

我国不同地区水稻及五种农作物中硒含量及形态分析

郑思文, 王翼潇, 张弛, 王锐

同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海
Email: zhengsw@tongji.edu.cn, yixiao.wang-2@postgrad.manchester.ac.uk, tjzc@tongji.edu.cn, wangr@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021年3月20日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

摘要

硒是人体生长发育所必需的微量元素, 对我国不同地区农作物硒含量及形态的探究将为居民膳食补硒提供科学依据。对我国不同地区水稻及五种常见农作物中的硒含量进行对比研究, 发现: 富硒地区土壤及水稻硒含量普遍较非富硒地区高, 且土壤硒含量对水稻植株硒的组织分布有影响; 市售精米经淘洗后, 糊粉层硒含量显著高于淘洗后精米; 五种常见农作物中硒含量呈现马铃薯 > 花生 ≈ 黑豆 > 甘薯 > 黄豆的趋势。继而对三种富硒农产品进行形态分析, 发现有机硒(尤其是硒代蛋氨酸)均为主要形态, 且不同农产品的硒形态分布有所不同, 富硒稻米中有机硒占总硒的比例显著高于马铃薯和甘薯。

关键词

水稻, 富硒地区, 农作物, 硒含量, 硒形态

The Content and Species of Selenium in Rice Plant and Other Five Crops Growing in Different Regions of China

Siwen Zheng, Yixiao Wang, Chi Zhang, Rui Wang

State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: zhengsw@tongji.edu.cn, yixiao.wang-2@postgrad.manchester.ac.uk, tjzc@tongji.edu.cn, wangr@tongji.edu.cn

Received: Mar. 20th, 2021; accepted: Apr. 21st, 2021; published: Apr. 28th, 2021

文章引用: 郑思文, 王翼潇, 张弛, 王锐. 我国不同地区水稻及五种农作物中硒含量及形态分析[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(2): 329-337. DOI: 10.12677/aep.2021.112036

Abstract

Selenium (Se) is an essential trace element for human growth and development. Studies on Se content and species of crops produced from different regions can provide scientific information to residents for supplement of Se via daily diets. In the present study, firstly, we compared the Se content in rice plant and other five crops growing in different regions. It was observed that soil and rice plant growing in Se-enriched regions were generally higher than in other regions, and the Se content in soil could impact the distribution of Se in rice plant. The Se content in obtained aleurone was significantly higher than in washed commercial rice. The Se content in five common crops showed the trend of potato > peanut \approx black bean > sweet potato > soybean. We then further investigated the Se species in three Se-enriched crops, and found that organic Se (especially selenomethionine) was the dominant form. Moreover, the Se species varied with different crops and the ratio of organic Se in total Se was significantly higher in Se-enriched rice than in potato and sweet potato.

Keywords

Rice, Selenium-Enriched Region, Crops, Selenium Content, Selenium Species

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硒是人体必需的矿物质营养素,具有重要的生理功能[1] [2],是目前公认生理必需剂量与毒性剂量范围最短的元素[3],人体摄入的剂量过低或过高均不利于健康[4] [5]。在世界范围内缺硒现象普遍存在[6] [7],但硒在人体内无法自身合成,需通过饮食摄取[8],研究表明食用富硒食品是比直接服用硒药更为安全有效的方式[9]。

水稻是我国居民日常生活中最常见的主食[10],大量研究[11] [12]证明人为施加外源硒可以提高稻米中的硒含量,但此方法可能存在安全隐患并造成环境污染[13]。此外,硒元素的生理功能及其毒性风险不仅取决于其含量,还与形态直接相关[14] [15]。因此对我国不同地区天然种植的水稻等农作物硒含量及形态的探究具有重要意义。

本研究首先对我国不同地区水稻及五种常见农作物中的硒含量进行分析,包括:富硒地区与非富硒地区生长的水稻中硒的含量及组织分布,市售稻米及马铃薯、甘薯、花生、黑豆、黄豆五种农作物硒含量差异。其次,选取市售稻米、马铃薯、甘薯三种农作物的富硒产品(有富硒标注)进行硒形态分析。研究可为我国居民通过日常膳食补硒提供参考,并为我国富硒农产品标准的制定和规范提供一定的理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集及预处理

2.1.1. 水稻植株样品

样品为2016年秧苗时期(春季)与成熟期(秋季)水稻,采样城市包括富硒地区[16] [17]湖北恩施、湖北荆州、湖南花垣,及非富硒地区湖南永州、四川达州、上海崇明、宁夏银川等。在上述地区的自然播种

