

我国富硒农产品与土壤标准研究^①

王张民^{1,2}, 袁林喜¹, 朱元元¹, 李飞¹, 袁丽君¹, 黄阳¹, 段增强², 刘丽³, 尹雪斌^{1*}

(1 江苏省硒生物工程技术研究中心, 江苏苏州 215123; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 山西省农业科学院果树研究所, 太原 030031)

摘要: 硒是人和动物生命活动必需的微量元素, 缺硒可影响人体健康并导致诸多疾病。通过富硒农产品补硒是一种简单而有效的方法。本文从硒对人体的健康功效、居民硒的摄入量状况、土壤硒分布与作物硒吸收特征、富硒土壤研究现状、富硒农产品标准、富硒农产品中硒摄入量安全性评估等方面, 进行了系统研究, 阐述了研制富硒土壤分类标准的必要性。

关键词: 硒; 土壤; 作物; 农产品; 标准

中图分类号: S-O; Q945.14; TS2 文献标识码: A

硒是人类和动物生命活动中必需的微量元素, 硒具有抗氧化、抗肿瘤、抗衰老等多种生物学功能, 人和动物体缺硒会导致人类克山病、大骨节病, 动物的白肌病等疾病的产生, 除此以外一些癌症、地方性甲状腺障碍等也与低硒环境密切相关^[1-6]。世界范围内土壤中硒分布极不均匀^[7-13], 根据我国生态景观硒界限的分类, 我国有 70% 的地区属于缺硒地区, 自东北向西南横跨我国 22 个省份, 存在一个天然的缺硒地带^[14-22]。植物对硒的吸收主要来源于土壤, 土壤缺硒导致农作物硒含量偏低。缺硒严重威胁人类健康, 适量补硒能促进人体健康, 硒的生物学功能的发挥主要取决于其有机形态, 有机硒与无机硒相比具有吸收利用率高、毒性低等优点, 且通过膳食补充有机硒是更安全的补硒方式。然而目前, 我国市场上富硒产品名目繁多, 富硒产品标准体系不健全, 富硒相关标准并不统一, 同种产品硒含量范围不一致, “含硒”和“富硒”概念混淆, 产品中直接添加无机硒等是目前硒产业发展需要解决的问题。目前富硒产品并没有国际标准, 其余国家也没有相应的富硒国家标准, 更没有认证标准。中国是富硒产品标准最多、最全面的国家, 其中全国供销行业标准《富硒农产品 GH/T 1135-2017》是我国最全面的硒标准, 其中对富硒农

产品的硒含量与硒形态有了全面要求。然而, 按照现有富硒土壤硒含量的参考划分标准, 对于相当部分总硒含量达到相应富硒标准的土壤, 在此土壤上栽培出的农产品硒含量并不能达到富硒农产品行业标准的标准, 这主要是因为农产品对土壤中硒的吸收、转化与植物种类、土壤硒含量、土壤质地、pH、Eh、水分含量等因素有关^[23-38]。因此, 有必要研制富硒土壤的分类标准, 研究什么样的土壤类型、硒含量、土壤理化指标以及种植什么样的农作物可以达到《富硒农产品 GH/T 1135-2017》中对富硒农产品的硒含量与硒形态标准的规定。

1 硒摄入量的标准状况

1817 年, 瑞典化学家 J.J. Berzelius 从硫酸厂铅室底部的红色粉状物质中首次发现硒(selena), 其名寓意月亮女神; 1934 年, 美国怀俄明州和南达柯他州农业站发布了一份关于动物因食用高硒植物而患碱毒症和蹒跚盲的报告引起学界的重视, 随后, 科学家们开始开展硒元素的生理作用研究; 1957 年, 德国科学家 K. Schwarz 证实硒对肝脏有很强的保护作用; 与此同时, 大量研究表明硒的缺乏将直接导致多种疾病的发生; 1973 年, 美国科学家 J.T. Rotruck 在

基金项目: 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, 桂科 AA17202027-3)、山西省农谷建设科研专项(SXNGJSKYZX201706)、山西省重点研发计划重点项目(201703D211001-01-02)和山西省晋中市科技成果转化与应用计划项目(T171006)资助。

