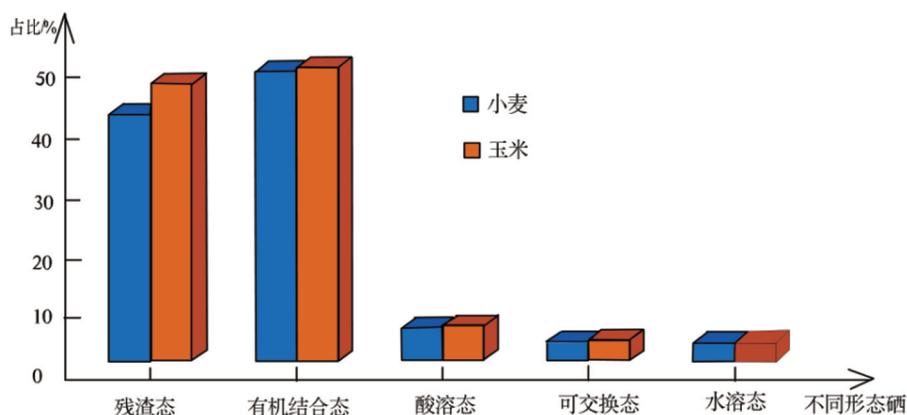


图 4 农作物籽实中不同形态硒含量分布图

研究区不同形态的硒含量高低基本遵循(图 4):有机结合态>残渣态>酸溶态>可交换态

>水溶态, 其中有机结合态占全量硒 47.81%~49.30%, 水溶态、离子交换态和酸溶态三项总和占

全量硒的 11.36%~12.21%，占比较少。这是因为硒在土壤中的赋存形式主要受岩石风化、腐殖化过程和微生物运动的影响，其中，岩石风化所产生的硒转化为碳酸盐和铁锰氧化物结合态，腐殖化和微生物作用会导致硒的形态转变或形成络合物，使得更多的无机结合态硒转化为有机结合态硒，因此，土壤中的硒主要以有机结合态和腐殖酸结合态的形式存在。硒酸盐为水溶性硒容易从碱性土壤中淋滤出来被植物吸收，酸性土壤中则较少，是植物最易吸收的形式。在土壤、作物中易被还原为亚硒酸盐，也可在适宜条件下还原成元素硒。有机态硒是富硒植物腐解的产物，并非都能被作物吸收利用，部分易被微生物分解呈气态烷基硒化物而挥发，碱土中硒的挥发作用比酸性土大<sup>[19-21]</sup>。

### 3.2.3 农作不同部位硒的分配与积累

为研究农作物不同部位对硒的富集能力，对农作物的根系、茎、叶、籽实分别做了硒含量测定，不同介质中硒分配情况（表 4），可以看出，玉米中根系与土壤的分配系数为 1.45，说明根系中硒含量大于土壤，主要是因根系能从土壤中富集硒，茎与根系的分配比系数为 0.13，叶与根系的分配系数为 0.23，说明玉米叶的富硒能力大于茎部，籽实与根系的分配系数为 0.06，籽实中硒含量最低；小麦中根系与土壤的分配系数为 1.89，说明根系中硒含量大于土壤，主要是因根系能从土壤中富集硒，茎与根系的分配比系数为 0.17，叶与根系的分配系数为 0.35，说明玉米叶的富硒能力大于茎部，籽实与根系的分配系数为 0.10，籽实中硒含量最低。总体情况说明作物中硒含量根系>叶>茎>籽实，并且根系能从土壤中富集硒。作物叶与空气接触面较大，能够吸收气溶胶形式的硒，多以  $\text{Se}^{4+}$  形式存在<sup>[22]</sup>，主要来源于人类燃煤、燃油释放、尘土、土壤及沉积物中微生物代谢释放出的挥发性硒<sup>[23]</sup>。

