

2008—2018 年功能农业的理论发展与实践

赵其国^{1, 2, 3}, 尹雪斌^{2, 3, 4, 5*}, 孙敏³, 刘永贤⁵, 侯非凡³, 张宁⁶

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学技术大学苏州研究院功能农业重点实验室, 江苏苏州 215123; 3 山西农业大学山西功能农业研究院, 山西太谷 030801; 4 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026; 5 广西富硒农业研究中心, 南宁 530007; 6 江苏省硒生物工程技术研究中心, 江苏苏州 215123)

摘要: 功能农业作为高产农业、绿色农业之后, 农业发展的新阶段, 是“调优供给”、“调强农业产业”的重要支撑性技术, 加强功能农业研究是构建生态高值农业产业体系的重要内容, 是我国农业供给侧结构性改革的主要举措之一, 对我国农业发展和乡村振兴战略具有重要意义。功能农业从 2008 年提出至今已有十年时间, 本文对有关功能农业的定义、学科的发展、应用实践, 进行了系统回顾, 对于未来发展进行了展望。

关键词: 生态高值农业; 功能农业; 硒; 矿物质; 植物有益物质

中图分类号: S-01 **文献标识码:** A

“民以食为天”, 农业的发展史, 也是人类饮食的进步史。功能农业作为农业发展的新阶段, 支撑着农业的生态高值目标, 开启了“吃”的新时代, 即从吃得“饱”、吃得“安全”, 向吃得“健康”迈进。根据十年功能农业研发实际, 我国未来功能农业的发展宗旨是“科技领先、智慧创新、开拓发展、团结协作、公正诚信”, 12 字方针是“准确、质量、稳妥、安全、民生、持续”。希望以此指导功能农业有序发展, 造福 13 亿中国人, 并期望服务全人类。山西、广西、宁夏、河北、山东、江苏、江西、湖北和安徽等省市, 率先在省域规模化发展功能农业, 是我国功能农业从科技创新走向产业实践的重要样板。

1 生态高值农业的技术体系和模式构建

1.1 生态高值农业的提出背景

在中科院的部署与领导下, 针对近年国内外农业发展面临的机遇与挑战, “中国科学院农业领域战略研究组”于 2007 年 10 月至 2009 年 3 月集体完成并制定了《中国至 2050 年农业科技领域发展路线图》^[1], 提出了发展我国“生态高值农业”的理念及技术体系模式构建。2010 年 6 月, 国家领导人在两院院士大会上, 针对农业科技, 首次提出要“构建我国生态高值农业产业体系”^[2]。

1.2 生态高值农业的概念与内涵

根据《生态高值农业: 理论与实践》一书的总结。所谓“生态”, 就是要体现农业既能为社会提供安全、优质的农产品, 又能实现农业资源的永续利用, 将农业纳入可持续发展的道路; 所谓“高值”, 就是要体现农业有很高的土地产出率、投入产出率、劳动生产率^[3]。因此, “生态高值农业”目标是构建集约化经营与生态化生产有机结合的现代农业。它以健康消费需求为导向, 以提高农业市场竞争力和可持续发展能力为核心, 兼有高产出、高效益与可持续发展的双重特性, 是转变农业增长方式、提高农业综合生产能力的集中体现。

1.2.1 生态高值农业的建设目标 “生态高值农业”的目标体系可表述为: $D=aE+bV+cS\{E, V\}$ 。其中, D 为生态高值农业发展水平; E 为农业的生态环境效益; V 为农业的经济效益; S 为农业的社会效益, 体现生态环境效益与经济效益相互协调的程度; a 、 b 、 c 是由社会生产力的发展水平、社会制度、人类的审美观与价值观等因素决定的。

可见, “生态高值农业”是包括生态农业及环境, 农产品的高产、高质、高效, 以及科技、市场、产业经济价值(包括农业的一、二、三产业的产值)“三者”相结合的总概念, 是现代农业可持续发展的总体方向。

* 通讯作者(xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 赵其国(1930—), 男, 湖北武汉人, 研究员, 中国科学院院士, 主要研究方向为土壤地理与资源、功能农业。

注: 部分内容出自科学出版社出版的《功能农业》, 内容有增删。

到 2020 年，通过重点农业科技领域的重大创新突破，构建生态高值农业技术体系，为不断满足我国日益增长的对农产品总量、质量、安全和多功能的需求以及改善农业生产结构、生态环境和农业资源永续利用等生态高值农业体系提供科技支撑^[4]。

到 2050 年，中国农业具备实现农业资源可持续利用，充分保障国家食物总量和质量安全，以及进入传统功能和现代多功能并存的未来农业所需要的科技支撑条件，使我国在发展中国家中率先进入生态高值可持续发展的新时代，全面实现农产品优质化、营养化、功能化，实现农业生产管理的信息化、数字化、精准化，建成农业高值转换的产业体系，形成生态系

统持续良性循环、景观优美、功能多样、城乡一体的新型农业。

1.2.2 生态高值农业的内涵实质 生态即指生态农业，包括水、土、气、生、岩、污等部分。高值包括农产值、农技值、农市值、农经值。其中，农产值是指农产品高量、高质、高效，简称“农-产”。农技值是指功能农业、智能农业、高科值农业，简称“农技-产”。农市值是指市场经济价值(农二产)、农加工、转工，简称“附加值”。农经值是指产业化经济价值(农三产)，包括农、经、贸、科、教、游、文等内容，如功能农业养生园、牛博园、盐博园、体验农业、农业公园等(图 2)。

