



王彤,周晨霓,吴长龙.小麦农艺硒强化研究进展[J].黑龙江农业科学,2022(3):87-92,107.

小麦农艺硒强化研究进展

王 彤,周晨霓,吴长龙

(西藏农牧学院 高原生态研究所/西藏高原森林生态教育部重点实验室/西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站/西藏高寒植被生态安全重点实验室,西藏 林芝 860000)

摘要:硒是人体必需的营养元素,食物链是人体膳食硒摄入的主要途径。我国居民膳食结构仍然以主粮摄入为主,因此硒强化主粮作物是提高人体膳食硒摄入和改善人体硒营养水平的重要举措。为进一步开展农作物硒生物强化研究,本文系统概述了我国小麦硒农艺生物强化方法及其影响因素。外源硒添加是麦类作物农艺强化的主要手段,外源添加硒的类型、浓度、施硒时间和微生物调控是影响麦类作物硒强化效果的重要因素。当前国内富硒小麦及产业发展研究尚处于起步阶段,理论落后于实践,相关经济研究成果更少,尚没有形成规模化和产业链,但极具发展前景。今后应在不超过籽粒硒强化目标值的前提下,优化麦类作物农艺硒强化措施,并在富硒小麦遗传育种、富硒小麦加工等环节加大投入,促进富硒小麦全产业链可持续发展。

关键词:外源硒;小麦;农艺强化

硒元素最早在 1817 年被瑞典化学家 Berlius 发现,直至 1973 年被世界卫生组织确定为人体和动物健康生存不可缺少的微量营养素^[1]。其作为硒酶和硒蛋白的重要组成元素,可实现生物体内的能量转换和基因表达^[2],并具有一些重要的生理学功能,例如抗氧化、抗炎症、抑制癌症细胞的分裂生长、免疫调节和拮抗重金属作用等^[3]。

硒存在于地壳的岩石圈层,即水、土壤和开放环境中,因此在地理上的分布有差异^[4-5]。WHO 报告中指明,中国是全世界 40 个缺硒国家之一^[6]。我国的缺硒地区主要是从东北平原至西南云贵高原的低硒地质带。其中土壤中的硒含量低于 $0.125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[7-10]。考虑到硒的饮食缺乏和有毒浓度之间的狭窄范围。研究人员将其同时作为营养素和环境污染物进行了研究^[11-13]。因此,硒的丰缺会对人体的健康产生影响,我国湖北恩施和资阳双安等富硒地区均发生过硒摄入过量导致的地方性中毒事件,严重者甚至死亡;而缺硒地带一度盛行大骨节病、克山病、白肌病等地方性疾病^[14];只有当人体摄入适宜量的硒时,才能使硒元素发挥对人体有益的作用。根据不同年龄阶段人体营养需要和生长发育规律,营养学家制定的硒日推荐摄入量为 $45 \sim 50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,但我国人均摄

入量不到 $40 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,缺硒地区的人群硒摄入量更是远低于标准摄入量。据全国性的营养调查表明,我国因缺硒而面临健康风险的人口数量高达 1.05 亿^[15]。另有调查研究显示,血浆、指甲、头发和尿液是可用于评估硒状态生物指标的标记物^[16],而我国缺硒地区人体血浆和尿液检测中的硒含量均低于符合人体健康的硒含量。由于人体不能通过自身功能合成硒,因此人体大部分硒摄入途径是自然饮食。中国人的饮食结构以主粮摄入为主,以蔬菜、肉、蛋、水果和奶制品为辅。纵观中国麦区(表 1)^[17],小麦籽粒硒含量均显著低于小麦籽粒硒强化目标值 $3 \times 10^5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的量^[17],严重缺硒的东北地区平均仅有 $35.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。食物链的基础环节是土壤作物系统,但我国现状是自然环境、作物籽粒、主要食物硒含量均偏低,短时间内很难改变国人的饮食习惯,因此通过聚硒能力强的主粮作物——小麦的生物强化来提高国人的硒摄入量是可行性较高的方案。

目前针对麦类作物硒强化的方法分为农艺生物强化和遗传生物强化,即施肥和作物改良^[18]。而农艺硒强化以可操作性强等优点在实践中被广泛采用。目前在不同作物上开展的各种农艺硒强化研究有很多,但是不同的方法强化效果却大不相同。本文基于前人对小麦进行的硒生物强化工作,系统总结麦类作物硒农艺强化方法及其强化效果,为今后进行更多作物硒生物强化提供理论基础。

