

富硒土壤生物转硒技术的研究进展^①

印遇龙^{1,4}, 颜送贵², 王鹏祖³, 白苗苗^{1,4}, 刘红南^{1,5}

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 动物营养生理与代谢过程湖南省重点实验室, 畜禽养殖污染控制与资源化技术国家工程实验室, 中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室, 农业部中南动物营养与饲料科学观测实验站, 长沙 410125; 2 桃源县富硒产品研究所, 湖南桃源 415700; 3 东北农业大学动物科学技术学院, 哈尔滨 150030; 4 华南农业大学动物科学学院, 广州 510642; 5 湖南畜禽安全生产协同创新中心, 长沙 410128)

摘要: 本文论述了生物转硒技术的应用价值和意义, 总结了有机硒生成的专利和生物转硒的技术特点, 并对生物转硒技术的发展进行了展望。

关键词: 硒; 土壤; 生物转化

中图分类号: S181 **文献标识码:** A

硒是红细胞谷胱甘肽过氧化物酶和磷脂过氧化物酶的组成成分, 具有保护细胞膜结构与功能、抗氧化和提高机体免疫力等作用。硒的缺乏会导致谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GSH-Px)活性降低, 引起自由基和过氧化物的积累, 严重时诱发克山病。食源硒的补充可促进超氧阴离子自由基和羟自由基的清除, 保护细胞膜的流动性, 甚至具有预防心血管疾病、维持正常血压和抗衰老的作用。研发富硒的功能性食品具有广阔的应用价值和市场前景。

“富硒土壤+生物转硒技术”是一种生产富硒农产品的办法。它可以利用天然的富硒土壤, 通过生物将硒元素转化为硒营养, 将无机硒转化为有机硒, 标准化生产达标的有机硒农产品, 实现农产品的优质化、营养化和功能化。“富硒土壤+生物转硒技术”的推广和应用, 对于富硒农产品生产的规范化、标准化、产业化意义重大。

1 土壤和植物中的存在形式

不同性质的土壤中硒和外源硒有不同的形态分布特征, 不同土壤中硒的形态分布会影响植物对土壤硒的吸收利用。在探讨土壤硒的生物转化之前, 需要明确土壤的特征和其本身硒的含量和形态。

我国是一个缺硒的国家, 约 72% 的地区土壤中硒的含量不足 0.1 mg/kg。除陕西紫阳、湖北恩施等个别地区富硒之外, 我国大部分地区均处于缺硒状态。

土壤硒的含量与当地人们的健康和畜牧业生产密切相关。从目前的资料来看, 我国的低硒带呈东北-西南走向, 低硒带的西北和东南方向则为富硒带。我国土壤硒含量范围为 0.022 ~ 3.806 mg/kg, 平均值为 0.239 mg/kg, 主要土壤类型耕作土表层硒含量范围为 0.038 ~ 3.081 mg/kg, 平均值为 0.269 mg/kg^[1-2]。从东北地区的暗棕壤(均值为 0.12 mg/kg)、黑土(均值为 0.11 mg/kg)向西南方向经过黄土高原的褐土、黑垆土(均值为 0.08 mg/kg)到川滇地区的棕壤、紫色土(均值为 0.06 mg/kg)、红褐壤、红棕壤和红壤(均值为 0.09 mg/kg), 再向西南延伸到青藏高原东部和南部的亚高山草甸土和黑毡土, 低硒带内的土壤硒含量均值仅为 0.1 mg/kg, 显著低于中国其他地区的土壤硒含量。从行政区划分布来看(图 1), 中南地区土壤表层硒平均含量最高, 其值达到 0.308 mg/kg, 最大值可达 0.754 mg/kg; 华北地区土壤表层硒平均含量最低, 为 0.180 mg/kg; 且除中南、华东地区以外, 华北、西北、西南、东北地区表层土壤硒含量均低于全国平均水平。按照谭见安^[3-4]划分我国硒元素生态景观标准对中国土壤表层硒元素进行安全分级, 结果表明, 我国 11.86% 的土壤属于缺硒土壤, 21.48% 的土壤为少硒土壤, 57.98% 的土壤为足硒土壤, 8.65% 的土壤为高硒土壤, 0.036% 的土壤为过硒土壤。

土壤硒来源复杂, 受到煤层、黑色岩系、土壤有机质、沉积作用、气候、成土母质等各类因素的影响。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0501201)资助。

