



富硒农产品研究开发助力我国营养型农业发展

汤超华^{1, 2}, 赵青余^{1, 2}, 张凯^{1, 2}, 李爽^{1, 2}, 秦玉昌¹, 张军民^{1, 2}

(¹中国农业科学院北京畜牧兽医研究所/动物营养学国家重点实验室, 北京 100193; ²农业农村部华北动物遗传资源与营养科学观测实验站, 北京 100193)

摘要: 营养是保证健康的基础。2016 年全球疾病负担研究结果显示, 饮食因素导致的疾病负担占到 15.9%, 已成为影响人群健康的重要危险因素。近年来, 我国居民营养健康状况明显改善, 但仍面临营养不足与过剩并存、营养相关疾病多发等问题, 营养与健康已经成为我国食品消费的主流需求。农业生产的根本目标是为了满足居民食物消费需求。作为食品消费最大的供给侧, 我国农业现阶段的主要矛盾已经由总量不足转变为结构性矛盾, 农业生产如何满足人民对优质食物消费需求的美好向往、适应营养健康需求, 已成为推动农业供给侧结构性改革, 实现农业现代化发展的首要问题。因此, 推动营养型优质农产品生产, 是实现农业供给侧改革、满足食品营养健康消费需求的重要途径。硒是机体抗氧化的重要成分, 最新营养与健康状况监测显示我国居民硒实际摄入量低于推荐量, 研发富硒农产品是满足我国居民食品消费营养健康需求的重要举措。本文结合前期研究基础, 从我国居民硒营养基本情况、硒的剂量生物学效应关系两方面介绍了我国富硒农产品开发的依据; 并针对我国居民硒摄入量普遍不足现状, 概述了我国富硒农产品研发基本情况, 最后对我国富硒农业发展提出了相关建议, 助力我国营养型农业发展。富硒农产品作为我国营养健康食品发展的重要组成部分, 其科学消费观的培养、全产业链的形成、质量监管及标准的制定, 对于推动我国营养型农业发展, 实现现代农业与食品产业升级, 满足人民群众对营养健康的需求、对美好生活的向往具有重要意义。

关键词: 硒; 农产品; 营养型农业; 营养健康

Promoting the Development of Nutritionally-Guided Agriculture in Research and Development of Selenium-Enriched Agri-Products in China

TANG ChaoHua^{1,2}, ZHAO QingYu^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, LI Shuang^{1,2}, QIN YuChang¹, ZHANG JunMin^{1,2}

(¹*Institute of Animal Sciences of Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Animal Nutrition, Beijing 100193*; ²*Scientific Observing and Experiment Station of Animal Genetic Resources and Nutrition in North China of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193*)

Abstract: Nutrition is the guarantee of health. The global burden of disease study in 2016 showed that the disease burden caused by dietary factors accounted for 15.9%, which has become an important risk factor affecting the health of people. In recent years, the nutritional and health status of Chinese residents has been improved significantly, but still faces the coexistence of malnutrition and supernutrition, and the frequent occurrence of nutrition-related diseases. Nutrition and health have become the mainstream demands of food consumption in China. The basic goal of agricultural production is to meet the needs of residents' food

收稿日期: 2019-01-29; 接受日期: 2019-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2018YFD050040001-02/03)、中国农业科学院科技创新工程主要农产品营养品质评价与调控协同创新子任务(CAAS-XTX20190025-08)、中国农业科学院北京畜牧兽医研究所基本科研业务费(2018-YWF-YB-5)

联系方式: 汤超华, E-mail: tangchaohua@caas.cn. 通信作者张军民, E-mail: zhjmxms@sina.com

consumption. As the biggest supply side of food consumption, the main contradiction in China's agriculture at the present stage has changed from numeric to structural. How to satisfy the people's desire for high-quality food and meet the needs of nutrition and health has become the first issue for agriculture structural reform and modernization. Therefore, promoting the production of nutritious and high-quality agricultural products is an important way to realize the reform of agriculture supply side and to meet the needs of healthy food consumption. Selenium, a key antioxidant component of organisms, its intake is insufficient in Chinese people according to the latest National Nutrition and Health Monitoring Program. Thus, the development of selenium-enriched agricultural products is important for health. In this article, we reviewed the basic information of selenium nutrition concerning the Chinese population, the dose-dependent function of selenium, and the development of selenium-enriched agricultural foods, and also provided some suggestions for selenium-enriched industry development, which might promote the development of nutritionally-guided agriculture. As one of the most important components of nutritional and healthy food development, the application of scientific concepts of consumption, the building of whole-chain production, monitoring and product standard establishment for selenium-enriched agricultural foods are critical for nutritionally-guided agriculture, which will meet the public demand for nutrition and health and also lead to a better life.

Key words: selenium; agricultural products; nutritionally-guided agriculture; nutrition and health

0 引言

健康是促进人的全面发展的必然要求，是经济社会发展的基础条件，保障全民健康，要从需求侧和供给侧两端发力。近年来我国居民营养状况不断改善，但同时，营养代谢型相关疾病发生率逐年上升。据《中国居民营养与慢性病状况报告（2015 年）》，我国成人糖尿病和高血压患病率分别为 9.7%、25.2%，2012 年全国居民慢性病死亡率为 533/100 000，占总死亡人数的 86.6%，已成为影响国家经济社会发展的重大公共卫生问题^[1]。膳食营养是影响慢性病发生的重要因素，为加强慢性病防治工作，依据《“健康中国 2030”规划纲要》，2017 年国务院办公厅印发了《中国防治慢性病中长期规划（2017—2025 年）》，提出要推动营养立法，调整和优化食物结构，倡导膳食多样化，推行营养标签，引导企业生产销售、消费者科学选择营养健康食品^[2-3]。农业是我国食品行业最大的供给侧，新形势下我国农业生产应主动适应消费需求，加大力度推进营养型优质农产品的生产。在食品消费结构升级的背景下，我国农业现阶段的主要矛盾已经由总量不足转变为结构性矛盾，营养型优质农产品发展相对滞后的问题日益凸显，农业生产如何满足人民对优质食物消费需求的美好向往、适应营养健康需求，已成为推动农业供给侧结构性改革，实现农业现代化发展的首要问题^[4]。在此背景下，我们应该充分利用精准化营养干预农业技术对农业发展带来积极影响，形成以营养需求为导向的农业生产和加工模式，构建营养健康食品供应链体系，满足人民对营养健康食品的消费需求，实现我国农业的转型升级^[5]。