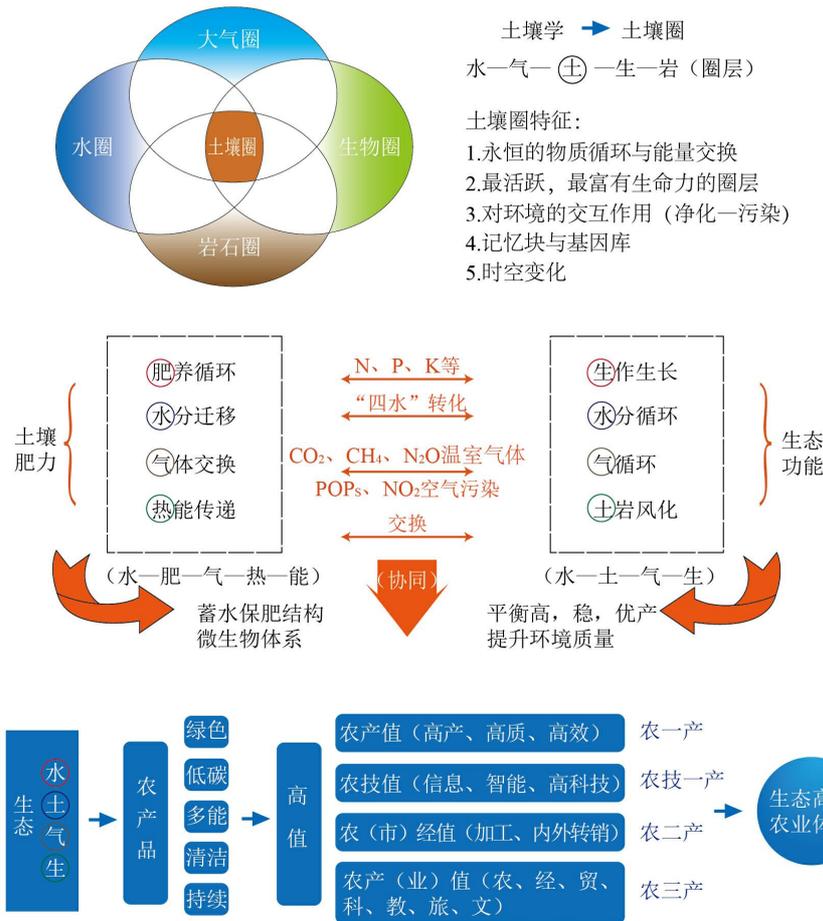


图 1 土壤肥力与生态(生物)系统功能的内涵关联图
Fig. 1 Relevance of soil fertility and ecological (biological) system functions

可见，生态高值农业是包括生态农业，环境与农业品高产、高质、高效，科技，市场，产业经济价值(包括农业的一、二、三产产值)相结合的总概念。比如，高产值：水稻：袁隆平 15 t/hm²；小麦：河南 10.35 t/hm²；玉米：新疆 19.5 t/hm²；富硒、富锌功能农产品价格通常高出普通农产品 30%~50%。高科值：通

过信息、分子和功能化等技术提高产值。市场值：通过农产品加工，走向国际与国内市市场，加工后的农产品价值可提高几十到上百倍，如安徽 70 g 的番茄酱可卖 50 元；美国玉米加工有 3 500 多种，产值提高达上千倍。我国农产品加工的工业值与农业产值比，每增加 0.1%，可带动 230 万人就业。综合经济值：

可通过“农经贸科教游文”增加大量产值。

简言之，生态高值农业未来多体现在向一产、二产和三产联合的“大农业”方向发展。

1.2.3 生态高值农业土壤肥力与生态系统图解 土壤圈是生态系统中最为活跃的一个圈层，也是大气圈、水圈、生物圈、岩石圈进行物质和能量交换的重要媒介，长期的农业生产历史，日益提高了土壤圈对于生态系统的重要性。我们在进行农事活动时，向土壤中施用额外的含有 N、P、K 元素的肥料以利于农作物生长；收集自然降水，汲取地下水以满足土壤中所生长的作物需水要求；生产化肥和使用大型农具改善土壤理化性质过程中排放的温室气体，多种因素叠加导致土壤肥力的提高与生态系统的稳定之间形成了紧密的互作联系。为了保证在提高土壤肥力，达到农产品高产、稳产、优产的同时，保证土壤生态功能的稳定，提高生态环境质量，选择以绿色、低碳、多能、清洁、持续为主要目标的生态高值农业是必由之路。

2 功能农业的创建

2.1 功能农业提出的背景

2007 年 10 月至 2009 年 3 月，中国科学院农业领域战略研究组集体编制完成《中国至 2050 年农业科技领域发展路线图》，提出了各阶段农业科技发展的主要方向及可突破的重大科学技术问题。“功能农业”正是规划路线图中的重要方向，其理念及设想被首次提出。中科院 2013 年出版的《科技发展新态势与面向 2020 年的战略选择》指出，未来的工作重心将围绕生态高值农业，构建中国特色的生态高值农业体系，“功能农业”作为生态高值农业体系的建设方向，在十二五、十三五规划中最有可能取得突破性进展。同年出版的《生态高值农业：理论与实践》进一步提出并论证了功能农业的发展，明确指出：“功能农业”是生态高值农业科技支撑体系的重要组成部分。这一方向很好地契合于当前我国农业从注重“量”转向注重“质”的战略需求。

“功能农业”实际是对生态高值农业的进一步延伸。在“中国至 2050 年农业科技领域发展路线图”理念与七大科技领域的研究——“农业生产与食品安全营养技术”规划中也指出，食品的营养保健性和科技发展将是食品产业发展的重要趋势。同时，“生态高值农业 2020—2050 年的建设目标”中指出，要“不断满足我国日益增长的对农产品总量、质量、安全和多功能的需求”，“全面实现农产品优质化、营养化、功

能化，实现农业生产管理的信息化、数字化、精准化，建成农业高值转换的产业体系”。实现产品的“营养化、功能化”，科技发展是核心要素，主要是通过育种技术和动植物“生物强化”等生物技术和农艺措施、设施农业等非生物技术定量增加食品中的某些营养元素，如人体必需微量元素钙、铁、锌、硒等，人体必需氨基酸赖氨酸、色氨酸等，维生素 VA、VE、B9(叶酸)等，抗氧化物质花青素、多酚、类胡萝卜素等。随着基因组学和蛋白组学的飞速发展，功能农业将成为农业科技的重要方向，在消除“隐性饥饿”^[5]、预防癌症、降血压、降血脂和冠心病等方面发挥巨大作用。

2.2 功能农业的定义

什么是功能农业？功能农业是通过生物营养强化技术或其他生物工程生产出具有健康改善功能的农产品。简单地说，功能农业就是要种植出具有保健功能的农产品^[6]。其中，既包括农产品中特定健康物质的提高，如矿物质、植物有益物质(Phytochemicals)，也包括根据某个人群的需求对特定物质进行优化，比如，抗性淀粉大米因其中的淀粉不易酶解消化为糖，适合糖尿病患者食用。