表 4 不同介质硒分配系数

| 作物名称 | 根系土  | 茎    | 叶    | 籽实   | 根系/土壤 | 茎/根系 | 叶/根系 | 籽实/茎 | 籽实/根系 |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| 玉米   | 0.26 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 1.45  | 0.13 | 0.23 | 0.45 | 0.06  |
| 小麦   | 0.36 | 0.06 | 0.12 | 0.03 | 1.89  | 0.17 | 0.35 | 0.56 | 0.10  |

### 3.2.4 农作物对硒元素的富集程度

为分析农作物对硒元素的富集程度，将农作物中硒元素含量与富硒标准含量的下限的比值，即农作物籽实富集系数进行统计分析；为定量的分析农

作物吸收和富集硒元素的能力，将农作物中硒元素含量值与其根系土壤中硒元素含量值的比值，即生物富集系数进行统计分析，统计结果见（表 5）。

表 5 农作物籽实硒富集系数

| 作物名称 | 农作物籽实富集系数(平均值) | 农作物籽实生物富集系数(平均值) |
|------|----------------|------------------|
| 玉米   | 0.57           | 0.13             |
| 小麦   | 0.65           | 0.15             |

从农作物富集系数统计表可见，小麦籽实对硒元素的富集能力较强。玉米生物富集系数平均值为 0.13，总体表现为中等吸收水平；小麦生物富集系数变化范围为 0.021~0.182，平均值为 0.15，也总体表现为中等吸收水平，表明小麦对硒元素的吸收富集能力与玉米基本一致。

### 3.3 农作物硒元素富集迁移影响因素

#### 3.3.1 作物籽实中硒元素含量与土壤硒元素相关性分析

通过对作物籽实中硒元素与土壤硒元素进行相关性分析（表 6、表 7），作物籽实中的硒元素与土壤中硒全量、有机质、pH、部分金属元素等呈正相关。在自然界中，硒的存在形式可分为无机硒和有机硒元素两类，无机硒的赋存形式包括亚硒酸盐、硒酸盐和元素硒，前两者均属于水溶态硒<sup>[24-25]</sup>。土壤有机硒是指腐殖酸结合态硒，该形态硒主要是以络合物或其他形式，不易被植物吸收，是非有效态硒。统计分析发现农作物籽实中硒元素与水溶态硒呈强正相关。农作物对硒的吸收除了与硒全量值及硒的赋存形式有关外，还与有机质、pH 有关<sup>[26-27]</sup>，还受到重金属元素、成土母岩以及其他土壤理化性质的影响。

#### 3.3.2 根系土硒元素

农作物体内硒元素的主要来源是土壤，通常情况下，当土壤中硒含量较高时，其种植的农作物硒含量水平也比较高。

通过农作物籽实中硒含量与根系土中硒元素含量进行相关性分析（图 5），可见小麦籽实中的硒含量水平与根系土中硒全量呈显著正相关，相关系数为 0.57( $R^2=0.32$ )，说明小麦籽实对硒的富集在一定程度上受到根系土硒含量的影响，即土壤中硒全量较高相对小麦籽实中的硒元素含量也升高。玉米籽实中硒含量水平与根系土中硒全量呈显著正相关，相关系数为 0.32( $R^2=0.10$ )，说明玉米籽实对硒的富集在一定程度上也受到根系土硒含量的影响。

通过两种农作物相关系数大小分析,小麦籽实对硒元素的富集能力要大于玉米。作物硒含量并不完全取决于土壤中硒全量高低,还与植物的类别属性、硒赋存形态、土壤理化性质等多种因素共同作用有关。

表 6 小麦籽实中硒元素与土壤元素相关性统计表

| 元素   | 相关系数  | 元素                             | 相关系数  |
|------|-------|--------------------------------|-------|
| F    | -0.11 | As                             | -0.1  |
| P    | 0.29  | Se(根系土)                        | 0.57  |
| V    | 0.01  | Ge                             | 0.09  |
| Cr   | 0.24  | B                              | -0.04 |
| Mn   | 0.03  | I                              | 0.13  |
| Cu   | 0.01  | Hg                             | 0.26  |
| Pb   | -0.04 | SiO <sub>2</sub>               | -0.16 |
| Zn   | 0.26  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0     |
| Co   | -0.03 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.13  |
| Ni   | 0     | MgO                            | -0.09 |
| Mo   | 0.07  | CaO                            | -0.11 |
| Cd   | 0.34  | K <sub>2</sub> O               | 0.18  |
| N    | 0.28  | pH                             | 0.21  |
| 水溶态硒 | 0.71  |                                |       |