营养型农业生产必须以我国国民营养现状为基

础。“营养不足与过剩并存”是我国国民营养现阶段面临的主要问题之一^[6]，在营养摄入不足方面，主要体现为部分维生素和矿物元素摄入量不足，以微量元素硒为例，据《中国居民营养与健康状况监测 2010—2013 年综合报告》，我国居民硒平均摄入量为 44.4 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[7]，低于原国家卫生和计划生育委员会规定的成人硒参考摄入量 60 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[8]。本文从硒的参考摄入量与主要膳食来源，硒的生物学剂量效应，我国富硒农产品研究开发现状等方面进行综述，并针对我国富硒农业发展提出相关建议，为推动我国营养型农业发展、保障国民营养健康提供参考。

1 硒的参考摄入量及主要膳食来源

1.1 硒的参考摄入量

硒是生物体必需的微量元素，主要以硒代半胱氨酸（selenocysteine, Sec）形式插入到硒蛋白中发挥生物学作用。部分国家对硒的参考摄入量如表 1 所示，对于 18 岁以上成年人，大部分国家的参考摄入量在 50—75 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[9]。《中国居民膳食营养素参考摄入量（2000 版）》中，成人硒的参考摄入量为 50 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[10]，主要依据为人体摄入硒 41 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 时，血浆谷胱甘肽过氧化物酶（glutathione peroxidase, GPX）活性达到饱和，设变异系数 10% 计算出我国成人的参考摄入量为 50 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。进入新世纪以后，随着对血浆硒蛋白 P（selenoprotein P, SELENOP）作为机体硒水平敏感指标的认识，2001 年和 2007 年在四川省低硒地区进行硒干预研究，结果证明：使人血浆 SELENOP 含量达到饱和的最小硒摄入量为 49 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ；因此，我国最新出版的《中国居民膳食营养素参考摄入量（2013 版）》中，成人硒的参考摄入量调整为 60 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[11]。

2017 年,原国家卫生和计划生育委员会发布了卫生行业标准《中国居民膳食营养素参考摄入量 第 3 部分:微量元素(WT/T 578.3—2017)》,规定成人硒的参考摄入量为 $60 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,是我国对硒摄入量的最新规定^[8]。

1.2 主要膳食硒含量

膳食是人体硒的主要来源,不同类别与产地地理环境对食物中硒含量影响巨大。美国农业部国家营养标准参考数据库最新统计了 6 000 余种食物中硒含量(<http://ndb.nal.usda.gov/>),英国食品标准局(<http://www.food.gov.uk/>)等类似机构也收录了一些食物中硒含量数据信息。我国的食品伙伴网(<http://db.foodmate.net/>)中收录了 1 000 余种食品的营养参数,能够实现常规食品中硒含量的在线查询。

我国定期组织对食物中营养成分进行抽样调查监测,最早在 1950 年发布了“食物成分表”,至今已经积累了涵盖数以十万计的食物数据信息库,近年来,在中国疾病预防控制中心等单位的组织下,于 2002 年、2004 年、2009 年、2017 年陆续出版了《中国食物成分表》^[12]。肉类和谷物类是对我国居民硒摄入贡献最高的两类食物。小麦和大米及相关制品是我国主要的两类谷物类食物。据《中国食物营养成分表 标准版(第 6 版 第一册)》^[12],小麦粉(代表值)硒含量为 $7.10 \mu\text{g}/100 \text{g}$,稻米(代表值)硒含量为 $2.83 \mu\text{g}/100 \text{g}$,其他代表性植物性食物硒含量如表 2 所示。此外,西北农林科技大学刘慧等^[14]通过连续调研我国 2008—2011 年不同麦区 73 份春小麦和 582 份冬小麦共计 655 份样品,利用电感耦合等离子体质谱仪对总硒含量进行测定结果发现:655 份小麦样品平均硒含量为 $6.46 \mu\text{g}/100 \text{g}$,春、冬小麦籽粒平均硒含量分别为 $6.75 \mu\text{g}/100 \text{g}$ 、 $6.42 \mu\text{g}/100 \text{g}$,小麦籽粒硒含量在不同区域表现为北部高于南部、西部高于东部。动物性食物类,据《中国食物营养成分表(2009)》,猪肉(肥瘦)、牛肉(瘦)、鸡蛋黄中硒含量分别为 $11.97 \mu\text{g}/100 \text{g}$ 、 $10.55 \mu\text{g}/100 \text{g}$ 、 $27.01 \mu\text{g}/100 \text{g}$,硒含量整体高于植物性食物,具体如表 2 所示。2018 年中国农业大学张薛勤等^[15]调研我国 10 个地区代表城市 516 份畜产品硒含量,采用原子荧光光谱法测定总硒含量,发现采自富硒区恩施的猪肉硒含量最高($23.43 \mu\text{g}/100 \text{g}$),采自西北地区西安的猪肉中硒含量较高($17.73 \mu\text{g}/100 \text{g}$),其他地区猪肉中硒含量集中在 $7\text{—}12 \mu\text{g}/100 \text{g}$;鸡肉中硒含量主要分布在 $3.6\text{—}7.3 \mu\text{g}/100 \text{g}$ 、 $14\text{—}16 \mu\text{g}/100 \text{g}$ 两个阶段。

英国萨里大学研究人员以食物中硒含量与摄入量为依据,计算各类食物对人体硒摄入的贡献,发现肉类和谷物类对英国居民硒摄入量的贡献超过 40%^[16]。尽管我国饮食习惯与英国有差异,但鉴于肉类和谷物类都是两国人民主要的动物性、植物性食物;可以预测肉类和谷物类食物也是我国居民硒摄入的主要来源,因此,积极开展富硒农产品的研究开发与利用,对于提高我国居民硒营养状况具有重要意义^[16]。

2 硒的实际摄入量与机体健康

2.1 我国居民膳食硒实际摄入量

我国居民膳食硒实际摄入量是了解我国硒营养基本情况、制定营养计划、实施干预的重要前提。2010—2013 年,中国疾病预防控制中心营养与健康所组织实施的中国居民营养与健康状况监测重大医改项目,对全国开展了调研,形成了覆盖 31 个省(自治区、直辖市) 205 个监测点约 25 万全人群、具有全国代表性的膳食营养和健康数据库^[7]。硒部分调研结果发现:我国不同地区居民平均摄入量为 $44.4 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,城市居民平均摄入量 $46.9 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,其中大城市居民平均硒摄入量 $53.9 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,中小城市居民平均硒摄入量 $45.7 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$;农村居民平均硒摄入量 $42.1 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,普通农村居民平均摄入量 $43.3 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,贫困农村居民平均摄入量 $39.3 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$;整体来看,我国居民平均硒摄入量低于推荐摄入量 $60 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[17]。