人们通过食用功能农业产品，可以对特定营养物质进行定量补充，可达到提高人体体质，改善健康的目的。比如：人体缺碘或碘摄入量不足时，会引起地方性甲状腺肿、不育症等病症，随着我国大部分地区食盐中加碘，已经明显减少缺碘病症的发生；人体缺硒或硒摄入量不足时，会引发克山病、大骨节病等病症，通过持续食用富硒食品，不仅可以消除病症，还可以提高人体免疫力，长期食用可有效预防癌症^[7-8]。其他人体健康所需矿物质包括钙、铁、锌等及不饱和脂肪酸、花青素、胡萝卜素等植物化合物，都可通过功能农产品的生产补充人体，改善健康。

功能农业是农业发展的新方向，它是继高产农业、绿色农业之后的第三个发展阶段^[9-10]。功能农业作为农业发展的第三个阶段，侧重于增加农产品的健康内涵(图 2)。通过现代生物技术和农艺措施，标准化调整优化农产品的营养成分，满足人们个性化的需求。这一农业形态理想的目标是“缺啥补啥”，“啥多调啥”。

2.3 功能农业有关的重点营养素

2.3.1 矿物质 矿物质是人体内无机物的总称，人体由 60 多种元素组成，其中很多矿物质元素是酶的必需组分，也是人体组织、骨的生长及维持的



图 2 农业发展三阶段

Fig. 2 Three stages of agricultural development

必需元素。按其在人体内含量的高低,可将矿物质分为常量元素和微量元素。常量元素,也称大量元素或宏量元素,其在人体内含量较高,占人体总重量的 0.01% 以上,如碳、氢、氧、氮、钙、磷、

镁、钠等;微量元素也称痕量元素,在人体内含量很低,约占人体总重量 0.01% 以下,如铁、锌、铜、锰、铬、硒、钼、钴、氟等。按照矿物质对人体健康的影响,可分为必需元素、非必需元素和有毒元素。必需元素是维持人体健康所必需的元素,缺乏时有机体的功能和组织都会出现异常,补充后即可恢复。目前,已被确认与人体健康和生命有关的必需微量元素有 18 种,即铁、铜、锌、钴、锰、铬、硒、碘、镍、氟、钼、钒、锡、硅、锶、硼、铷、砷等;必需常量元素有钙,这样人体必需的矿物质元素总计有 19 种。加上锗等对人体有益的 3 种元素,共计 22 种对人体有益的元素^[11-12]。其中,日常生活中的营养食品、保健食品中最常见和较多人群存在缺乏的矿物质有 5 种,包括硒、锌、钙、铁和碘(表 1)^[13-14]。

表 1 常见矿物质元素及其功能
Table 1 Functions of conventional mineral elements

营养素	生理功能	每日需要量	来源
钙	凝血因子,能降低神经、肌肉的兴奋性,是构成骨骼、牙齿的主要成分	0.6~1.2 g	绿色蔬菜、乳类、蛋类含量高
铁	血红蛋白、肌红蛋白、细胞色素和其他酶系统的主要成分,协助血液氧气运输	15~18 mg	肝、蛋黄、血、瘦肉、绿色蔬菜、桃、杏、李
锌	数百种酶的构成成分,促进细胞分裂、生长和再生;调节 DNA 复制和 RNA 转录,参与免疫有关酶的作用;促进身体和智力发育。缺乏锌,智力会下降,发育受阻,免疫力下降、食欲差	10~15 mg	初乳、鱼、蛋、肉、禽、全谷、麦胚、豆、酵母等,动物性食物利用率高
硒	谷胱甘肽过氧化物酶的组分,抗不生育,防止营养不良,提高身体免疫力,多种金属的解毒剂	60~250 μg	芝麻、麦芽、中草药黄芪、酵母、蛋类、海产类、肝脏、肾脏、大蒜、蘑菇
碘	为甲状腺素 T ₃ 、T ₄ 的主要成分,缺乏时引起单纯性甲状腺肿及地方克汀病	90~120 μg	海产如海带、紫菜、海鱼等
磷	参与核酸代谢和能量代谢,维持细胞膜的完整性,参与糖与蛋白质代谢,维持体内酸碱平衡	0.4~1.2 g	乳、肉、豆、五谷
铜	对制造红细胞、合成血红蛋白和铁的吸收有很大作用,与许多酶的形成关系密切,例如细胞色素酶、氧化酶等,存在于人体红细胞、脑、肝等组织内,缺乏时易引起贫血	0.5~0.8 mg	肝、肉、鱼、海蛎、全谷、硬果、豆类
镁	激活糖代谢酶,与肌肉神经兴奋性有关,对所有细胞代谢过程都很重要,常与钙缺乏同时出现,导致手足抽筋	160~320 mg	谷类、豆类、干果、肉、乳类

2.3.2 维生素 通俗来讲,维生素即维持生命的物质,是人体内生命活动必需的一类微量营养物质,也是保持人体健康的重要活性物质。通常将维生素分为脂溶性维生素和水溶性维生素。脂溶性维生素包括维生素 A、维生素 D(又称钙化醇)、维生素 E(又称生育酚)和维生素 K(又称凝血维生素);水溶性维生素主要是 B 族维生素(主要包括 B₁、B₂、B₃、B₆、B₁₂)、维

生素 C(又称抗坏血酸)、维生素 PP(又称尼克酸)、维生素 H(又称生物素)和维生素 M(又称 B₉,也称叶酸)等(表 2)。

维生素大部分不能在体内合成或合成量不足,不能满足人体的需要,必须从食物中摄取。当膳食中缺乏维生素,将引起人体代谢紊乱,发生维生素缺乏症。例如:当缺乏维生素 A(vitamin A)时,会出

现夜盲症、干眼病和皮肤干燥等^[15]。维生素 A 又称视黄醇或抗干眼病因子，包括维生素 A₁、A₂ 两种，是一个具有脂环的不饱和一元醇。维生素 A₁ 多存于哺乳动物及咸水鱼的肝脏中，而维生素 A₂ 常存于淡水鱼的肝脏中。由于维生素 A₂ 的活性比较低，所以通常所说的维生素 A 是指维生素 A₁。植物来源的 β-

胡萝卜素及其他类胡萝卜素可在人体内合成维生素 A，β-胡萝卜素的转换效率最高。在体内，在 β-胡萝卜素-15,15'-双氧酶(双加氧酶)催化下，可将 β-胡萝卜素转变为两分子的视黄醛，视黄醛在视黄醛还原酶的作用下还原为视黄醇，但 β-胡萝卜素也可以合成虾青素(astaxanthin，强抗氧化剂)^[16]。