表 7 玉米籽实中硒元素与土壤元素相关性统计表

| 元素   | 相关系数  | 元素                             | 相关系数  |
|------|-------|--------------------------------|-------|
| F    | -0.15 | As                             | 0.03  |
| P    | 0.5   | Se(土壤)                         | 0.32  |
| V    | -0.01 | Ge                             | -0.03 |
| Cr   | 0.28  | B                              | -0.04 |
| Mn   | 0.02  | I                              | 0.04  |
| Cu   | -0.16 | Hg                             | 0.39  |
| Pb   | -0.18 | SiO <sub>2</sub>               | -0.16 |
| Zn   | 0.22  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0     |
| Co   | -0.03 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.03  |
| Ni   | 0     | MgO                            | 0.16  |
| Mo   | 0.06  | CaO                            | -0.01 |
| Cd   | 0.25  | K <sub>2</sub> O               | 0.17  |
| N    | 0.43  | pH                             | 0.19  |
| 水溶态硒 | 0.68  |                                |       |

### 3.3.3 根系土硒的赋存形式

本研究采用五步连续提取法对根系土中硒的赋存形态进行分级表征,明确了水溶态硒在硒生物有效性中的主导作用。水溶态硒以硒酸盐( $Se^{6+}$ )和亚硒酸盐( $Se^{4+}$ )为主要赋存形式,是植物有效性的直接来源,其含量水平显著影响农作物籽实硒的富集程度。水溶态与总硒含量的相关性分析表明,二者呈弱负相关或无显著统计学关联,暗示土壤总硒含量并非决定硒生物有效性的关键指标。

通过农作物籽实硒含量与根系土各形态硒含量进行相关性分析(图 6),发现小麦与玉米籽实硒富集均与水溶态硒呈显著正相关。具体而言,小麦籽

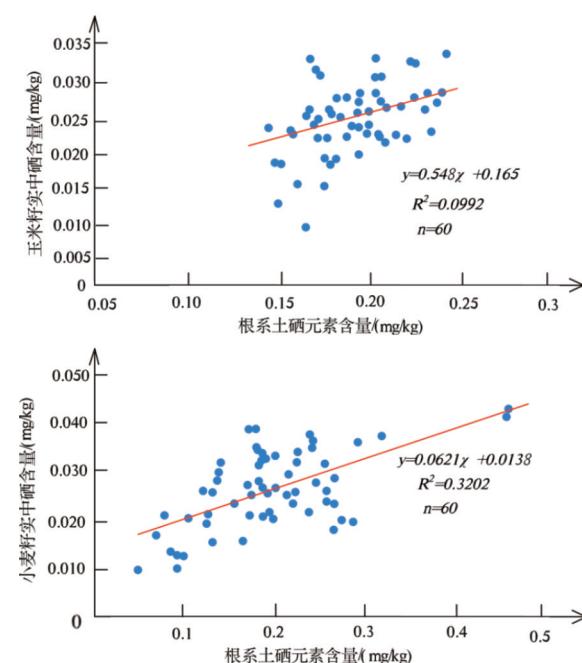


图 5 不同农作物籽实与根系土硒含量相关分析图

实硒含量与水溶态硒的相关系数达 0.71 ( $R^2 = 0.50$ ),玉米籽实硒含量与水溶态硒的相关系数为 0.69 ( $R^2 = 0.48$ ),表明两种作物对硒的吸收主要受水溶态硒的驱动。在碱性环境中,硒多以硒酸盐( $Se^{6+}$ )形成,能够增加水溶态硒比例,在酸性环境中,多以亚硒酸盐( $Se^{4+}$ )形式存在,易被铁铝氧化物所固定。在氧化环境中,硒以硒酸盐( $Se^{6+}$ )为主,迁移性强;在还原环境中,硒还原为亚硒酸盐( $Se^{4+}$ )或硒化物( $Se^{2-}$ ),降低其有效性。因此, pH 及氧化还原环境等因素,能够影响水溶态硒含量进而影响农作物籽实对硒元素的富集。