农田中用五点取样法进行采样将每个采样点的根系土与水稻植株一同带回，并将根系、茎部、叶片、籽粒等不同组织分开，进行清洗，冷冻干燥后保存于-80℃冰箱。植物样品经剪碎研磨后成均一样品待测。冷冻干燥后的土壤样品经碾磨过筛后保存待测。

2.1.2. 市售稻米样品

市售稻米购买自吉林通化、湖北恩施、安徽石台、江苏如皋、山西太原、海南澄迈、海口长流、四川达州、上海青浦、重庆市区以及重庆合川等 11 个地区。为模拟研究稻米清洗过程对稻米硒摄入的影响，我们将精米充分搅拌后，采用离心方式分离出洗脱的糊粉层，并低温烘干保存待测。

2.1.3. 农作物样品

马铃薯、甘薯、花生、黄豆、黑豆五种农作物样品购买自湖北恩施、山西太原、山东临沂、山东济宁、江苏宜兴、四川达州、重庆合川、福建龙岩、海南海口、广东湛江等 10 个城市。其中，马铃薯及甘薯取单一个体不同部位的 50 g 混合样，并冷冻干燥后碾磨至粉末状保存。花生、黑豆、黄豆取 50 g 左右混合样，经球磨机碾磨后冷冻干燥保存。

2.2. 仪器分析方法

碾磨均一的植物样品采用硫酸 - 硝酸(3:1)消解，土壤样品采用硝酸 - 过氧化氢(7:1)消解。消解后的植物及土壤中采用 ICP-MS (Agilent 7700)技术进行总硒分析，标准品回收率为 75%~86%。

对硒元素含量较高的稻米、马铃薯、甘薯三种农作物的富硒产品(有富硒标注)进行硒的形态分析。采用酶提取法[18]，利用 HPLC-ICP-MS (Agilent 1200 及 Agilent 7700)联用技术进行硒形态分析，测得如表 1 所示五种硒形态。

Table 1. On-line standard curve of different Se species

表 1. 不同形态硒上机标准曲线

形态	标准曲线	R ²
硒代半胱氨酸	$y = 396.12x - 95.661$	0.9974
硒代甲基半胱氨酸	$y = 425.88x - 23.678$	0.8288
硒代蛋氨酸	$y = 386.38x + 32.553$	0.9997
四价硒	$y = 782.65x - 551.800$	0.9982
六价硒	$y = 377.21x + 12.667$	0.9120

3. 结果与讨论

3.1. 土壤及水稻植株硒含量

3.1.1. 富硒地区水稻硒含量

由图 1，富硒地区土壤硒含量整体较非富硒地区高，水稻硒含量也普遍更高。已有研究发现张家界[19]、海南[20]、湖南[21]等地区的土壤硒含量可影响水稻等作物硒含量，且普遍表现为正相关关系，与本研究结果一致。值得注意的是，本研究中采自富硒地区的土壤及水稻样品硒含量并不一定高于非富硒地区。例如，采自世界公认的富硒地区湖北恩施的土壤样品中硒含量仅为 1.07 mg/kg，甚至低于某些非富硒地区(如湖南永州，为 1.175 mg/kg)，这可能是由于富硒地区土壤硒分布并不均匀所致。据报道，富硒地区恩施市沙地乡表层土壤硒含量均值高达 1.88 mg/kg，但浓度范围跨度大，为 0.19~15.57 mg/kg [22]。

非富硒地区海南岛西部土壤硒含量均值为 0.4 mg/kg, 浓度范围为 0.23~1.58 mg/kg [20]。因而, 由于土壤硒含量分布普遍不均匀, 并不是所有富硒地区土壤硒及作物含量均高于非富硒地区。