表 2 常见维生素及其功能
Table 2 Functions of vitamins

种类	作用	食物来源
维生素 A	可以维持正常的视觉反应、骨骼发育和上皮组织的正常形态与功能	牛奶，鸡蛋，鱼肝油，动物肝脏，深绿色、深黄色蔬菜及水果等
维生素 B ₁	缺乏维生素 B ₁ 会患感冒、胃炎、肌肉疲倦且容易焦虑或记忆力减退、脚气、神经失调	未经精制的谷物如糙米、胚芽米、瘦肉、牛奶、动物肝脏、酵母、豆类、牛肉等
维生素 B ₂	缺乏维生素 B ₂ 会引发口腔炎、口角炎、眼睛充血、精神恍惚、皮肤干、头发大量脱落等	牛奶、动物肝脏、蛋类、瘦肉、麦胚、黄豆、花生等
维生素 B ₆	与新陈代谢有关，需要量由蛋白质摄入量决定	麦胚、牛奶、酵母、荚豆类、动物肝脏等
维生素 C	促进“胶原”的形成，让细胞排列更为紧密	绿色蔬菜、水果等
维生素 D	促进钙质的吸收进而使骨质钙化，维持正常的骨骼形态	鱼肝油、动物肝脏、蛋黄、牛奶等
维生素 E	缺乏维生素 E 容易不育，有良好的抗氧化性，降低细胞老化	植物油、绿色蔬菜、动物肝脏、豆类、蛋黄、瓜果、瘦肉、花生等
维生素 K	与血液凝固有密切关系，缺乏维生素 K 易患血友病	绿色蔬菜

2.3.3 植物有益物质(Phytochemicals) 除矿物质和维生素外，功能农业密切关注多种植物有益物质。如人体必需氨基酸(赖氨酸、色氨酸)、抗氧化物质(多酚、黄酮、类胡萝卜素、花色素)、不饱和脂肪酸(ω-3)等。对于这些有益物质的调控，目前更多地通过育种手段来实现。随着科学技术的发展和人们健康意识的不断增强，研究者将会对人体有益物质进行更加深入的研究，更多的植物有益物质将被发现。功能农业的内涵将越来越丰富。

2.4 功能农业与生态高值农业关系

“生态高值农业”是我国农业新型战略领域，其

对农产品总量、质量、安全和多功能的需求，全面实现农产品优质化、营养化、功能化的发展理念与“功能农业”的发展方向是一致的，“功能农业”从产地条件、产品功能到产业开发一系列科技链条，符合生态高值农业的发展内涵，是未来生态高值农业的支撑性技术。“功能农业”的稳定发展，为我国生态高值农业体系构建积累了大量经验，奠定了发展基础。

因此，以富硒、富锌等为主体的“功能农业”的研发，只有按生态高值农业的理念与内涵方向发展，才能不断走向创新开拓与可持续发展。今后其研发也必将走“生态高值型功能农业”的方向(图 3)。

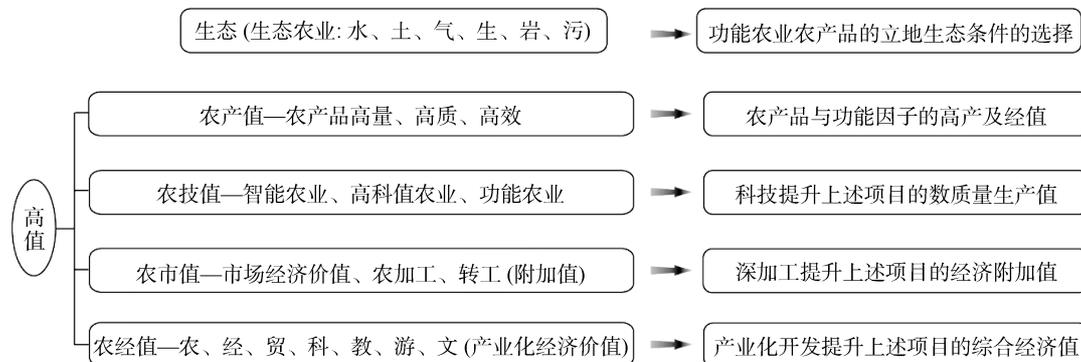


图 3 功能农业与生态高值农业关联图

Fig. 3 Relevance about functional agriculture and ecological high-value agriculture

结合中国功能农业产业发展实际,对于未来功能农业发展总结了 20 字宗旨与 12 字方针,希望以指导功能农业有序发展,造福 13 亿中国人。

关于功能农业发展的 20 字“宗旨”:科技领先、智慧创新、开拓发展、团结协作、公正诚信。

关于功能农业发展的 12 字“方针”:准确、质量、稳妥、安全、民生、持续。

3 功能农业的十大科学问题

为了满足人们对某一个或几个功能物质的需求,功能农业相关的一系列科学问题需要不断探索和研究。下文重点以矿物质强化为例,按照其传输路径和规律,包括从土壤环境、作物栽培、元素拮抗、食品加工、消化代谢等等。在此提取了十个相关问题分别简述。

3.1 作物吸收预测模型

矿物质对人体健康起重要作用,多种矿物质复合,效果更加明显。功能农业的最终农产品,就是使其定量富含某种或某几种矿物质。首先要解决矿物质形态技术及吸收预测模型这一基础性科学问题。

植物对矿物质的吸收具有选择性。矿物质的形态大体可分为两类:植物可利用的和不易利用的。在植物吸收矿物质的过程中,自由离子是最易被吸收的形态,植物根部表面的正负离子与土壤中的正负离子可通过交换作用而吸附到根部。其他的可溶性离子浓度可以用分级提取的方法测得,比如有纯净水提取部分,也有模拟土壤盐分的盐溶液提取部分。

植物对矿物质的吸收取决于多个方面,不同地区、不同作物的吸收、积累既与土壤中的矿物质形态有关,也与植物本身特性有关。不同性质的土壤中,有机物的含量、黏粒的含量都会影响到植物对矿物质的吸收。对于植物本身而言,不同种属间差异巨大,例如木本植物相比于草本类植物,由于其高大的特性,根部在向上运输离子的过程中受到层层阻隔,致使上部枝干中矿物质含量积累较少,而草本植物低矮,易于吸收积累;植物不同器官中,含量差别亦较大,植物吸收遵循优先生长原则,籽粒、果实较叶片含量高;在植物不同生长周期,吸收积累规律也有差别,比如水稻在分蘖期、灌浆期都是矿物质需求旺盛的阶段。对于植物矿物质吸收的准确预测,仍需土壤环境、栽培学等方面专家进一步的研究和调查。