作者简介: 印遇龙(1956—), 男, 湖南常德人, 研究员, 主要从事动物营养与饲料的研究。E-mail: yinyulong@isa.ac.cn

硒的植物有效性指的是土壤输出硒的通量,不仅与其在土壤中的含量有关,而且取决于其在土壤中的形态和分布特征。土壤中硒的形态包含硒化物(Se^{2-})、元

素硒(Se^0)、亚硒酸盐(SeO_3^{2-})、硒酸盐(SeO_4^{2-})和有机态硒,其中,后 3 种硒形态的水溶性较好,是土壤有效硒的主要来源。

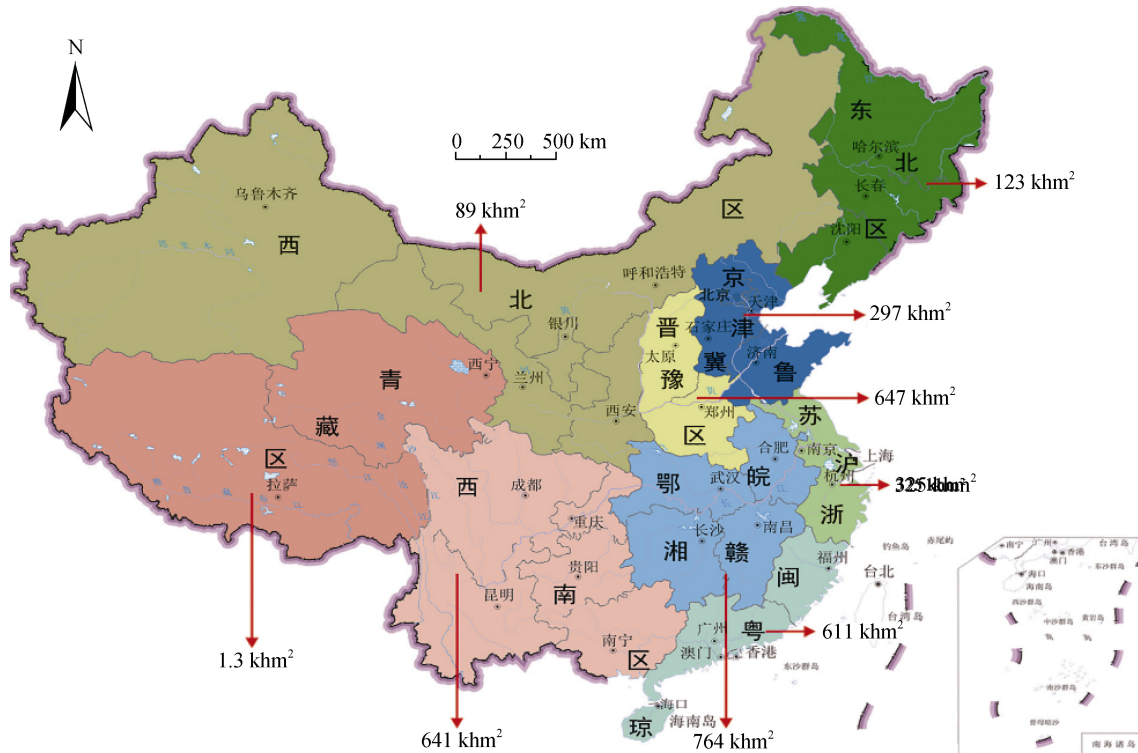


图 1 全国绿色富硒耕地分布图^[5]

Fig. 1 Distribution of green Se-rich cultivated land in China

2 无机硒-有机硒的转化原理

硒元素是人类、哺乳动物、细菌、古生菌等多种生物所必需的微量元素^[6]。虽然硒对于高等植物的必需性仍未被证实^[7],但仍有大量实验表明硒对植物抗逆性、酶活性(谷胱甘肽过氧化物酶等)、拮抗重金属等方面有影响,能够影响作物的产量、品质、种子萌发、根系活力等^[8-9]。

植物可吸收土壤中的硒酸盐(SeO_4^{2-})、亚硒酸盐(SeO_3^{2-} 、 HSeO_3^- 、 H_2SeO_3)以及有机硒(如:硒代半胱氨酸 SeCys、硒代蛋氨酸 SeMet)^[10],转运速率为硒酸盐>有机硒>亚硒酸钠^[11],但不能吸收胶质硒及金属硒化物^[12]。硒酸盐能够在植物体内快速积聚、转运至木质部,而亚硒酸盐表现出更长的时效性,吸收后在植物根部立即转化为 SeMet 等,供植物长期利用^[13]。不同植物对硒的积聚能力也不同。因此可根据植物组织中硒含量将被子植物分为 3 类:非硒积累型(10~100 mg/kg 干重)、硒指示型(100~1 000 mg/kg 干重)、高硒积累型(>1 000 mg/kg 干重)^[14]。除此之外,植物对硒的吸收主要取决于环境条件和土壤因素等,其中最重要的是土壤中硒的存在形态和含量^[15]。硒