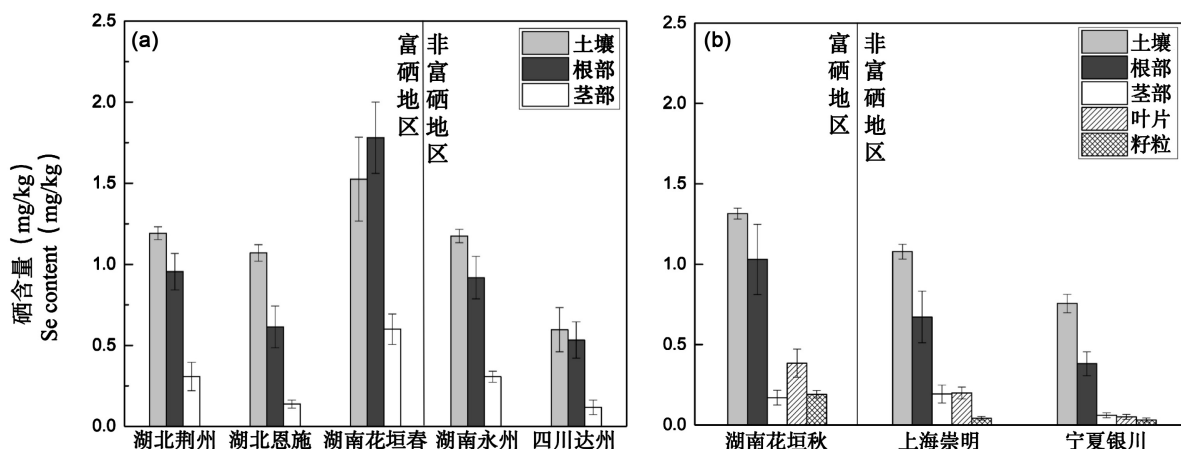


Figure 1. Se distribution in different rice plant organs during growing period (a) and mature period (b)

图 1. 生长期(a)与成熟期(b)水稻不同组织硒含量分布

来自八个地区的水稻植株的根系, 叶片和籽粒硒含量与根系土壤硒含量呈显著正相关(表 2), 且水稻叶片与土壤硒含量相关性($r = 0.989$)较高, 水稻茎部硒含量与土壤硒含量相关性较低。姜超强等[23]通过盆栽试验也发现, 土壤硒含量与水稻根系, 茎叶和籽粒的硒含量呈显著正相关, 且与茎叶的相关性相对较低。这一现象可能是由于根部和叶片是植物吸收和储存能量的器官, 因而与土壤中必需元素硒含量相关性较高, 而茎干作为养料和水分运输通道, 储存的物质相对较少, 而且传输过程受硒形态[24], 输送途径, 器官组成等[25]多种因素的共同影响。

Table 2. Correlation coefficients between rice plant organs and root soil

表 2. 水稻不同器官与土壤硒含量相关系数

r	根部	茎部	叶片	籽粒
土壤	0.950	0.783	0.989	0.853

3.1.2. 水稻不同器官硒含量分布

水稻在成熟期时根部硒含量最高, 籽粒最低, 根部硒含量约为茎部 2.96~6.25 倍, 约为叶片的 2.68~7.62 倍。将叶片与茎部硒含量进行对比, 发现富硒地区湖南花垣水稻叶片硒含量是茎部的 2.26 倍, 而非富硒地区上海崇明水稻叶片硒含量略大于茎部, 宁夏银川水稻叶片硒含量低于茎部, 表明土壤硒含量高低可以影响硒在水稻中的组织分布。本研究中富硒土壤中水稻各器官硒含量大小顺序依次为根 > 叶 > 茎 > 籽粒, 这与海南富硒土壤中水稻硒含量的组织分布结果一致[25]。已有实验室研究也表明, 水稻在施硒肥后, 硒含量分布表现为: 根 > 叶 > 茎 > 籽粒[26]。此外, 周鑫斌等[27]研究发现土壤施硒肥可改变水稻硒的组织分布, 当土壤不施硒时水稻植株叶片硒含量约等于茎部, 而施加亚硒酸盐后叶片硒浓度大于茎部。这一结果也与本研究发现非富硒地区水稻硒组织分布为根部 > 叶片 ≈ 茎部 > 籽粒结果相一致。

3.1.3. 水稻植株对土壤硒的富集能力

根系吸收系数(Root Absorption Index, RAI), 即根系硒浓度与土壤硒浓度的比值, 反映土壤中某物质生物有效性, RAI 值越大, 说明水稻根系越易从土壤中富集硒, 硒的生物有效性越大。本研究所采样地

区中,由图 2,富硒地区 RAI 值显著高于非富硒地区,表明富硒地区水稻植株根部富硒能力更强。陈雪等[28]研究表明随施硒浓度的升高,紫色土、青紫泥、小粉涂三种类型土壤 RAI 值逐渐升高,与本研究结果一致。但姜超强等[23]的研究结果表明,土壤硒处理浓度在 0.5 mg/kg、1.0 mg/kg、1.5 mg/kg 时,RAI 值分别为 2.71、1.86、1.86,即随土壤硒含量的增加,根系硒的 RAI 值降低。因此,水稻植株的富硒能力不仅与土壤硒含量有关,还受其他因素影响,如土壤性质,土壤硒形态及有效性等。

