吴格格,王莉莉,王晓虎,等.余家湾稻田硒空间分布特征与影响因素[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(2):102-112.
Wu G G, Wang L L, Wang X H, et al.Spatial distribution characteristics and influencing factors of selenium in paddy fields in Yujiawan[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(2):102-112.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202404014

余家湾稻田硒空间分布特征与影响因素

吴格格[1,2,3],王莉莉[4],王晓虎[1,2,3],张泽洲[2,3,5],陈清清[6],宋佳平[2,3,5],王张民[7,8,9],孙辰璐[9],牛珊珊[2,3,10],尹雪斌[1,2,3*]

(1.山西农业大学 农学院,山西 晋中 030801;2.安徽科技学院 长三角功能农业(食品)研究院,安徽 滁州 239000;3.安徽科技学院 功能农业与功能食品安徽省重点实验室,安徽 滁州 239000;4.百色市农牧渔技术推广中心,广西 百色 533099;5.安徽科技学院 资源与环境学院,安徽 滁州 233100;6.宜春学院 生命科学与资源环境学院,江西 宜春 336000;7.苏州科技大学 环境科学与工程学院,江苏 苏州 215009;8.苏州硒谷科技有限公司/江苏省硒生物工程技术研究中心,江苏 苏州 215123;9.南京恒宝田功能农业产业研究院/国家粮食产业(功能稻米)技术创新中心,江苏 南京 210008;10.中国科学技术大学 地球和空间科学学院,安徽 合肥 230026)

摘　要:[目的]探究余家湾万亩水稻基地的土壤—稻米系统中硒(Se)的空间分布特征、稻米中Se形态组成特征及其影响因素,可为余家湾地区富Se稻米的开发及高效利用土壤中Se元素提供研究基础。[方法]采集余家湾万亩水稻基地75组耕地表层土壤样品与对应稻米样品,检测土壤与稻米中Se、钙(Ca)、铁(Fe)、锌(Zn)等12种矿质元素的含量,以探讨Se与土壤中其它矿质元素关系,并通过ArcGIS空间分析、相关性分析等方法探究Se的空间分布特征及其影响因素。[结果]土壤总Se含量为35～350 μg/kg,均值200 μg/kg;土壤有效Se含量为19～44 μg/kg,均值为28 μg/kg。稻米总Se含量为13～96 μg/kg,均值为31 μg/kg;稻米硒代蛋氨酸(SeMet)含量最高,占总Se含量的64%～96%,平均为88%;硒代胱氨酸($SeCys_2$)占总Se含量的0%～22%,平均为5%;土壤有效Se与稻米中钾(K)、Ca含量均呈显著正相关,相关系数r值分别为0.77和0.72($P<0.01$),与稻米硼(B)含量呈正相关,相关系数r值为0.64($P<0.05$);稻米中Se含量与土壤Ca含量之间存在显著正相关关系,相关系数r值为0.63($P<0.05$),且稻米中SeMet含量与土壤Ca含量存在正相关,相关系数$R^2=0.377\ 7$($P<0.05$)。[结论]该研究区域整体上处于足Se水平,有效Se占比与恩施地区基本一致,潜在富Se能力强,虽籼稻比粳稻更易富Se,但稻米Se含量总体较低;影响土壤—稻米系统Se的分布主要与人类活动与元素互作等因素有关;Ca为无机Se转化为有机Se供能,以此来增加稻米中有机硒的含量。

关键词:硒; 土壤; 稻米; 空间分布; 影响因素; 余家湾
中图分类号:S511　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)02-0102-11

Spatial distribution characteristics and influencing factors of selenium in paddy fields in Yujiawan

Wu Gege[1,2,3], Wang Lili4, Wang Xiaohu[1,2,3], Zhang Zezhou[2,3,5], Chen Qingqing[6], Song Jiaping[2,3,5], Wang Zhangmin[7,8,9], Sun Chenlu[9], Niu Shanshan[2,3,10], Yin Xuebin[1,2,3*]

(*1. College of Agriculture, Shanxi Agriculture University, Jinzhong 030801, China; 2. Instituteof Functional Agriculture (Food) Science and Technology at Yangtze River Delta, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 239000, China; 3.Anhui Province Key Laboratory of Functional Agriculture and Functional Food, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 239000, China; 4.Baise Agriculture, Animal Husbandry and Fishery Technology Promotion Center, Baise 533099,*

收稿日期:2024-03-02　　**修回日期**:2024-07-21
基金项目:2020年南京市浦口区万亩核心生产示范基地功能农业目的的资源调查项目(FAST-HBT-202002);2020年宁夏中卫市富硒功能农产品技术标准制定及硒资源和质量评价服务项目(FAST-HBT-202005);食品原料硒生物营养定量强化与硒蛋白制备技术开发(2022JBGS-FXSP01-02);富硒产品硒形态检测技术研究及功能成分检测平台建设(2020QFY09-09)
作者简介:吴格格(ORCID:0009-0007-6315-2561),硕士研究生,研究方向:功能农业,E-mail:1079335759@qq.com
*通信作者:尹雪斌(ORCID:0009-0005-5448-106X),教授,研究方向:功能农业,E-mail:xbyin@ahstu.edu.cn

China;*5.College of Resource and Environment*,*Anhui Science and Technology University*,*Chuzhou 233100*,*China*;*6.College of Life Science and Resources and Environment*,*Yichun University*,*Yichun 336000*,*China*;*7.School of Environmental Science and Engineering*,*Suzhou University of Science and Technology*,*Suzhou 215009*,*China*;*8.Suzhou Selenium Valley Technology Co.*,*Ltd./Jiangsu Selenium Biotechnology Research Center*,*Suzhou 215123*,*China*;*9.Nanjing Institute for Functional Agriculture Science and Technology* (*iFAST*)/*National Grain Industry* (*Functional Rice*) *Technology Innovation Center*,*Nanjing 210008*,*China*;*10.School of Earth and Space Sciences*,*University of Science and Technology of China*,*Hefei 230026*,*China*)