被高等植物吸收后,在其体内形成复杂的化合物,并以多种形态共存,可分为无机硒和有机硒两大类。无机硒包含硒酸、亚硒酸及其化合物(如 HSeO_3^- 、 HSe^- 等),仅占总硒含量的 2/25 左右;有机硒包含硒代氨基酸、硒蛋白及硒多糖等生物大分子,约占总硒含量的 4/5 左右,其中以硒蛋白为主^[16]。

植物对硒的吸收、转运和形态转化机制,因硒的种类不同而不同。植物通过根系和叶片吸收硒,其中根系是主要的吸收部位。硒和硫的化学结构、性质相似,因此植物根系能够在高亲和力硫酸盐转运蛋白(high-affinity sulphate transporters, HASTs)的促进下,通过多种硫转运途径吸收硒酸盐^[17]。目前,植物对亚硒酸盐的吸收机制尚无定论,但大量实验表明植物根系可通过磷酸盐转运蛋白途径吸收亚硒酸盐,如通过水稻 OsPT2 转运蛋白吸收 HSeO_3^- ^[18],通过水稻水通道蛋白 OsNIP2;1 吸收 H_2SeO_3 ^[19]。

植物将无机硒转化为有机硒的过程可同时发生在根部和地上部分,主要在叶片叶绿体中^[20]。首先,土壤中的硒酸盐被植物根系吸附,经根细胞吸收进入植物体内,然后通过共质体和质体外途径进入木质

部,随后通过导管输送到植物叶片中。在叶片中,硒酸盐在三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)的参与下,被 ATP 硫化酶(ATP sulfurylase, APS)催化生成磷酸硒代腺苷(selenoadenosine phosphate, APSe)^[21],继而被 APS 还原酶(APS reductase, APR)还原为亚硒酸盐。因为细胞基质中存在 APS 与 APR 的同工酶,这一过程也可能发生在细胞质基质中。亚硒酸盐随后被叶绿体中的亚硒酸钠还原酶还原为硒化物^[22]。还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)通过非酶促反应也可将亚硒酸盐还原为硒化物。最后, O-乙酰丝氨酸(O-acetylserine, OAS)与硒化物在 OAS 巯基裂解酶的催化下生成 SeCys。

SeCys 进一步在多种酶的催化下生成 SeMet 和二甲基硒。首先, SeCys 与 O-磷酸高丝氨酸在胱硫醚- γ -合成酶的作用下,生成硒代胱硫醚,然后在胱硫醚- β -裂解酶的作用下转化为硒代高半胱氨酸(Se-homocysteine, Sehomo-Cys)。随后, SeCys 与 Sehomo-Cys 跨膜进入细胞质基质, Sehomo-Cys 在甲硫氨酸合成酶的催化下生成 SeMet。SeCys 与 SeMet 可参与蛋白质的合成,生成有机硒分子^[23]。而亚硒酸盐被植物根细胞吸收后,立即在根部通过上述过程生成 SeCys 和 SeMet。除上述硒的基本转化途径外,在高硒积累型植物中,还有特异性代谢途径^[21]。这类植物可以区分硫与硒,在 SeCys 甲基转移酶催化下将 SeCys 甲基化为甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys),导致其无法参与蛋白质的合成^[24]。

3 生物转硒技术的特点和应用

3.1 生物转硒技术的涵义

“生物转硒技术”是指在天然的富硒土壤地区,运用生物工程技术原理,利用动、植物作无污染天然的生化反应器,通过土壤或叶面补施硒肥或添加含硒饲料,促进生物将硒元素转化为硒营养,将无机硒转化为有机硒的方法。即在富硒地区或低硒地区,动植物生长、生殖过程中施用或添加特别研制的专利技术产品——富硒肥料(饲料),在一定的时间范围内,在相适应的温、光、水、热条件作用下,通过动植物自身的生命运动,使从土壤中吸收的硒和从叶面吸收的硒或通过饲料添加的硒与氨基酸结合而成为氨基酸硒,而富硒植物作为动物饲料的主要来源,最终实现硒在农作物和畜禽体内贮存的过程。生物转硒技术可将硒富集在果、菜、肉、蛋和籽实中,增加农产品中有机硒的含量,生产更多符合《富硒农产品》标准^[25]的农产品(表 1)。因此,生物转硒技术对促进富硒农产

品生产的规范化、标准化、产业化具有重要的意义。目前,以桃源县富硒产品研究所颜送贵为代表的研究人员经过十余年的研究与实践,深化富硒土壤转硒技术的开发与应用,获得了政府、农户和消费者的一致认可。

表 1 中华人民共和国供销合作行业标准
GH/T 1135—2017 富硒农产品

Table 1 Se-enriched agricultural products of GH/T 1135-2017
(Standard for supply and marketing cooperation of the People's Republic of China)