3.2 矿物质形态分析技术

矿物质是地壳中自然存在的化合物或天然元素,多为无机盐。当矿物质经根部吸收至植物体内,会转

化成多种形态存在。生物体对不同形态的矿物质,其吸收效果有很大差异,所以研究清楚不同矿物质的形态变化具有重要意义。

矿物质经人体或动物吸收后,有的形成小分子状态存在,例如:硒就会转化为硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸、甲基-硒代半胱氨酸等,这些物质的分子量一般会达到一百到几百道尔顿。有的矿物质转化为大分子形态,如含硒的多肽、多糖。锌、镁、铁等也会在不同的功能蛋白中作为活性中心,协助蛋白发挥活性功能。

3.3 矿物质间相互影响

矿物质在吸收过程中具有相生相克的关系,即拮抗效应和协同效应^[17]。各元素之间的相互关系错综复杂,一种元素可能会影响另一种元素的分布与吸收。

拮抗效应是指两种元素之间相互抑制的效应,主要发生在两种具有化学性质相似的离子之间,一种元素升高,另一种元素势必降低,存在竞争关系。协同效应恰恰相反,某一种元素会促进另一种元素的升高,两种元素相互叠加。对于功能农业农产品来说,要保持矿物质的吸收平衡。当发生拮抗作用时,要重新对产品元素进行评估,对降低的元素进行补充;发生协同效应时,则要适当降低被促进吸收的元素供给,保持矿物质平衡。

在实际的人体吸收过程中,规律可能更为复杂,一种元素可能与不同元素之间既存在拮抗效应,又存在协同作用。所以,矿物质的最佳供给模型需要通过不断的试验研究来优化。

在功能农业方面,矿物质的相互影响,在被人类食用之前就已经发生。植物在吸收矿物质离子时,存在不同程度的协同或拮抗作用,导致此种现象既有化学方面的原因也有植物生理作用的影响。如同为阳离子的钙、锌、镁离子在被植物吸收时相互间存在竞争关系,而同为阴离子的硒却能促进植物对碘离子的吸收(图 4)。同时,植物可吸收利用的矿物质与矿物质的存在形态有关,例如:水稻硒的吸收量(生物有效硒)取决与土壤中的有效硒含量(化学有效硒)^[18]。因此,矿物质吸收的规律多样性,尚需要研究学者更加深入的研究。

3.4 功能农产品的标准研究

功能农业所生产的农产品,是否可以有效地提高人体健康质量,需要一个严格的标准来度量。所以,功能农产品的标准研究,是这个新产业发展起来以后的重要工作内容。

功能农产品的标准包括两大部分,一个是什么样

的产品才能算是功能农产品，即产品标准；另一个是这个产品在生产过程中需要恪守哪些规范、步骤，即

生产过程的规范。后者在认证方面能提供非常必要的信息。

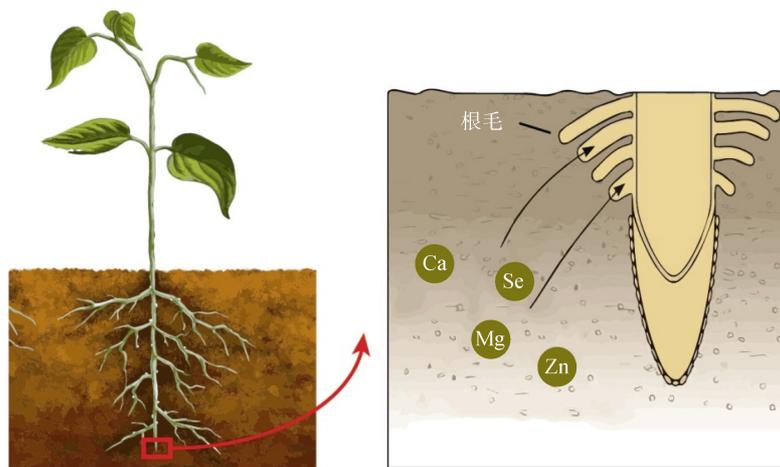


图 4 植物吸收矿物质原理图

Fig. 4 Plant absorbs minerals

但是目前功能农产品的标准研究少之又少。消费者在食用一种或者几种功能农产品，特别是主食性功能农产品，能够提高所需矿物质摄入量，但是在其含量方面，众多的产品中含量要求应该怎样平衡，以实现所有产品的综合食用不会超过安全量，是一个需要解决的重大问题。有关生产过程的标准，重要的是缩小含量波动范围，并防止造假。一个合适的标准既要保障安全，又要能够在规模化农业实施中实现。这些都还需要科技界和产业界进一步的合作研究来推进。

3.5 食品加工过程矿物质形态演变

功能农业的功能农产品，人们在食用之前，会进行各种加工，包括干燥、加热、粉碎等。在经历复杂的加工程序后，是否会对矿物质形态及含量造成损失，这需要进行进一步的研究。

功能农产品在食品加工过程中，会涉及一系列的生理生化变化。包括水分、温度、粒度、酶、微生物群落等的变化，这些变化可能会影响到矿物质的存在形态。例如：温度会引起蛋白质变性，一些易挥发的形态在高温下会引起大量损失。温度还会使矿物质的形态发生转变，研究发现硒代氨基酸形态在蒸煮、煎炸过程中，会有显著的变化。食物加工程序中引起的这些形态变化，并不是说这些生理生化变化会对矿物质的吸收和利用产生巨大影响，只是这些变化所导致的含量结果需进一步评估，以便找到更合适的方式制作功能食品。

3.6 矿物质人体摄入量动态数据库

功能农业的目的是，补充人们所缺乏的营养功能物质，并且在其适合量的区间。所以，功能农产品开

发，需进一步建立区域性人群矿物质摄入量动态数据库。即：调查某一区域人群的矿物质摄入量状况及动态变化。通过这一大数据调查，对比中国营养学会推荐摄入量，了解人们到底“缺啥”，补充干预的效果如何，这样有助于对功能农业研究方向的把握，研发更适宜含量的功能农产品。