* 通讯作者(xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 王张民(1988—), 男, 江苏如皋人, 博士, 主要从事功能农业研究。E-mail: wzmwzm@mail.ustc.edu.cn

分子水平上揭示了硒的生物活性形态——谷胱甘肽过氧化酶(GPx),指出人体缺硒将导致谷胱甘肽过氧化酶活性降低,这一发现首次确认硒的生理作用;同年,中国科学家杨光圻等人发现克山病区居民血硒和发硒浓度均低于非病区,首次提出克山病可能是由于硒的摄入量过低导致的^[1]。1973年,世界卫生组织(WHO)确认:硒是人类和动物生命活动必需的微量元素^[2]。1981年,杨光圻等人调查湖北恩施高硒区的人群脱发脱甲病发现其与过高的硒摄入密切相关^[1]。因此,尽管微量元素硒对人体发挥着重要的生理功能,

但是摄入过高或过低都会导致健康风险,故其在微量元素的研究与应用中具有特殊的地位。

人体缺硒会不健康,摄入过量会中毒,随着人们对补硒安全性的不断深入的认识,对富硒农产品的品质要求将会更高,食用符合要求的富硒农产品是适量补硒的最佳选择。1988年10月,中国营养学会把硒列为15种每日必需的营养素,建议每日补充50~250 μg。2013年做了修订,对成人而言,每天硒的推荐摄入量(RNI)和可耐受最高摄入量(UL)分别定为60 μg/d和400 μg/d(表1)。

表1 中国居民硒营养素参考摄入量(μg/d)
Table 1 Referenced selenium intake of Chinese residents

| 人群 | 平均需求量 EAR | 推荐摄入量 RNI | 适宜摄入量 AI | 可耐受最高摄入量 UL |
|------|-----------|-----------|----------|-------------|
| 0岁 | - | - | 15 | 55 |
| 0.5岁 | - | - | 20 | 80 |
| 1岁 | 20 | 25 | - | 100 |
| 4岁 | 25 | 30 | - | 150 |
| 7岁 | 35 | 40 | - | 200 |
| 11岁 | 45 | 55 | - | 300 |
| 14岁 | 50 | 60 | - | 350 |
| 18岁 | 50 | 60 | - | 400 |
| 孕妇 | 54 | 65 | - | 400 |
| 乳母 | 65 | 78 | - | 400 |

中国营养学会对成人的硒摄入推荐量为60~400 μg/d,中国除硒中毒区以外的大部分地区、沙特阿拉伯、捷克共和国、布隆迪(非洲)、新几内亚(岛)、尼泊尔、克罗地亚、埃及、巴西、印度、比利时、法国、塞尔维亚、斯洛维尼亚、土耳其、波兰、瑞典、德国、西班牙、葡萄牙、丹麦、斯洛伐克共和国、希腊、荷兰、意大利、奥地利、爱尔兰、韩国等多达29个国家或地区的成人日硒摄入量都显著低于60 μg/d,出现硒的“隐性饥饿”问题;仅有澳大利亚、新西兰、瑞士、芬兰、日本、美国、加拿大、委内瑞拉等8个国家的成人日硒摄入量在60~400 μg/d范围内,为硒摄入充足国家;但在中国恩施等高硒地区的成人日硒摄入量却高达4990 μg/d,为硒摄入过量地区。可见,硒的摄入量在全球分布是极不均匀的,大多数国家都处于硒摄入量不足的“隐性饥饿”状态。