项目	总硒 (mg/kg)	硒代氨基酸/总硒(%)
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	>70

注:表中硒代氨基酸含量是硒代蛋氨酸、硒代胱氨酸和硒甲基硒代半胱氨酸含量之和。

3.2 生物转硒技术的要点

生物转硒技术的核心和要点是在查清土壤硒资源的基础上,科学用好富硒叶面肥或土施富硒生物有机肥。即根据土壤含硒量、土壤类型、土壤 pH、土壤矿物质成分和富硒农产品的目标硒含量,因地制宜确定叶面补硒用量或土壤施用富硒生物有机肥的用量。以富硒大米为例,大量试验研究发现,土壤硒含量为 0.4 ~ 1.0 mg/kg 的地区是生产富硒大米的适硒区。即在耕整稻田时糞口撒施富硒生物有机肥,用量 1 hm² 稻田 1 200 kg 左右,或在乳熟期使用粮油型贵西牌叶面肥,用量 1 hm² 稻田 45 包左右,可使大米硒的含量稳定在 0.3 mg/kg 的水平,比普通大米含硒量提高 4 倍以上,且低于中华全国供销合作总社发布的 GH/T1135—2017《富硒农产品》行业标准对富硒稻谷硒规定的上限标准 0.5 mg/kg。

3.3 生物转硒技术的优势

1)富硒农产品含硒量稳定。从 2007 年到 2016 年,采用生物转硒技术生产的农产品(粮油茶、果菜瓜、猪牛羊、鸡鸭鱼、食用菌等)先后送检包含了 23 类 75 种,经农业部产品质量安全监督检验测试中心(长沙)、湖南省食品测试分析中心、桃源县质量监督检验所、江苏省理化测试中心、农业部质检中心(乌鲁木齐)、PONY 谱尼测试、国家富硒产品质量监督检验中心等 12 个权威部门检测,共 2 930 个样本,有 2

856 个样品达到富硒食品标准^[26]。

2) 利于有机硒的生成。以湖南省桃源县的富硒农产品为例, 经国家富硒产品质量监督检验中心(湖北)检测, 2014 年第一届、2015 年第二届、2016 年第三届、2017 年第四届中国恩施硒产品博览会参展产品权威发布, 包括粮、油、茶、肉、蛋等富硒农产品, 其有机硒含量占总硒含量 80.46%~98.00%, 以生物分子结合态硒为主, 不仅总硒含量达到了湖南省团体

标准 T43HNF001-2017《湖南省富硒农产品硒含量要求团体标准》^[27], 且有机硒占比达 80% 以上, 超过了有机硒含量 70% 的标准要求(表 2)。

2015 年 8 月 12 日, 湖南省产品质量安全监督检验测试中心在桃源县抽查 21 个富硒农产品, 有 20 个富硒农产品达到国家标准, 其中有机硒含量全部达标(表 3)。因此, 不论动物产品还是植物产品, 通过生物转硒技术都可以增加农产品有机硒的含量。

表 2 2014—2017 中国恩施硒产品博览会参展产品权威发布(mg/kg)

Table 2 Authoritative issue of exhibitors at China Enshi Selenium Products Expo in 2014—2017

生产单位	产品名称	国检中心检测结果							
		2014 年		2015 年		2016 年		2017 年	
		总硒	有机硒	总硒	有机硒	总硒	有机硒	总硒	有机硒
兴隆米业	多维锌硒米	1.575	1.513	-	-	0.209	0.177	0.647	0.537
	富硒香米	0.201	0.197	0.296	0.254	0.187	0.160	0.5	0.428
泰香粮油	富硒香米	0.682	0.652	-	-	1.348	1.123	0.329	0.269
龙凤米业	富硒香米	-	-	-	-	0.94	0.767	1.519	1.338
龙山特种养殖	绿壳鸡蛋	-	-	-	-	1.052	0.850	0.632	0.509
锦绣农牧	富硒鸡蛋	0.526	0.461	0.526	0.458	0.253	0.225	0.567	0.476
康多利油脂	富硒菜油	-	-	0.157	0.141	0.21	0.190		
博邦茶油	富硒山茶油	-	-	0.174	0.156	0.147	0.132	0.47	0.389
乌云界茶业	富硒茶	-	-	1.394	1.195	1.559	1.271	3.771	3.034
义哥牛肉	五香牛肉	-	-	-	-	0.351	0.315	0.234	0.201

表 3 湖南省农业委对桃源县产品抽检结果(mg/kg)

Table 3 Inspection results of products from Taoyuan County by Agriculture Commission of Hunan Province