Abstract:[Objective]By exploring the spatial distribution characteristics of selenium (Se) content in the soil-rice system in Yujiawan 10 000 mu rice base, the morphological composition characteristics of Se in rice and its influencing factors, we hope to provide a research basis for the development of Se-rich rice in Yujiawan area and the efficient utilization of Se elements in soil. [Methods]The surface soil samples of 75 groups of cultivated land and corresponding rice samples were collected from Yujiawan 10,000 mu rice base, and the contents of 12 mineral elements such as Se, calcium (Ca), iron (Fe) and zinc (Zn) in soil and rice were detected to explore the relationship between Se and other mineral elements in the soil, and the spatial distribution characteristics of Se and its influencing factors were explored by ArcGIS spatial analysis and correlation analysis. [Results]The total Se content in soil ranged from 35 ~ 350 μg/kg, and the average value was 200 μg/kg. The soil available Se content ranged from 19 ~ 44 μg/kg, and the average value was 28 μg/kg. The total Se content of rice ranged from 13~96 μg/kg, with an average value of 31 μg/kg. The content of selenomethionine (SeMet) in rice is the highest, accounting for 64% ~ 96% of total Se content, with an average of 88%; $SeCys_2$ accounts for 0%~22% of the total Se content, with an average of 5%. There was a significant positive correlation between soil available Se and the contents of potassium (K) and Ca in rice, and the correlation coefficients were 0.77 and 0.72 ($P<0.01$), respectively, which were positively correlated with the boron (B) content of rice, and the correlation coefficient r=0.64 ($P<0.05$), and there was a significant positive correlation between Se content and soil Ca content in rice, with a correlation coefficient r=0.63 ($P<0.05$), and the content of SeMet in rice was positively correlated with soil Ca content, and the correlation coefficient R^2=0.377 7($P<0.05$). [Conclusion]The study area was generally at the level of sufficient Se, and the proportion of available Se was basically the same as that in Enshi area, and the potential Se enrichment capacity was strong, although indica rice was more easier to enrich Se than japonica rice, but the Se content of rice was generally low. The distribution of Se in soil-rice system was mainly related to human activities and elemental interactions. Ca is used to convert inorganic Se into organic Se for energy, thereby increasing the content of organic Se in rice.

Keywords:Selenium, Soil, Rice, Spatial distribution, Influencing factors, Yujiawan

硒(Selenium,Se)是人体必需微量元素之一,具有抗氧化、提高人体免疫力与预防癌症等作用[1]。世界卫生组织(WHO)推荐健康成年人每天Se的摄入量为60~200 μg,Se摄入不足与克山病、大骨节病等疾病的发生有关,Se摄入过量则会造成血Se水平长期超标,从而导致Se中毒[2-3]。中国是世界上缺Se最严重的国家之一,1/3的地区土壤极度缺Se,且Se的缺乏可通过食物链传输影响到人体健康[4-5]。

土壤是食物链传输中Se的重要来源,Se的分布特征及Se的生物有效性与人体健康存在密切联系[6]。水稻是我国最重要的主粮之一,土壤中有效态Se含量会影响水稻对Se的吸收累积,有效Se含量较高时,植物吸收的Se^{4+}会被同化为硒代氨基酸,随后由根部运输至地上部分,进而增加水稻茎、籽粒等器官中的Se含量[7-8]。此外,土壤中存在的其它矿质元素含量也会影响水稻对Se元素的吸收累积,有研究表明,水稻对Se的积累量与土壤中镉(Cd)、砷(As)元素含量呈显著性负相关关系[9-10],与铁(Fe)元素含量呈显著性正相关关系[11]。但目前土壤-稻米系统中Se及其形态与土壤中其它矿质元素的关系罕有报道,徐强等[12]发现土壤Se形态分布取决于土壤有效Fe、锰(Mn)元素含量和黏粒及其相互作用。另有研究表明,钙镁磷肥与氨基酸叶面肥双重处理可影响水稻中Se向有机态转化的过程[13]。本研究选择长江三角洲地区土壤及其上所栽种稻米为研究对象,检测土壤和稻米中Se、Zn、Mn、Fe、钙(Ca)、钼(Mo)、铷(Rb)、铜(Cu)等多种矿质元素,探讨Se与土壤中其它矿质元素关系,利用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法分析稻米中Se形态的组成特征,并探索影响稻米中Se形态组成特征的因素,旨在

为富Se水稻产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究地点位于长江三角洲地区的江苏省南京市浦口区余家湾万亩水稻基地(图1),经纬度分别为32°11′6.25"N、118°32′3.73"E,地势平坦,海拔在5~8 m。土质为潴育水稻土,气候属于北亚热带湿润气候,四季分明,光能资源充足。年平均温度15.4 ℃,相对湿度76%,无霜期237 d。

1.2 样品采集及前处理

2020年8月在余家湾地区6.667 km^2的水稻田中,采集主要耕地表层土壤样品(0~20 cm)。采样时利用GPS进行定位,并由定位点向四周辐射10~20 m,使用梅花法每0.066 7 km^2采集5个土壤样品,每个采样点取样量为1000 g,混匀后取其中200 g土壤密封带回实验室。本研究中土壤样品前处理主要参照采样标准《多目标区域地球化学调查规范》进行[14]。2020年10月进行稻米采样,采样点选择方法同上,每0.066 7 km^2采集选择5个水稻植株。

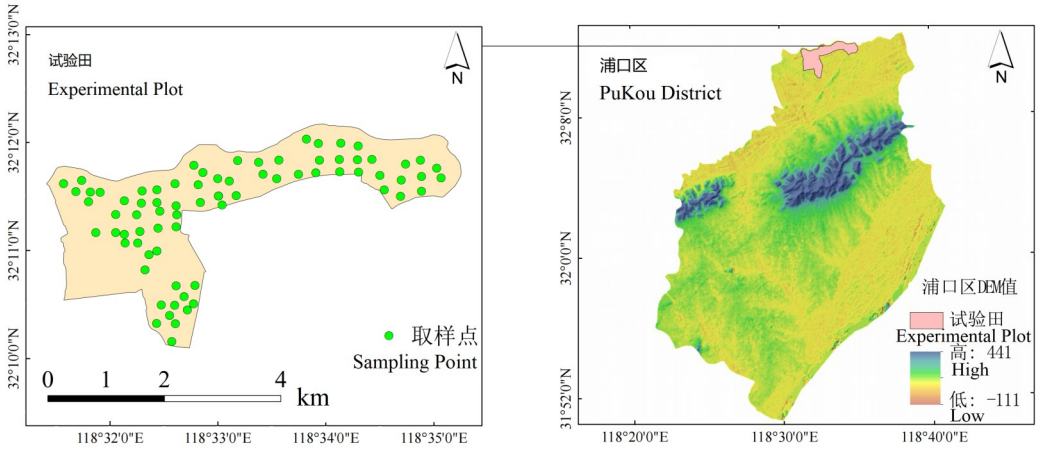

图1 研究区域与样本采集位置的地理图示

Fig.1 Geographical diagram of research area and sample collection location

1.3 样品测定项目与方法

水稻籽粒形态检测,参照GH/T 1135-2017《富硒农产品》[15],称取待测样品于玻璃瓶中,加入蛋白酶XIV、纤维素酶、超纯水,进行酶解振荡、冷冻干燥、复悬浮、离心等操作,取上清液装进专用进样瓶,以待上机检测。硒代胱氨酸($SeCys_2$),纯度>99%,购于Tokyo Chemical Industry公司;甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)与硒代蛋氨酸(SeMet),纯度均>98%,购于ACROS Organics公司;亚硒酸根(Se^{4+})与硒酸根(Se^{6+}),纯度均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司。