2 土壤硒分布与作物硒吸收特征

植物是人和动物摄入硒营养的主要来源,植物对硒的吸收主要来源于土壤。硒在地壳中的丰度为0.05 mg/kg,属于稀有分散元素。硒在土壤中分布极不均

匀,其平均含量为0.4 mg/kg,变化范围0.01~2.0 mg/kg,在高硒土壤中可达到1200 mg/kg^[7-10]。芬兰的土壤中硒含量为0.005~1.24 mg/kg,苏格兰0.12~0.88 mg/kg,新西兰0.1~4 mg/kg,美国<(0.1~4.3) mg/kg,挪威3~6 mg/kg,印度高硒地区1~19.5 mg/kg^[11]。世界上有40多个国家和地区缺硒,其中包括中国、芬兰、丹麦和俄罗斯(东部和中部西伯利亚)等,典型的高硒地区包括:美国落基山脉和北部平原地区,加拿大的艾伯塔省和马托尼省,印度旁遮普地区,墨西哥部分地区,欧洲的爱尔兰和北威尔士地区和澳洲的昆士兰地区^[12-13]。中国的土壤硒含量平均值为0.29 mg/kg,变化范围0.05~0.99 mg/kg^[14-15]。北京的硒含量为0.28 mg/kg,甘肃0.045~0.40 mg/kg,广东0.03~1.42 mg/kg,广西0.55 mg/kg,黑龙江0.035~0.36 mg/kg,湖北恩施0.41~9.67 mg/kg^[16-21]。在中国存在一条从东北到西南的低硒土壤带,包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、北京、山东、甘肃、西藏、四川、云南和浙江等省份的部分地区^[22]。最早发现的两个高硒地区分别是湖北恩施和陕西紫阳,于1963年和1980年发生过人群硒中毒现象。硒在土壤中的含量主要与土壤类型、土壤母质、有机质含量、

pH、氧化还原条件等因素有关,其中有机质可以吸附硒,防止硒被淋溶掉^[23-25]。

硒在土壤中的形态按硒的价态可以分为:硒化物和有机硒(-2价)、元素硒(0价)、亚硒酸盐(+4价)和硒酸盐(+6价)。Elrashidi等^[26]研究表明: $pE+pH>15$ 碱性氧化条件下的土壤中硒酸盐为硒的主要形态; $7.5<pE+pH<15$ 偏酸性的土壤中则以亚硒酸盐为主; $pE+pH<7.5$ 强酸性或还原性土壤中硒化物或有机硒是硒的稳定价态。按硒浸提的难易程度可分为:水溶态硒、可交换态硒、铁锰结合态硒、有机结合态硒和残渣态硒。一般土壤中主要以有机结合态硒和残渣态硒为主,水溶态硒和可交换态硒较少,如恩施高硒地区有机结合态硒和残渣态硒分别占土壤总硒含量的26%和42%,而水溶态和可交换态硒仅占3%和12%^[27];江苏的低硒土壤中有有机结合态硒和残渣态硒共占70%~80%,而水溶态硒和可交换态硒仅占4%~9%和9%~15%^[28]。土壤的理化性质影响硒的形态分布,如有机质含量、黏土矿物和铁锰氧化物等^[29]。

植物吸收硒的量不仅与土壤硒总量有关,更与硒的生物可利用性有关。土壤中硒的生物可利用性,主要由硒的形态、pH、氧化还原、黏土含量、矿物含量等因素决定。研究表明不同形态的硒生物可利用性由低到高分别为:硒化物<元素硒<亚硒酸盐<硒代半胱氨酸<硒代甲硫氨酸<硒酸盐^[8,10]。硒酸盐易溶于水,其生物有效性最高,但也最易淋溶;亚硒酸盐易溶于水,但由于土壤中氧化铁或氢氧化铁对其强烈的吸收作用^[30],生物有效性相对较低;硒化物难溶于水,植物难以吸收;有机硒如硒代半胱氨酸和硒代甲硫氨酸的生物有效性较高。Kikkert和Berkelaar^[31]研究表明,在水培条件下,小麦和油麦菜对于硒代半胱氨酸和硒代甲硫氨酸的吸收速率明显高于亚硒酸盐。Cartes等^[32]研究表明硒酸盐处理组的黑麦草硒含量是亚硒酸盐处理组的20~60倍。高黏土、氧化铁和有机质含量会吸附固化硒从而降低其生物可利用性。水溶态硒含量是硒生物可利用性的重要指标^[8,22,29]。一般土壤中水溶态硒占总硒含量0.3%~7%,含量为<0.1 mg/kg^[8]。