### 3.3.4 重金属元素

将小麦与玉米籽实中硒与土壤重金属元素做相关性分析。结果表明,小麦籽实中 Se 与 Zn、Cr、Cd 均呈现弱正相关,而玉米籽实中仅 Se 与 Cd、Cr、Hg 呈弱正相关。这一现象暗示农作物对 Se 与重金属的共积累具有显著差异,可能与作物根系离子转运通道的竞争性抑制或协同调控有关。

通过农作物籽实硒含量与根系土重金属元素 Cd 进行相关性分析(图 7),发现小麦与玉米籽实硒富集均与金属元素 Cd 正相关。具体而言,小麦籽实硒含量与金属元素 Cd 的相关系数为 0.25,玉米籽实硒含量与金属元素 Cd 的相关系数为 0.34,表明两种作物对硒的吸收受金属元素 Cd 影响。尽管

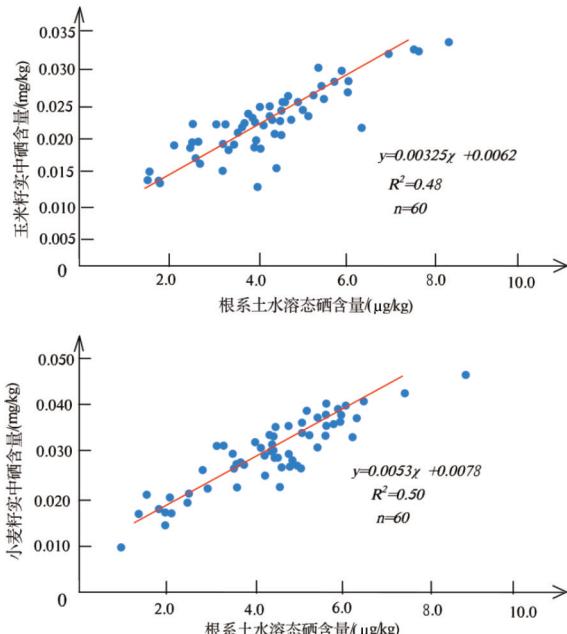


图 6 不同农作物籽实硒含量与根系土水溶态硒含量相关分析图

籽实中 Se 与 Cd 呈正相关,但土壤中外源 Se 的添加可通过形成 Se - Cd 复合物显著降低 Cd 的生物有效性。此外土壤中 Se 与 Cd 的交互作用受多重因素调控,例如土壤 pH、Eh 等因素,Se 通过竞争吸附位点或形成稳定的 Se - Cd 络合物(如  $\text{CdSeO}_3$ 、 $\text{CdSe}_2\text{O}_5$ ),显著降低 Cd 的迁移性。