水稻总Se含量检测,参照GB 5009.93-2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》[16]。土壤总Se含量测定,具体参照DZ/T 0279.14-2016《区域地球化学样品分析方法 第14部分:硒量测定 氢化物发生—原子荧光光谱法》[17]。土壤有效Se含量测定,具体参照NY/T 3420-2019《土壤有效硒的测定 氢化物发生原子荧光光谱法》[18]。土壤其余有益矿质元素含量检测由通标标准技术服务(上海)有限公司承担。Mo、Rb、Zn、Cu元素含量的测定参照DZ/T 0279.2-2016《区域地球化学样品分析方法》[19]。硼(B)元素含量的测定参照DZ/T 0279.11-2016《区域地球化学样品分析方法 第11部分:银、硼和锡量测定 交流电弧—发射光谱法》[20]。As元素含量的测定参照DZ/T 0279.13-2016《区域地球化学样品分析方法 第13部分:砷、锑和铋量测定 氢化物发生—原子荧光光谱法》[21]。Fe、Mn、Ca、硅(Si)、钾(K)、镁(Mg)元素含量的测定参照DZ/T 0279.1-2016《区域地球化学样品分析方法 第1部分:三氧化二铝等24个成分量测定 粉末压片—X射线荧光光谱法》[22]。稻米中其余矿质元素含量检测参照GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》[23]。上述检测指标均重复3次。

1.4　质量控制

本研究采用妥善的样品保存、设置空白对照组、标准样品检测和重复样品检测进行质量控制。总Se平行样品相对标准偏差小于15%。总Se标准物质(国家质量监督检验检疫局,灌木枝叶成分分析标准物质GBW07603(GSV-2),Se含量(0.12±0.02) mg/kg)回收率为78.99%~108.37%。SELM-1富硒酵母标准物质(加拿大国家研究委员会,Se含量(1285±105) mg/kg)回收率为83.25%~118.19%。

1.5　数据处理

本研究采用SPSS 25.0进行平均值、变异系数标准差的统计分析与相关性分析,采用ArcGIS 10.8,Origin 2021进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　土壤—水稻系统中Se元素的分布特征

2.1.1　土壤总Se的分布特征

对研究区耕地表层土壤样品的总Se含量采用克里金插值法绘制空间分布图进行统计分析(图2a)。土壤总Se含量为35~350 μg/kg,均值为200 μg/kg。与其它地区的研究相比,该研究区土壤Se平均浓度显著低于全国土壤Se含量平均水平(290 μg/kg)[24]及江苏省土壤Se含量平均水平(220 μg/kg)[25]。根据中国对Se元素安全阈值划分及参考谭见安等[26]提出的标准,将土壤Se分为5个等级,分别为Se缺乏(≤125 μg/kg)、潜在缺Se(125~175 μg/kg)、足Se(175~400 μg/kg)、富Se(400~3000 μg/kg及Se中毒(≥3000 μg/kg),研究区土壤Se含量最高值低于400 μg/kg,虽未达到富Se土壤水平,但其中90.67%的土壤采样点Se含量皆高于125 μg/kg,该区域存在62.70%的足Se土壤,不存在富Se与Se中毒土壤,整体处于足Se水平。表层土壤总Se变异系数为29%,属中等变异程度[27]。足Se含量土壤主要分布在中部,贯穿整个地区,呈条带状分布,Se含量处于150~300 μg/kg;Se缺乏区域分布少,清流河沿岸的土壤总Se含量显著低于滁河沿岸。

2.1.2　土壤有效Se的分布特征

从研究区75个耕地表层土壤样品中随机抽取20个土壤样品,对其有效Se含量采用克里金插值法绘制空间分布图进行统计分析(图2b)。土壤有效Se含量为19~44 μg/kg,平均值为28 μg/kg。将土壤有效Se与土壤总Se的比值定义为土壤有效Se占比,该区域土壤有效Se含量占比为10.20%~20.10%,平均为15.20%,显著高于英国土壤(1.10%~3.40%)与四川成都地区(8%)的土壤有效Se占比[28-29],且接近恩施地区[30](15%)和河北省[31](10%)等地区的土壤有效Se占比。表层土壤有效Se变异系数为18%,属于中等变异程度,可能存在局部富集[32]。表层土壤有效Se含量空间分布与总Se分布特征相似,整体呈条状形态分布,从东北和西南方向皆向内呈弧形递进的态势,且清流河沿岸有效Se含量显著低于滁河沿岸。

2.1.3　稻米总Se的分布特征

稻米总Se含量为13~96 μg/kg,平均值为31 μg/kg。其中,粳稻总Se含量13~54 μg/kg,均值28 μg/kg,低于长江三角洲地区的淮阴农业科学研究所试验粳稻品种Se含量(47 μg/kg)[33]。籼稻总Se含量18~96 μg/kg,均值38 μg/kg,高于天然富硒区的陕西省安康市农业科学研究所试验籼稻品种未施Se肥时Se含量(35 μg/kg)[34]。根据《富硒稻谷》国家标准(GB/T 22499-2008),通过生长过程自然富集而非收获后添加Se,稻米Se含量范围在40~300 μg/kg之间的稻米称为富Se稻米[35]。本研究区域内天然富Se稻米总Se含量为40~96 μg/kg,平均含量为53 μg/kg,其中达到国家富Se稻米标准的粳稻样品占比为10.53%,籼稻样品占比为33.3%,说明在天然状态下籼稻比粳稻更容易富集Se元素。

稻米籽粒Se含量空间分布图如图2c所示,整体呈块状带分布,由西向东逐渐递增,大洼、竹园区域稻米Se含量最低,车湾、许云、杨云、江云区域稻米Se含量最高。主要呈东北高、西南低的态势,富Se稻米也主要集中在东北地区,与土壤总Se、有效Se含量的空间分布趋势存在差异。

