

典型富硒植物中硒形态和生物可给性研究^①

陆晓奇^{1,2,3}, 王 健³, 朱元元³, 刘 颖³, 袁林喜³, 高礼先⁴, 尹雪斌^{1,2*}

(1 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026; 2 中国科技大学苏州研究院功能农业重点实验室, 江苏苏州 215123; 3 江苏省硒生物工程技术研究中心, 江苏苏州 215123; 4 安徽省全椒县西王镇农技站, 安徽滁州 239553)

摘 要: 为了评估生物营养强化技术在富硒农产品生产中的应用效果, 本文对苏州硒谷科技有限公司提供的生物营养强化所得富硒植物材料中硒的含量、形态和生物可给性进行了测定。结果表明: 生物营养强化技术可有效提高植物中硒的含量, 检测样品中硒的含量达到 0.91 ~ 110.8 mg/kg。富硒植物中硒的形态主要以硒代氨基酸形式的有机硒为主, 其中富硒谷物和大豆中硒主要存在形态为硒代蛋氨酸(SeMet, 44.2% ~ 80.4%), 富硒西兰花中硒主要存在形态为 SeMet(27.8%)、硒代胱氨酸(SeCys₂, 25.9%)和硒甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys, 37.1%)。壶瓶碎米荠中硒主要存在形态为 SeMet(73%)和 SeCys₂(23.8%)。富硒植物中硒具有较高的生物可给性, 其中富硒小麦和大豆达到 90%, 富硒玉米和西兰花达到 80%, 壶瓶碎米荠为 50%。生物营养强化所得富硒植物具有硒含量高、有机硒比例大和较好的生物可给性, 可作为人体补充硒的重要原料。

关键词: 生物营养强化, 富硒植物, 硒形态, 生物可给性

中图分类号: Q946.91; S184 **文献标识码:** A

功能农业是通过生物营养强化技术等方式提高农产品中的营养、功能成分, 以解决人们“隐性饥饿”的问题, 富硒功能农业是功能农业的重要组成部分^[1]。硒是动物和人体必需的微量元素之一^[2-3], 硒缺乏会导致多种疾病的发生, 如在我国东北硒缺乏区发现的一种地方性心肌病(克山病)和在我国某些土壤严重硒缺乏地区出现的一种关节变形性疾病(大骨节病)^[4-6]。此外, 硒缺乏还与机体的免疫功能、抗病毒感染能力、繁殖、心脑血管疾病、甲状腺功能和癌症有着密切的联系^[7-11]。中国 72% 的地区属于硒缺乏或低硒地区, 存在着一条从东北到西南的低硒带^[12-14], 我国居民硒膳食摄入水平为 36 μg/d, 远低于中国营养学会推荐的 60 μg/d^[15], 因此中国居民具有较高的补硒需求。

随着人们对硒的生理功能的认识逐渐增强, 居民对硒的补充需求日益迫切, 为满足此需求开发出了多种补硒产品, 主要有无机硒盐、富硒酵母、富硒食用菌和来自天然富硒区富硒农产品^[16-18]。近年来, 随着生物营养强化技术在我国快速发展和应用推广, 在

缺硒地区利用硒生物营养强化技术开发出了多种富硒农产品和富硒食品, 广泛应用于我国居民的日常补硒。应用生物营养强化技术生产富硒产品具有不受地域限制、产品中硒含量稳定、有机硒比例高、易于被人体吸收等优势^[19], 成为近年来我国主流的富硒农产品生产技术。

1 材料与方法

1.1 富硒植物材料

本研究所使用富硒玉米、富硒小麦、富硒大米、富硒大豆和富硒西兰花由苏州硒谷科技有限公司提供, 分别来自于山东(玉米和小麦)、苏州(大米)、黑龙江(大豆)和浙江(西兰花)。壶瓶碎米荠采集于湖北省恩施鱼塘坝地区硒矿附近的溪流附近。壶瓶碎米荠属于十字花科植物, 是 2000 年发现的一种新的硒超积累植物, 所使用样品为采集的混合样品。