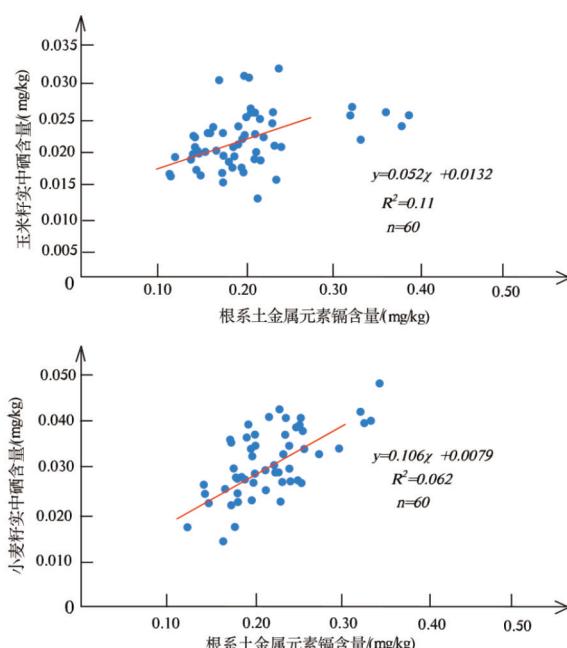


图 7 不同农作物籽实 Se 含量与根系土重金属元素 Cd 含量相关分析图

### 3.3.5 pH

土壤的 pH 是土壤的一项重要指标,制约了土壤中各种物理、化学和生物反应过程。研究区表层土壤 pH 变化范围集中在 4.4~6.2 之间,呈弱酸性—酸性,玉米根系土 pH 变化范围为 4.4~5.8,平均值为 4.78,呈酸性—强酸性,小麦根系土 pH 变化范围为 4.2~6.6,平均值 5.12,呈弱酸性—酸性。因此推断研究区土壤中硒主要以亚硒酸盐形式存在,亚硒酸盐易与氧化物、矿物黏粒和有机质吸附或络合物<sup>[30]</sup>,使其有效性降低。

通过农作物籽实中硒元素含量与 pH 相关性分析图(图 8),见玉米、小麦籽实中硒元素含量与 pH 的相关系数分别为 0.21( $R^2 = 0.041$ )和 0.19( $R^2 = 0.035$ ),均为正相关。在湿润、缺氧的酸性土壤中,Se 主要以  $\text{HSeO}_3$  形式存在,亚硒酸盐极易被 Fe、Al、Mn 的氧化物吸附,形成极难溶于水并且极不易被植物所吸收的络合物,例如  $\text{Fe}_2(\text{OH})_4\text{SeO}_3$ 。在富氧的碱性土壤中<sup>[31]</sup>,硒主要以硒酸盐形式存在,元素硒、硒化物及有机态硒分解后产生的  $\text{H}_2\text{Se}$  均可被氧化为  $\text{SeO}_3^{2-}$  或  $\text{SeO}_4^{2-}$ ,相对于亚硒酸盐,硒酸盐极易溶于水,更容易被植物所吸收,其迁移性、流动性更强,从而提高土壤中硒的有效性。因此,土壤 pH 对农作物吸收硒的控制主要是通过改变硒元素在土壤中的存在形式来实现的<sup>[28~32]</sup>。

### 3.3.6 有机质

土壤有机质对硒的固定具有双重作用,一方面,土壤有机质吸附的阴离子能与环境中的硒结合,形成各种结合态硒,阻碍了硒元素在植物—土壤中的循环。表现为大分子有机质能够固定硒并在土壤结核中产生缺氧区,植物腐殖化和微生物作用可将  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{5+}$  还原为  $\text{Se}^{0+}$  和  $\text{Se}^{2-}$  或形成络合物而固定<sup>[33]</sup>,甚至有机质对硒的结合能力高于黏土矿物质;另一方面,有机质作为有机—无机复合体能吸附环境中的硒,加快有机硒的分解,促进硒元素的地球化学循环,增加土壤中硒元素的含量。玉米、小麦籽实中硒元素含量与有机质相关性系数为 0.52、0.29,均呈显著正相关(图 9),其变化趋势表明植物籽实中硒含量随着有机质含量的增加而增加,玉米植物较小麦植物趋势更明显。