编号	名称	产地	全硒	无机硒	有机硒
NSE015031	桃花源富硒葛粉	湖南省福千府富硒农产品专业合作社	0.183	0.000	0.183
NSE015032	富硒香米	桃源县泰香粮油科技开发有限公司	0.256	0.000	0.256
NSE015033	富硒杞枣五谷擂茶	桃源县桃花源萃源擂茶食品厂	0.045	0.000	0.045
NSE015034	富硒大叶绿茶	常德市乌云界生态茶叶专业合作社	1.250	0.000	1.250
NSE015035	富硒大叶红茶	常德市乌云界生态茶叶专业合作社	0.947	0.000	0.947
NSE015036	“钱缘”富硒香米	桃源县兴隆米业科技开发有限公司	0.148	0.000	0.148
NSE015037	“钱缘”多维锌硒米	桃源县兴隆米业科技开发有限公司	0.750	0.000	0.750
NSE015038	“钱缘”高必须氨基酸营养米	桃源县兴隆米业科技开发有限公司	0.813	0.000	0.813
NSE015039	富硒红薯粉丝	桃源县老韩家薯类食品加工厂	0.212	0.000	0.212
NSE015040	富硒腊牛肉	湖南省桃源县义哥清真牛肉食品厂	0.355	0.000	0.355
NSE015041	富硒腊肉	湖南燕老三食品有限公司	0.213	0.000	0.213
NSE015042	富硒蜂蜜	湖南桃源县天源蜂业有限责任公司	0.112	0.000	0.112
NSE015043	富硒蜂胶软胶囊	湖南桃源县天源蜂业有限责任公司	15.991	0.000	15.991
NSE015044	富硒茶籽油	湖南博邦农林科技股份有限公司	0.145	0.000	0.145
NSE015045	富硒茶籽油	湖南桃源县金虹茶油有限公司	0.070	0.000	0.070
NSE015046	富硒菜油	湖南省康多利油脂有限公司	0.128	0.000	0.128
NSE015047	富硒提子(红宝石)	湖南桃源县青林丰收果业有限公司	0.234	0.000	0.234
NSE015048	富硒提子(摩尔多瓦)	湖南桃源县青林丰收果业有限公司	0.216	0.000	0.216
NSE015049	富硒鸡蛋	桃源县锦绣农牧发展有限责任公司	0.572	0.000	0.572
NSE015050	富硒皇菊	桃源县丰盛源富硒生态农业种植专业合作社	1.290	0.000	1.290
NSE015051	富硒竹笋	桃源县芦花潭乡富硒竹笋实验基地	0.165	0.000	0.165

3)推进了富硒农产品的标准化。硒在土壤中分布的不均匀性,决定了所产富硒农产品硒的含量高低。一般难以达到富硒农产品的国家标准,更难实现产业化、标准化。为此早在 1996 年,我国著名营养问题专家于若木和国家食物与营养咨询委员会主任卢良恕院士等一批知名科学家,提倡“要重视富硒食物的开发与生产”,主张在农牧业中,用富硒的饲料喂养家畜、家禽,用含硒肥料种植庄稼^[28]。人工科学施用富硒肥,是今后中国富硒产品产业化和标准化的有效途径^[29-31]。据桃源县富硒产品开发不完全统计,2008—2017 年,桃源县生产的富硒农产品获得了 74 个国家级、省级奖项。据广州、上海、深圳抽查的信息反馈,桃源县送检的 6 个富硒农产品均达到了出口欧盟标准,无一例存在质量问题。桃源县的富硒农产品质量在国内享有很高的信誉。叶面喷硒技术具有硒转化率高、便于操作、高效快捷等优点,在生产上得到了广泛的应用^[32-33]。

3.4 生物转硒技术的应用

据统计,全世界有 42 个国家和地区缺硒,大约 10 亿人口处于硒营养缺乏状态。为了增加居民饮食中硒的摄入量,提高人体硒水平,国外许多国家都已经在大范围内推广生物强化法(如施用硒肥)来提高农产品中硒含量,国外的富硒农业在快速发展中。芬兰是世界上最早也是最成功利用生物强化法来提高农作物中硒含量的国家,也是世界范围内实行全民补硒的一个成功案例。芬兰是天然缺硒的国家,1984 年芬兰国家强制法案要求肥料中添加硒,以此来提高农作物的硒含量。英国也是一个缺硒国家,通过施加硒肥,其小麦中的硒含量从 0.035 mg/kg 提高到 1.800 mg/kg^[26]。