2.2　Se与矿质元素的相关性分析

表层土壤中总Se、有效Se含量与稻米中其余矿质元素含量之间的相关性分析如图3a所示。结果表明表层土壤总Se含量与土壤有效Se含量呈显著正相关,相关系数r=0.70(P<0.01);与稻米Ca、Rb元素含量呈显著正相关关系,相关系数r值分别为0.59和0.56(P<0.05)。表层土壤有效Se含量与稻米K、Ca、B元素含量呈显著相关性,相关系数r值分别为0.77、0.72和0.64(P<0.01)。土

壤总Se含量和土壤有效Se含量均与稻米Ca含量呈显著正相关关系,表明随着土壤Se水平的升高,稻米Ca含量将随之升高。

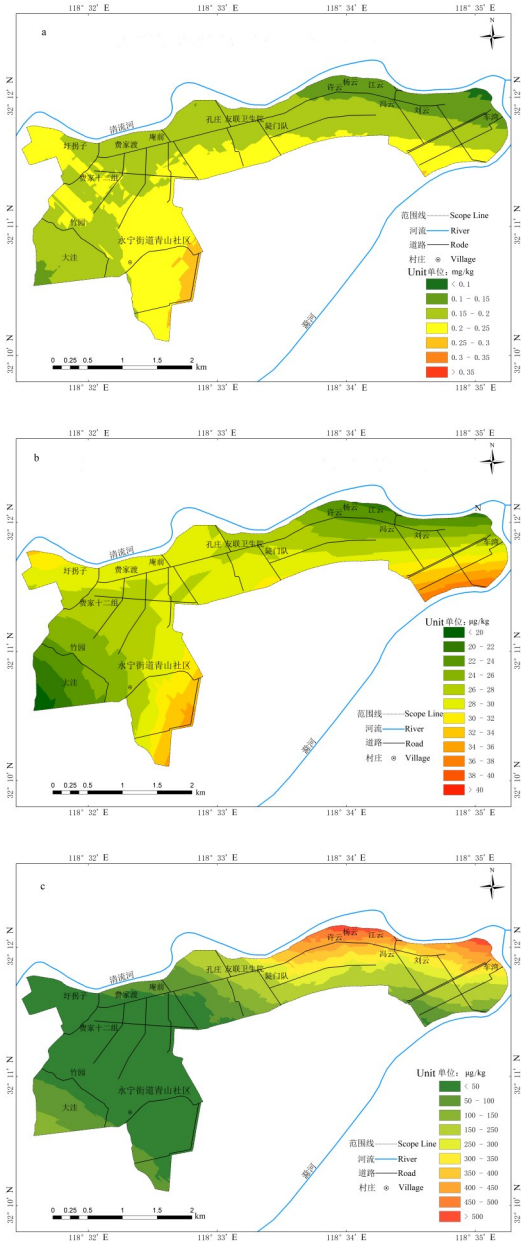

图2 土壤总Se空间分布图(a)、土壤有效Se空间分布图(b)、稻米总Se空间分布图(c)

Fig.2 Spatial distribution map of soil total Se(a), soil bio-available Se spatial distribution map(b), and rice total Se spatial distribution map(c)

表层土壤中其余矿质元素含量与稻米中Se含量之间的相关性分析如图3b所示。结果表明稻米Se含量与土壤Ca元素含量呈显著正相关,相关系数r=0.63(P<0.05);与土壤K元素含量呈负相关关系,相关系数r=-0.56(P<0.05)。土壤Ca含量与稻米Se含量呈显著正相关关系,表明随着土壤Ca含量的升高,稻米Se含量将随之升高。

通过对土壤-水稻系统中Se与其它矿质元素之间的相关性分析表明,研究区域土壤-水稻系统中Se和Ca之间存在相互作用,且两者存在协同作用关系。

2.3 Se、Ca元素与稻米Se形态组成的关系

为进一步探究土壤-水稻系统中Se和Ca之间的相互作用以及土壤Ca元素对稻米Se形态的影响机制,因此检测了所采稻米样品中Se的形态(图4)。结果表明稻米中的Se主要以有机Se形态存在,包括硒代蛋氨酸(SeMet)与硒代胱氨酸($SeCys_2$),其中SeMet占总Se比例最高,为64%~96%,平均为88%;其次为$SeCys_2$,占比为0%~22%,平均为5%;此外,还存在少量的无机硒Se^{6+},占比为0%~14%,平均为7%;SeMeCys、Se^{4+}均未检出。

稻米有机Se形态(SeMet与$SeCys_2$)与土壤总Se、土壤有效Se、稻米总Se、土壤总Ca含量之间的相关性分析如图5所示。结果表明土壤总Se、有效Se与稻米中SeMet、$SeCys_2$含量之间均不存在显著相关性(图5a~图5d),说明所测稻米中的SeMet、$SeCys_2$含量可能不受土壤总Se及有效Se含量的影响。稻米总Se含量与稻米中Se形态含量之间的相关性分析表明(图5g和5h),稻米总Se含量与SeMet呈显著正相关关系,但与$SeCys_2$含量的相关性并不显著。土壤总Ca含量与稻米中SeMet、SeCys2含量之间的相关性分析表明(图5e和5f),土壤总Ca含量与稻米中SeMet呈显著正相关关系(R^2=0.377 7,P<0.05)。研究结果表明土壤-水稻系统中Se和Ca之间存在协同作用,且土壤Ca元素含量与稻米SeMet含量存在着一定的相互作用关系,随着土壤Ca含量的增加,可促进稻米有机Se含量的增加。