收稿日期:2021-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(31960256)。

第一作者:王彤(1996—),女,硕士研究生,从事农业生态学。E-mail:986553915@qq.com。

通信作者:周晨霓(1984—),女,硕士,副教授,从事农业生态学研究与教学工作。E-mail:chenni2018@126.com。

表 1 中国不同麦区小麦籽粒硒含量^[17]

区域		样本数	品种数	硒含量/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
				范围	平均值
春小麦	东北	23	11	0~102.9	35.9
	北部	25	14	0~253.2	66.1
	西北	25	12	0~634.4	97.8
冬小麦	东部	299	125	0~672.7	59.5
	中部	99	56	0~564.9	47.7
	南部	89	53	0~473.7	45.5
	西南	79	45	0~342.9	50.6
	西北	16	8	25.0~378.4	119.8

1 农艺硒生物强化

农艺生物强化通过土壤施用、叶面喷洒或者种子处理等方式在作物生长发育的不同时期施以不同形态、浓度的肥料,从而提高可食用植物部分特定微量营养素的含量^[19]。研究表明,通过外源添加硒施用对小麦进行农艺生物强化是目前提高人体硒摄入量的最有效的方法。促使生物强化成功提高植物硒含量的重要影响因素包括:外源硒形态、施硒方式、时间、浓度、作物对象种类和微生物调控等^[20]。

1.1 外源硒形态

硒的五种价态分别是硒化物(Se^{2-})、元素硒(Se)、硫酸盐(Se^{2+})、亚硒酸盐(Se^{4+})和硒酸盐(Se^{6+})^[21-22]。外源硒的补充类型包括有机硒、无机硒和纳米硒。其中硒酸盐、部分亚硒酸盐和有机硫化物本身可供植物吸收^[23]。

大多数天然有机硒存在于植物中,例如莎草科的莎草,豆科的黄芪和苜蓿,菊科的紫苑等植物都拥有较强的聚集有机硒的能力^[24]。植物根系被动吸收土壤中的 Se^{4+} 后转换成 Se^{6+} 和有机硒化合物,最终将无机硒转换为有机硒储存^[25]。王琪^[26]的研究表明,不同有机硒的形态对小麦根系和地上部的硒含量均有显著影响,且小麦根系对有机硒的吸收速率和处理时间呈正相关;黄思思等^[27]在灌浆初期对不同小麦品种进行叶面喷施生物有机硒的结果表明,不同小麦品种籽粒硒含量均达到了当地《富有机硒食品硒含量要求》的标准。

无机硒分为 3 个阶段:土壤相固定、吸附到土壤中和可溶,只有吸附/可溶形式的硒可供植物吸收^[28]。硒酸盐(Se^{6+})和亚硒酸盐(Se^{4+})是硒的两种无机形式^[29],其中硒酸盐是以最高氧化状态

存在的^[30]。大多数研究表明,当施用于土壤时,硒酸盐是最有效的形式,当以叶面喷洒施用,通常也比亚硒酸盐更有效^[30]。硒酸盐的效率较高原因在于硒酸盐的吸收和从根到茎、叶的转化更为迅速,并且更快地转化为有机形式,而亚硒酸盐更容易吸附在土壤中,使其难以吸收^[31]。硒酸盐易从根部分布到芽部,而亚硒酸盐或其代谢物通常在根部积累^[32]。Zhang 等^[33]的砂培试验结果表明,在土壤施用和叶面喷洒两种施硒方式中,小麦总硒含量最高的硒形态均为硒酸盐;但 Lidon 等^[34]的研究表明,与硒酸钠相比,使用亚硒酸钠对水稻植物进行叶面施肥的效率更高。

前人大部分的研究均使用硒酸盐和亚硒酸盐作为强化肥料。然而 Márquez 等^[35]和 Kumar 等^[36]认为由于纳米颗粒独特的性能,如高生物活性、生物利用度、低毒性、高粒子分散性和大比表面积,可以实现应用复杂性的降低,从而在增强抗氧化代谢、促进农艺可持续性和减少废物方面取得重要成果,因此纳米硒极有希望代替其他形态硒;李韬等^[37]以 110 份不同品种小麦为材料,施用纳米硒肥进行硒强化试验,结果证实对小麦施用纳米硒肥可显著提高小麦籽粒的硒含量。但目前有机硒和纳米硒的生产成本较高,还需研发技术的进一步发展,降低制造成本方可普遍推广,因此在田间实践中大多使用无机硒。