2015 年,哈尔滨医科大学地方病控制中心克山病防治研究所抽样调查了全国 30 个省(市、自治区)的城市和农村居民血清 SELENOP 含量,采集了 2 310 份样品,利用酶联免疫法测定 SELENOP 含量,发现克山病区村居民平均血清 SELENOP 含量为 $14.23 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,非病区村为 $15.28 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,两者差异显著;发达城市、普通城市和农村居民血清 SELENOP 含量分别为 16.54、14.94 和 $14.45 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,发达城市显著高于普通城市和农村;硒摄入不足是我国居民现阶段营养状况面临的主要问题之一^[17]。

2.2 血硒含量与流行病学

当浓度低于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,增加的硒主要用于提高 GPX3 活性^[18],当浓度在 $100\text{—}120 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,增加的硒主要用于增加 SELENOP 含量,增强机体向外周转运硒的能力^[19]。众多流行病学调查表明,血硒水平不仅能反应膳食硒摄入量,同时与众多慢性疾病发生率密切相关^[15],本文主要介绍美国、法国及中国的几个大群体试验结果^[20-23]。

表 1 部分国家对不同人群硒的推荐摄入量^[8-9]

Table 1 Recommended selenium intake for different populations by some countries

年龄 Age	德国、奥地利 Germany, Austria		北欧国家 Nordic countries		新西兰、澳大利亚 New Zealand, Australia		美国 America		英国 United Kingdom		年龄 Age		中国 China	
	RDA	UL	RDA	UL	RDA	UL	RDI	UL	RDA	UL			EAR	RNI
婴儿 ^a (月) Baby ^b (Month)	0—3	10	—			45	15	45	10	0—	0—	—	15 ^b	55
	4—6	15					15		13	0.5—	0.5—	—	20 ^b	80
	约 7—12	15	15				20	60	10	1—	1—	20	25	100
儿童 (年) Children (Year)	1—2	15	20		25	90	20	90	15	4—	4—	25	30	150
	2—4	15	25		25	90	20	90	15	7—	7—	35	40	200
	约 4—8	20	30		30	150	30	150	20	11— (男, Male)	11— (男, Male)	45	55	300
	约 8—10	30	30		50	280	40	280	30	11— (女, Female)	11— (女, Female)			
男性 (Male)	约 10—13	43	40		50	280	40	280	45	14— (男, Male)	14— (男, Male)	50	60	350
	约 13—15	60	60		70	400	55	400	45	14— (女, Female)	14— (女, Female)			
	15—18	70			70	400	55	400	70	18—	18—	50	60	400
	18—70	70	400	300	70	400	55	400	75	450	50—			
女性 (Female)	>70	70	400	300	70	400	55	400	75	450				
	15—18	60	50		60		55		60	18—	18—	50	60	400
	18—70	60	400	300	60	400	55	400	60	450	50—			
	70+	60	400	300	60	400	55	400	60	450				
妊娠期 Pregnancy	60		60		65	400	60	400			孕妇 Pregnancy	54	65	400
哺乳期 Nursing	75		60		75	400	70	400	75		乳母 Nursing	65	78	400

RDA: 推荐膳食许可量 Recommended dietary allowance; UL: 可耐受最高剂量 Tolerable upper intake levels; RDI: 参考膳食摄入量 Reference dietary intake; EAR: 平均需要量 Estimated average requirement; RNI: 推荐营养素摄入量 Recommended nutrient intake. ^a: 适宜摄入量值 Adequate intake

表 2 我国主要食物中硒含量 (μg/100 g 可食部分计)
Table 2 Selenium contents in some major food in China (μg/100 g edible part)

动物性食物 Animal food	硒含量 ^[13] Se content	植物性食物 Plant food	硒含量 ^[12] Se content
猪肉 (肥瘦) Pork	11.97	小麦 Wheat	4.05
牛肉 (瘦) Beef	10.55	小麦粉 Wheatmeal	7.10
羊肉 (肥瘦) Mutton	32.20	稻米 Rice	2.83
鸡蛋黄 Egg yolk	27.01	玉米 (鲜) Maize (raw)	1.63
猪肝 Pig's liver	19.21	大麦 Barley	9.80
猪肾脏 Pig's kidney	156.77	马铃薯 Potato	0.47
猪蹄筋 Pig's tendon	10.27	黄豆 Soybean	6.16
鸭肝 Duck liver	57.27	大白菜 Chinese cabbage	0.57
小黄花鱼 Little yellow croaker	55.20	大蒜 (白皮、鲜) Garlic	3.09
牡蛎 Oyster	86.64	红菜薹 (紫菜薹) Purple flowering stalks	8.43

美国在“第三次国家健康与营养监测调研 (National Health and Nutrition Examination Survey III, NHANES III)”期间,于 1988—1994 年对 13 887 名成人血清硒含量进行了测定,并进行了连续 12 年的随访,研究了血清硒浓度与全因、癌症及心血管疾病死亡率的关系,发现群体平均基线血清硒浓度约为 126 μg·L⁻¹,血清硒浓度与全因和癌症死亡率呈非线性关系,血清硒浓度为 130 μg·L⁻¹ 时死亡率最低,低于 130 μg·L⁻¹ 时全因死亡率与血清硒水平呈负相关,高于 130 μg·L⁻¹ 时全因死亡率与血清硒水平呈正相关^[23];该项目更新到 2006 年的数据表明,血清硒浓度为 135 μg·L⁻¹ 时,全因死亡率最低^[15,23]。法国在 1991—1993 年间开始,对 1922—1932 年出生的 1 389 名老年人血浆硒含量进行了测定,并对死亡率进行了为期 9 年的随访,结果发现对照组和死亡率高组平均血浆硒含量分别约为 87 和 80 μg·L⁻¹,血浆硒浓度每降低 15.8 μg·L⁻¹,全因死亡风险升高 56%^[22]。我国的上海女性健康研究和上海男性健康研究项目评估了膳食硒摄入量与全因、肿瘤及心血管死亡率之间的关系^[24],该研究共纳入了 133 957 例研究对象,女性和男性的随访时间分别为 13.9 年、8.37 年,平均硒摄入量分别为 45.48、51.34 μg·d⁻¹,发现膳食硒摄入量与全因和心血管死亡率呈现负相关,说明中国人群中较高的膳食硒摄入量能降低全因和心血管死亡率^[24]。上述研究未考虑人群基线硒浓度,正如美国和法国的研究,基线硒浓度不同得出的结论也不同,我国由于硒分布不均匀,以不同地域的人群为研究对象,得出的结论也可能不同。因此,关于硒与死亡风险的关系还需要更多流行