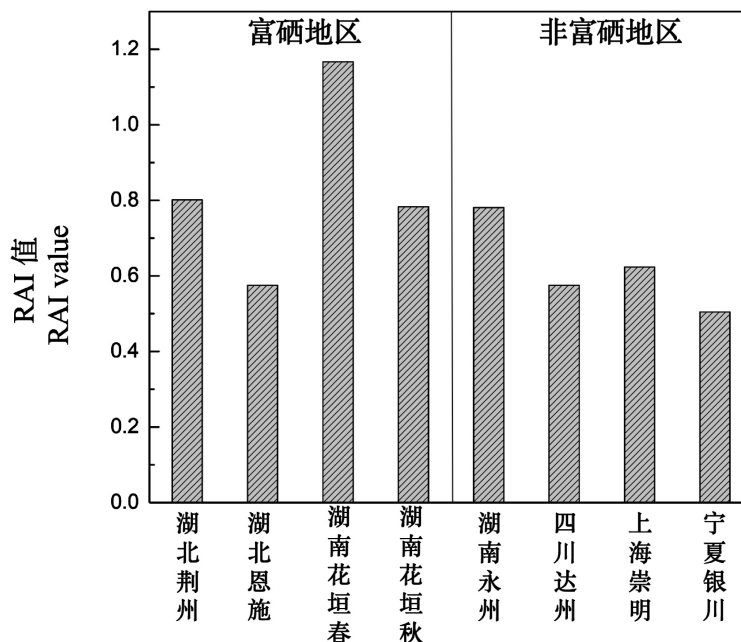


Figure 2. RAI value of rice plant
图 2. 水稻 RAI 值

3.2. 精米淘洗过程对硒含量的影响

水稻籽粒中硒含量在所有器官中最低,而已有研究发现糙米含硒量明显高于精米[21],米糠或米皮中的硒含量显著高于精米[29][30],表明籽粒加工成精米的过程会导致硒的流失。本研究将市售稻米经充分淘洗后沉淀下来的糊粉层硒含量与洗净精米进行对比,发现所有样品糊粉层硒含量均高于洗净精米,约为洗净精米的 1.2~2.8 倍,表明精米在淘洗,去水等处理的过程也会导致硒大量流失,若在烹饪前过度淘洗会影响硒元素的摄入。富硒稻谷国家标准 GB/T 22499-2008 [31]中界定富硒大米硒含量标准为 0.04~0.3 mg/kg,由图 3,本研究所有精米样品硒含量均达此最低标准,且富硒地区精米硒含量整体高于非富硒地区。

3.3. 典型农作物硒含量对比及硒形态分析

目前已有大量研究证明马铃薯[32]、甘薯[33]、花生[34]、黑豆[35]、黄豆[36]等农作物的富硒产品可以有效补硒,本文将五种农作物硒含量进行对比。由图 4,五种农作物硒含量大小呈现出马铃薯 > 花生 ≈ 黑豆 > 甘薯 > 黄豆的趋势,表明马铃薯对硒元素的吸收和富集能力较强。

此外,目前的标准均依据总硒含量来评价富硒产品的优劣性[37],由于无机硒和有机硒的潜在毒性和营养价值存在较大差异,未来富硒标准的进一步发展还需考虑硒形态差异的影响。