1.2 施硒方式

施硒方式是显著提高小麦中硒含量的首要因素。在土壤里或者作物叶面上施用饮食中缺乏的硒肥提高其在作物中的含量,改善人体膳食硒的摄入,是短期内提高人体硒摄入量的最佳解决方案。土壤施用硒肥可改善小麦植株硒营养水平和籽粒硒含量;叶面喷施硒肥能提高小麦活力和抗氧化能力、籽粒硒含量^[38]。

在两种施硒方法中,土壤施硒较受欢迎,但关于这两种施硒方法有效性的强弱,国内外各学者的观点大不相同。一些学者认为叶喷效果优于土施,Zhang 等^[33]在新疆自治区的温室中进行的砂培试验结果表明,土壤施肥和叶面喷施均能提高小麦硒含量,但叶片硒的有机硒比例最高,因此叶喷效果优于土施;Pezzarossa 等^[39]和 Winkel 等^[40]、Nawaz 等^[41]的试验结果与之一致;少数学者持相反观点,杨浩等^[42]以贵紫麦 1 号、中国春和 RIL 群体为材料,采用盆栽的方式,通过土壤施硒和叶面喷施两种方式对不同小麦品种的硒积累和营养机制进行研究,结果表明,在同等施硒量

的条件下,无论何种施硒方式都对小麦无不良影响,均能提高小麦籽粒中的硒含量,且土施效果更佳;另有部分学者则认为二者结合为最优,Rada-wiec^[43]在波兰的酸性土壤里用硒酸钠进行的试验结果表明,与对照组相比,土壤和叶面肥都显著增加了小麦籽粒中硒的含量,但土壤施肥和叶面喷施(总剂量为 10%)相结合的方法获得的硒含量最高;税杨等^[44]也得出了同样的结论,其采用二因素裂区设计,在研究施用有机硒的施用浓度和方式对强筋小麦各方面影响的硒强化试验中发现,土壤施用和叶面喷洒有机肥可提高籽粒硒含量、促进小麦生长和改善营养品质。已有研究试验结果的不一致说明,小麦硒肥施用方法的效果可能受多方面因素影响,比如土壤 pH、硒源类型、气候等。

1.3 种子硒处理

在农业生产实践中,浸种也是处理微量元素肥料的常规方式,目前有关亚硒酸钠浸种对种子发芽影响的研究较多,而将亚硒酸钠用于小麦浸种的报道很少^[45]。国内学者唐玉霞等^[46]通过室内发芽培育试验,并结合土壤栽培试验结果,用 0.1~2.5 mg·L⁻¹ 亚硒酸钠水溶液,对冀麦 12 进行浸种,能够提高小麦籽粒硒含量,但距离小麦籽粒富硒 0.2~0.3 mg·kg⁻¹ 的标准还有较大差距;林匡飞等^[47]的水培试验表明,适当浓度(0.1~0.5 mg·L⁻¹)的亚硒酸钠,对促进小麦播种力、 α -淀粉酶、萌发速率、幼苗出土和根系生长发育、以及幼根和芽干物质积累等都有作用;高剂量浓度硒(≥ 5.0 mg·L⁻¹)对植物种子活性、 α -淀粉酶,以及幼苗出土、生长发育等都有强胁迫效应,当硒浓度超过 40 mg·L⁻¹ 时,这些指标明显被抑制,而且随着硒含量的提高抑制率上升;邵志慧等^[48]的试验结论表明,硒含量与种子萌发等各项指标抑制率之间呈现明显的正相关性,因此小麦根系伸长抑制率也可成为相应生态风险评估的一个指标;缪树寅^[49]的研究结果显示,在相同硒含量条件下硒酸盐对小麦种子的毒害效果远远超过亚硒酸盐,小麦的新生芽抑制效果可用作亚硒酸盐生物毒性的敏感指标,而根长抑制效果则可用作硒酸盐的生物敏感性指标。

国外学者 Islam 等^[50]在 DFT 水培系统中培养植物,在生长室中用不同浓度的硒(0, 0.125, 0.250, 0.500 和 1.000 mg·L⁻¹ 亚硒酸钠)通过控制温度(25 °C/20 °C;昼/夜)、光照(12 h 亮/12 h 暗;强度 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 白色荧光灯)和湿度

(60%)持续 10 d,结果表明硒生物强化提高了发芽率。综上所述,由于硒液浸种技术对籽粒硒含量的改善幅度有限,对小麦硒浸种无法成为改善小麦籽粒硒含量的主要手段,而从改善小麦生产质量和含量的角度来看,加入较低强度外源硒则可提高在萌芽阶段小麦的生长发育,但高浓度的添加反而会抑制小麦的生长,而且硒酸盐的有效性高于亚硒酸盐。