病学证据的支持,且必须将人群基线硒浓度作为重要的参考因素。

2.3 缺硒降低硒蛋白合成, 损害机体健康

缺硒被证实是克山病、大骨节病等地方性疾病发生的主要诱因。硒蛋白是硒发挥生理功能的主要形式,目前在人体内发现了 25 种硒蛋白。硒是合成硒蛋白的重要物质基础,硒摄入被转化为 Se²⁻, Se²⁻在硒磷酸合成酶 2 的作用下形成 SePO₃³⁻, 参与到 Sec-tRNA^{sec} 的合成,在密码子 UGA 的指导下将 Sec 插入到蛋白质多肽中。硒摄入不足直接导致硒蛋白合成降低,影响其生理功能的发挥。美国 Wisconsin 大学研究人员系统研究和综述了啮齿类动物体内 24 种硒蛋白转录对日粮不同含量硒 (缺乏到过量) 的响应,获得了不同硒蛋白转录的优先次序;并总结了肌肉、肝脏、肾脏及红细胞中几种主要硒蛋白转录水平或蛋白酶活性达到饱和和所需的最低日粮硒含量^[25]。笔者研究团队以猪为模型,通过饲喂缺硒日粮建立缺硒模型,模拟研究硒摄入不足对组织器官硒蛋白表达的影响,结果发现除硒磷酸合成酶 2 等少数硒蛋白之外,大部分硒蛋白转录水平在缺硒组猪心肌、骨骼肌、肝脏等组织器官较正常组均降低 (数据未发表)。

各种硒蛋白在机体内功能各异,敲除相关基因后发现动物表现为胚胎致死、出生后生存能力下降、对应激抵抗能力下降等症状^[26-27],证明硒蛋白在机体生存与生活中的重要性。根据功能,硒蛋白大致可以分为几类: GPxs 类,包括 GPx1、GPx2、GPx3、GPx4、GPx6,其功能主要是利用谷胱甘肽还原 H₂O₂, 缺硒

导致 GPxs 活性降低引发氧化应激，可能是克山病发生的主要病因之一^[28]；硫氧还蛋白还原酶类（thioredoxin reductases, TXNRDs），包括 TXNRD1、TXNRD2、TXNRD3，主要是通过消耗还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸来使氧化的硫氧还蛋白还原；脱碘酶类（deiodinases, DIOs），包括 DIO1、DIO2、DIO3，主要是通过外环、内环脱碘酶反应，促进甲状腺激素成熟；SELENOP 主要是作为硒的运输载体；SELENOR 是唯一一个含有 Sec 的甲硫氨酸亚

砷还原酶，可能在中枢神经系统中具有重要功能^[29]。SELENOF 具有类似 TXNRDs 的活性；SELENON 能与钙离子通道受体互作，影响钙离子平衡^[30]；部分硒蛋白包括 SELENOO、SELENOV 的生理功能尚不完全清楚。由此可见，硒蛋白参与机体氧化还原、内分泌、离子平衡、信号传导等多种生理过程，缺硒降低硒蛋白合成导致相应生理功能下降或丧失，使机体发生病理变化或出现临床症状，硒蛋白的主要生理功能如图 1 所示。

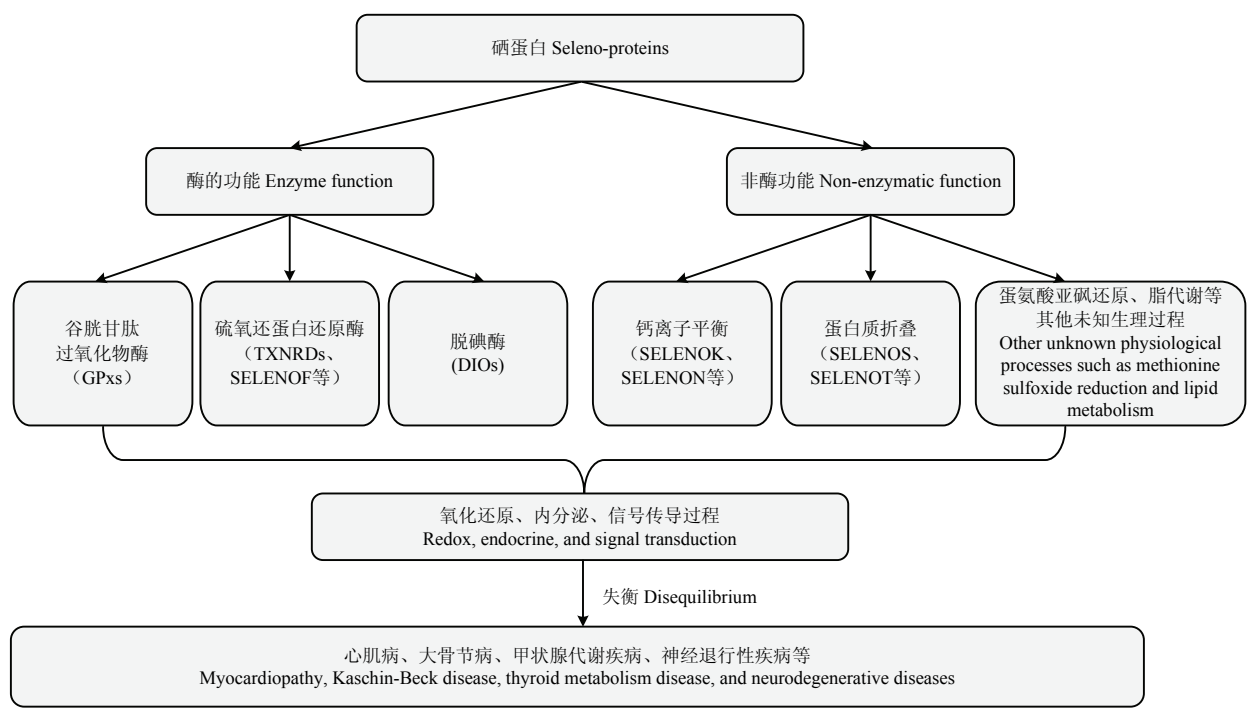


图 1 硒蛋白主要生理功能概况
Fig. 1 Summary of selenoproteins function

2. 4 硒超量摄入引发的潜在风险

美国的 NHANES III 项目期间发现高硒摄入与代谢性疾病之间的关联性^[31-32]。营养预防癌症（Nutritional Prevention of Cancer, NPC）试验中，在对照组（n=600）和干预组（n=602）基线平均硒浓度均为 114 μg·L⁻¹ 情况下，给予干预组受试者 200 μg·d⁻¹ 酵母硒，连续 7.7 年随访，对照组和干预组分别发现 39 例和 58 例 II 型糖尿病。按基线硒浓度进行三分位，三分位较低的两组，对照组和干预组患 II 型糖尿病风险无显著差异；三分位高的组，干预组患 II 型糖尿病风险高于对照组。该结果提示对基线硒浓度较低的人群补硒对预防 II 型糖尿病无显著效果，对基线较高的