硒的毒性效应不仅取决于硒含量,还与形态直接相关,无机硒毒性大,有机硒(如硒代蛋氨酸和硒代

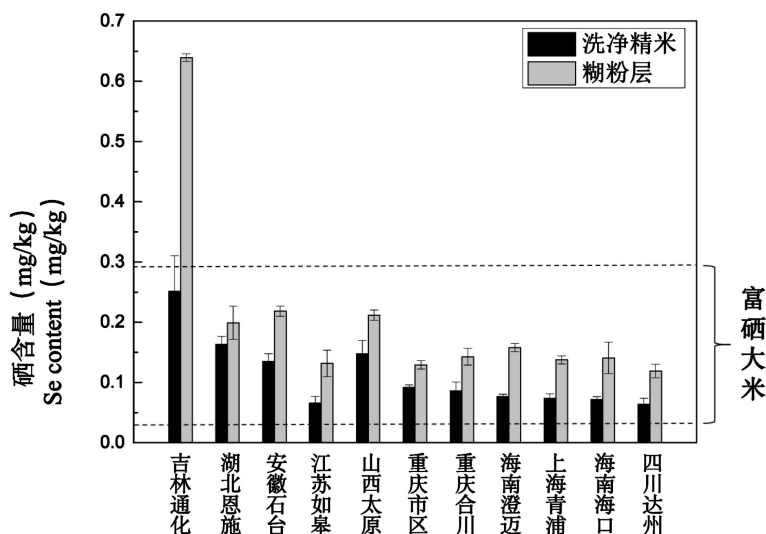


Figure 3. Comparison of Se concentration in washed commercial rice and the obtained aleurone layer

图 3. 洗净精米与糊粉层硒含量对比

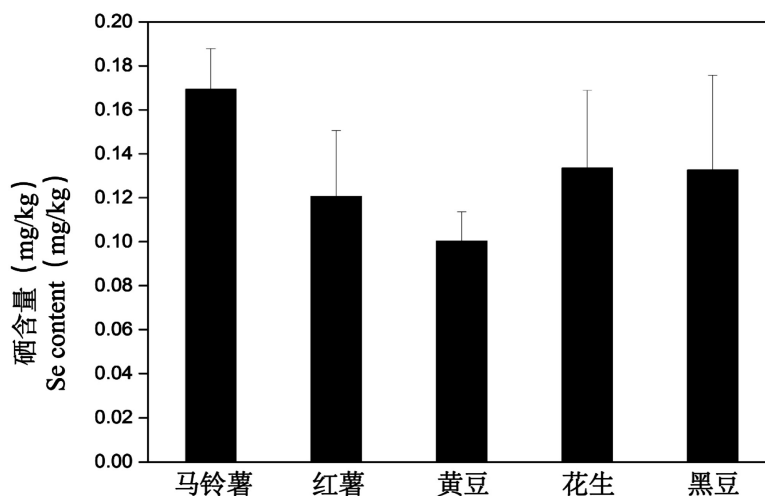


Figure 4. Comparison of Se concentration in five types of crops

图 4. 五种农作物硒含量对比

甲基半胱氨酸)毒性小且易被人体吸收。已有研究表明,富硒食用菌、富硒茶叶等食品中的硒主要以有机硒为主,并以硒代蛋氨酸为主要形态[38][39]。如图5,本研究所测得三种富硒农作物的主要形态以有机硒为主,包括硒代蛋氨酸、硒代甲基半胱氨酸、硒代半胱氨酸等有机态。其中,富硒稻米有机硒占总硒比例最高(达到93%),其中73%为硒代蛋氨酸,无机硒仅占总硒的7%。与本研究结果一致,方勇等[40]研究表明,富硒稻米中约86.9%的硒以硒代蛋氨酸的形式存在,6.8%的硒为无机态。Sun等[41]也发现水稻籽粒中硒代蛋氨酸为主要的硒形态,占总硒的82.9%,其次为硒代甲基半胱氨酸和硒代半胱氨酸。不同农作物硒的形态分布也有所不同。甘薯所含有有机硒主要为硒代蛋氨酸,约占总硒50%,同时存在较高比例的六价硒,约占总硒的16%。马铃薯与稻米中硒形态组成相似,主要形态为硒代蛋氨酸,其次为硒代甲基半胱氨酸和硒代半胱氨酸。由于土壤中的硒主要以无机硒存在,表明农作物能将毒性较强的无机硒转化为毒性较弱的有机硒,三种作物中水稻的转化能力最强,然而关于不同农作物对硒元素转化能力