1.4 施硒时间与浓度

关于小麦硒强化最佳时期和硒液浓度的研究方面,各学者得出的结论也不一致。宋家永等^[51]在小麦拔节期、灌浆初期及中期三个营养生长阶段喷施硒液肥的试验发现,小麦籽粒中硒含量比对照高 3 倍左右,表明小麦抽穗期至灌浆中期硒吸收较好,尤其以灌浆中期效果最为明显;唐玉霞等^[52-53]进行的盆栽试验和田间试验研究表明,小麦植株含硒量表现为幼苗期最高,生殖生长期次之,营养生长期最低,抽穗期至灌浆期的硒吸收量和吸收速率最高,因此建议在小麦抽穗期至灌浆初期采用叶面喷洒的方式施用 40 mg·L⁻¹ 亚硒酸盐溶液,用量以 750 kg·hm⁻² 为宜;史芹等^[54]与之观点一致;彭涛等^[55]在小麦孕穗期和灌浆期对小麦品种喷洒不同浓度的硒营养液,从而提高小麦籽粒的硒含量,结果表明,不同浓度处理间差异性明显,并且小麦籽粒的硒含量与喷洒的富硒营养液浓度呈正相关;周勋波^[56]也认为喷洒 7.5 g·hm⁻² 亚硒酸钠对小麦富硒有较好的效果;但马玉霞等^[57]认为,在返青和拔节期二次喷施获得的效果更好;董石峰等^[58]采用盆栽试验,在中麦 175 开花期喷施低(8 mg·L⁻¹)、中(16 mg·L⁻¹)、高(24 mg·L⁻¹)浓度的亚硒酸钠(以不喷硒为对照),结果表明,花期喷施亚硒酸钠处理的小麦根长、根表面积、根体积、根重较 CK 增加,缓解了根系衰老,提高了根冠比、各器官硒含量及籽粒各形态硒的积累,籽粒硒积累量占植株总硒比例、籽粒中有机态硒积累量及其所占比例以低浓度最高,而高浓度最低,开花期喷施低浓度(8 mg·L⁻¹)亚硒酸钠更有利于硒向籽粒中转运,增加有机态硒含量及其占比,降低无机态硒含量及其比例;另有研究表明,小麦生育后期喷洒硒肥籽粒中硒含量显著提高,灌浆期比孕穗期喷洒效果明显可能与籽粒蛋白质合成时易与硒螯合有关^[55]。尽管研究人员对小麦哪个阶段施硒效果最好的观点各异,但都认同在小麦生长的关键期施用硒肥可提高小麦籽粒硒含量。

1.5 品种间聚硒能力差异

基因型决定了小麦对硒的耐受和吸收能力存在着显著差异,且品种间富硒能力具有较高的多样性^[58-59],因此硒聚集能力强的小麦品种筛选对硒生物强化驯化具有一定的科学意义。有研究表明,少数籽粒硒含量较高且后期抗早衰相对晚熟的品种具有较强的耐受性;但大部分品种在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 较低硒酸钠溶液浓度下通常易发生毒害症状,严重者甚至会导致死亡^[60]。马玉霞等^[57]研究表明,强筋小麦与普通小麦相比具有较强的硒吸收能力,即表明蛋白质含量与其对硒的吸收能力正相关。另有研究指出,不同遗传基础小麦品种(系)的聚硒效果及对硒的吸收程度具有较大差异,如在同一土壤条件下,鄂恩4号小麦的富硒效果比998042品系更佳^[61],两者在苗期有较大差异;普通紫麦生物吸收比($23.09\%\sim 27.25\%$)最大,而灰麦生物吸收比较小,为 $12.35\%\sim 15.87\%$ ^[62]。孙发宇等^[63-64]对114份品种(系)进行不同浓度的硒添加试验结果表明,高浓度硒酸钠处理有利于富硒品种的筛选,籽粒富硒方面,Jagger较好,在硒强化潜力方面,徐州25、陕354和陕107-6更具潜力,其在另一组长江中下游地区的63个小麦品种施硒试验中,籽粒硒利用效率和硒含量以江麦816最优。