1.2 样品前处理

采集的富硒玉米、富硒小麦、富硒大米、富硒大

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目(201703D211001)、山西农谷建设科研专项(SXNGJSKYZX201706)、广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17202019-2, 桂科 AA17202026-6, 桂科 AA17202026-7, 桂科 AA17202038-1, 桂科 AA17202044-1, 桂科 AA17202010, AA17202027-3)

* 通讯作者(xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 陆晓奇(1988—), 男, 安徽无为, 博士, 主要研究方向为微量元素硒与人体健康。E-mail: lusoke@163.com

豆、富硒西兰花和壶瓶碎米荠在实验室先用自来水冲洗掉表面灰尘和残留土壤,再用蒸馏水润洗后放在托盘中于 55 ℃ 烘干 48 h。烘干后用粉碎机粉碎,样品分别过 60 目筛和 100 目筛用于测定总硒和硒形态,粉碎后样品置于阴凉干燥处保存。

1.3 硒含量测定

采用湿法消解原子荧光光谱法检测样品总硒含量。检测原理:试样经酸加热消化后,在盐酸介质中,将试样中的六价硒还原成四价硒,用硼氢化钠或硼氢化钾作还原剂,将四价硒在盐酸介质中还原成硒化氢(H_2Se),由载气(氩气)带入原子化器中进行原子化,在硒空心阴极灯照射下,基态硒原子被激发至高能态,再去活化回到基态时,发射出特征波长的荧光,其荧光强度与硒含量成正比,与标准系列比较后定量。

总硒测定的具体操作为:准确称取 0.2~0.5 g 样品置于 50 ml 小锥形瓶中,加入 10 ml 混酸溶液(HNO_3 : $\text{HClO}_4=4:1$),加歪颈小漏斗冷消解过夜。次日将小锥形瓶置于电热板上,100 ℃ 加热 1 h,120 ℃ 加热 2 h,180 ℃ 加热 1 h 后,于 210 ℃ 加热至冒高氯酸白烟后取下,加去离子水润洗后于 210 ℃ 第二次加热至冒高氯酸白烟,取下冷却后加 5 ml HCl 还原至少 4 h 后定容至 25 ml,混匀后上机检测。总硒测定所使用仪器为原子荧光光度计(AFS-9230,北京吉天),仪器参考条件:负高压:270 V;灯电流:80 mA;原子化温度:800 ℃;炉高:8 mm;载气流速:400 ml/min;屏蔽气流速:800 ml/min;测量方式:标准曲线法;读数方式:峰面积;延迟时间:1 s;读数时间:7 s。试验所使用器皿均在 10% HCl 溶液中浸泡过夜后,去离子水清洗后烘干备用,所使用试剂均为分析纯及以上。每批样品检测中均设置 3 个空白样和 3 个标准样用于质量控制。

1.4 硒形态测定

样品硒形态测定方法为酶解法结合液相色谱-紫外消解-原子荧光光谱法(LC-UV-AFS,北京吉天)。检测原理:试样经酶水解后,将与蛋白结合的硒氨基酸及游离的多肽中硒氨基酸等形态释放在酶提取上清液中,再利用液相色谱的有效分离,紫外在线消解形成四价硒形态,四价硒在盐酸介质与硼氢化钠反应生成硒化氢(H_2Se),由载气(氩气)带入原子化器中进行原子化,在硒空心阴极灯照射下,基态硒原子被激发至高能态,再去活化回到基态时,发射出特征谱线,经聚焦,得到的荧光信号被日盲光电倍增管接收,然后经放大、解调,再由数据处理系统得到结果。