人群补硒增加了患 II 型糖尿病风险^[33]。国际硒与维生素 E 预防癌症项目（Selenium and Vitamine E Cancer Prevention Trial, SELECT）研究中，该项目共包括 35 533 例男性，硒的干预剂量为 200 μg·d⁻¹，为期 5 年，受试群体硒基线浓度为 136 μg·L⁻¹，研究发现对照组和干预组的 II 型糖尿病发生风险无显著差异^[34]。结合观察性研究与干预研究，提示硒摄入量与患 II 型糖尿病风险可能同样存在“U 型”关系^[35]，血硒浓度过高时，可能通过改变氧化还原平衡影响胰岛素信号传导，这在许多模式动物上已经得到了证实^[36]。模式动物上，高硒摄入引发 II 型糖尿病发生的结果证据相对比较充足。康奈尔大学雷新根教授综述了高硒摄入引发小鼠、

大鼠、猪 II 型糖尿病发生的研究结果^[36], 认为高硒摄入主要是通过提高 GPX1 活性, 降低机体肝脏、肌肉及胰岛活性氧水平, 影响了活性氧信号的正常传导, 导致胰腺功能及机体糖脂代谢紊乱, 引发 II 型糖尿病的发生^[36]。

3 我国富硒农产品研究开发现状

基于缺硒是我国居民现阶段存在的主要营养健康问题之一, 结合我国实际情况, 充分利用资源禀赋优势发展富硒产品, 适当提高我国居民硒摄入量, 开展科学补硒行动, 对于保障营养健康具有重要意义。

3.1 我国对富硒产品的定义及相关标准制定

制定富硒产品标准, 保障产品品质, 是规范富硒产业长远发展, 保障国民健康的重要先决条件。我国富硒产品主要相关标准汇总见表 3。2011 年我国发布的《预包装食品营养标签通则 (GB 28050—2011)》规定: 凡标注“富 X”的矿物质, 其含量应在营养素参考值的 30%以上, 硒的最新参考值为 $60 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 因此, 凡标注“富硒食品”的硒含量下限必须在 $18 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ 以上^[37]。2012 年发布的《食品营养强化剂使用标准 (GB 14880—2012)》批准了亚硒酸钠、硒酸钠、硒蛋白、富硒食用菌粉、L-硒-甲基硒代半胱氨酸等添加剂作为硒营养强化剂的来源, 并规定了不同种类食品中硒的允许添加范围^[37]。管理方面, 我国已经发布了《富硒茶 (NY/T 600—2002)》^[41]、《富硒稻谷 (GB/T 22499—2008)》^[40]、《饮用天然矿泉水 (GB 8537—2008)》^[44]、《富硒农产品 (GH / T1135—2017)》^[39]、《富硒大蒜 (NY/T 3115—2017)》^[42]、《富硒马铃薯 (NY/T 3116—2017)》^[43]等国家与行业标准, 对富硒茶叶、富硒稻谷、天然矿泉水以及富硒大宗农产品中硒含量进行了规定。其中, 2017 年中华人民共和国供销合作总社发布的《富硒农产品 (GH / T1135—2017)》规定了富硒农产品, 包括谷物类、豆类、蔬菜类、肉类、蛋类等农产品硒含量和硒代氨基酸含量^[39]。此外, 我国湖北、陕西、江西等各个富硒地区也制定了相关的富硒产品地方标准。

2016 年 6 月, 原农业部批准了《富硒猪肉》农业行业标准的立项, 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所与陕西省安康市富硒产品研发中心、安康学院等多家单位合作, 正在开展《富硒猪肉》农业行业标准编制的相关工作。

3.2 我国富硒农产品开发概况

从产品开发与消费角度来讲, 充分利用天然硒资源进行富硒农产品的生产是实现我国特色农业发展, 改善硒营养状况的重要途径。在农产品硒含量与土壤硒的关系研究方面, 中国农业大学徐聪等^[45]研究了中国南方和北方两类不同硒含量地区土壤硒与农产品中硒含量的关系, 为我国区域富硒农业发展过程中作物品种选择、发展方案制定提供了重要参考。在应用端, 以区域性富硒资源为基础, 在社会各界推动下, 已经形成了以湖北恩施、陕西安康为典型, 涵盖山西、广西、宁夏、安徽、江苏、江西、河北、黑龙江等地区以及“一带一路”沿线国家泰国的“10+1”应用格局^[46]。湖北恩施和陕西安康分别被称为“世界硒都”和“中国硒谷”。据调研, 恩施土壤硒含量均值达到 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远高于全国平均水平^[47]。安康由于独特的地质地理环境, 形成了以紫阳县为中心覆盖全市范围的天然富硒带, 全域 54.2%的土壤硒含量达到中硒以上水平。近年来, 天然富硒地区充分发挥资源禀赋优势开发出一系列富硒农产品。以陕西安康市为例, 在中国农业科学院“院地合作”项目支持下, 目前已经开发出富硒紫阳茶、富硒猪肉、富硒魔芋、富硒油菜薹等多种富硒农产品, 形成了富硒农产品种植、养殖、加工等系列技术体系, 富硒产业发展势头良好, 2017 年安康市富硒产业产值达 396 亿元^[48], 是我国富硒区域发展样板。

3.3 动物性产品作为富硒农产品开发载体的特点

无机硒毒性较高, 机体耐受剂量较低, 经生物体转化后形成的有机硒相对更安全。因此, 通过动植物机体转化实现农产品中硒的富集, 是目前消费者更认可的富硒产品生产方式。稻米、小麦等大宗谷物, 以及猪肉、鸡蛋等主要畜产品, 都是目前富硒产品开发的主要对象。相比于植物性食物, 动物性食物中硒含量更高^[12,16]。以稻谷和马铃薯为例, 我国《富硒稻谷 (GB/T 22499—2008)》规定稻谷中硒含量不得少于 $4 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ^[40], 《富硒马铃薯 (NY/T 3116—2017)》规定马铃薯中硒含量不得少于 $1.5 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ^[43], 而普通猪肉中硒含量可以达到 $11.97 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ 以上^[16]。富硒植物性食物生产大多通过在富硒土壤上种植或喷洒硒肥, 提高硒向植物体内转移达到富集的目的。富硒动物性产品生产主要通过饲喂富硒饲料实现畜产品中硒的富集, 由于通过动物机体转化后畜产品中硒主要以有机形态存在, 因此

表 3 我国硒强化及富硒产品相关标准

Table 3 Standards of selenium biofortification and selenium-enriched foods in China