建立矿物质摄入量动态库，首先要进行摄食调查。通过调查市场食物种类，分别检测每种食品中矿物质含量，通过地区性食谱组成，并按照生活习惯进行烹制后测定矿物质含量，可准确计算出该区域居民的矿物质摄入水平。大规模营养摄入量普查，涉及面广，需调查大量人口，对人力、物力和财力要求较高，通常间隔时间长，而某些区域或某个群体性的小规模调查，则间隔时间短。所以，当前所说的动态数据库，有着区域的不均一性，研发产品要采用最新的统计报道数据。根据目前的一些调查结果，发现了一些有趣的规律，得到一些有价值的发现。例如，苏州作为中国经济最发达的地区之一，居民每日硒摄入量约为 $44 \mu\text{g}$ ，并未满足每日 $60 \mu\text{g}$ 的推荐摄入量。这一结果表明在我国经济发达的地区，矿物质摄入量也可能不足。对于通过毛发、血液的测定，对营养素摄入量的预测模型也是一项有着实际意义的重要研究。

3.7 矿物质有效性研究新技术——胃肠模拟

功能农产品的最终走向是服务消费者，其矿物质有效性如何？这需要经过系统科学的评估。这种评估除其形态特征组成外，通常通过动物实验、胃肠模拟和人群干预 3 种方法。

动物实验通常采用大鼠，因大鼠与人类基因序列

类似,且研究体系成熟。在一定时间内,其他条件一定的情况下,喂食定量的功能农产品,采集动物的血液、毛发样品进行检测,分析矿物质在动物体内的吸收转化规律。但是由于动物与人之间仍然有差距,对于动物矿物质的摄入量只能作为一个参考,而不能将某些规律直接推理到人体摄入情况。人群干预是最直接、最有效的方法,但是所需人口基数大,在研究矿物质的吸收消化情况与规律时,采样难度也大,同时还存在一定的伦理问题。所以,科学家们发明了人工模拟胃肠试验装置,用来模拟食物在胃肠中的消化作用,研究物质的变化吸收过程。

体外模拟胃肠系统是一种基于生理学模拟生物体进行的研究,其简单、快速、安全、稳定,可系统研究人体肠胃的功能,高效地评价食品营养安全^[19]。在这一套模拟体系中,通过调节 pH、搅拌、添加人工模拟胃液等,最大限度地模拟人体规律,目前比利时根特大学研究组在这一方面做出了领先性工作。现在为了更真实反演还引入了特定的微生物群落。

3.8 人体矿物质摄入量毛发预测模型

功能农业就是要生产出对人体健康有益的产品,这一前提要基于人体矿物质摄入水平的准确调查或预测。目前,大规模的人口普查和人体干预等调查手段实施难度大,而直接的摄入量调查又有实施频率高,浪费大量人力、物力、财力的缺点。所以,利用毛发来预测人体摄入量模型,受到越来越多的关注。

毛发预测模型相对于其他技术手段来说,有较强的适用性。人体矿物质在各器官和组织之间存在动态平衡,各部位之间的矿物质含量相对稳定,所以,理论上通过检测毛发中矿物质含量,可以反映人体其他器官和组织中的矿物质摄入水平。另一方面,相较于血液、器官等组织的采集来说,毛发不仅采集方便,更能避免伦理方面的问题,而且要求较低,不受时间地点限制,甚至理发时保留一部分毛发样品,这对每个人都可以办到,无需专门去医疗机构采集。中国科技大学苏州研究院功能农业实验室搭建了毛发硒预测摄入量的模型,模型结果显示:粗略来看,毛发中硒含量($\mu\text{g}/\text{kg}$)/10,这个数据模型得到的结果近似于日硒摄入量($\mu\text{g}/\text{d}$)。通过毛发预测模型,可以准确检测出人体的矿物质摄入水平,对普通人来说,都可以进行快速准确的测定,以便针对性地选择适合自己的功能农产品,补充所需的矿物质,保障营养平衡和健康。

3.9 生物矿物质干预研究

在研究矿物质某一作用时,干预研究是最为直接的

手段。干预研究从宏观方向来看,一种是针对临床病人的干预研究,另一种是针对健康人群的干预研究^[20-21]。

临床病人的干预研究是针对某种病症的病人,定量补充某一种或几种矿物质,观察病人病症能否得到缓解,免疫力是否得到改善,从而促进病人的康复。例如:癌症对人类健康威胁日益突出,通过给癌症患者每日定量服用 200 μg 硒的富硒谷物,研究硒对病人的免疫改善,包括化疗副作用的控制等。

针对健康人群的干预研究,目的是为消除人们的“隐性饥饿”(hidden hungry),我国大部分地区都存在不同程度的“隐性饥饿”。例如:苏州地区属硒中度缺乏地区,通过开展谷物硒的干预研究,人们每日硒摄入量已达 50 μg ,显著提高了人们的免疫力。

3.10 功能农业要保障环境可持续

生态环境是人类赖以生存的基础,也是经济发展和社会生产力进步的基础。功能农业的宗旨是确保生态环境的可持续发展,既能够保障定量提高农产品中营养物质的含量,同时也能严格控制土壤和植物体内营养物质的水平,走环境友好型发展道路^[22]。因此,精准农业是功能农业的重要要求。

功能农业通过在土壤中添加人体必需矿物质,农作物通过根部吸收,运送至农产品部位,达到人体所需的含量。在这一技术过程实施中,基本原则是:每季精准实施,以尽量少的矿物质投入,保障生产含量合格的功能农产品。

4 功能农业的应用实践

2017 年,功能农业的定义首次被写入中央“一号文件”,并在全国“两会”被热议,此后,农业部“主食提升行动”,国家粮食与物资储备局“中国好粮油行动计划”和“科技兴粮”行动,山西、广西和宁夏等省级战略和多地农业“十三五”规划,先后提及。功能农业在提出近十年后,终于成为支撑农业供给侧结构性改革的重要科技新方向。

4.1 功能农业市场容量估算

由于功能农业这一领域为新兴领域,市场容量的直接估算存在困难。据推测,2020 年功能农业的占比会达到我国可食用农作物耕作面积的 1%,2030 年左右比例会上升至 10%,2050 年将上升为 50%。按静态价值计算,2020 年市场容量将达到 1 000 亿元,2030 年为 1 万亿元,2050 年为 5 万亿元。可见,随着农业产业化发展,消费者对于健康产品需求越发迫切,功能农业的发展速度可能超过绿色农业。