硒形态测定的具体操作为:准确称取 0.1~0.2 g 过 100 目筛待测样品于 10 ml 离心管中,向装有样品的离心管中加入 5 ml Tris-HCl ,摇匀后,超声 30 min,再加入 0.2 ml 蛋白酶 K(500 mg/L),50 ℃,气浴恒温振荡器中转速为 250 r/min,培养 18 h 后,再加入 0.2 ml 蛋白酶 K(500 mg/L),继续培养 6 h,再加入 0.4 ml 蛋白酶 XIV(500 mg/L),37 ℃,培养 18 h,再将离心管放入高速离心机,4 ℃,10 000 r/min,离心 30 min。上清液过 0.22 μm 水系膜后待测。仪器参考条件:灯电流/辅阴极:100 mA,45 mA;光电倍增管负高压:300 V;载气流速:300 ml/min;屏蔽气流速:700 ml/min;原子化温度:800 ℃;炉高:8 mm;测量方式:标准曲线法;读数方式:峰面积;峰采集时间:8 min。氧化剂:0.35% $\text{NaOH}+0.8\% \text{H}_2\text{O}_2$,还原剂:0.35% $\text{NaOH}+1.2\% \text{NaBH}_4$,流动相:40 mmol/L $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{pH}=6.0$ 。标准物质硒代胱氨酸(SeCys_2)、硒代蛋氨酸(SeMet)、硒甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)和亚硒酸盐(SeO_3^{2-})均购置于 Sigma 公司。试验所使用器皿均在 10% HCl 溶液中浸泡过夜后,去离子水清洗后烘干备用。

1.5 富硒植物中硒的生物可给性

本研究通过人工模拟胃肠实验研究富硒植物材料中硒的生物可给性,人工模拟胃肠实验通过模拟食物在人体胃肠中消化过程测定食物中有效成分在胃肠中释放进入胃液或肠液的量,评价食物中有效成分潜在的吸收能力。本研究采用静态胃肠模型,使用 RC-8 型药物溶出仪(天津天光)小杯法模拟,具体操作步骤及参数如下:

试剂:胃蛋白酶(P7000, sigma),胰酶(P7545, sigma),胆盐(69005236, 国药), KHCO_3 , NaHCO_3 , NaCl 。

胃液配制:准确称取 1 g 胃蛋白酶,3 g NaCl ,5 g KHCO_3 溶解于纯水中并定容至 1 000 ml。

肠液配制:准确称取 0.9 g 胰酶,6 g 胆盐,0.9 g NaHCO_3 溶解于纯水中并定容至 1 000 ml。

胃消化阶段:准确称取 6 g 样品和 120 ml 胃液置于溶出仪小杯中,玻璃棒混匀。于 37 ℃ 水浴中 200 r/min 搅拌,总反应时间 2.0 h。分别在 0.5、1.0 和 2.0 h 时用注射器抽取 5 ml 混合液,5 000 r/min 离心 10 min 后取上清液过 0.45 μm 水系膜,4 ℃ 保存用于总硒测定。

肠消化阶段:胃阶段结束时,用 NaOH 调节 pH 至中性后加入 60 ml 肠液并继续于 37 ℃ 水浴中 200 r/min 搅拌,总反应时间 6.0 h。分别在 0.5、1.0、

2.0、4.0 和 6.0 h 用注射器抽取 5 ml 混合液,5 000 r/min 离心 10 min 后取上清液过 0.45 μm 水系膜, 4 ℃ 保存用于总硒测定。

2 结果与分析

2.1 典型富硒植物材料的硒含量

本研究中所使用富硒材料的硒含量见表 1。富硒材料有富硒大米 1 种,富硒小麦 1 种,富硒玉米 2 种,富硒大豆 3 种,富硒西兰花 1 种和壶平碎米茅 1 种。
富硒大米、小麦、玉米、大豆和西兰花均由苏州硒谷科技有限公司提供,其生产过程为在农作物生长过程中向土壤中添加该公司特制硒植物营养剂强化剂,农作物在生长过程中通过根部吸收转化。壶瓶碎米茅采集自湖北省恩施市鱼塘坝硒矿地区山间溪流附近,本文所使用材料为恩施考察期间采集壶瓶碎米茅样品粉碎后的混合样。