3 讨论

3.1 土壤-水稻系统Se元素含量空间分布特征的影响因素

余家湾地区表层土壤总Se、有效Se含量空间分布趋势为东北低、西南高,与稻米Se含量空间分

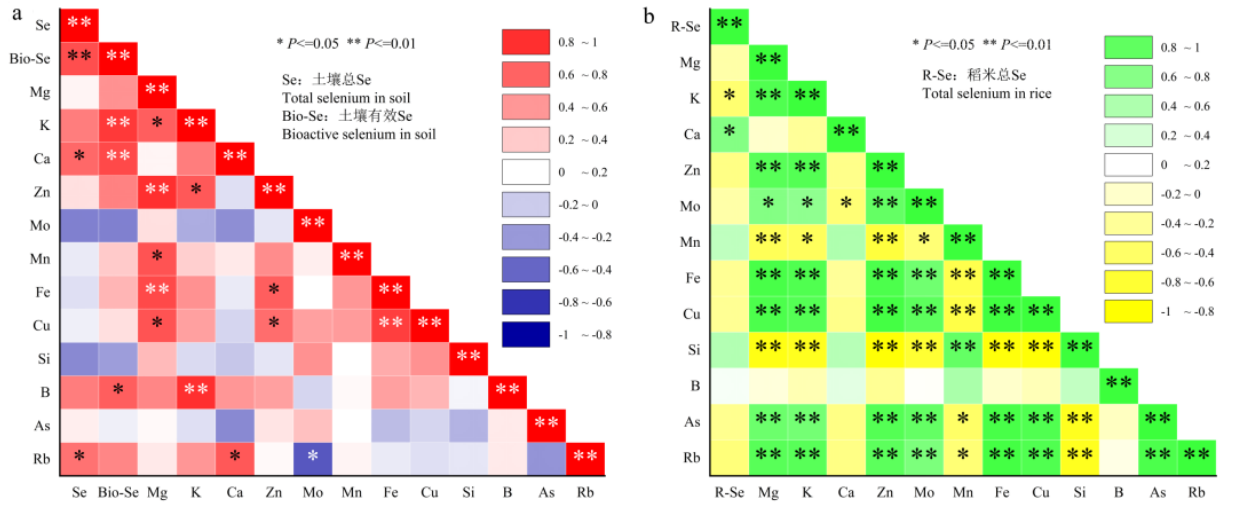

图3　土壤总Se、有效Se与稻米中多种元素(a)、以及稻米总Se与土壤中矿质元素(b)相关性热图

Fig.3　Heat map of the correlation between total Se and bio-available Se in soil and various elements in rice (a), as well as total Se in rice and mineral elements in soil (b)

布呈相反趋势,这与前人得到的土壤中的硒也与不同的水稻组分呈线性关系的研究结果不一致[36-38],可能是由于土壤Se含量虽是作物Se含量的主要来源,但作物Se水平还与作物生理过程及品种、元素互作、人类活动等多种因素有关[39]。有研究表明灌溉水漫灌会加速土壤Se的流失,降低土壤Se的生物有效性,特别是水溶性Se与离子交换Se的含量[40],进而影响作物Se水平。而强有机结合态Se与腐殖酸结合态Se等难以被植物直接吸收利用[41],土壤Se含量的空间分布可能与土壤中Se形态的分布有关[42],因此推测余家湾地区稻米Se含量低的区域,土壤中的强有机结合态Se与腐殖酸结合态Se占总Se的比例高于水溶态Se和可交换态Se。大田种植环境复杂多变,人类活动(施肥等)、大气降尘等外源输入会影响Se的空间分布[43]。此外,水稻植株内矿质元素含量主要来源于土壤,且土壤中矿质元素种类数量繁多,元素互作会对水稻植株各器官生长状态以及体内元素含量产生积极或消极影响,Se元素也难免受到影响。因此,土壤-稻米系统中Se含量及其分布存在差异的原因可能与人类活动(施肥等)、土壤中Se形态分布特征以及元素互作等因素有关。因清流河岸比滁河岸更加接近人类活动区,因此推测人类活动与元素互作是土壤总Se、有效Se含量与稻米Se含量并未呈现显著相关性的主要影响因素。

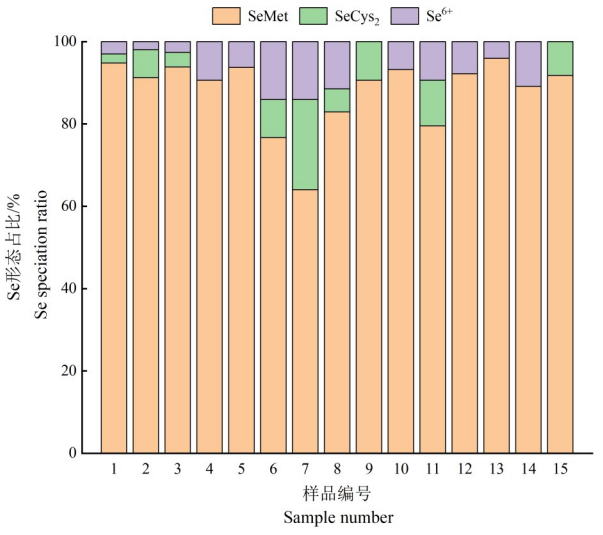

图4　稻米中Se各形态占比堆积图

Fig.4　Stacking diagram of the proportion of various forms in rice

3.2　土壤－作物系统Se与其它矿质元素的互作关系

土壤-作物系统中Se与其它元素存在协同或拮抗等互作关系,有研究表明Se对磷(P)[44-45]和硫(S)等必需元素通常表现出拮抗作用[46],且Li等[47]研究表明土壤中K、Mg、P、S等营养元素和As、铬(Cr)、Cu、镍(Ni)、Zn、铅(Pb)等重金属元素与水稻中Se从土壤到根的迁移呈极显著负相关($P<0.01$,$n=56$),表明土壤中这些元素可能抑制水稻根系对Se的吸收,进一步抑制稻米对Se的累积,本研究表明土壤K含量抑制水稻对Se元素的吸收

和积累,这与前人研究结果保持一致。此外,本研究发现土壤Se含量可促进稻米对Ca元素的吸收和累积,同样,土壤Ca元素含量可促进稻米对Se元素的吸收和累积,这表明土壤-水稻系统中Se和Ca之间存在协同互作关系。有研究表明外源添加适量的Se可增加稻米Ca元素的累积[48],这与本研究结果一致。且前人研究表明微生物诱导的碳酸钙沉淀对Se的生物利用度具有积极影响[49],可能是由于土壤中微生物诱导的碳酸钙沉淀提高了Se的生物利用度,进而促进稻米对Se元素的吸收。同时,Ca离子对稳定土壤中有机碳有着无可替代的作用,且土壤有机碳与土壤中各形态Se(水溶态Se、离子交换态Se、铁锰氧化态Se和残渣态Se)之间存在显著的正交互作用,间接表明Ca对土壤中可被作物吸收的Se组分存在积极影响[50-51]。因此,研究区域土壤-水稻系统中Se和Ca之间可能存在相互协同作用,土壤中Se和Ca含量分别可促进稻米对Ca和Se吸收与累积。