植物对土壤中硒的吸收还与植物种类、土壤硒含量、土壤质地、pH、Eh、水分含量等因素有关。Johnsson^[33]发现随着土壤中黏土含量增加,植物对硒的吸收量下降。植物吸收硒的主要形式为硒酸盐和亚硒酸盐。由于硒与硫的化学性质相似,植物吸收硒酸盐主要通过硫酸盐的转运载体^[34];而研究表明没有

亚硒酸盐的相应转运载体,植物对亚硒酸盐的吸收属于被动运输,因而大多数植物对硒酸盐的吸收能力高于亚硒酸盐^[35-37]。硒进入植物体内后主要以硒酸盐的形式向上转运^[38]。植物吸收亚硒酸盐后,绝大部分硒立即转化为有机形态,存储在植物根部^[38]。

植物是人和动物摄入硒营养的主要来源,而农作物对土壤中硒的吸收程度取决于硒的形态及其有效性,而大多数硒以矿物晶格形态存在难以被作物利用,这就制约着食物中硒的营养状况。

3 富硒土壤及农产品标准

3.1 富硒土壤研究现状

目前国内并没有对土壤中的硒素安全阈值展开系统研究,更没有土壤中硒素的含量阈值标准和评价指标。有限的科学研究如下:

1) 李家熙等^[39]根据全国土壤地球化学的调查数据在土壤类型上的硒含量分布特征,将土壤划分为极低硒土壤(<0.1 mg/kg)、低硒土壤(0.1~0.2 mg/kg)、中硒土壤(0.2~0.4 mg/kg)、高硒土壤(>0.4 mg/kg)。

2) 贾十军^[40]依据安徽省土壤硒元素含量分布为基础提出土壤总硒含量0.14 mg/kg为极缺乏硒土壤,0.20~0.29 mg/kg为缺乏硒土壤,0.29~0.35 mg/kg为足硒土壤,0.35~3.00 mg/kg为富硒土壤,3.00 mg/kg为硒过量土壤。

3) 申锐莉等^[41]参考李家熙等^[39]对土壤硒含量的划分标准,将江汉平原土壤硒含量划分为4级:低硒土壤(<0.2 mg/kg)、中硒土壤(0.2~0.4 mg/kg)、富硒土壤(0.4~3.0 mg/kg)和硒过剩土壤(≥ 3.0 mg/kg)。

4) 赵书军等^[42]对烟叶种植土壤全硒含量自主分类为:<0.125 mg/kg为缺硒土壤,0.125~0.175 mg/kg为少硒土壤,0.175~0.45 mg/kg为足硒土壤,0.45~2.00 mg/kg为富硒土壤,2.00~3.00 mg/kg为高硒土壤、>3.00 mg/kg为过量硒土壤。

目前对土壤中全硒含量的分类依据主要来自于李家熙等^[39],主要是根据不同土壤类型中的总硒含量予以分类的;而其他的研究均是依据这个基础略有变化,但是都没有给出令人信服的依据。很显然,目前对土壤硒含量的分类研究并不是从安全的角度出发的,仅仅从土壤总硒含量的特征分布的角度出发。然而,仅从总硒含量这一单独指标并不能保证栽培出的作物中的硒含量达到相应富硒标准。土壤中硒的总量只能看作是土壤的潜在供应能力和储量的指标,植物能直接吸收、利用的是土壤溶液中的有效态硒,大量的研究证明作物中硒的含量与土壤中有效态的

含量呈显著正相关关系,而与土壤全硒含量无明显相关性^[43]。

3.2 富硒农产品标准

随着对土壤中硒素合理、安全利用的重视,对土壤中硒素安全阈值的评价成为迫切的问题。土壤硒素安全阈值评价的第一要素是农产品的硒含量标准。目前关于富硒农产品的硒含量标准分为3个层级:国家标准(富硒稻谷)、行业标准(硒营养强化盐、富硒茶、富硒农产品供销行业标准)、地方标准。部分标准如下:中华人民共和国国家标准 GB/T 22499—2009《富硒稻谷》;中华人民共和国供销合作行业标准 GH/T 1135—2017《富硒农产品》;中华人民共和国轻工行业标准 QB 2238.3—2005《强化营养盐 硒强化营养盐》(已废止);中华人民共和国农业行业标准 NY/T 600—2002《富硒茶》;湖北省地方标准 DBS 42/002—2014《富有机硒食品硒含量要求》;陕西省地方标准 DB 6109.1—2012《富硒食品与其相关产品硒含量标准》;江西省地方标准 DBD36/T 566—2009《富硒食品硒含量分类标准》;广西省地方标准 DB45/T 1061—2014《富硒农产品 硒含量分类要