前人研究发现土壤有机质与无机硒亚硒酸盐接触后<sup>[34]</sup>,能迅速吸附和解析土壤中的硒。土壤中与腐殖质结合的硒约占 80%,其中与富里酸结合的硒

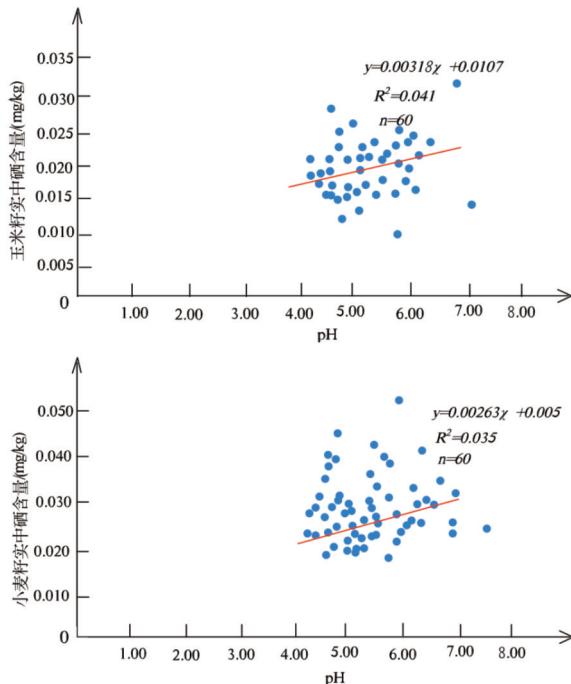


图 8 不同农作物籽实硒含量与 pH 相关性分析图

属于生物可利用硒,能被植物吸收利用;而与胡敏酸结合的硒,则是植物所不能吸收和利用的。

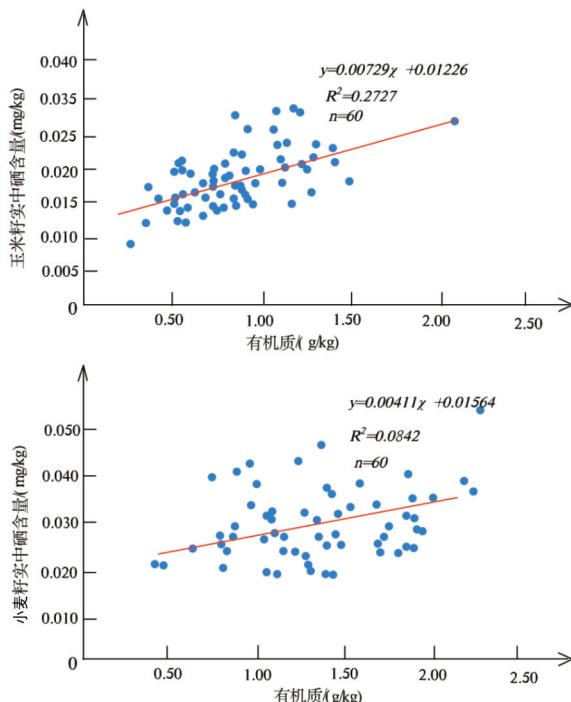


图 9 不同农作物籽实硒含量与有机质相关性图

## 4 结论

(1) 农作物体内硒元素主要来源于土壤, 代表性

农作物不同部位对硒的富集能力也不同, 遵循根系 > 叶 > 茎 > 穗实的特征。农作物籽实中硒元素与土壤硒元素正相关, 其中小麦籽实中硒元素与根系土中硒元素相关系数为 0.57, 玉米籽实中硒元素与根系土中硒元素相关系数为 0.32, 说明小麦籽实对硒的富集能力比玉米籽实对硒元素的富集能力强。

(2) 研究区残渣态、腐殖酸结合态和强有机结合态三者总和占全量硒 88.53%~94.37%, 水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态四项总和占全量硒的 5.63%~11.47%, 占比较少。岩石风化所产生的硒转化为碳酸盐和铁锰氧化物结合态, 腐殖化和微生物作用会导致硒的形态转变或形成络合物, 使得更多的无机结合态硒转化为有机结合态硒, 因此土壤中的硒主要以有机结合态和腐殖酸结合态的形式存在。硒酸盐为水溶性硒容易从碱性土壤中淋滤出来被植物吸收, 酸性土壤中则较少, 是植物最易吸收的形式。

(3) 小麦与玉米籽实硒富集均与水溶态硒呈显著正相关。具体而言, 小麦籽实硒含量与水溶态硒的相关系数达 0.71 ( $R^2 = 0.50$ ), 玉米籽实硒含量与水溶态硒的相关系数为 0.69 ( $R^2 = 0.48$ ), 表明两种作物对硒的吸收主要受水溶态硒的驱动。