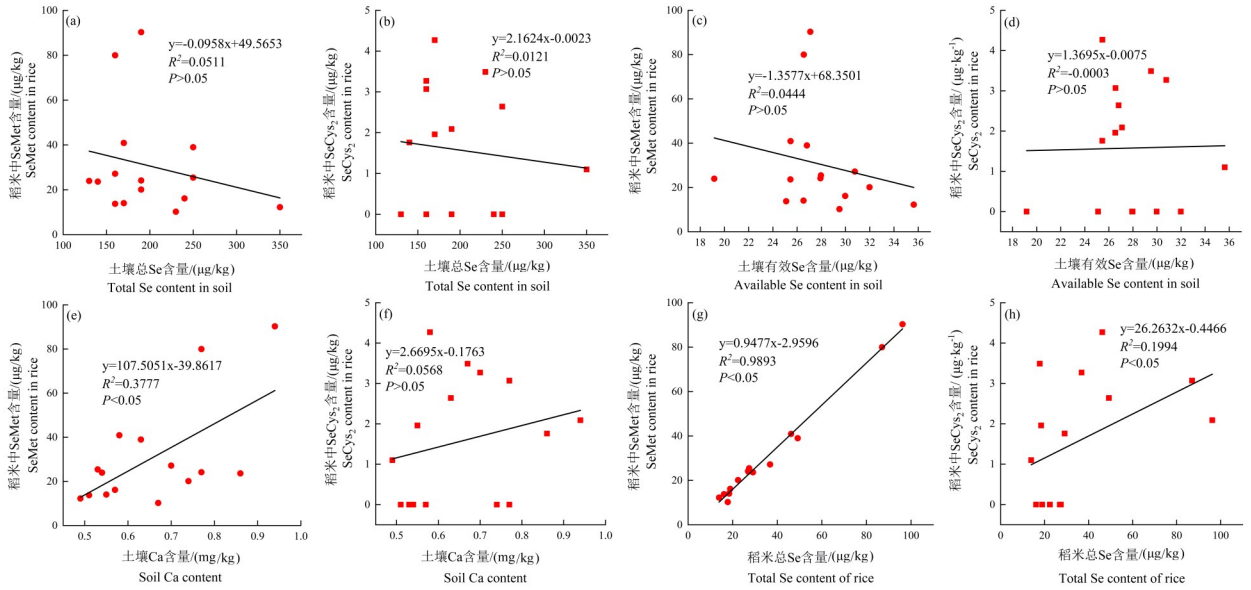

图5 土壤总Se(a,b)、土壤有效Se(c,d)、土壤Ca(e,f)、稻米总Se(g,h)含量分别与稻米中SeMet(a、c、e、g)、SeCys2(b、d、f、h)含量的相关性

Fig.5 Relationship between total Se in soil(a,b), bio-available Se in soil(c,d), soil Ca content(e,f), Se in rice(g,h) and SeMet(a,c,e,g) and SeCys2(b,d,f,h) content in rice respectively

3.3 土壤-水稻系统中Ca对稻米Se形态的影响

水稻拔节期到孕穗期是稻米Se积累的关键阶段,土壤中水溶性、可配体交换和有机结合的Se组分是水稻组织中Se的主要来源[52-53],Yin等[54]研究表明根施亚硒酸钠可有效提高稻米中有机Se化合物的积累,水稻根系吸收的亚硒酸盐,将有46%转化为SeMet,通过硝酸盐转运蛋白NRT1.1B装载到木质部中并运输至地上部,另有研究表明,该蛋白可能还参与水稻灌浆过程中SeMet从叶片到籽粒的转运[55]。亚硒酸盐是稻田土壤中Se的主要存在形式,其可在根系细胞的质体中被同化为有机态Se,SeMet是水稻籽粒中积累最多的有机Se形态,而植物根系对有机态Se的主动吸收是一个耗能过程[56-57],其所需能量来自于叶绿体光合作用产生的ATP。Ca元素是植物生长过程中的重要营养元素,介质中Ca元素含量的增加会促进植物根系对多种元素的吸收利用[58]。研究表明外源施Ca会改善小麦[59]、葡萄[60]、白杏[61]的光合作用效率,而光合作用不仅可为作物生长提供营养物质,从而提高作物果实品质,还可为植物吸收有机态Se提供能量,从而促进稻米中有机Se含量的升高。综上,Ca元素主要通过改善水稻光合效率,为水稻更高效地提供所需能量,促进无机Se向有机Se的转化,进而促使作物将无机Se转化为SeMet,以此来增加提高稻米中有机Se的转化效率。

本研究主要针对余家湾万亩水稻基地开展土壤-水稻系统中Se的空间分布与影响因素研究,且研究区域种植模式相同,后续应加强对不同种植

模式(如传统种植、有机种植、精准农业等)下的对比研究,探究不同模式下土壤-水稻系统中Se的空间分布与相关影响因素。研究通过相关性分析表明研究区域土壤-水稻系统中Se和Ca之间存在协同作用,但相关作用机制尚不清楚,后续应利用同位素示踪、分子生物学、转录组学与代谢组学等技术,深入探究土壤Ca促进水稻籽粒无机Se向有机Se的转化机制。

4　结论

研究区表层土壤总Se含量均值为200 μg/kg,有效Se占比为15.2%,有利于开展富Se土地资源利用等相关工作;稻米Se含量均值为31 μg/kg,富Se稻米主要集中研究区东北区域,且籼稻比粳稻更易富Se。但稻米Se含量总体较低,建议采用遗传育种(易富Se水稻品种)或农艺措施(施用富Se肥)的方法提高稻米Se含量。

该研究区土壤-稻米系统中Se分布特征主要与人类活动、土壤中Se形态组成特征以及元素互作等因素有关。土壤有效Se受到土壤中其它矿质元素的影响,进而影响稻米对Se的吸收累积,且土壤有效Se促进稻米对K、Ca、B的累积,并与Ca相互促进。其中Ca通过改善水稻光合效率,为无机Se转化为有机Se供能,以此来增加稻米有机Se的含量。稻米中SeMet为主要的Se形态,占总Se的88%,且与土壤全Ca含量呈显著正相关关系(R^2=0.377 7)。

参　考　文　献

[1]Lü Q Z, Liang X M, Nong K Y, et al. Advances in research on the toxicological effects of selenium [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 106(5): 715-726.

[2]熊咏民, 杨晓莉, 张丹丹, 等. 硒的生物学效应与环境相关性疾病的研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(6):1105-1112.
Xiong Y M, Yang X L, Zhang D D, et al. Research progress in biological function of selenium and environmentally associated diseases[J]. Soils, 2018, 50(6):1105-1112.

[3]蔡立梅, 王硕, 温汉辉, 等. 土壤硒富集空间分布特征及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):83-90.
Cai L M, Wang S, Wen H H, et al. Enrichment spatial distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10):83-90.

[4]Song T J, Su X S, He J, et al. Selenium (Se) uptake and dynamic changes of Se content in soil - plant systems [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(34): 34343-34350.