表 1 典型富硒材料硒含量 Table 1 Selenium contents in typical Se-enriched materials	
富硒材料	Se (mg/kg)
富硒大米	0.91
富硒小麦	21.7
富硒玉米 A	32.4
富硒玉米 B	2.71
富硒大豆 A	110.8
富硒大豆 B	39.1
富硒大豆 C	1.54
富硒西兰花	68.2
壶瓶碎米茅	14.3

2.2 典型富硒植物材料的硒形态

本研究中所使用富硒材料的硒形态见表 2,对总硒含量达到 2 mg/kg 的样品进行了硒形态检测,有富硒小麦 1 种,富硒玉米 2 种,富硒大豆 2 种,富硒西兰花 1 种和壶瓶碎米茅 1 种。

表 2 典型富硒材料硒形态 Table 2 Se speciation in typical Se-enriched materials								
硒形态	指标	富硒小麦	富硒玉米 A	富硒玉米 B	富硒大豆 A	富硒大豆 B	富硒西兰花	壶瓶碎米茅
SeCys ₂	含量 (mg/kg)	0.67 ± 0.13	0.72 ± 0.22	0.12 ± 0.02	7.7 ± 0.9	0.64 ± 0.13	17.7 ± 0.2	3.4 ± 0.6
	占比(%)	2.6 ± 0.6	2.2 ± 0.5	4.4 ± 0.4	6.9 ± 0.3	1.6 ± 0.1	25.9 ± 0.3	23.8 ± 7.1
MeSeCys	含量 (mg/kg)	0.14 ± 0.08	0.21 ± 0.05	0.11 ± 0.03	1.4 ± 0.1	1.1 ± 0.1	25.3 ± 0.3	ND
	占比(%)	0.3 ± 0.3	0.7 ± 0.2	4.2 ± 0.5	1.2 ± 0.04	2.8 ± 0.1	37.1 ± 0.4	ND
SeO ₃ ²⁻	含量 (mg/kg)	ND	ND	ND	3.7 ± 0.9	0.35 ± 0.04	ND	ND
	占比(%)	ND	ND	ND	3.3 ± 0.5	0.90 ± 0.01	ND	ND
SeMet	含量 (mg/kg)	9.6 ± 0.07	20.5 ± 2.5	2.2 ± 0.4	55.7 ± 5.2	25.7 ± 3.5	19.0 ± 0.6	10.9 ± 3.0
	占比(%)	44.2 ± 3.7	63.5 ± 8.0	80.4 ± 4.8	50.3 ± 1.0	65.7 ± 0.4	27.8 ± 0.9	73.0 ± 7.5

注：占比指每种硒形态占总硒含量的百分比，ND 指未检出。

富硒小麦硒形态检测结果显示主要的硒形态为硒代蛋氨酸(SeMet),占样品总硒的 44.2%;硒代胱氨酸(SeCys₂)和甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)少量检出,分别占总硒的 2.6% 和 0.3%,亚硒酸盐(SeO₃²⁻)未检出。检出各硒形态含量之和占样品总硒 47%,有一半左右的硒在样品酶解时未进入酶解液,说明这种样品前处理方法在检测小麦硒形态时存在一定的局限性,有待进一步完善和优化。富硒玉米 A 和富硒玉米 B 硒形态检测结果显示富硒玉米中硒的主要形态为 SeMet,分别占样品总硒 63.5% 和 80.4%。SeCys₂ 和 MeSeCys 少量检出,SeCys₂ 分别为 2.2% 和 4.4%,MeSeCys 分别为 0.7% 和 4.2%;亚硒酸盐未检出。检出各硒形态含量之和占样品总硒分别为 66% 和 89%,较富硒小麦有较好的提取率。富硒大豆 A 和富硒大豆 B 硒形态检测结果显示富硒大豆中硒的主要形态为 SeMet,分别占样品总硒的 50.3% 和 65.7%;