(4) 土壤 pH、有机质、重金属元素等通过影响硒元素在土壤中各种物理、化学和生物反应过程, 影响农作物对硒元素的迁移与富集。例如在湿润、缺氧的酸性土壤中, 硒主要以  $\text{HSeO}_3^-$  形式存在, 亚硒酸盐极易被  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  的氧化物吸附, 形成极难溶于水并且极不易被植物所吸收的络合物。土壤有机质通过吸附的阴离子与环境中的硒结合, 形成各种结合态硒, 阻碍了硒元素在植物—土壤中的循环。重金属元素  $\text{Cd}$  通过与  $\text{Se}$  结合形成复合物而降低硒的生物有效性。

## 参考文献:

- [1] 罗海怡. 广西三江县土壤硒元素迁移富集规律研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [2] 王申. 山东省五莲县土壤硒的含量分布特征[J]. 西部资源, 2020(6): 163~165.
- [3] 孙彦伟, 常彬, 刘根驿, 等. 黄河下游流域土壤-作物系统硒元素地球化学特征: 以山东省冠县为例[J]. 山东国土资源, 2023, 39(1): 40~46.
- [4] 周立国, 朱江源, 范伟顺, 等. 浅析土壤理化性质对元素迁移转化的影响[J]. 山东国土资源, 2021, 37(9): 46~51.

[5] 梁帅,朱建新,戴慧敏,等.黑龙江拜泉地区硒元素在土壤-植物系统中的迁移富集规律[J].地质与资源,2021,30(4):456-464.

[6] 李大吉,傅良同,蒙信礼,等.贵州省黔南州耕地土壤硒地球化学特征及富硒资源评价[J].山东国土资源,2024,40(1):23-30.

[7] 邵鹏威.硒元素形态分析方法及其在恩施富硒地区的应用研究[D].青岛:青岛大学,2020.

[8] 刘笑,丹慧杰,房凡,等.燃煤耦合污泥发电过程重金属、砷和硒迁移转化试验研究[J].热力发电,2022,51(5):65-72.

[9] 田红宇.云南省八宝稻富硒阻镉的岩溶表生地球化学研究[D].北京:中国地质大学,2021.

[10] 李明龙.表生环境介质中硒与重金属的地球化学特征及生态效应研究[D].成都:成都理工大学,2021.

[11] 王巧云,郝兴中,兰君,等.鲁西鲁山-关帝庙地区碱性杂岩体微量元素地球化学特征及其意义[J].山东国土资源,2024,40(3):23-32.

[12] 范海滨,李强,刘倩,等.山东栖霞杨础地区包裹体及稳定同位素地球化学特征及其意义[J].山东国土资源,2024,40(3):50-57.

[13] 全德标.广西钦州市钦南区硒元素分布特征与受控因素研究[J].华北自然资源,2024(1):157-160.

[14] 陈春秀,雷建容,胡文,等.紫山药中硒元素富集特征分析[J].安徽农学通报,2023,29(增刊1):21-24.

[15] 孙天河,郭中,孙鹏,等.济南市洪范池地区土壤重金属地球化学特征与潜在生态风险评价[J].山东国土资源,2025,41(1):32-38.

[16] 冯广,杜现福,孙超,等.山东省平邑县九间棚村土壤地球化学调查评价[J].山东国土资源,2024,40(10):35-42.

[17] 魏印涛,何其芬.地球化学分区方法在地球化学勘查中的应用:以胶东半岛乳山寨幅1:5万水系沉积物测量为例[J].山东国土资源,2024,40(12):27-32.

[18] 平艳丽,刘杰,赵艳,等.鲁西银山庄地区煌斑岩岩石地球化学特征及其构造环境探讨[J].山东国土资源,2023,39(2):1-8.

[19] 王海芹,禚传源,王秀凤,等.山东蒙阴金伯利岩带地球化学特征和源区性质[J].山东国土资源,2023,39(2):17-24.

[20] 王美珠,章明奎.我国部分地区高硒低硒土壤的成因初探[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,1996,22(1):89-93.