的差异机制尚待研究。

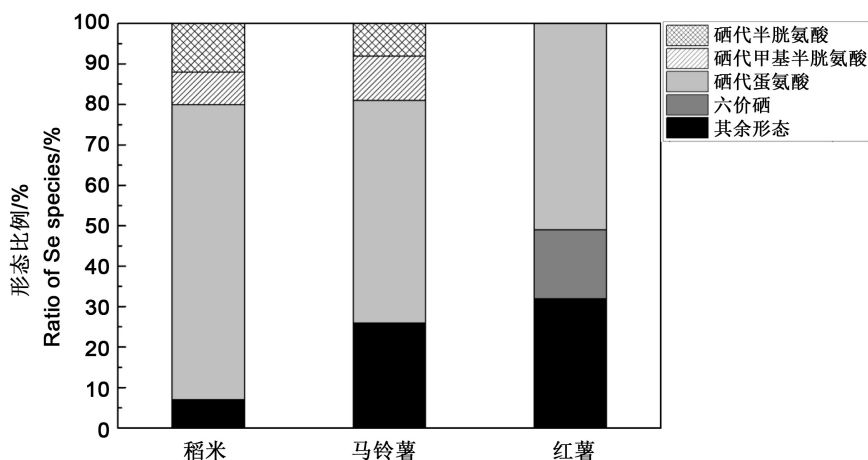


Figure 5. Se species in Se-enriched crops
图 5. 富硒农作物硒形态分布

4. 结论

水稻植株硒含量随土壤硒含量的增加而增加，富硒地区出产的水稻植株硒含量整体上较非富硒地区高。另外，土壤硒含量还可影响水稻植株硒含量的组织分布，如富硒地区整体趋势为：根部 > 茎部 > 叶片 > 籽粒，但非富硒地区为根部 > 叶片 ≈ 茎部 > 籽粒。稻米糊粉层硒含量显著高于淘洗后的精米，表明若精米在烹饪前淘洗次数过多会对人体硒元素的摄入造成影响。在五种典型农作物中，硒含量整体上呈现出马铃薯 > 花生 ≈ 黑豆 > 甘薯 > 黄豆的趋势。富硒农作物以有机硒(尤其是硒代蛋氨酸)为主要形态，且不同农作物的硒形态分布有所不同，富硒稻米中有机硒占总硒的比例高于马铃薯和甘薯。

参考文献

- [1] 万海英, 向极钎, 杨永康, 殷红清, 马进. 植物对硒的吸收、转化及生理功能研究综述[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(21): 6923-6925, 6933.
- [2] Zhu, Y.G., Pilonismitis, E.A.H., Zhao, F.J., Williams, P.N. and Meharg, A.A. (2009) Selenium in Higher Plants: Understanding Mechanisms for Biofortification and Phytoremediation. *Trends in Plant Science*, **14**, 436-442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.06.006>
- [3] 杨光圻, 顾履珍. 微量元素硒的人体需要量和安全摄入量范围[J]. 生理科学进展, 1992, 23(2): 184-186.
- [4] Contempné, B., Duale, N.L., Dumont, J.E., Ngo, B., Diplock, A.T. and Vanderpas, J. (2010) Effect of Selenium Supplementation on Thyroid Hormone Metabolism in an Iodine and Selenium Deficient Population. *Clinical Endocrinology*, **36**, 579-583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2265.1992.tb02268.x>
- [5] Amaral, A.F., Cantor, K.P., Silverman, D.T. and Malats, N. (2010) Selenium and Bladder Cancer Risk: A Meta-Analysis. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, **19**, 2407-2415. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-10-0544>
- [6] Cao, Z.H., Wang, X.C., Yao, D.H., Zhang, X.L. and Wong, M.H. (2001) Selenium Geochemistry of Paddy Soils in Yangtze River Delta. *Environment International*, **26**, 335-339. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00009-5)
- [7] Taylor, J.B., Marchello, M.J., Finley, J.W., Neville, T.L., Combs, G.F. and Caton, J.S. (2008) Nutritive Value and Display-Life Attributes of Selenium-Enriched Beef-Muscle Foods. *Journal of Food Composition & Analysis*, **21**, 183-186. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2007.08.001>
- [8] Yadav, S.K., Singh, I., Sharma, A. and Singh, D. (2008) Selenium Status in Food Grains of Northern Districts of India. *Journal of Environmental Management*, **88**, 770-774. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2012.11.012>
- [9] Kieliszek, M. and Błażej, S. (2013) Selenium: Significance and Outlook for Supplementation. *Nutrition*, **29**, 713-718.