2 微生物调控

土壤环境中微生物的存在严重影响土壤中硒的形态、迁移率和生物有效性^[65]。Acuña等^[66]报告中,将含有硒的硒杆菌接种在元素硒(Se)和其他细胞内形式(如硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸和甲基化形式)的微纳米球中,可以转移到小麦植株的叶片上。另一方面,丛枝菌根真菌(AMF)有利于真菌菌丝附近细菌菌群的生长,加速其代谢活动和养分循环,并可影响植物获取某些元素,如P、类金属和重金属^[67];Durán等^[68]的研究表明,某些根际微生物,如根际细菌和丛枝菌根真菌可以增加植物对硒的吸收,硒杆菌混合物和克氏克雷伯菌之间具有协同效应,与主要生物多样性相关,并证明这些根际微生物在谷物及其衍生物的生物强化方面具有巨大潜力;Luo等^[69]以冬小麦为材料,采用水培和盆栽试验,结果表明,水培试验中AMF对小麦根系吸收硒和亚硒酸盐有显著影响($P<0.001$),但对硒代蛋氨酸无显著影响,菌根对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收增加。盆栽试验进一步表明,在添加硒或亚硒酸盐的土壤中,接种

AMF显著($P<0.05$)促进了茎和根中硒的积累。因此,AMF有可能提高小麦籽粒硒含量,改善以小麦为主食的居民的饮食营养结构。

3 问题与展望

人体补硒要遵循科学,长期进食过低或过高硒含量的食物都会影响人体的健康^[70]。中国营养学会推荐成年人的硒摄入量标准为 $50\sim 250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。小麦作物富硒应当严格执行国标粮食作物硒含量 $<300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的标准。其中应当注意天然富硒小麦硒含量是否超标;另外要注意,国家和地方尚未制定和出台规范统一的富硒食品标准^[71]。目前市场中上架与推广的较多富硒产品仅可算作含硒食品,并未达到富硒标准,而非真正含义的富硒食品。

我国对富硒小麦的研究与产业发展尚处于初级阶段,理论与实践不同步,经济方面的研究更为匮乏,尚未形成规模化和产业链,因此极具发展前景与潜力。针对小麦硒强化的研究现状,今后可重点关注以下3个方面:(1)充分利用多学科、多技术的结合,如现代生物技术与遗传育种技术的结合可加强富硒小麦新品种的选育、硒营养遗传变化规律与基因调节机制等方面的研究;(2)加强各地区基础环境及小麦籽粒硒含量的现状调查,因地制宜筛选小麦品种,确定符合当地情况的施硒方式、时间、浓度等处理技术,以保证优质富硒小麦的生产,并结合现代食品加工技术进行原料深加工,拓展产业链条并提升附加值从而实现富硒小麦全产业链的绿色经济发展;(3)政府应强化政策和资金的支持力度,统筹规划发展富硒小麦生产,重点扶持富硒产品生产经营公司,并给予公司和种植户必要的资金支持和补助力度,加快制定富硒农业产品和食品质量标准并予以监督检查,促进富硒产业的良性发展。

参考文献:

- [1] 刘杨,吴如德.微量元素硒的概况研究[J].生物技术世界,2014(11):85-87.
- [2] LZQUIERDO A,CASAS C,HERRERO E. Selenite-induced cell death in *Saccharomyces cerevisiae*: Nprotective role of glutaredoxins[J]. Microbioly,2010,156(9):2608-2620.
- [3] ROMAN M, JITARU P, BARBANTE C. Selenium biochemistry and its role for human health[J]. Metallomics, 2014(6):25-54.
- [4] MEHDI Y, HORNICK J L, ISTASSE L, et al. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions[J]. Molecules, 2013, 18(3): 3292-3311.
- [5] EL-RAMADY H, ABDALLA N, ALSHAAL T, et al. Sele-