我国自 2005 年 1 月 18 日在人民大会堂举行“防病治病定量补硒全国工作会议”以来,硒引起了人们的高度重视。随着研究硒元素、利用硒资源、开发硒产品、发展硒产业的悄然兴起,历经半个世纪,学术研究不断深入,科技成果成批涌现,富硒产业迅速发展,硒资源开发效益凸显。据国家统计局所属国家市场调研中心产业经济研究院《2010—2015 年中国富硒农产品行业深度研究与预测分析报告》^[34]统计,2006 年我国富硒农产品行业工业总产值为 82.1 亿元,到 2011 年达到 138.5 亿元,每年以 9.3%~13.1% 的速度递增。资料显示,全国已约有 21 个县生产富硒大米和杂粮,拥有富硒大米品牌达 25 个左右;富硒果品品牌 15 个以上;富硒蔬菜及深加工产品品牌 100 多个;富硒茶品牌 19 个;富硒药品、保健品及

食品品牌达 60 多个,全国生产硒产品的企业约有 300 多家^[35]。

据中国富硒农业产业技术创新联盟资料统计,截至 2017 年,湖北、陕西、江西、福建、黑龙江、安徽、湖南、重庆、河北、山东和海南等地已形成较大的种植规模,总种植面积超过 100 万 hm^2 ,作物种类超过 80 种以上^[26]。这些地区,尤其是贫硒地区,如著名的富硒农产品大市(县)山东省淄博市、山西省晋中市、黑龙江省方正县、黑龙江省绥滨县、河北省柏乡县普遍采用土壤基施或作物叶面喷施硒肥,促进作物对硒的吸收,提高农产品硒的富集水平。

2009 年 4 月 20 日湖南省桃源县人民政府办下发桃政办发[展 2009]3 号《关于促进富硒产业发展的意见》,做出扶持富硒产业的 8 项规定,并把这项工作纳入县委“百、千、万”工程的重要内容,明确县、乡两级主要负责人都要帮扶一个富硒基地或富硒企业。富硒产业由民间自发性的发展转变为政府指导性的产业。2010 年以来,他们坚持以科技为支撑,用科技保质量,用科技促开发,重点抓生物转硒的技术标准制订和富硒农产品生产技术的普及,配合常德市农学会与常德市老科协,起草了《富硒水稻》等 64 个富硒农产品生产技术规程,由湖南省质量技术监督局正式发布成为湖南省地方标准(DB43/T816-823—2013^[36]、DB43/T929-944—2014^[37]、DB43/T1086-1134—2015^[38])。同时编印了《富硒水稻栽培技术》^[39]、《富硒农产品生产技术规程》^[40]等科普资料;编著出版了《科学补硒 50 问》^[41]、《硒与富硒功能农产品生产技术》^[42]、《富硒农作物优质高产栽培技术》^[43]等科普书籍,加快了生物转硒技术的普及,有效地规范了富硒农产品的生产技术,提高了从业农民的科学技术水平,赢得了开发富硒农产品的主动权,使富硒农产品得到了全方面的开发。据 2015 年 4 月 2 日桃源县富硒产品研究所的统计,已成功开发 23 类 75 种 150 款产品,其中已批量上市的有 96 种^[44](表 4)。

富硒功能农业的发展,为农民增收提供了支持和保障。据桃源县富硒产品开发办统计,2017 年富硒功能农业发展规模达 23 个乡镇,223 个村 24 541 个农户,面积 19 116.13 hm^2 ,总产量 11.182 8 万 t,销售收入 25.878 9 亿元,利润 2.247 4 亿元,助农增收 2.359 1 亿元。与 2010 年富硒农产品生产面积 635 hm^2 ,产量 16 806 t,总产值 5 994 万元,新增利润 659.3 万元,农民增收 185.8 万元比较,2017 年富硒农产品生产面积增长 281 倍,年递增率达 53.048%,富硒农产品产量增长 5.65 倍,总产值增长 42.17 倍,年递增率达

60.105%。2010—2017 年，8 年间富硒农产品生产规模总量达 62 561 hm²，实现销售收入总计 53.539 8 亿元，新增利润总计 63 638.1 万元，农民增收总计 70 645.2 万元(表 5)。