<https://doi.org/10.1016/j.nut.2012.11.012>

- [10] 陈凤霞, 吕杰, 史元, 黄利. 我国稻米质量安全生态环境的现状与发展对策[J]. 生态经济(中文版), 2015, 31(2): 109-112.
- [11] 魏丹, 杨谦, 迟凤琴, 申惠波. 叶面喷施硒肥对水稻含硒量及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2005(1): 39-41.
- [12] 朱文东. 叶面喷施有机硒肥对稻米硒含量及品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(8): 1764-1767.
- [13] 赵妍, 宗良纲, 曹丹, 张倩, 肖峻, 汪润池. 江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2467-2474.
- [14] 卿艳, 张立实. 硒毒性研究进展[J]. 预防医学情报志, 2012, 28(3): 216-218.
- [15] 顾浩峰. 食品中硒元素的形态分析研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(2): 1-8.
- [16] 张永康, 刘红艳, 周亚林. 湘西地区土壤硒含量及其分布的调查[J]. 长沙大学学报, 2009, 23(2): 16-17.
- [17] 闫加力, 徐春燕, 杨军, 项剑桥, 赵敏, 黄彬. 湖北省不同区域土壤与农作物硒相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2018(6): 121-123, 128.
- [18] Stadlober, M., Sager, M. and Irgolic, K.J. (2001) Effects of Selenate Supplemented Fertilisation on the Selenium Level of Cereals—Identification and Quantification of Selenium Compounds by HPLC-ICP-MS. *Food Chemistry*, **73**, 357-366. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00115-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00115-7)
- [19] 胡婷, 李文芳, 聂亚文, 向昌国. 张家界市土壤硒分布规律和富硒作物研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(6): 821-824.
- [20] 章倩. 海南西部土壤-水稻系统硒分布特征[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2013.
- [21] 肖时运. 湖南省稻田硒含量及硒肥施用效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 212-214.
- [22] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质, 2018, 32(1): 105-112.
- [23] 姜超强, 沈嘉, 祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 809-816.
- [24] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [25] 邴逸根, 徐静, 李琰, 宋明义, 翁祖山. 浙江富硒土壤中硒赋存形态特征[J]. 物探与化探, 2007, 31(2): 95-98, 109.
- [26] 周遗品. 硒在水稻中的积累与分布的研究[J]. 石河子农学院学报, 1994(Z1): 27-31.
- [27] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. 土壤, 2007, 39(5): 731-736.
- [28] 陈雪, 沈方科, 张增裕, 潘柳疏, 程浩, 顾明华, 阳继辉, 韦燕燕. 硒肥和土壤类型对水稻硒吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(9): 2010-2016.
- [29] 王金英, 江川, 郑金贵. 不同色稻的糯米与米糠中矿质元素的含量[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(4): 409-413.
- [30] 江川, 王金英, 李清华, 郑金贵. 早晚季水稻精米和米皮硒含量的基因型差异研究[J]. 植物遗传资源学报, 2005, 6(4): 448-452.
- [31] 国家粮食局. GB/T 22499-2008 富硒稻谷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [32] 李树举, 杨丹, 王素华, 王中美, 万国安. 富硒马铃薯研究进展[J]. 中国马铃薯, 2014(6): 367-371.
- [33] 郭文慧. 外源硒对紫甘薯吸收累积硒与生理特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛农业大学, 2015.
- [34] 张忠信, 张新友, 汤丰收, 董文召, 秦利, 臧秀旺, 等. 硒的生理保健功能及富硒花生研究[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(2): 61-63.
- [35] 朱洪梅, 赵猛, 王芬, 高晨曦. 极谱法测定黑豆中硒含量及其富硒工艺研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 68-71.
- [36] 葛红霞. 富硒大豆的研究进展[J]. 大豆科技, 2017(2): 32-35.
- [37] 王立平, 刘永贤, 李秀杰, 刘云, 伊素芹. 我国富硒农产品标准的现状、问题与对策[J]. 农产品质量与安全, 2017(5): 24-27.
- [38] 高柱, 蔡荟梅, 彭传焱, 董阳阳. 富硒茶叶中硒的赋存形态研究[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(1): 31-33.
- [39] 张建辉, 汪霞丽, 胡勇辉, 周彬彬, 方宣启, 张丽. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定富硒食用菌中的4种硒形态[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4688-4693.
- [40] 方勇, 杨文建, 马宁, 汤晓智, 陈曦, 胡秋辉. 体积排阻色谱-电感耦合等离子体质谱分析富硒大米含硒蛋白组[J].

分析化学, 2013, 41(6): 882-887.

- [41] Sun, G.X., Xiao, L., Williams, P.N. and Zhu, Y.-G. (2010) Distribution and Translocation of Selenium from Soil to Grain and Its Speciation in Paddy Rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science & Technology*, **44**, 6706-6711.
<https://doi.org/10.1021/es101843x>