求》;江苏省地方标准 DB32/T 706—2004《富硒稻米》;浙江省地方标准 DB33 345—2002《富硒稻米》;安徽省地方标准 DB34/T 847—2008《富硒大米》。

其中大部分标准制定中只规定了农产品的硒含量,未规定有机硒含量,仅湖北省食品安全地方标准《富有机硒食品硒含量要求》(DBS 42/002—2014)中规定了有机硒含量。但此标准是利用差减法测定富硒农产品中的有机硒含量,对于具体的硒形态并不清楚。

目前最新的标准是由全国供销总社于2017年5月发布,由苏州硒谷科技有限公司、中国科学技术大学、中科院南京土壤研究所、苏州大学等起草的《富硒农产品》(GH/T 1135—2017),其中对谷物类、豆类、薯类、蔬菜类、食用菌类、肉类、蛋类、茶叶等8个品系的农产品中的硒含量予以规范,而且对其中的硒代氨基酸的含量占比也进行了科学的规范(表2),一方面设定总硒含量标准确保富硒农产品的食用安全,另一方面设定硒代氨基酸的含量标准确保富硒农产品中硒的作物转化来源,防止造假的出现,是目前国内对富硒农产品的硒含量和形态最为科学、完整的行业标准。

表2 富硒农产品的硒含量和硒代氨基酸含量(占比)指标

Table 2 Selenium contents and ratios of seleno-amino acids in selenium enriched agricultural products

| 农产品 | 总硒含量(mg/kg) | 硒代氨基酸含量占总硒含量的百分比(%) |
|------------|-------------|---------------------|
| 谷物类 | 0.10~0.50 | >65 |
| 豆类 | 0.10~1.00 | >65 |
| 薯类(以干重计) | 0.10~1.00 | >65 |
| 蔬菜类(以干重计) | 0.10~1.00 | >65 |
| 食用菌类(以干重计) | 0.10~5.00 | >65 |
| 肉类 | 0.15~0.50 | >70 |
| 蛋类 | 0.15~0.50 | >70 |
| 茶叶 | 0.25~4.00 | >60 |

注:硒代氨基酸含量是指硒代蛋氨酸、硒代胱氨酸和硒甲基硒代半胱氨酸总含量。

3.3 富硒农产品中硒摄入量安全性评估

按照中国营养学会推荐每天膳食摄入量,谷物250~400 g、蔬菜300~500 g、畜禽肉类40~75 g、水产品类40~75 g、蛋类40~50 g。按《富硒农产品》(GH/T 1135-2017)标准设定下限值计算硒的摄入量为:谷物250 g(25 μg)+蔬菜300 g(4.5 μg,含水率按85%计算)+畜禽肉类40 g(6 μg)+水产品类40 g(6 μg)+蛋类40 g(6 μg)=47.5 μg。在正常膳食量情况下,食用达到《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)标准设定下限值硒含量的农产品,日硒摄入量接近世界卫生组织(WHO)推荐健康成年人每天硒的摄入量50 μg的下限值,但考虑到并不会都食用标准下限硒含

量的农产品,因此硒的日摄入量可满足中国营养学会推荐的日硒摄入量下限60 μg的要求。硒的摄入量上限设置:谷物400 g(200 μg)+蔬菜500 g(75 μg,含水率按85%计算)+畜禽肉类75 g(37.5 μg)+水产品类75 g(37.5 μg)+蛋类50 g(25 μg)=375 μg。硒含量上限设置主要考虑食物安全性,按最大膳食量,硒的摄入量也会在最大安全摄入量(400 μg/d)之内,离最高界限中毒剂量(800 μg/d)保留很大的安全空间。