4.2 中央与部委关注

4.2.1 中央“一号文件” “功能农业”自 2008 年提出,至今已发展至十个年头,在发展过程中得到了中央部委的高度重视。2017 年 2 月 5 日,《中共中央、国务院关于深入推进农业供给侧结构性改革加快培育农业农村发展新动能的若干意见》(中央“一号文件”)发布,在第三部分壮大新产业新业态的第 15 条明确提出:“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的食品。”

4.2.2 农业农村部 农业部办公厅 2017 年印发《关于深入实施主食加工业提升行动的通知》,功能农业有关表述被首次列入。在重点任务部分,第(二)条,提出:“开发多元产品。以功能化、营养化、便捷化消费需求为主导,适应个性化、高端化、体验化消费需求,开发营养、安全、美味、健康、便捷、实惠的多元化主食产品。加强现代生物和营养强化技术研究,针对老人、儿童、学生、孕妇、“三高”病人等特定人群,开发营养均衡、药食同源等功能性主食产品。”

4.2.3 国家粮食与物资储备局“中国好粮油”行动 “中国好粮油”行动计划作为国家粮食和物资储备局实现“优质粮食”的三大工程之一,是贯彻落实中央经济工作会议、中央农村工作会议精神,适应经济发展新常态,扎实推进粮食行业供给侧结构性改革的重要举措。主要目的是聚焦增加绿色优质粮油产品供给,实现粮食供给从解决“吃得饱”到“吃得好”的转变。功能农业通过营养强化技术所实现的功能性粮油正是“中国好粮油”中“好”字标准的重要支撑。2018 年 5 月,国家粮食与物资储备局“科技兴粮”行动也将开发功能性水稻、小麦、玉米、杂粮等粮食及深加工产品作为重要发展方向,并支持山西农业大学、山西功能农业研究院联合国家粮科院、江苏省晒生物工程中心等共建“国家功能杂粮技术创新中心”。

4.3 功能农业产业生态初见——来自三个省级样板区的报告

4.3.1 山西省 山西省作为功能农业的先行示范省,在 2017 年中央“一号文件”出台之前,山西省政府已将功能农业列为省级战略。在山西省委十一届二次全会暨经济工作会议上,山西省委书记骆惠宁、省长楼阳生,提出:“山西的农业不在大,而在特,不在规模,而在功能。2017 年在功能农业发展上要实现重大突破”的口号^[23]。

到目前为止,为抢抓功能农业产业机遇,山西省政府已展开全方位布局:建立山西功能农业研究院,

打造功能农业研发高地;在“山西农谷”中规划建设功能农业产业园,构建功能农业产业链;山西省政府报请国家粮食与物资储备局支持,依托山西农业大学建立了“国家功能杂粮技术创新中心”;山西农业大学在全国率先设立了第一个功能农业本科专业和第一个功能农业专项奖学金。

山西功能农业研究院成立于 2017 年 4 月,是以中央“一号文件”中关于“加强现代生物和营养强化技术研究”、“深入推进农业供给侧结构性改革”的有关精神为指导,依据《山西省“十三五”规划纲要》的指示所组建。该院的成立为全国首例。研究院立足山西特色农业,抢抓功能农业新兴机遇,以推动功能农业人才培养、科技创新、社会服务三方面快速发展为主要目标。

2017 年山西省重点研发计划重点项目“山西功能农业共性关键技术与示范”项目立项,标志着山西以科技创新推进农业供给侧结构性改革的步伐正在加快。项目主要包含山西主要作物功能肥料和生物农药的研制与应用、功能主粮共性关键技术与示范等六方面课题研究。项目完成后,预计能创制作物和果蔬等植物的种质资源 150~200 份,集成创新作物和果蔬等定向栽培技术 15~18 套,形成特色功能食品加工技术 20~25 套,申请山西省干鲜果功能品种审定 3~5 个,建立技术示范基地 25~30 个,申报专利 30~35 项,制定地方标准 40~45 项,带动“山西农谷”及全省功能农业产值达到 30 亿元以上,综合效益提升 20%~30%。

4.3.2 广西自治区 广西经过地质勘测,发现自治区境内存在国内少有的特大面积连片富硒土壤区域,非常适合富硒农产品的开发。广西科技厅于 2017 年 9 月启动了科技重大项目“富硒农产品国家技术标准研究与示范”,总投资达 5 000 万元,通过富硒农产品国家技术标准体系的研究着力解决富硒土壤资源高效利用、富硒农产品标准化生产以及富硒农产品产业链延伸 3 方面的问题。

富硒土壤资源高效利用:针对广西天然富硒地区土壤,对其土壤及其作物中镉、砷、汞等有毒伴生元素指标进行摸底普查测定,明确富硒地区是否存在重金属的污染与危害性,了解农田土壤中硒素与其他有毒重金属的迁移转化规律,并进行富硒土壤的安全评价与安全阈值研究,建立土壤硒元素安全利用评价体系,并进行合理规划,科学开发富硒农产品。

广西特色富硒农产品标准化安全生产:在土壤自然硒素活化技术、优质富硒品种筛选、作物富硒及重

金属阻控耦合技术、作物适时定量标准化富硒技术等方面开展研究与开发,着力突破富硒农业技术瓶颈,建立广西特色富硒农产品的标准化生产规程与标准,确保富硒农产品的质量与安全。

富硒农产品产业链延伸:开展富硒特色农产品加工关键技术、农产品中功能性硒代有机物提取技术等研究;以加工延伸产业链来提高富硒农业附加值,建设一批符合国家食品、药品安全标准的加工原料基地。

4.3.3 宁夏回族自治区 宁夏回族自治区农牧厅与江苏省硒生物技术工程中心、硒谷科技共建“宁夏功能农牧业研究与推广中心”,并在中卫市开展了“十万亩富硒功能农业示范”,推出的富硒硒砂瓜、富硒枸杞和富硒苹果,已成为“中卫三宝”,中卫市与硒谷科技合资成立宁夏硒产业发展股份有限公司,服务支撑宁夏硒产业高质量发展。目前,在中卫已制定出富硒硒砂瓜、富硒枸杞和富硒苹果的种植规范,开始示范试用,并通过在产品上加贴专用标志,来增强消费者识别性。