- nium in soils under climate change, implication for human health[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2015, 13(1): 1-19.
- [6] XU Z C, SHAO H F, LI S, et al. Relationships between the selenium content in flue-cured tobacco leaves and the selenium content in soil in Enshi, China tobacco growing area[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44(5): 1563-1568.
 - [7] YAO Y F, PEI F X, KANG P D. Selenium, iodine, and the relation with Kashin-Beck disease[J]. *Nutrition*, 2011, 27(11-12): 1095-1100.
 - [8] CHEN J S. An original discovery: Selenium deficiency and Keshan disease (an endemic heart disease)[J]. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 21(3): 320-326.
 - [9] LI S H, XIAO T, ZHENG B. Medical geology of arsenic, selenium and thallium in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421-422(1): 31-40.
 - [10] PANCHAL S K, WANYONYI S, BROWN L. Selenium, vanadium, and chromium as micronutrients to improve metabolic syndrome[J]. *Current Hypertension Reports*, 2017, 19(3): 10.
 - [11] World Health Organization. Vitamin and mineral requirements in human nutrition[M]. World Health Organization, 2004.
 - [12] KIKKERT J, BERKELAAR E. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 65(3): 458-465.
 - [13] DOS SANTOS M, DA SILVA JÚNIOR F M R, MUCCILLO-BAISCH A L. Selenium content of Brazilian foods: a review of the literature values[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 58: 10-15.
 - [14] 王凯, 卢维宏, 张乃明, 等. 土壤作物系统中的硒与人体健康[J]. *肥料与健康*, 2020, 47(1): 5-10, 69.
 - [15] WANG J, LI H R, YANG L S, et al. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 39(1): 221-229.
 - [16] 王权, 李秀霞, 李伦, 等. 硒与大骨节病相关性的 Meta 分析[J]. *中国循证医学杂志*, 2013, 13(12): 1421-1430.
 - [17] 刘慧, 杨月娥, 王朝辉, 等. 中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1715-1728.
 - [18] BROADLEY M R, ALCOCK J, ALFORD J, et al. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1): 5-18.
 - [19] SARWAR N, AKHTAR M, KAMRAN M A, et al. Selenium biofortification in food crops: Key mechanisms and future perspectives[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 93: 103615.
 - [20] SCHIAVON M, NARDI S, DALLA VECCHIA F, et al. Selenium biofortification in the 21st century: Status and challenges for healthy human nutrition[J]. *Plant and Soil*, 2020, 453(1-2): 245-270.
 - [21] MEHDI Y, HORNICK J L, ISTASSE L, et al. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions[J]. *Molecules*, 2013, 18: 3292-3311.
 - [22] TERRY N, ZAYED A M, SOUZA M, et al. Selenium in higher plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2000, 51: 401-432.
 - [23] ZHAO C, REN J, XUE C, et al. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277(1): 197-206.
 - [24] 仲娜, 王小如, 陈登云. 有机硒的研究进展[J]. *中国药事*, 2007(4): 268-271.
 - [25] 张艳玲, 潘根兴, 李正文. 土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J]. *土壤与环境*, 2002(4): 388-391.
 - [26] 王琪. 水稻和小麦对有机硒的吸收、转运及形态转化机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
 - [27] 黄思思, 余侃, 饶登峰, 等. 生物有机硒对小麦产量及硒含量的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(10): 19-26.
 - [28] HART D J, FAIRWEATHER-TAIT S J, BROADLEY M R, et al. Selenium concentration and speciation in biofortified flour and bread; Retention of selenium during grain biofortification, processing and production of Se-enriched food[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(4): 1771-1778.
 - [29] LYONS G. Biofortification of cereals with foliar selenium and iodine could reduce hypothyroidism[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1-8.
 - [30] EICH-GREATOR S, SOGN T A, ØGAARD A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79: 221-231.
 - [31] IZYDORCZYK G, LIGAS B, MIKULA K, et al. Biofortification of edible plants with selenium and iodine-A systematic literature review[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 754: 141983.
 - [32] LI H F, MCGRATH S P, ZHAO F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *The New Phytologist*, 2008, 178(1): 92-102.
 - [33] ZHANG D, ZHANG N, HOU Z, et al. Effects of different application methods of selenite and selenate on selenium distribution within wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(20): 2729-2740.
 - [34] LIDON F C, OLIVEIRA K, RIBEIRO M M, et al. Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 22-29.
 - [35] MÁRQUEZ V G, MORENO Á M, MENDOZA A B, et al. Ionic selenium and nanoselenium as biofortifiers and stimulators of plant metabolism[J]. *Agronomy*, 2020, 10(9): 1399.
 - [36] KUMAR A, PRASAD K S. Role of nano-selenium in health and environment[J]. *Journal of Biotechnology*, 2020, 325: 152-163.
 - [37] 李韬, 孙发宇, 龚盼, 等. 施纳米硒对小麦籽粒硒含量及其