SeCys₂、MeSeCys 和亚硒酸盐均少量检出,SeCys₂ 分别为 6.9% 和 1.6%,MeSeCys 分别为 1.2% 和 2.8%;亚硒酸盐分别为 3.3% 和 0.9%。检出各硒形态含量之和占样品总硒分别为 62% 和 71%,具有较好的硒提取率,较富硒小麦有所提高。富硒西兰花硒形态检测显示 SeCys₂ 占 25.9%,MeSeCys 占 37.1%,SeMet 占 27.8%,亚硒酸盐未见检出。富硒西兰花中检出各形态硒含量之和占样品总硒的比例为 91%,具有极好的提取效率,原因可能是西兰花中纤维素成分较高,而淀粉含量较谷物类少,在酶解的过程中硒更容易释放进入溶出液中。壶瓶碎米茅硒形态检测结果显示 SeCys₂ 占 23.8%,SeMet 占 73.0%,MeSeCys 和亚硒酸盐未见检出。与富硒西兰花相比,壶瓶碎米茅同样具有较高 SeCys₂,但未检出 MeSeCys,显示西兰花和壶瓶碎米茅虽然同属于十字花科植物,但在硒的代谢和积累途径方面仍然具有一定的差异性,壶

瓶碎米茅积累了更多的 SeMet 而没有 MeSeCys。壶瓶碎米茅中检出各形态硒含量之和占样品总硒的比例为 97%，具有极好的提取效率，原因与富硒西兰花类似，主要是与谷物类的构成存在较大差异，壶瓶碎米茅中的硒更容易在酶解液中释放出来。

2.3 典型富硒植物材料中硒的生物可给性

选取经膨化加工熟制后富硒小麦粉进行人工模拟胃肠试验测定富硒小麦中硒的生物可给性，所选富硒小麦经膨化加工后总硒浓度为 26.4 mg/kg。根据前述研究结果所述本法硒生物营养强化所得富硒小麦中主要的硒形态为 SeMet。分别在人工模拟胃肠试验的胃阶段的 0.5、1.0 和 2.0 h，肠阶段的 0.5、1.0、2.0、4.0 和 6.0 h 取样测定溶解于消化液中的硒含量。每组设置 3 个平行试验组，结果显示富硒小麦人工模拟胃肠试验中硒的生物可给性在胃阶段呈现随时间线性上升的趋势(图 1)，胃阶段 0.5、1.0、和 2.0 h 的生物可给性分别为 37.3%、47.2% 和 55.1%。富硒小麦中硒生物可给性在进入肠阶段后迅速上升为 76.5%，整个肠阶段变化不大，在 86.5%~93.2% 之间波动，模拟肠消化阶段结束，即肠 6.0 h 时富硒小麦的生物可给性为 89.1%。