标准名称	产品种类	规定硒含量 (μg/100 g)
Standard names	Product category	Se content required (μg/100 g)
食品营养强化剂使用标准 Standards for the Use of Food Nutrition Enhancers (GB 14880—2012) ^[37]	调制乳粉 (儿童用乳粉除外)	14—28
	Modified milk powder (not for children)	
	调制乳粉 (仅限儿童用乳粉)	6—13
	Modified milk powder (for children)	
	大米及制品 Rice and products	14—28
	小麦粉及制品 Wheat flour and products	
	杂粮粉及制品 Cereal flour and products	
	面包 Bread	
	饼干 Biscuits	3—11
预包装食品营养标签通则 General Rules for Nutrition Label of Prepackaged Food (GB 28050—2011) ^[38]	含乳饮料 Milk beverage	5—20
	凡标注“富 X”的矿物质, 其含量应在营养素参考值的 30 % 以上, 硒的最新参考值为 60 μg, 因此, 凡标注 “富硒食品” 其硒含量下限必须在 18 μg/100 g 以上	
	For mineral substance, any product labeled with “enriched with X” should contains more that 30% of the RNV. The RNV of Se is 60 μg, so Se-enriched food should contains more than 18 μg/100 g	
	谷物类 Cereal	10—50 (硒代氨基酸>65%)
		(Selenomethionine > 65%)
	豆类 Beans	10—100 (硒代氨基酸>65%)
		(Selenomethionine > 65%)
	薯类 (干重计)	10—100 (硒代氨基酸>65%)
	Tubers (Dry weight basis)	(Selenomethionine > 65%)
富硒农产品 Se-enriched agri-products (GH/T 1135—2017) ^[39]	蔬菜类 (干重计)	10—100 (硒代氨基酸>65%)
	Vegetables (Dry weight basis)	(Selenomethionine > 65%)
	食用菌类 (干重计)	10—500 (硒代氨基酸>65 %)
	Mushroom (Dry weight basis)	(Selenomethionine > 65%)
	肉类 Meat	15—50 (硒代氨基酸>70%)
		(Selenomethionine > 70%)
	蛋类 Egg	15—50 (硒代氨基酸>70%)
		(Selenomethionine > 70%)
	茶叶 Tea	25—400 (硒代氨基酸>60%)
富硒稻谷 Se-enriched paddy rice (GB/T 22499—2008) ^[40]		(Selenomethionine > 60%)
	稻谷 Paddy rice	4—30
	茶叶 Tea	25—40
	富硒茶 Se-enriched tea (NY/T 600—2002) ^[41]	
	大蒜 Garlic	3—30
	富硒大蒜 Se-enriched garlic (NY/T 3115—2017) ^[42]	
	马铃薯 Potato	1.5—15
	富硒马铃薯 Se-enriched potato(NY/T 3116—2017) ^[43]	
	饮用天然矿泉水 Drinking natural mineral water (GB 8537—2008) ^[44]	1—5
	矿泉水 Mineral Water	

更安全。中国农业科学院北京畜牧兽医研究优质功能畜产品创新团队通过给猪饲喂亚硒酸钠、硒代蛋氨酸、甲基硒代半胱氨酸等不同形态的硒源, 研究同一水平

(0.25 mg·kg⁻¹ 日粮) 不同形态硒在猪肉中富集规律, 结果发现: 富集量以硒代蛋氨酸最高, 达到 32 μg/100 g; 同时, 猪肉中硒主要以有机形态硒为主, 其中硒代

蛋氨酸含量>70%，硒代胱氨酸含量>10%，少量以甲基硒代半胱氨酸及其他形式存在。因此，畜产品作为富硒产品开发的载体具有很大的优势^[49]。

3.4 推动我国富硒产业发展的相关建议

我国富硒产业发展迅猛，社会各界关注不断提高，本文从提高正确消费认识、科学制定补硒计划、产品标准制定 3 方面对我国富硒产业发展提出了相关建议。1.加强硒与人体健康的科学宣传，提高居民对富硒产品的正确消费认识。科学宣传引导正确消费。硒的生理功能多样，存在复杂的剂量效应，科学的宣传缺硒对人体健康的损害以及硒摄入过量存在的潜在安全风险，让消费者正确、客观地认识硒与机体健康的关系，提高居民对富硒产品的正确消费认识，是实现我国富硒产业长远发展的重要工作。2. 以不同地域人群硒摄入量为准，合理制定科学补硒计划，实现硒的精准营养。科学补硒，首先必须明晰不同地域人群硒摄入量，我国硒分布极不均匀，大多为缺硒地区，要合理制定科学的补硒计划，必须以不同地域人群硒摄入量为准，充分掌握硒的剂量生物学效应，结合富硒产品中硒的含量，提出补硒策略，实现硒的精准营养。3. 推进产品标准制定，规范富硒产业发展。富硒产品标准制定须以摄入量与生物学效应为依据，在充分了解我国居民硒摄入量现状基础上，结合流行病学、营养学、农学、产品加工等多学科专业知识，由多机构协作完成。目前，市场上标注的“富硒产品”种类繁多，产品品质参差不齐，普通消费者无法辨别其好坏，严重影响我国富硒产业的长远发展；因此，推动富硒产品标准制定，确保产品品质，莫让“劣币驱逐良币”，让真正优质的产品得以发展，是我国富硒产业发展目前亟待解决的关键问题之一。

4 展望

健康中国，营养先行，农业为本^[50]。在营养健康已成为我国居民对农产品消费主流需求背景下，富硒农产品作为我国营养健康食品的开端，其科学消费观的培养、生产加工全产业链的形成、质量监管及标准的制定，对于我国营养导向型现代农业发展具有重要意义。美味健康的农产品不仅承担了消费者对营养健康食物的美好期待，也是未来我国农业与食品加工转型升级的着力点，未来借助于社会各界通力合作，从品种选育、种植与养殖生产过程、加工与品质评价、科普宣传等多个环节入手，共同推动我国营养导向型