表 4 桃源县富硒农产品分类名细表

Table 4 Inventory of selenium-rich agricultural products in Taoyuan County

类别	产品名称
柑橘类	富硒蜜橘、SOD 柑橘、富硒南香杂柑、富硒椪柑、富硒大柚、富硒南丰蜜橘、富硒纽荷尔脐橙、富硒红肉蜜柚
粮食类	富硒大米、富硒糯米、富硒香米、铬锌硒米、硒锗米、铬硒米、多维锌硒米、高必需氨基酸营养米、富硒小麦、富硒红薯、富硒马铃薯、富硒紫薯、富硒山药
豆类	富硒黄豆
酱果类	富硒葡萄、富硒草莓
核果类	富硒桃、富硒枇杷
枣类	富硒鸡蛋枣
油料类	富硒花生油、富硒花生、富硒茶油、富硒山茶油、富硒菜油、富硒油葵油
瓜果类	富硒西瓜、富硒南瓜
蔬菜类	富硒黄秋葵、富硒辣椒、富硒萝卜、
竹笋类	富硒竹笋、富硒鲜笋
蜂产品类	富硒蜂蜜、富硒蜂胶软胶囊、
食用菌类	富硒平菇、富硒秀珍菇、仿野生富硒姬菇、富硒灵芝
蕨类	富硒港蕨
葛粉类	富硒鲜葛
茶叶类	富硒大叶茶、富硒银豪、富硒毛尖、富硒绿茶、富硒紫芝寒冰、砖茶、富硒红茶
牲畜类	富硒牛肉、富硒牛肉干、富硒酱板牛肉、富硒猪肉、富硒腊肉、富硒山羊
家禽类	富硒鸡、富硒虫子桃源鸡、富硒鸭
蛋品类	富硒鸡蛋、锌硒土鸡蛋、富硒绿壳鸡蛋
鱼类	富硒鱼
酒类	富硒葡萄酒、富硒啤酒
副食类	富硒仙果面、富硒擂茶、富硒野蒿粽叶粿、富硒红薯粉丝
富硒水类	含硒桃花山泉
菊类	富硒皇菊

表 5 桃源县富硒功能农业经济历年效益汇总表

Table 5 Summary of annual economic benefits of selenium-rich agriculture in Taoyuan County from 2010 to 2017

年份	生产规模(hm ²)	产量($\times 10^3$ kg)	销售收入(亿元)	新增利润(万元)	农民增收(万元)
2010	635	16 806	0.60	659.3	185.8
2011	2 666.67	33 300	1.56	1 669.6	3 800
2012	3 902.2	35 100	1.92	3 780	4 100
2013	5 363	48 831	2.71	5 095	5 673
2014	9 034.33	46 389	4.33	6 908.9	5 645
2015	10 958.53	43 224	6.24	8 179.3	9 933.44
2016	10 886	45 075	10.29	14 872	17 717
2017	19 116.13	111 828	25.88	22 474	23 591
总计	62 561.87	380 553	53.54	63 638.1	70 645.2

4 结语

2017 年中央 1 号文件提出：“加强现代生物和营养强化技术研究，挖掘开发具有保健功能食品”。作为保健功能产品的一个分类，富硒农产品的开发符合

日益发展的社会经济水平需要。实现民族复兴的落脚点是“全民健康”，而富硒土壤生物转硒技术有利于促进硒的生物转化效率，促进富硒农产品生产的标准化、规模化和产业化。科研和生产工作者今后仍需对该技术的系统性、标准性、可操作性等方面进行改进，