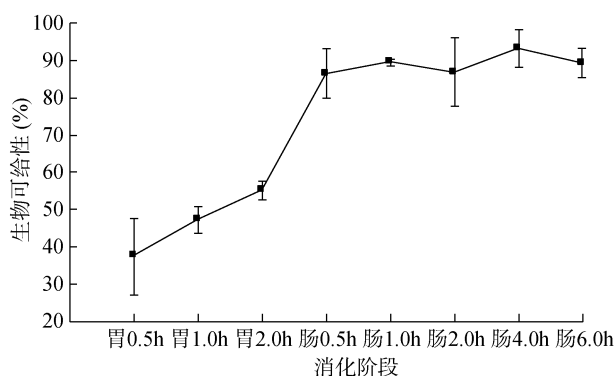


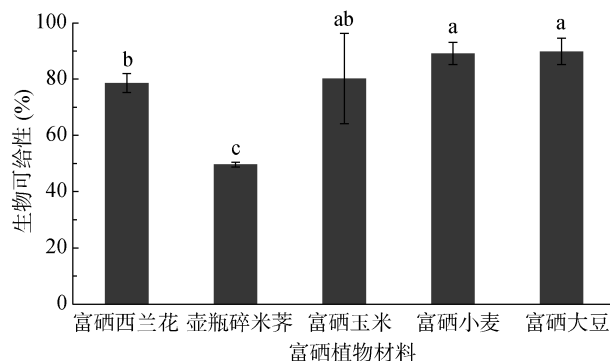
图 1 富硒小麦在人工模拟胃肠试验中硒的溶出

Fig. 1 Dissolved Se from Se-enriched wheat in gastro-intestinal (GI) digestion

选取富硒玉米、富硒小麦、富硒大豆、富硒西兰花和壶瓶碎米茅各 1 种进行人工模拟胃肠试验，比较了肠阶段 6 h 各富硒材料中硒的生物可给性(图 2)。结果显示，富硒小麦和富硒大豆中硒的生物可给性显著高于富硒西兰花和壶瓶碎米茅，富硒西兰花中硒的生物可给性显著高于壶瓶碎米茅。

3 讨论

硒是一种分散元素，在地球表面的含量极低且分布不均匀^[20-21]。由于硒在全球土壤分布的不均匀性导致了不同地区作物中硒的含量具有很大的差异性，而



(图中小写字母不同表示样品间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平)

图 2 典型富硒材料在人工模拟胃肠试验中硒的溶出

Fig. 2 Dissolved Se from typical Se-enriched materials in gastro-intestinal (GI) digestion

动物和人体中硒的主要来源为食物中硒的摄入，因此最终造成不同地区动物和人体硒摄入量的巨大差异^[22]。在南北半球 30 度以上的高纬度地区均存在一条纬向的低硒带，涵盖全球 40 多个国家和地区。中国是一个典型的低硒国家，东北到西南存在一条地理上的低硒带，全国 72% 的国土属于缺硒或低硒区域^[23]。本研究中采用硒生物营养强化技术所得富硒植物性材料的硒含量达到 0.91 ~ 110.8 mg/kg，显著高于先前在我国采集的市售产品中硒的含量，如大米硒含量为 10 ~ 55 $\mu\text{g/kg}$ ^[24]，小麦 22 ~ 49 $\mu\text{g/kg}$ ^[25]。通过生物营养强化所得富硒植物材料具有硒含量高、便于大规模农业生产的特点，可作为我国缺硒人群膳食补充硒元素的重要原材料，亦可将高含量的富硒植物材料经过加工作为食品添加剂应用于食品工业，开发各类富硒食品。

从食物中摄入的硒是人体硒的主要来源，人体对于硒的吸收和利用效率与食物中硒的形态紧密相关。本研究对 5 类共 7 个富硒植物样品中硒的形态分析显示，谷物(小麦、玉米)和大豆中硒主要以硒代蛋氨酸(SeMet)形式存在，分析结果与天然富硒区或其他方式强化的富硒谷物中硒的形态相吻合^[26]。西兰花中硒的形态除 SeMet 以外，还有较高比例的硒代胱氨酸(SeCys₂)和硒甲基硒代半胱氨酸(SeMeCys)。造成西兰花硒形态分布与谷物和豆类硒形态分布差别的主要原因可能是西兰花属于十字花科植物，其硒的代谢途径与谷物和豆类植物存在一定的差异，硒被西兰花在根系吸收后转化为 SeCys，部分的硒被直接以 SeCys₂ 或甲基化后形成 MeSeCys 的形式储存起来，而不像谷物和豆类植物继续转化为 SeMet。而同属于十字花科类植物壶瓶碎米茅中硒的形态分布中却没有 MeSeCys，体现了作为硒的超积累植物在硒的代谢途径上可能与西兰花不同。此外，本研究中壶瓶碎

米茅中硒主要以 SeMet(73%)形式存在,与先前研究以 SeCys₂ 为主的结果存在差异^[27],其原因可能是本研究采集的壶瓶碎米茅中硒的含量较低仅为 14.3 mg/kg,而先前研究中则达到几百至几千 mg/kg。壶瓶碎米茅作为硒的超积累植物在低硒生长环境中将吸收的硒以 SeMet 形式存储,在高硒环境下更多地转化为 SeCys₂。