[21] 刘铮.中国土壤微量元素[M].南京:江苏科学技术出版社,1996:57-58.

[22] 高志友,李大鹏,颜梅,等.基于水文地球化学特征的黄河流域(济阳段)地热水成因机制研究[J].山东国土资源,2023,39(3):65-71.

[23] 刘强,尉鹏飞,杨斌,等.鲁西石马-胡家庄稀土矿成矿机制研究[J].山东国土资源,2023,39(11):20-31.

[24] 姜冰,张海瑞,刘阳,等.青州市南张楼村土地质量地球化学特征及特色土地资源评价[J].山东国土资源,2022,38(1):54-59.

[25] 孙建中,张镇洪.松辽第四纪[M].香港:中国学术评论出版社,2007.

[26] 迟乃杰,单伟,张晨西,等.胶西北花山岩体岩石成因与地质意义:来自地球化学、年代学与Sr-Nd同位素的约束[J].山东国土资源,2023,39(10):1-11.

[27] 常彬,郭忠华,赵涵,等.山东省茌平县土壤元素地球化学特征与质量评价[J].山东国土资源,2022,38(7):49-54.

[28] 康鹏宇,刘传朋,刘同,等.土地质量地球化学评价方法研究与应用:以山东省沂南县东部地区为例[J].山东国土资源,2022,38(7):55-62.

[29] 韩庆彬.新疆西南天山地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向[J].山东国土资源,2022,38(12):10-17.

[30] 常彬,孙彦伟,赵涵,等.山东冠县土壤元素地球化学特征与质量评价[J].山东国土资源,2022,38(11):31-36.

[31] 李治平,皮桥辉.老寨湾金矿热液独居石地球化学特征及地质意义[J].山东国土资源,2021,37(5):17-25.

[32] 王红晋,郭艳,任文凯,等.济南市土壤地球化学背景值及环境质量评价[J].山东国土资源,2021,37(12):50-55.

[33] 于林松,宋蕊蕊,康桂玲,等.基于土壤地球化学分区的重金属污染风险评价:以山东省郯城县某镇为例[J].山东国土资源,2020,36(3):34-41.

[34] 李秀章,刘汉栋,于晓卫,等.胶西北秦姑庵花岗岩体岩石成因及对金成矿的启示:元素地球化学、锆石U-Pb年代学及Lu-Hf同位素制约[J].山东国土资源,2021,37(12):1-16.

## Migration and Accumulation Law of Selenium in Soil-crop System in Eastern Area of Wulian County in Shandong Province

FAN Weishun<sup>1,2</sup>, ZHENG Chengguang<sup>1</sup>, LIU Yuanzhong<sup>1</sup>, ZHOU Liguo<sup>1</sup>

(1. No.8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province), Shandong Rizhao 276826, China;  
2. Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Taking eastern area of Wulian county in Shandong province as the study area, through collecting wheat, corn and root soil samples systematically, analysis and testing of beneficial and harmful elements have been carried out in order to identify the migration and enrichment rules of selenium elements in soil—

crop system in the study area and their influencing factors. It is showed that main source of elements in crops is soil. The accumulation capacity of different parts of representative crops for selenium is different. It will follow the characteristics of root system>leaf>stem>seed. The selenium elements in the seeds of crops are positively correlated with the selenium elements in the soil. The correlation coefficient of Se element between the wheat seeds and the root soil is 0.57, while it is 0.32 between corn seeds and root soil. It is indicated that the accumulation capacity of Se in wheat seeds is stronger than that in corn seeds. Absorption of Se by crops is not only related to total amount of Se, but also to the form of Se, such as water-soluble Se such as selenate, which is the easiest to be absorbed by plants. In addition, it is also related to organic matter, pH, and is affected by heavy metal elements parent rock of soil formation, and other soil physicochemical properties. Its research results have important guiding significance for the construction of high standard farmland, scientific nutrition fertilization, environmental quality evaluation.

**Key words:** Selenium element; soil; crop; migration; accumulation; Wulian area