[5]李柳, 刘庆华, 尹春英. 植物硒生物强化及微生物在其中的应用潜力[J]. 植物生态学报, 2023, 47(6):756-769.
Li L, Liu Q H, Yin C Y. Selenium biofortification in plants and application potential of microorganisms in selenium biofortification[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(6):756-769.

[6]王莹, 马彦斌, 王泽晶. 基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素[J]. 环境科学, 2023, 44(1):395-404.
Wang Y, Ma Y B, Wang Z J. Threshold of Se-rich soil based on available-Se and influencing factors of available-Se [J]. Environmental Science, 2023, 44(1):395-404.

[7]王兆双, 涂书新, 熊双莲, 等. 土壤硒水平和硒肥对水稻硒含量、抗氧化反应及干物质积累的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(12):2375-2384.
Wang Z S, Tu S X, Xiong S L, et al. Effects of soil Se levels and Se application on Se content, antioxidative responses and biomass accumulation of rice [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(12):2375-2384.

[8]Zhang L H, Chu C C. Selenium uptake, transport, metabolism, reutilization, and biofortification in rice[J]. Rice, 2022, 15(1):30.

[9]刘春梅. 镉胁迫下硒对寒地水稻镉积累及养分吸收的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
Liu C M. Effects of Se on Cd accumulation and nutrient uptake of rice in cold area under Cd stress [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.

[10]杨静, 王瑞昕, 方正, 等. 叶面喷施硅和硒对水稻砷积累及光合参数的影响[J]. 土壤, 2022, 54(3):547-555.
Yang J, Wang R X, Fang Z, et al. Effect of foliage spraying Si and Se on As accumulation and photosynthetic parameters of rice[J]. Soils, 2022, 54(3):547-555.

[11]钟庆祥, 张豫, 陶贞, 等. 土壤—植物系统硒的迁移转化机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2023, 38(1):44-56.
Zhong Q X, Zhang Y, Tao Z, et al. Advance on selenium migration and transformation mechanism in soil-plant systems [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(1):44-56.

[12]徐强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 基于通径分析的土壤性质与硒形态的关系——以黑龙江省主要类型土壤为例[J]. 土壤, 2016, 48(5):992-999.
Xu Q, Chi F Q, Kuang E J, et al. Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis-taking main types of soil in Heilongjiang Province as an example[J]. Soils, 2016, 48(5):992-999.

[13]马迅, 诸旭东, 宗良纲, 等. 不同调控措施对酸性富硒土壤硒有效性及水稻产量性状的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 284-290.
Ma X, Zhu X D, Zong L G, et al. Effects of mixed application of calcium magnesium phosphate and aminoacid foliar fertilizer on Se availability in acid Se-rich soil and on trait of rice yield[J]. Soils, 2018, 50(2):284-290.

[14]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0258-2014,多目标区域

地球化学调查规范(1:250000)[S].
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258-2014, Specification for Multi-objective Regional Geochemical Survey (1: 250000)[S].
[15]中华全国供销合作总社. GH/T 1135-2017,富硒农产品[S].
All-China Federation of Supply and Marketing Cooperatives. GH/T 1135-2017, Selenium-enriched Agricultural Products[S].
[16]中国国家食品药品监督管理局. GB 5009.93-2017,食品安全国家标准食品中硒的测定[S].
China State Food and Drug Administration. GB 5009.93-2017, Determination of Selenium in National Food Safety Standards[S].
[17]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0279.14—2016,区域地球化学样品分析方法 第14部分:硒量测定 氢化物发生—原子荧光光谱法[S].
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0279.14—2016, Analysis Methods of Regional Geochemical Samples Part 14: Determination of Selenium Content-Hydride Generation-Atomic Fluorescence Spectrometry[S].
[18]中华人民共和国农业农村部. NY/T 3420-2019,土壤有效硒的测定 氢化物发生原子荧光光谱法[S].
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 3420-2019, Determination of Available Selenium in Soil. Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry[S].
[19]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0279.2—2016,区域地球化学样品分析方法 第2部分:氧化钙等27个成分量测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法[S].
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0279.2—2016, Analytical Methods of Regional Geochemical Samples Part 2: Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry for Determination of 27 Components such as Calcium Oxide[S].
[20]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0279.11—2016,区域地球化学样品分析方法 第11部分:银、硼和锡量测定 交流电弧—发射光谱法[S].
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0279.11—2016, Methods for Analysis of Regional Geochemical Samples Part 11: Determination of Silver, Boron and Tin[S].
[21]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0279.13-2016,区域地球化学样品分析方法 13部分:砷、锑和铋量测定 氢化物发生—原子荧光光谱法[S].
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0279.13-2016, Methods for analysis of regional geochemical samples Part 13: Determination of arsenic, antimony and bismuth contents-Hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[S].
[22]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0279.1-2016,区域地球化学样品分析方法 第1部分:三氧化二铝等24个成分量测定 粉末压片—X射线荧光光谱法[S].
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0279.1-2016, Analysis Methods of Regional Geochemical Samples Part 1: Determination of 24 Components of Alumina, etc. Powder Tablet-X-ray Fluorescence Spectrometry[S].
[23]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268-2016,食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, china food and drug administration. GB 5009.268-2016, Determination of Multi-elements in National Food Safety Standards[S].
[24]Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review[J]. Environment International, 2018, 112: 294-309.
[25]中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990. 370.
China National Environmental Monitoring Center. Background value of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. 370.
[26]谭见安. 环境Se与健康[M]. 北京:人民卫生出版社, 1989. 34.
Tan J A. Environmental Se and Health[M]. Beijing: People's Health Publishing House, 1989.34.
[27]Yang H, Yang X F, Ning Z P, et al. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: an overview [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 422:126876.
[28]Stroud J L, Broadley M R, Foot I, et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil[J]. Plant and Soil, 2010, 332(1):19-30.
[29]陈杜军. 若尔盖地区硒地球化学特征[D]. 成都:成都理工大学, 2012.
Chen D J. Geochemical characteristics of selenium in Zoige [D]. Chengdu:Chengdu University of Technology, 2012.
[30]Lü C H, Qin Y J, Zhao Z Q, et al. Characteristics of selenium enrichment and assessment of selenium bioavailability using the diffusive gradients in thin-films technique in seleniferous soils in Enshi, Central China[J]. Environmental Pollution, 2021, 273:116507.
[31]唐玉霞, 王慧敏, 刘巧玲, 等. 河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(S1): 194-197.
Tang Y X, Wang H M, Liu Q L, et al. Study on the content, speciation distribution and availability of selenium in wheat field soils of Hebei[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25 (S1):194-197.
[32]姜侠, 张立, 崔玉军, 等. 黑龙江省绥棱县土壤硒空间分布特征及其与土壤性质的关系[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 592-596, 578.
Jiang X, Zhang L, Cui Y J, et al. Spatial distribution of soil

selenium and its relation with soil properties in Suiling County, Heilongjiang province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(6):592-596, 578.