农业的发展，不断满足人民群众对营养健康的需求、对美好生活的追求。

References

- [1] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 中国居民营养与慢性病状况报告 (2015 年). 2015.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Report on Nutrition and Chronic Diseases of Chinese Resident (2015). 2015. (in Chinese)
- [2] 国务院办公厅. 关于印发中国防治慢性病中长期规划(2017—2025 年)的通知. 2017.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Circular on China's Medium- and Long-term Plan (2017—2025) for the Prevention and Treatment of Chronic Diseases. 2017. (in Chinese)
- [3] 国务院. “健康中国 2030”规划纲要. 2016.
The State Council of the Central Committee of the Communist Party of China. Outline of "Healthy China 2030" Program. 2016. (in Chinese)
- [4] 国务院. 关于印发全国农业现代化规划(2016-2020)的通知. 2016.
The State Council. Circular on the Issuance of the National Plan for Agricultural Modernization (2016-2020). 2016. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国国家卫生与计划生育委员会. 《“健康中国 2030”规划纲要》辅导读本. 北京: 人民卫生出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Guidance Reading of "Outline of Healthy China 2030". Beijing: People's Health Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [6] 国务院办公厅. 国民营养计划(2017-2030 年). 2017.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. National Nutrition Plan (2017-2030). 2017. (in Chinese)
- [7] 常继乐, 王宁. 中国居民营养与健康状况监测 2010-2013 年综合报告. 北京: 北京大学医学出版社, 2016.
CHANG J L, WANG N. Comprehensive Report on the Monitoring of Nutrition and Health Status of Chinese Residents 2010-2013. Beijing: Peking University Medical Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 中国居民膳食营养素参考摄入量第 3 部分: 微量元素 (WS/T 578.3—2017). 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Reference Intake of Dietary Nutrients for Chinese Residents, part 3, trace elements, (WS/T 578.3—2017). 2017. (in Chinese)
- [9] 哈特菲尔德 D L, 施魏策尔 U, 津路 P A, 格拉德舍夫 V N. 硒: 分子生物学与人体健康. 雷新根, 王福倌, Editors. 北京: 科学出版社, 2018.

- HATFIELD D L, SCHWEIZER U, TSUJI P A, GLADYSHEV V N. *Selenium: Its Molecular Biology and Role in Human Health (fourth edition)*. Xingen Lei, Fudi Wang, Editors. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [10] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2000 版). 北京: 科学出版社, 2000.
- Chinese Society of Nutrition. Reference Intake of Dietary Nutrients for Chinese Residents (2000 Edition). Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2013 版). 北京: 科学出版社, 2014
- Chinese Society of Nutrition. *Reference Intake of Dietary Nutrients for Chinese Residents (2013 Edition)*. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 杨月欣. 中国食物营养成分表 标准版. 北京: 北京大学医学出版社, 2017.
- YANG Y X. *Table of Nutritional Components of Food in China (Standard edition)*. Beijing: Peking University Medical Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [13] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成分表. 北京: 北京大学医学出版社, 2009.
- YANG Y X, WANG G Y, PAN X C. *Table of Nutritional Components of Food in China*. Beijing: Peking University Medical Publishing House, 2009. (in Chinese)
- [14] 刘慧, 杨月娥, 王朝辉, 李富翠, 李可懿, 杨宁, 王森, 王慧, 何刚, 戴健. 中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1715-1728.
- LIU H, YANG Y E, WANG C H, LI F C, LI K Y, YANG N, WANG M, WANG H, HE G, DAI J. Selenium content of wheat grain and its regulation in different wheat production regions of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1715-1728. (in Chinese)
- [15] 张薛勤, 梅晓宏, 袁长梅, 石文婷. 中国不同地区畜禽水产品硒含量分析. 中国食物与营养, 2018, 24(6): 15-19.
- ZHANG X Q, MEI X H, YUAN C M, SHI W T. Selenium content in poultry aquatic products in different areas of China. *Food and Nutrition in China*, 2018, 24(6): 15-19. (in Chinese)
- [16] RAYMAN M P. Selenium and human health. *The Lancet*, 2012, 379(9822): 1256-1268.
- [17] 张晓, 王铜, 李世娥, 冶超, 梁虹, 周慧慧, 郭中影, 韩晓敏, 吴欢, 高祥芝. 人血清硒蛋白 P 的空间生态学研究. 中国地方病防治杂志, 2017, 32(10): 1081-1084.
- ZHANG X, WANG T, LI S E, YE C, LIANG H, ZHOU H H, GUO Z Y, HAN X M, WU H, GAO X Z. Spatial ecological study on human serum selenoprotein P. *Chinese Journal of Control of Endemic Disenaces*, 2017, 32(10): 1081-1084. (in Chinese)
- [18] DUFFIELD A J, THOMSON C D, HILL K E, WILLIAMS S. An estimation of selenium requirements for New Zealanders. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1999, 70(5): 896-903.
- [19] RACHEL H, CHARLOTTEE N A, JACK R D, DAVE J H, BIRGIT T, ANDREW J G, MARTIN R B, AMY K M, SUSAN J F T. Establishing optimal selenium status: Results of a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2010, 91(4): 923.
- [20] RAY A, SEMBA R, WALSTON J, FERRUCCI L, CAPPOLA A, RICKS M, XUE Q, FRIED L. Low serum selenium and total carotenoids predict mortality among older women living in the community: The women's health and aging studies. *Journal of Nutrition*, 2006, 136(1): 172-176.
- [21] WEI W Q, ABNET C C, QIAO Y L, DAWSEY S M, DONG Z W, SUN X D, FAN J H. Prospective study of serum selenium concentrations and esophageal and gastric cardia cancer, heart disease, stroke, and total death. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 79(1): 80.
- [22] AKBARALY N T, ARNAUD J, HININGER F I, GOURLET V, ROUSSEL A M, BERR C. Selenium and mortality in the elderly: results from the EVA study. *Clinical Chemistry*, 2005, 51(11): 2117-2123.
- [23] JOACHIM B, ANA N A, ELISEO G. Serum selenium levels and all-cause, cancer, and cardiovascular mortality among US adults. *Archives of Internal Medicine*, 2008, 168(4): 404-410.
- [24] SUN J W, SHU X O, LI H L, ZHANG W, GAO J, ZHAO L G, ZHENG W, XIANG Y B. Dietary selenium intake and mortality in two population-based cohort studies of 133 957 Chinese men and women. *Public Health Nutrition*, 2016, 19(16): 2991-2998.
- [25] SUNDE R A. Selenium regulation of the selenoprotein and non-selenoprotein transcriptomes in a variety of species. *Advances in Nutrition*, 2011, 2(2): 138-150.
- [26] INGOLD I, BERNDT C, SCHEMITT S, DOLL S, POSCHMANN G, BUDAY K, ROVERI A, PENG X, PORTO F F, SEIBT T, MEHR L, AICHLER M, WALCH A, LAMP D, JASTROCH M, MIYAMOTO S, WURST W, URSINI F, ARNER E S J, FRADEJAS V N, SCHWEIZER U, ZISCHKA H, FRIEDMANN A J P, CONRAD M.