硒的最高安全剂量为400 μg/d,但是在现实生活中通过正常饮食摄入这样高水平的硒是很难达到的。按江苏省硒生物工程技术有限公司目前的实践经验,富硒农产品的硒含量总体不会很高,检测的337个农

产品样品,约 80% 的农产品硒含量都在 0.50 mg/kg 以下,只有西兰花、茶叶、食用菌、玉米、小麦等少数农产品硒含量会超过 0.50 mg/kg(数据未发表)。所以在现实生活中,除了过量食用富硒药品或保健品外,食用富硒农产品一般不会中毒。按一般膳食摄入量符合《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)标准要求的最高硒含量要求的富硒农产品时,所摄入的硒剂量控制在“膳食硒安全摄入量”(400 $\mu\text{g}/\text{d}$)以内。凡经检验符合《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)标准的富硒农产品,长期食用,可建立合理的硒储备,有效改善人体硒营养水平,提高人体防病抗病能力。

4 讨论

目前亟需对我国富硒土壤予以分类,可以将土壤中能种植出达到《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)中对应农产品硒含量和硒形态标准的区域圈定为标准富硒土壤区,一方面确保农产品硒含量与硒形态安全,另一方面可以合理高效开发利用富硒土壤。提出硒总量以及硒形态含量要求还远远满足不了产业发展的需求,面对富硒产品生产的乱象,还应加大硒形态分析研究的投入力度,加快制定硒形态分析检测标准的步伐^[44-45]。此外,对于土壤中不能种植出达到《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)中对应农产品硒含量和硒形态标准的区域,目前可以通过土壤生态系统健康指标模型予以评价,识别出由于土壤中硒含量过高或过低所带来的生态风险因素,从而进行科学应对,予以改造后合理利用。

土壤硒素安全阈值评价的第二要素是土壤生态系统健康标准。土壤生态系统健康是指土壤生态系统内部各部分功能及运转没有受到损害(如微生物区系),系统对来自于外部或自然长期干扰效应具有抵抗力和恢复力^[46-47]。一般而言,土壤生态系统健康指标通常包括:植被覆盖、土壤有机质、生物活性和土壤生物多样性、土壤结构和多孔性、有效水容量、植物可利用的养分、阳离子交换量、土壤酸度、土壤盐度、根系深度^[48]。作为特征性指标,固氮细菌、总微生物生物量、土壤呼吸、脱氢酶活性及土壤微生物的腐殖化活性可作为土壤质量的敏感指示物^[49]。此外,线虫已经被认为是反映土壤健康状况的代表性指示生物,研究显示线虫作为食物链中的重要成员广泛存在于土壤中,既有与原生动物、蚯蚓等生物一样的重要作用,如分解土壤有机质、促进养分循环、改善土壤结构、影响植物生物量等;又有独自的特点,如个体微小、分布广泛、种类数量繁多、营养类群丰富、

形态特殊、食物专一性、分离鉴定相对简单,以及对土壤环境的各种变化包括污染胁迫效应能做出较为迅速的反应等特点^[50]。

因此,通过对典型富硒土壤进行不同连续提取方法,研究土壤中生物有效硒含量和结合态特征,同时关注生物有效硒组分中重金属含量及其结合态特征,以及不同硒含量和重金属含量对其土壤微生物组成的影响;然后通过典型富硒土壤的作物种植模式,确定不同作物对生物有效硒组分的吸收、积累特征,根据全国供销行业标准《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)中对富硒农产品的硒含量与硒形态的标准,以及食品安全国家标准《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2012)中的重金属限量标准,构建土壤硒素安全利用评价模型,制定富硒土壤分类标准,指导富硒土壤的科学利用。

5 总结

硒是人类和动物生命活动中必需的微量元素,人和动物体缺硒会导致诸多疾病。我国有 70% 的地区属于缺硒地区,土壤缺硒导致农作物硒含量偏低,而造成人的“隐性饥饿”,进而影响人体健康。针对缺硒现状,我国市场上存在繁多富硒产品,然而富硒产品标准体系不健全,富硒相关标准并不统一,其中全国供销合作行业标准《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)是我国最全面的硒标准,其中对富硒农产品的硒含量与硒形态有了全面要求。然而,按照现有富硒土壤硒含量的参考划分标准,对于相当部分总硒含量达到相应富硒标准的土壤,在此土壤上栽培出的农产品硒含量并不能达到富硒农产品行业标准的要求,因此,有必要研制我国富硒土壤分类标准。