使其为富硒农产品产业的发展发挥更加突出的作用。

参考文献：

- [1] Tan J, Zhu W, Wang W, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 284(1): 227–235
- [2] 王锐, 余涛, 曾庆良, 等. 我国主要农耕地土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 359–366
- [3] 谭见安. 生命元素硒的地域分异与健康[J]. *中华地方病学杂志*, 1996, 15(2): 67
- [4] 谭见安. *地球环境与健康*[M]. 北京: 化学工业出版社环境科学与工程出版中心, 2004
- [5] 国土资源部中国地质调查局. *中国耕地地球化学调查报告*[R]. 北京: 国土资源部中国地质调查局, 2015
- [6] Mangiapane E, Pessione A, Pessione E. Selenium and selenoproteins: an overview on different biological systems[J]. *Current Protein & Peptide Science*, 2014, 15: 598–607
- [7] Schiavon M, Pilon-Smits E A. The fascinating facets of plant selenium accumulation biochemistry, physiology, evolution and ecology[J]. *New Phytol*, 2017, 213: 1582–1596
- [8] 张杨杨, 焦自高. 硒对植物的生理作用及富硒瓜菜研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2014, 27(1): 5–9
- [9] 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
- [10] Juniper D T, Phipps R H. Effect of high dose selenium enriched yeast diets on the distribution of total selenium and selenium species within lamb tissues[J]. *Livestock Science*, 2009, 122(1): 63–67
- [11] 陈铭, 谭见安. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学[J]. *土壤学进展*, 1994(4): 1–10
- [12] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. *New Phytologist*, 2009, 182: 49–84
- [13] Li H F, McGrath S P. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178: 92–102
- [14] White P J, Bowen H C. Extraordinarily high leaf selenium to sulphur ratios define ‘Se-accumulator’ plants[J]. *Annals of Botany*, 2007, 100: 111–118
- [15] 陈松灿, 孙国新. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5): 612–624
- [16] Sharma S, Bansal A. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1): 339–348
- [17] White P J, Brown H C. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55: 1927–1937
- [18] Zhang L, Hu B. OsPT2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice[J]. *New Phytologist*, 2014, 201: 1183–119
- [19] Pommerrenig B, Diehn T A. Metalloido-porins: Essentiality of Nodulin 26-like intrinsic proteins in metalloid transport[J]. *Plant Science*, 2015, 238: 212–227
- [20] Pilon-Smits E A H, Winkel L H E, Lin Z Q. Selenium in plants[M]. Springer, Cham, 2017
- [21] Wilson L G, Bandurski R S. Enzymatic reactions involving sulfate, sulfite, selenate, and molybdate[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1958, 233(4): 975–981
- [22] Terry N, Zayed A M, Souza M P D, et al. Selenium in higher plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, 2000, 51(51): 401
- [23] Sors T G, Ellis D R, Salt D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants[J]. *Photosynthesis Research*, 2005, 86(3): 373–389
- [24] Neuhierl B, Böck A. On the mechanism of selenium tolerance in selenium-accumulating plants[J]. *European Journal of Biochemistry*, 1996, 239: 235–238
- [25] 中华全国供销合作总社. 中华人民共和国供销合作行业标准 GH/T 1135—2017 富硒农产品. 2017
- [26] 中国富硒农业产业技术创新联盟. 2017 中国富硒农业发展蓝皮书[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2017: 286
- [27] 湖南省富硒生物产业协会. 湖南省富硒农产品硒含量要求团体标准 T/HNFX 001-2017. 2017
- [28] 颜送贵, 姚亚夫, 杨金球. “富硒土壤+生物转硒法”的发现与实践[J]. *海峡科技与产业*, 2016(4): 30–31
- [29] 薛梅, 陈悦, 刘红芹, 等. 富硒肥的研究及其应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(1): 1–6
- [30] 颜送贵. 坚持“富硒土壤+生物转硒法”, 推进富硒产品标准化[J]. *作物研究*, 2015(s1): 707–709
- [31] 郑甲成, 刘婷. 不同浓度硒肥对籼稻硒含量和产量的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 88–93
- [32] 颜送贵. 硒与富硒功能农产品生产技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017
- [33] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 叶面喷硒对水稻籽粒硒富集及分布的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 73–78
- [34] 国家市场调研中心. 2010—2015 年中国富硒农产品行业深度研究与预测分析报告[R]. 中国调研报告网, 2018.
- [35] 高显钧, 白裕兵, 魏虹. 我国富硒食品特色农业发展现状研究[J]. *中国食物与营养*, 2013, 19(9): 26–29
- [36] 湖南省质量技术监督局. 湖南省地方标准 DB43/T816-832—2013《富硒农产品生产技术规程》. 2013
- [37] 湖南省质量技术监督局. 湖南省地方标准 DB43/T929-944—2014《富硒农产品生产技术规程》. 2014
- [38] 湖南省质量技术监督局. 湖南省地方标准 DB43/T1086-1134—2015《富硒农产品生产技术规程》. 2015
- [39] 湖南省质量技术监督局. 富硒水稻栽培技术. 湖南农业, 2011
- [40] 桃源县富硒产品研究所. 富硒农产品生产技术规程. 湖南农业, 2013

- [41] 颜送贵, 文俊. 科学补硒 50 问[M]. 北京: 中国传统文化出版社, 2013
- [42] 颜送贵. 硒与富硒功能农产品生产技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017
- [43] 邓正春, 郑海涛, 颜送贵, 吴仁明. 富硒农作物优质高产栽培技术[M]. 广州: 南方出版社, 2011
- [44] 中国富硒农业产业技术创新联盟. 2015 中国富硒农业发展蓝皮书[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015: 162

Review of Soil Selenium Biotransformation

YIN Yulong^{1,4}, YAN Songgui², WANG Pengzu³, BAI Miaomiao^{1,4}, LIU Hongnan^{1,5}

(1 Institute of Subtropical Agriculture, The Chinese Academy of Sciences; Hunan Provincial Key Laboratory of Animal Nutritional Physiology and Metabolic Process; National Engineering Laboratory for Pollution Control and Waste Utilization in Livestock and Poultry Production; Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences, Scientific Observing and Experimental Station of Animal Nutrition and Feed Science in South-Central, Ministry of Agriculture, Changsha, Hunan 410125, China; 2 Taoyuan Institute of Selenium-rich Products, Taoyuan, Hunan 415700, China; 3 College of Animal Science, Northeast Agricultural University, Haerbin 150030, China; 4 College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 5 Hunan Co-Innovation Center of Safety Animal Production, CICSAP, Changsha 410128, China)

Abstract: This review discusses the application value and significance of biological selenium transfer technology, and summarizes the patents of organic selenium generation and the technical characteristics of biological selenium transfer technology, and prospects the development of biological selenium transfer technology.

Key words: Selenium; Soil; Biotransformation