- Selenium utilization by GPX4 is required to prevent hydroperoxide-induced ferroptosis. *Cell*, 2018, 172(3): 409-422.e21.
- [27] 杨玉洁, 李楠. 硒蛋白与神经退行性疾病. 生物技术进展, 2017, 7(5): 511-517.
- YANG Y J, LI N. Selenoproteins and neurodegenerative diseases. *Current Biotechnology*, 2017, 7(5): 511-517. (in Chinese)
- [28] LOSCALZO J. Keshan disease, selenium deficiency, and the selenoproteome. *New England Journal of Medicine*, 2014, 370(18): 1756-1760.
- [29] 师腾瑞, 杨玉洁, 刘琼, 李楠. 硒蛋白 R—一个独特的甲硫氨酸亚砷还原酶. 化学进展, 2018(10): 1-6.
- SHI T R, YANG Y J, LIU Q, LI N. Selenoprotein R: A unique methionine sulfoxide reductase. *Progress in Chemistry*, 2018(10): 1-6. (in Chinese)
- [30] SHCHEDRINA V A, YAN Z, LABUNSKYY V M, HATFIELD D L, GLADYSHEV V N. Structure-function relations, physiological roles, and evolution of mammalian ER-resident selenoproteins. *Antioxid Redox Signal*, 2010, 12(7): 839-849.
- [31] JOACHIM B, ANA N A, ELISEO G. Serum selenium and diabetes in U.S. adults. *Diabetes Care*, 2007, 30(4): 829.
- [32] LACLAUSTRA M, NAVASACIEN A, STRANGES S, ORDOVAS J M, GUALLAR E. Serum selenium concentrations and diabetes in U.S. adults: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003-2004. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117(9): 1409-1413.
- [33] SAVERIO S, MARSHALL J R, RAJ N, DONAHUE R P, MAURIZIO T, COMBS G F, CAPPuccio F P, ANTONIO C, REID M E. Effects of long-term selenium supplementation on the incidence of type 2 diabetes: A randomized trial. *Annals of Internal Medicine*, 2007, 147(4): 217.
- [34] LIPPMAN S M, KLEIN E A, GOODMAN P J, LUCIA M S, THOMPSON I M, FORD L G, PARNES H L, MINASIAN L M, GAZIANO J M, HARTLINE J A, PARSONS J K, BEARDEN J D, CRAWFORD E D, GOODMAN G E, CLAUDIO J, WINQUIST E, COOK E D, KARP D D, WALTHER P, LIEBER M M, KRISTAL A R, DARKE A K, ARNOLD K B, GANZ P A, SANTELLA R M, ALBANES D, TAYLOR P R, PROBSTFIELD J L, JAGPAL T J, CROWLEY J J, MEYSKENS F L, BAKER L H, COLTMAN C A. Effect of selenium and vitamin E on risk of prostate cancer and other cancers: The Selenium and Vitamin E Cancer Prevention Trial (SELECT). *Jama*, 2009, 301(1): 39-51.
- [35] RAYMAN M P, POUND G B, BARRIUSO R P, GGUALLAR E, STRANGES S. Epidemiology of selenium and type-2 diabetes: Can we make sense of it? *Free Radical Biology & Medicine*, 2012, 53: S19-S19.
- [36] ZHOU J, HUANG K, LEI X G. Selenium and diabetes-evidence from animal studies. *Free Radical Biology & Medicine*, 2013, 65(6): 1548-1556.
- [37] 中华人民共和国卫生部. 食品营养强化剂使用标准 (GB28050—2011). 2012.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Standards for the Use of Food Nutrition Enhancers (GB28050-2011). 2012. (in Chinese)
- [38] 中华人民共和国卫生部. 预包装食品营养标签通则 (GB28050—2011). 2011.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. General Rules for Nutrition Label of Prepackaged Food (GB28050-2011). 2011. (in Chinese)
- [39] 中华全国供销合作总社. 富硒农产品 (GH/T 11135—2017). 2017.
- China National Supply and Marketing Cooperative. Se-enriched Agri-products (GH/T 11135-2017). 2017. (in Chinese)
- [40] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 富硒稻谷 (GB/T 22499—2008). 2008.
- General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Se-enriched Paddy Rice (GB/T 22499-2008). 2008. (in Chinese)
- [41] 中华人民共和国农业部. 富硒茶 (NY/T 600—2002). 2002.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Se-enriched Tea (NY/T 600-2002). 2002. (in Chinese)
- [42] 中华人民共和国农业部. 富硒大蒜 (NY/T 3115—2017). 2017.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Se-enriched Galic (NY/T 3115-2017). 2017. (in Chinese)
- [43] 中华人民共和国农业部. 富硒马铃薯 (NY/T 3116—2017). 2017.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Se-enriched Potato (NY/T 3116-2017). 2017. (in Chinese)
- [44] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饮用天然矿泉水 (GB 8537—2008). 2008.
- General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Drinking natural mineral water (GB 8537-2008). 2008. (in Chinese)

- [45] 徐聪, 刘媛媛, 孟凡乔, 吴文良, 郭岩彬, 李花粉. 农产品硒含量及与土壤硒的关系. *中国农学通报*, 2018, 34(7): 96-103.
- XU C, LIU Y Y, MENG F Q, WU W L, GUO Y B, LI H F. Selenium content in agricultural products and its relationship with soil selenium. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(7): 96-103. (in Chinese)
- [46] 中国功能农业产业发展研究组. 2019 中国功能农业产业发展报告. Research Group on the Development of Functional Agricultural Industry in China. Report on the Development of China's Functional Agricultural Industry in 2019. (in Chinese)
- [47] 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]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- GUO Y. Geochemistry of selenium in Enshi area and experimental study of selenium-enriched cultivation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese)
- [48] 人民日报. 安康 卖资源走向卖品牌 (在习近平新时代中国特色社会主义思想指引下——新时代新作为新篇章). 2018. <http://cpc.people.com.cn/n1/2018/1127/c64387-30423315.html>.
- People's Daily. Ankang From Selling Resources to Selling Brands (Guided by Xi Jinping's Thought of Socialism with Chinese Characteristics in the New Era—New Era as a New Chapter). 2018, <http://cpc.people.com.cn/n1/2018/1127/c64387-30423315.html>. (in Chinese)
- [49] ZHANG K, GUO X Q, ZHAO Q Y, HAN Y S, ZHAN T F, LI Y, TANG C H, ZHANG J M. Development and application of a HPLC-ICP-MS method to determine selenium speciation in muscle of pigs treated with different selenium supplements. *Food Chemistry*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125371>
- [50] 唐华俊. 中国营养型农业发展正当其时. 高科技与产业化, 2018(7): 6-8.
- TANG H J. The development of nutritional agriculture in China is just in time. *High-Technology and Industrialization*, 2018(7): 6-8. (in Chinese)

(责任编辑 赵伶俐)