[33]魏杰, 吴传万, 尹航, 等. 外源硒、钙对优质食味粳稻产量、品质及稻米硒、钙含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5):1162-1170.
Wei J, Wu C W, Yin H, et al. Effects of exogenous selenium and calcium on the yield, quality and contents of selenium and calcium of high-quality edible Japonica rice [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2022, 38(5):1162-1170.

[34]郑甲成, 刘婷. 不同浓度硒肥对籼稻硒含量和产量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1):88-93.
Zheng J C, Liu T. Selenium content and yield of indica rice under different selenium concentration[J]. Soils, 2014, 46(1):88-93.

[35]国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 22499-2008, 富硒稻谷[S].
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Administration Standardization. GB/T 22499-2008, Se-enriched rice[S].

[36]Sun G X, Liu X, Williams P N, et al. Distribution and translocation of selenium from soil to grain and its speciation in paddy rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(17):6706-6711.

[37]Li H F, Lombi E, Stroud J L, et al. Selenium speciation in soil and rice:influence of water management and Se fertilization [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(22):11837-11843.

[38]Xu Z Q, Zhou W J, Zhou Y Z, et al. Factors controlling accumulation and bioavailability of selenium in paddy soils: a case study in Luxi County, China [J]. Environmental Pollution, 2024, 348:123196.

[39]Goodson C C, Parker D R, Amrhein C, et al. Soil selenium uptake and root system development in plant taxa differing in Se-accumulating capability[J]. The New Phytologist, 2003, 159(2):391-401.

[40]Hu A Y, Yu Z Y, Liu X H, et al. The effects of irrigation and fertilization on the migration and transformation processes of main chemical components in the soil profile [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(6):2631-2648.

[41]Dinh Q T, Wang M K, Tran T A T, et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, 49(6):443-517.

[42]Qu L L, Xu J Y, Dai Z H, et al. Selenium in soil-plant system: transport, detoxification and bioremediation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 452:131272.

[43]范健, 任静华, 廖启林, 等. 苏南典型区农田土壤硒-镉拮抗作用研究[J]. 土壤, 2021, 53(5):1023-1032.
Fan J, Ren J H, Liao Q L, et al. Antagonism between Se and Cd in typical farmland soil in southern Jiangsu Province [J]. Soils, 2021, 53(5):1023-1032.

[44]Hopper J L, Parker D R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate[J]. Plant and Soil, 1999, 210(2):199-207.

[45]Khattak R A, Page A L, Parker D R, et al. Accumulation and interactions of arsenic, selenium, molybdenum and phosphorus in alfalfa[J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(1):165-168.

[46]White P J, Bowen H C, Parmaguru P, et al. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(404):1927-1937.

[47]Li T Y, Yuan X Y, Song Y X, et al. Influence of heavy metals and nutrient concentrations on selenium geochemical behavior in soil-rice system [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, 25(1): 185-193.

[48]刘勤. 磷肥和硒施用对稻米硒、钙、锌等营养累积的影响[J]. 广东微量元素科学, 2003, 10(6):20-24.
Liu Q. Influences of application of phosphate fertilizer and selenium in paddy soil on absorption of selenium, calcium, zinc and sulphur in rice[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2003, 10(6):20-24.

[49]Lü C H, Qin Y J, Chen T, et al. Microbial induced carbonate precipitation contributes to the fates of Cd and Se in Cd-contaminated seleniferous soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423(Pt A):126977.

[50]Wan D, Ma M K, Peng N, et al. Effects of long-term fertilization on calcium-associated soil organic carbon: implications for C sequestration in agricultural soils[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 772:145037.

[51]Rowley M C, Grand S, Verrecchia É P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon [J]. Biogeochemistry, 2018, 137(1):27-49.

[52]黄鑫. 探究施硒处理对三个水稻材料有机硒转化的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2022.
Huang X. To explore the effects of selenium fertilization treatments on the transformation of organic selenium in three rice varieties [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.

[53]Gong R Y, Ai C Y, Zhang B J, et al. Effect of selenite on organic selenium speciation and selenium bioaccessibility in rice grains of two Se-enriched rice cultivars[J]. Food Chemistry, 2018, 264:443-448.

[54]Yin H Q, Qi Z Y, Li M Q, et al. Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 169:911-917.

[55]Zhang L H, Hu B, Deng K, et al. NRT1.1B improves selenium concentrations in rice grains by facilitating selenomethinone translocation [J]. Plant Biotechnology Journal, 2019, 17(6):1058-1068.

[56]Abrams M M, Shennan C, Zasoski R J, et al. Selenomethionine uptake by wheat seedlings[J]. Agronomy

Journal, 1990, 82(6):1127-1130.

[57]Deng X F, Liu K Z, Li M F, et al. Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages[J]. Field Crops Research, 2017, 211:165-171.

[58]Morales J, Martínez-Alcántara B, Bermejo A, et al. Effect of calcium fertilization on calcium uptake and its partitioning in *Citrus* trees[J]. Agronomy, 2023, 13(12):2971.

[59]郭世保, 陈俊华, 王朝阳, 等. 5%调环酸钙EA对小麦生长和光合作用的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(3):23-26, 42.
Guo S B, Chen J H, Wang C Y, et al. Influence of prohexadione-calcium 5% EA to growth and photosynthesis of wheat[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(3):23-26, 42.

[60]李萍, 单守明, 李映龙, 等. 叶面喷施氨基酸钙对盐碱地′北玺′葡萄光合作用和果实品质的影响[J]. 中国果树, 2021(12):22-26.
Li P, Shan S M, Li Y L, et al. Effects of calcium amino acid on photosynthesis and berry quality in 'Beixi' grapevine cultivate in saline-alkali soil[J]. China Fruits, 2021(12):22-26.

[61]章世奎, 罗晓琴, 王亚铜, 等. 调环酸钙对轮台白杏营养生长和果实品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(5):846-853.
Zhang S K, Luo X Q, Wang Y T, et al. Effects of prohexadione calcium on the growth and fruit quality of luntaibaixing apricot [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(5):846-853.

(编辑:郭玥微)