参考文献:

- [1] 袁丽君,袁林喜,尹雪斌,等. 硒的生理功能、摄入现状与对策研究进展[J]. 生物技术进展, 2016, 6(6): 396-405
- [2] 彭祚全,黄剑锋. 世界硒都恩施硒资源研究概述[M]. 北京:清华大学出版社, 2012
- [3] 梁立军. 微量元素与人体健康[J]. 医学理论与实践, 2008, 21(3): 782-783
- [4] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. The Lancet, 2000, 356: 233-241
- [5] Coppinger R J, Diamond A M. Selenium deficiency and human disease//Hatfield D L. Selenium: Its molecular biology and role in human health[M]. Springer US, 2001: 219-233
- [6] Gore F, Fawell J, Bartram J. Too much or too little? A review of the conundrum of selenium[J]. Journal of Water & Health, 2010, 8(3): 405-416

- [7] Fleming G A. Essential micronutrients II: Iodine and selenium//Davis B E. Applied soil trace elements[M]. New York: Wiley, 1980: 199–234
- [8] Jacobs L W. Selenium in agriculture and the environment[M]. SSSA, Madison: Soil Science Society of America Special Publication, 1989
- [9] Mayland H F, Frankenberger W T J, Benson S. Selenium in plant and animal nutrition[J]. Selenium in the Environment, 1994: 29–45
- [10] Neal R H. Selenium//Alloway B J. Heavy metals in soils[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1995: 260–283
- [11] Fordyce F M. Selenium deficiency and toxicity in the environment// Selinus O. Essentials of Medical Geology[M]. Springer, Dordrecht, 2013: 375–416
- [12] 张学林. 硒的世界地理分布[J]. 国外医学医学地理分册:1–4, 1992
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Wu S X, Gong Z T, Huang B. Water-soluble selenium in main soil types of China and in relation to some soil properties[J]. China Environ. Sci., 1997, 17: 522–525
- [16] Yang G Q, Wang S Z, Zhou R H, et al. Endemic selenium intoxication of humans in China[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1983, 37: 872–881
- [17] Zhu C F, Jia S C. An investigation of soil selenium background value in Gansu Province[J]. Environ. Study Monit., 1991, 14: 4–7
- [18] Zhang H H, Wu Z F, Yang C L, et al. Spatial distributions and potential risk analysis of total soil selenium in Guangdong Province[J]. China J. Environ. Qual., 2008, 37: 780–787
- [19] Ban L, Ding Y F. Distribution pattern of selenium in soils of Guangxi[J]. Environmental Monitoring of China, 1992: 98–101
- [20] Shao G Z, Guan G W. Soil selenium background values and endemic diseases in Heilongjiang, China[J]. Environmental Monitoring of China, 1993: 61–62
- [21] Sun G X, Lu 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]. Environ. Sci. Technol., 2010, 44: 6706–6711
- [22] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. Sci. Total Environ., 2002, 284: 227–235
- [23] Johnson C C, Ge X, Green K A, et al. Selenium distribution in the local environment of selected villages of the keshan disease belt, Zhangjiakou District, Hebei Province, People's Republic of China[J]. Appl. Geochem., 2000, 15(3): 385–401
- [24] Ander E L, Fordyce F M, Johnson C C, et al. Controls on the distribution of selenium in the soils of East Anglia, UK[C]. Geological Society of America Abstract Section Meeting. Baltimore, Maryland, 2010: 143
- [25] Fordyce F M, Brereton N, Hughes J, et al. An initial study to assess the use of geological parent materials to predict the Se concentration in overlying soils and in five staple foodstuffs produced on them in Scotland[J]. Sci. Tot. Environ., 2010, 408(22): 5295–5305
- [26] Elrashidi M A, Adriano D C, Workman S M, et al. Chemical equilibrium of selenium in soil: A theoretical development[J]. Soil Science, 1987, 144(2): 141–151
- [27] 吴少尉, 池泉, 陈文武, 等. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 92–95
- [28] 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉, 等. 江苏省几种低硒土壤中硒的形态分布及生物有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 355–359
- [29] Fordyce F M, Zhang G D, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China[J]. Appl. Geochem., 2000, 15: 117–132
- [30] Barrow N J, Whelan B R. Testing a mechanistic model. VIII. The effects of time and temperature of incubation on the sorption and subsequent desorption of selenite and selenate by a soil[J]. J. Soil Sci., 1989, 40: 29–37
- [31] Kikkert J, Berkelaar E. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium[J]. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 2013, 65: 458–465
- [32] Cartes P, Gianfreda L, Mora M L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms[J]. Plant and Soil, 2005, 276(1): 359–367
- [33] Johnsson L. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH[J]. Plant Soil, 1991, 133: 57–64
- [34] Anderson J. Selenium interactions in sulfur metabolism//De Kok L J, Stulen I, Rennenberg H, et al. Sulfur nutrition and sulfur assimilation in higher plants: Regulatory, agricultural and environmental aspects[M]. The Hague: SPB Academic Publishing, 1993: 49–60
- [35] Abrams M M, Shennan C, Zasoski R J, et al. Selenomethionine uptake by wheat Seedlings[J]. Agronomy Journal, 1990, 82: 1127–1130
- [36] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean-plants (*Phaseolus-Vulgaris*) [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44: 1083–1087
- [37] Leggett J E, Epstein E. Kinetics of sulfate absorption by barley roots[J]. Plant Physiology, 1956, 31: 222–226
- [38] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. New Phytol., 2008, 178: 92–102
- [39] 李家熙, 张光第, 葛晓立, 等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京: 地质出版社, 2000
- [40] 贾十军. 安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J]. 资源调查与环境, 2013, 34(2): 133–137