生物可给性是指食物经过消化系统消化后产生可溶解性的营养物质。通过动物或人体的进行活体试验进行评估,因研究时间长、费用高和存在一定的风险和伦理道德问题,目前此方面的研究较少进行。通过模拟配制人体的消化液,如唾液、胃液、肠液等和人体消化道的相关消化过程,如口、食管、胃和小肠等。将被检测的食物加入到消化液中,在模拟人体消化的条件下反应对应时间,反应结束后释放到消化液中的营养物质的量和加入的总量之比即为该营养物质的生物可给性。此方法具有简便、快速和费用低等优点,是评价生物可给性的重要方法。人体内硒的含量取决于食物中摄入硒的总量和硒的可吸收水平,人工模拟胃肠试验可有效评估食物中硒的生物可给性。以富硒小麦的人工模拟胃肠试验为例,在胃消化阶段的 2 h 内硒的生物可给性由 35% 逐步上升至 55%,进入肠阶段后迅速上升并维持在 90%,另 4 种富硒植物硒的生物可给性也存在类似的变化规律。从肠阶段 6 h 的最终生物可给性数值比较来看,富硒玉米、小麦、大豆和西兰花均达到 80% 以上,而壶瓶碎米茅只有 50%。壶瓶碎米茅中硒的生物可利用性较低的原因可能与其独特的硒形态分布有关。此外,本研究中所使用的壶瓶碎米茅采集于湖北省恩施市鱼塘坝硒矿地区,采集时已处于生长阶段末期,所采得茎秆纤维化较为严重,处于生长晚期的壶瓶碎米茅中难被消化液所分解的纤维可能是阻止其中硒释放进入消化液的一个重要原因。

4 结论

通过对所选取的生物营养强化富硒植物的硒含量和形态分析的结果表明,生物营养强化可获得高硒含量的富硒植物材料。生物营养强化富硒植物中硒主要以硒代氨基酸的形式存在,但分布规律上存在一定的差异性,其中在谷物和大豆中主要以硒代蛋氨酸存在,十字花科类植物中另有一定含量的硒代胱氨酸或硒甲基硒代半胱氨酸存在。通过人工模拟胃肠试验评估结果显示小麦、玉米、大豆和西兰花中硒的生物可给性超过 80%,建议可作为富

硒农产品或富硒食品用于居民的日常补硒。

参考文献：

- [1] 赵其国,尹雪斌. 功能农业[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 82
- [2] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. Lancet, 2000, 356(9225): 233–241
- [3] Brown K M, Arthur J R. Selenium, selenoproteins and human health: A review[J]. Public Health Nutrition, 2001, 4(2B): 593–599
- [4] 范明慧, 范杰. 微量元素硒与克山病[J]. 中国地方病防治杂志, 2015, 30(6): 472–474
- [5] 李海蓉, 杨林生, 谭见安, 等. 我国地理环境硒缺乏与健康研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 381–386
- [6] 朋玲龙, 王先良, 陈霞, 等. 我国硒的环境分布及其健康影响[J]. 安徽预防医学杂志, 2015, 21(1): 33–36
- [7] Hatfield D L, Tsuji P A, Carlson B A, et al. Selenium and selenocysteine: Roles in cancer, health, and development[J]. Trends in Biochemical Sciences, 2015, 39(3): 112–120
- [8] Roman M, Jitaru P, Barbante C. Selenium biochemistry and its role for human health[J]. Metallomics, 2014, 6(1): 25–54
- [9] Fernandes A P, Gandin V. Selenium compounds as therapeutic agents in cancer[J]. Biochimica et Biophysica Acta-general Subjects, 2015, 1850(8): 1642–1660
- [10] Duntas L H, Benvenga S. Selenium: An element for life[J]. Endocrine, 2015, 48(3): 756–775
- [11] Reich H J, Hondal R J. Why nature chose selenium[J]. ACS Chemical Biology, 2016, 11(4): 821–841
- [12] Gao J, Liu Y, Huang Y, et al. Daily selenium intake in a moderate selenium deficiency area of Suzhou, China[J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 1088–1093
- [13] 罗友进, 韩国辉, 孙协平, 等. 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤, 2018, 50(1): 131–138
- [14] 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): 993–999
- [15] 中国硒景观与硒研究团队分布图[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 349–350
- [16] 姜兴丹, 张根林, 叶邦策. 高富硒酵母的筛选及富硒强化研究[J]. 生物技术通报, 2017, 33(12): 132–137
- [17] 刘书畅, 马布平, 周忠发, 等. 富硒食用菌的研究进展(综述)[J]. 食药菌, 2018, 26(2): 74–78
- [18] 彭祚全. 恩施州富有机硒食品现状及评价[J]. 微量元素与健康研究, 2018, 35(2): 45–46, 48
- [19] Lu X Q, He Z S, Lin Z Q, et al. Effects of Chinese cooking methods on the content and speciation of selenium in selenium bio-fortified cereals and soybean[J]. Nutrients, 2018, 10(3): 317
- [20] 迟凤琴, 徐强, 匡恩俊, 等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1262–1274
- [21] 戴慧, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1356–1364