4.3.4 富硒功能农业系统性行业标准 2017年4月25日,由中国科学技术大学、苏州硒谷科技、中华供销合作社北京商用机械研究所、苏州大学、中科院南京土壤研究所等十家单位联合参与的国内首个富硒产品分类标准《富硒农产品》,并首次提出硒代氨基酸含量标准和硒代氨基酸检测标准,历时两年、十多轮修改,正式通过审定。这标志着我国富硒功能性农产品在全国范围尺度上有了第一个统一的参考依据。在标准制定的基础上,中国科技大学研究团队还在牵头搭建 FAST Tracing System 系统,希望建立智慧型功能农业,构建全球性功能农产品质量追溯系统,为功能农业产业链提供可视化质控服务。

4.3.5 泰国合作 为响应“一带一路”战略,中国科技大学团队将与泰国国家科研院所(TISTR)开展功能农业的研究与示范,特别是泰国大米、菠萝的功能化研究与示范,在学生培养、国际项目合作、功能农业标准等方面开展合作,为泰国公众、政府和产业界提供功能农业科技咨询服务,共同推进中国东盟功能农业创新网络的建立,为功能农业服务于泰国农业的升级提供保障。

5 结语

“生态高值型功能农业”作为我国农业新兴战略领域,是继高产农业、绿色农业之后的第三个发展阶段,也是推动“健康中国”、助力“乡村振兴”的新阶段。同时,还是能将大农业的一产、二产、三产相连接,推进农产品走向生态高值化。但功能农业这一

新兴方向毕竟尚处于初始研发阶段,无论在理论创新、学科建设、产业开发和产业生态构建等方面,仍待深入研究与改进。

最后,希望大家能够看到功能农业作为一个趋势性新方向,既有着无限美好的前景,又有着很艰巨的任务有待完成,充满很多挑战,需要各界联合面对。希望功能农业相关力量团结一致,齐心协力,共同把中国功能农业发展得享誉全球,使之成为“中国机遇”、“人类福祉”,到2020年,在庆祝全面建成小康社会的同时,共同为“生态高值型功能农业”的高速发展共同庆贺!

参考文献:

- [1] 中国科学院基础科学局. 中国至2050年农业科技发展路线图[J]. 前沿科学, 2009, 3(3): 15-16
- [2] 赵其国, 段增强. 生态高值农业:理论与实践[M]. 科学出版社, 2013
- [3] 赵其国, 黄季焜, 段增强. 我国生态高值农业的内涵、模式及其研发建议[J]. 土壤, 2012, 44(5): 705-711
- [4] 赵兰香, 等, 主编. 科技发展新态势与面向2020年的战略选择[M]. 北京: 科学出版社, 2013
- [5] Yin X B, Yuan L X, Liu Y, et al. Phytoremediation and biofortification: Two sides of one coin[M]. Netherlands: Springer, 2012: 1-6
- [6] 赵其国, 尹雪斌. 功能农业[M]. 北京: 科学出版社, 2016
- [7] 邵树勋, 刘亚峰, Dernovics M. 恩施富硒植物研究及其开发利用探讨[C]. 全国成矿理论与找矿方法学术讨论会, 2017
- [8] 毛恩慧. 供给侧改革视角下的富硒土地资源开发及生态富硒农产品价值实现机制研究——以福建诏安为例[C]. 2017中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷). 2017
- [9] 佟屏亚. 中国的高产农业及其可持续发展[J]. 作物杂志, 1997(4): 12-15
- [10] 刘伟明. 中国绿色农业的现状与发展对策[J]. 世界农业, 2004(8): 20-22
- [11] 巴纽埃洛斯 G S, 林治庆. 生物营养强化农产品开发和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [12] 姚滢秋. 中国营养学会发布《中国居民膳食营养素参考摄入量》2013年修订版[J]. 营养学报, 2014(4): 313-315
- [13] Banuelos G S, Lin Z Q, Yin X B. Selenium in the environment and human health[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013
- [14] Banuelos G S, Lin Z Q, Yin X B. Global advances in selenium research from theory to application[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015
- [15] 孙定人, 张石革. 维生素A(视黄醇)缺乏症(夜盲症)与补充维生素A[J]. 中国药房, 2003, 14(10): 639-640
- [16] 赵其国, 尹雪斌. 我们的未来农业——功能农业[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(7): 457-468
- [17] 钟金凤, 张力. 放牧绵羊毛、血、粪、尿中矿物元素含量特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 668-674

- [18] 马迅, 诸旭东, 宗良纲, 等. 不同调控措施对酸性富硒土壤硒有效性及水稻产量性状的影响[J]. 土壤, 2018(2): 284–290
- [19] 张卿. 体外人胃肠模拟系统的研究进展[J]. 生物化工, 2016, 2(4): 65–68
- [20] Banuelos G S, Lin Z Q, Yin X B. Selenium deficiency toxicity and biofortification for human health[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009
- [21] Banuelos G S, Lin Z Q, Yin X B, et al. Selenium: Global perspectives of impacts on humans, animals and the environment[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2011
- [22] 余维祥. 农村生态环境状况与农业可持续发展[J]. 生态经济(中文版), 2009(9): 150–153
- [23] 尹雪斌, 高志强, 孙敏, 等. 关于山西省“十三五”功能农业产业发展的思考[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 13–17

A Ten-year Overview of Functional Agriculture from 2008 to 2018

ZHAO Qiguo^{1,2,3}, YIN Xuebin^{2,3,4,5*}, SUN Min³, LIU Yongxian⁵, HOU Feifan³, ZHANG Ning⁶

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Key Laboratory for Functional Agriculture, Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123, China*; 3 *Shanxi Institute for Functional Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China*; 4 *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*; 5 *Guangxi Selenium-enriched Agriculture Research Center, Nanning 530007, China*; 6 *Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou, Jiangsu 215123, China*)

Abstract: Construction of ecological high value agricultural system is the main agricultural measure for agricultural supply-side structural reform in China. Functional agriculture is an important basic technology for supply and industry improvement as a new stage of agricultural development in future. It is of great significant for China's agricultural development and rural revitalization strategy. Functional agriculture's proposal has been proposed for 10 years since 2008. This paper systematically reviewed the definition, development, and application of functional agriculture, and provided a perspective for their development in the next decade.

Key words: Ecological high-value agriculture; Functional agriculture; Selenium; Mineral; Phytochemicals