- [41] 申锐莉, 杨军, 徐宏林, 等. 江汉平原富硒土壤区富硒农产品及其环境效应研究[C]. 第二届重金属污染防治与风险评价研讨会. 武汉, 2012
- [42] 赵书军, 陈红华, 李锡宏, 等. 恩施烟区土壤硒分布特征及其与烟叶硒的关系[J]. 中国烟草科学, 2011, 32: 63-66
- [43] 张栋, 张妮, 侯振安, 等. 石灰性土壤硒含量与小麦籽粒硒相关性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 152-157
- [44] 汪厚银, 李志, 赵镭. 富硒产品相关标准的技术动态分析[J]. 标准科学, 2014, 11: 28-34
- [45] 王立平, 刘永贤, 李秀杰, 等. 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
- [46] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137-143
- [47] 范荣亮, 苏维词, 张志娟. 生态系统健康影响因子及评价方法初探[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 82-86
- [48] 杨晓霞, 周启星, 王铁良. 土壤健康的内涵及生态指示与研究进展[J]. 生态科学, 2007, 26(4): 374-380
- [49] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特征对土壤健康的指示作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 162-171
- [50] 赵吉. 土壤健康的生物学检测与评价[J]. 土壤, 2006, 38(2): 136-142

On Standards of Selenium Enriched Agricultural Products and Selenium-rich Soil in China

WANG Zhangmin^{1,2}, YUAN Linxi¹, ZHU Yuanyuan¹, LI Fei¹, YUAN Lijun¹, HUANG Yang¹,
DUAN Zengqiang², LIU Li³, YIN Xuebin^{1*}

(1 *Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou, Jiangsu 215123, China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 3 *Pomology Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China*)

Abstract: Selenium (Se) is an essential trace element for humans and animals. Selenium deficiency can affect human health and lead to many diseases. It is a simple and effective way to supplement Se by eating Se enriched agricultural products. This paper systematically studied the effects of Se on human health, the daily Se intake by residents, the distribution of Se in soil and the characteristics of Se uptake by crops, the researches of Se-rich soils, the standards of Se-enriched agricultural products, and the safety assessment of Se intake from Se-enriched agricultural products. The necessity of developing the classification standard of selenium-rich soil was also described in this paper.

Key words: Selenium; Soil; Crop; Agricultural product; Standard