- [22] 胡秋辉, 朱建春, 潘根兴. 硒的土壤生态环境、生物地球化学与食物链的研究现状[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 54–57
- [23] 蒋彬, 李志刚, 叶正钱, 等. 硒从土壤向食物链的迁移[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 149–152
- [24] 陈历程, 杨方美, 张艳玲, 等. 我国部分大米含硒量分析及生物硒肥对籽粒硒水平的影响[J]. 中国水稻科学, 2002(4): 48–52
- [25] 鲁璐, 季英苗, 李莉蓉, 等. 不同地区、不同品种(系)小麦锌、铁和硒含量分析[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(5): 646–649
- [26] Huerta V D, Reyes L H, Marchante-Gayon J M, et al. Total determination and quantitative speciation analysis of selenium in yeast and wheat flour by isotope dilution analysis ICP-MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2003, 18 (10): 1243–1247
- [27] Yuan L X, Zhu Y Y, Lin Z Q, et al. A novel selenocystine-accumulating plant in selenium-mine drainage area in Enshi, China[J]. Plos ONE, 2013, 8(6): e65615

Study on Se Speciation and Bioaccessibility of Typical Se-enriched Plants

LU Xiaoqi^{1,2,3}, WANG Jian³, ZHU Yuanyuan³, LIU Ying³, YUAN Linxi³, GAO Lixian⁴, YIN Xuebin^{1,2*}

(1 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2 Key Laboratory of Functional Agriculture, Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123, China; 3 Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou, Jiangsu 215123, China; 4 Xiwang Town Agrotechnical Station, Chuzhou, Anhui 239553, China)

Abstract: In order to evaluate the effects of bio-fortification on producing Se-enriched agricultural products, the content, speciation and bioaccessibility of selenium in Se-enriched plant materials supplied by Suzhou Setek Co., Ltd. were determined. The results showed that bio-fortification could effectively improve the selenium contents in plants. Selenium content in the tested samples was 0.91–110.8 mg/kg. The main speciation of selenium was selenium amino acid. Selenium in grains and soybeans mainly existed in the form of SeMet (44.2%–80.4%). The main forms of selenium in broccoli were SeMet (27.8%), SeCys₂ (25.9%) and MeSeCys (37.1%). The main forms of Se in *Cardamine hupingshanensis* were SeMet (73%) and SeCys₂ (23.8%). Selenium in Se-enriched plants has high bioaccessibility. The bioaccessibilities were 90% for Se-enriched wheat and soybean, 80% for Se-enriched maize and broccoli, and 50% for *Cardamine hupingshanensis*, respectively. Se-enriched plants produced by bio-fortification have high selenium content, high organic selenium ratio and good bioaccessibility, thus could be used as important materials for human selenium dietary supplement.

Key words: Bio-fortification; Se-enriched plant; Se speciation; Bioaccessibility