- 品质性状的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(2): 427-433.
- [38] 于丽敏, 薛艳芳, 高华鑫, 等. 小麦富硒研究进展[J]. 山东农业科学, 2015, 47(6): 137-144.
- [39] PEZZAROSSA B, REMORINI D, GENTILE M L, et al. Effects of foliar and fruit addition of sodium selenate on selenium accumulation and fruit quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(4): 781-786.
- [40] WINKEL L H, VRIENS B, JONES G D, et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: A critical review[J]. Nutrients, 2015, 7(6): 4199-4239.
- [41] NAWAZ F, ASHRAF M Y, AHMAD R, et al. Supplemental selenium improves wheat grain yield and quality through alterations in biochemical processes under normal and water deficit conditions[J]. Food Chemistry, 2015, 175: 350-357.
- [42] 杨浩, 刘东, 严俊, 等. 施硒方式对不同品种(系)小麦籽粒硒利用效率的影响[J]. 种子, 2021, 40(4): 1-5.
- [43] RADAWIEC A, SZULC W, RUTKOWSKA B. Selenium biofortification of wheat as a strategy to improve human nutrition[J]. Agriculture, 2021, 11(2): 144.
- [44] 税杨, 杨文平, 夏清, 等. 施硒肥方式对强筋小麦产量、硒累积分配及籽粒营养品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 112-120.
- [45] 胡振瀛. 硒强化对糙米营养组分的影响及其含硒蛋白磷酸化改性应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [46] 唐玉霞, 王慧敏, 吕英华, 等. 硒肥浸种对小麦生长发育及产量和籽粒含硒量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 731-734.
- [47] 林匡飞, 徐小清, 郑利, 等. Se 对小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒理效应[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 885-889.
- [48] 邵志慧, 林匡飞, 徐小清, 等. 硒对小麦和水稻种子萌发的生态毒理效应的比较研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1440-1443.
- [49] 缪树寅. 不同品种小麦硒的耐受性差异及其动态吸收, 转运规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [50] ISLAM M Z, PARK B J, KANG H M, et al. Influence of selenium biofortification on the bioactive compounds and antioxidant activity of wheat microgreen extract[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125763.
- [51] 宋家永, 张万业, 王永华, 等. 小麦富硒生产技术研究[J]. 中国农学通报, 2005, 5(21): 197-199.
- [52] 唐玉霞, 王慧敏, 吕英华, 等. 冬小麦硒素吸收积累特性及叶面喷硒效应的研究[J]. 华北农学报, 2005, 25(S): 198-201.
- [53] 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(21): 194-197.
- [54] 史芹, 高新楼. 不同时期喷施富硒液肥对小麦籽粒硒含量及产量的影响[J]. 山地农业生物学报, 2011, 30(6): 562-564.
- [55] 彭涛, 赵伟峰, 张庆社, 等. 富硒营养液对不同冬小麦品种产量及籽粒硒含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(21): 75-76.
- [56] 周勋波, 王海英, 谢甫绶, 等. 硒在农作物上应用研究进展概况[J]. 辽宁农业科学, 2002(1): 36-38.
- [57] 马玉霞, 杨胜利, 赵淑章. 强筋小麦富硒技术研究初报[J]. 河南职业技术学院学报, 2004, 32(3): 9-10.
- [58] 董石峰, 孙敏, 赵剑敏, 等. 花期喷施亚硒酸钠对小麦生长特性及硒积累的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 13-18.
- [59] ZHU Y G, PILON-SMITS E H, ZHAO F J, et al. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation[J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(8): 436-442.
- [60] 李韬, 兰国防. 植物硒代谢机理及其以小麦为载体进行补硒的策略[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(1): 173-177.
- [61] 邢丹英, 金明珠, 阎忠武, 等. 富硒矿粉对不同小麦品种(系)富硒效应的初步研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(4): 726-727.
- [62] 朱玲. 不同品种小麦中硒含量的测定及其与生长土壤中硒水平的相关性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
- [63] 孙发宇, 李长成, 王安, 等. 叶面喷施硒酸钠对不同小麦品种(系)籽粒硒及其他矿物质元素含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(4): 559-564.
- [64] 孙发宇, 陈欣, 马启闯, 等. 长江中下游地区主推小麦品种的硒强化潜力研究[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 83-90.
- [65] DUNGAN R, YATES S, FRANKENBERGER W. Transformations of selenate and selenite by *Stenotrophomonas maltophilia* isolated from a seleniferous agricultural drainage pond sediment[J]. Environmental Microbiology, 2003, 5(4): 287-295.
- [66] ACUÑA J, JORQUERA M, BARRA P, et al. Selenobacteria selected from the rhizosphere as a potential tool for Se biofortification of cereal crop[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49: 175-185.
- [67] BAREA J M, POZO M J, AZCÓN R, et al. Microbial cooperation in the rhizosphere[J]. Journal Experimental Botany, 2005, 56: 1761-1778.
- [68] DURÁN P, ACUÑA J J, JORQUERA M A, et al. Enhanced selenium content in wheat grain by co-inoculation of selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi: A preliminary study as a potential Se biofortification strategy[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 275-280.
- [69] LUO W, LI J, MA X, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on uptake of selenate, selenite, and selenomethionine by roots of winter wheat[J]. Plant and Soil, 2019, 438(1-2): 71-83.
- [70] 秦海波, 朱建明, 李社红, 等. 环境中硒形态分析方法的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(2): 180-187.
- [71] 蒋步云, 柴振林, 朱杰丽, 等. 富硒产品的开发利用及研究现状[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(11): 446-448.

- 究[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(5): 531-534.
- [7] 王海荣. 江苏优质稻米产业发展现状及品牌建设策略[D]. 江苏: 扬州大学, 2020.
- [8] 高清, 张亚玲, 周弋力, 等. 黑龙江省粳稻品种稻瘟病主效抗性基因鉴定与抗性评价[J]. 作物杂志, 2021(4): 59-66.
- [9] 杨春刚, 郭桂珍, 周广春, 等. 早熟高产水稻新品种吉粳 116 选育及栽培技术[J]. 北方水稻, 2019, 49(6): 54-55.
- [10] 赵海成, 李红宇, 钱永德, 等. 寒地水稻新品种垦粳 1501 的选育及栽培技术[J]. 北方水稻, 2021, 51(3): 45-46, 48.
- [11] 徐振华, 刘海英, 武洪涛, 等. 寒地水稻新品种松粳 33 的选育及高产栽培技术要点[J]. 黑龙江农业科学, 2020(12): 153-155.

Breeding and Cultivation Technology of A New Rice Variety Songjing 60 with Good Quality

LIU Hai-ying^{1,2}, YANG Zhong-liang², WU Hong-tao², WU Li-cheng², ZHANG Shu-li², ZHANG Yi-rui³, YAN Ping², LAI Yong-cai¹

(1. Postdoctoral Programme, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. Biotechnology Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150028, China; 3. Heilongjiang Seed Industry Technology Service Center, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to promote the popularization and application of Songjing 60, this paper introduced its breeding procedure, agronomic characteristics, main cultivation technology. Songjing 60 is a new rice variety, which was selected by the pedigree selection method from the cross of Songjing 16 × Songjing 9. Songjing 60 was bred in the Biotechnology Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences. From 2018 to 2019, the average yield of Songjing 60 was 8 412. 80 kg·ha⁻¹, which was 6. 6% higher than that of the control variety Longdao 18. In 2020, the average yield of production test was 8 387. 00 kg·ha⁻¹, which was 7. 5% higher than that of the control variety Longdao 18. Songjing 60 was certified by the Agricultural Crop Variety Certification Commission of Heilongjiang Province as a new rice cultivar in 2021 (2021L008). The quality of Songjing 60 has reached the secondary national level. It is suitable for planting in the first accumulative temperate zone of Heilongjiang Province.

Keywords: good quality; *japonica*; Songjing 60; breeding

(上接第 92 页)

Research Progress of Selenium Enhancement in Wheat Agronomy

WANG Tong, ZHOU Chen-ni, WU Chang-long

(Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University/Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau(Tibet Agriculture & Animal Husbandry University), Ministry of Education/Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet/Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Tibet, Nyingchi, Tibet 860000, China)

Abstract: Selenium is an essential nutrient element for human body, and the food chain is the main way of dietary selenium intake. The dietary structure of Chinese residents is still dominated by the intake of grains, so selenium biofortification is an important measure to enhance the intake of dietary selenium and improve the nutritional level of human beings. For further research on selenium biofortification of crops, the methods and influencing factors of selenium biofortification in wheat, one of the main grain crops in China, were reviewed in the present study. Exogenous selenium application is the main measure to enhance the grain selenium content of wheat, and the type, concentration, application time and microbial control of exogenous selenium are the important factors affecting the effect of selenium enhancement of wheat crops. At present, the research on selenium-rich wheat and its industrial development in China is still in the initial stage, and the theory lags behind the practice. The relevant economic research results are less, and the scale and industrial chain has not been formed, but it has great prospects for development. In the future, the selenium enhancement measures for wheat should be optimized under the premise of not exceeding the grain selenium enhancement target value, and the input should be increased in the genetic breeding and processing of selenium-rich wheat, so as to promote the sustainable development of the whole industrial chain of selenium-rich wheat.

Keywords: exogenous selenium; wheat; agronomic enhancement