



功能农业全球发展态势分析综述

黄瑞林^{1,3†}, 林巧^{2†}, 孔令博², 胡诗雨¹, 陈友桃^{3,7}, 贺培欢^{3,8}, 辛竹琳^{5,6},
张泽洲^{1,3}, 宋佳平^{1,3}, 赵建荣¹, 尹雪斌^{3*}, 赵瑞雪^{2,4*}, 聂迎利^{2*}

1. 安徽科技学院资源与环境学院, 滁州 233100
2. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081
3. 功能农业与功能食品安徽省重点实验室(安徽科技学院长三角功能农业(食品)研究院), 滁州 239000
4. 国家新闻出版署农业融合出版知识挖掘与知识服务重点实验室(中国农业科学院农业信息研究所), 北京 100081
5. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071
6. 中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100190
7. 安徽科技学院农学院, 滁州 233100
8. 江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: xbyin@ahstu.edu.cn; zhaorui@caas.cn; nieyingli@caas.cn

收稿日期: 2024-04-19; 接受日期: 2024-11-12; 网络版发表日期: 2025-01-08

安徽科技学院高层次人才引进项目(批准号: KYYJ202201)、陕西省技术创新引导专项(批准号: 2022QFY09-09)和陕西省关键核心技术产业化“揭榜挂帅”项目(批准号: 2022JBGS-FXSP01-02)资助

摘要 随着全球人口的持续增长和人们对高质量生活的向往和追求, 农业生产方式正面临着新的转变和挑战. 关注农产品“营养化, 功能化”的功能农业(functional agriculture)正逐渐受到中国乃至世界农业科学家的重视. 尽管功能农业概念的提出仅有16年, 但世界范围内关于功能微量营养素的研究已有上百年的历史. 本文分析发现, 国内外功能农业领域研究呈稳步上升趋势. 国外相关研究主要集中在功能食品精准调控和加工等方向, 而国内在土壤功能性成分评估、功能食品加工与封装技术等方面表现出较高的关注. 本综述对于了解功能农业领域的当前研究现状、不足之处以及未来研究热点具有重要的启示意义.

关键词 功能农业, 发展态势, 精准营养, 微量营养素, 生物营养强化

微量营养素指相比于宏量营养素(如蛋白质、脂肪和碳水化合物), 在人体的需求量较小, 通常以毫克(mg)或微克(μg)计量的营养成分^[1]. 它们中常见的有维生素和微量矿质元素等. 微量营养素的缺失通常被称作“隐性饥饿”. 它是妨碍联合国实现其第二个可持续发展目标——到2030年确保粮食安全和提高营养水平

的一个主要难题^[2]. 据估计, 全球已有约30亿人受到隐性饥饿的影响. 随着工业生产工艺的优化, 大气中一些源于工业生产过程产生的微量元素(如锌、铁、钙等)将明显降低; 而由于土壤退化的发生, 源于土壤过程的部分微量元素(如硒、碘和氯)也将明显减少. 这些情景将导致空气中气态铁、锌、二硒化氢、二氧化硒、

引用格式: 黄瑞林, 林巧, 孔令博, 等. 功能农业全球发展态势分析综述. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 399–408

Huang R L, Lin Q, Kong L H, et al. Global trends in functional agriculture: a mini-review (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 399–408, doi: 10.1360/SSV-2024-0117

二甲基硒、碘甲烷和氯化氢等物质减少并降低土壤中源于沉降的微量元素, 最终可能导致受隐性饥饿影响的人群数量持续增加^[3,4]。为了解决人类健康发展所面临的隐性饥饿问题, 中国科学院农业领域战略研究组于2007~2009年编制的《中国至2050年农业科技发展路线图》, 首次提出了功能农业理念及设想, 做出了“农产品要走向营养化, 功能化”的判断^[5]。具体来说, 该理念(功能农业概念)主要指在天然富含有益成分的土壤生境中生长, 或通过生物营养强化技术及其他生物技术培育, 实现农副产品中一种或多种有益健康成分基于人类健康需求做出标准化优化的生产实践^[6]。其中, 既包括农产品中特定健康物质的提高, 如矿物质、植物化学物质(phytochemicals), 也包括根据某个人的需求对特定物质进行优化^[7-9], 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。简单地说, 功能农业的概念就是要培育出具有保健功能的农产品, 消除“隐性饥饿”, 以“吃”来改善人体健康^[6]。

在功能农业概念提出后, 为详细阐明功能农业的体系构建、产业化实践、发展趋势等, 赵其国和尹雪斌^[10]于2016年合著了功能农业方向的首部著作——《功能农业》。2020年尹雪斌^[11]编著了《功能农业百问》以进一步解答人们关于功能农业的疑问。迄今为止, 功能农业概念所涉及的领域和所研究的对象越来越多, 主要涉及领域或可能存在交叉的一级学科包括但不限于农业资源利用、环境科学与工程、作物学、畜牧学、食品科学与工程、生物医学工程、信息与通信工程、农林经济管理和机械工程等^[12,13]。不仅如此, 随着功能农业概念的提出和发展, 越来越多对人体有益的微量营养素被确定为功能成分。它们中常见的如植酸(phytic acid)、硒(selenium)、铁(iron)、锌(zinc)、碘(iodine)、硼(boron)、硅(silicon)、β-胡萝卜素(beta-carotene)、叶酸(folate)、维生素(vitamin)、类黄酮(flavonoids)、花青素(anthocyanins)、茶多酚(catechins)、类胡萝卜素(carotenoids)和叶黄素(lutein)等^[11,14]。

相比之下, 由于文化和语言背景差异, 国外“功能农业”相关领域的研究主要使用“健康食品(health foods)”, “功能食品(functional foods)”, “营养保健品(nutraceuticals)”或“设计食品(designer foods)”等关键词描述^[15-17], 并且国外对微量元素含量及其人体健康

效应的研究已有半个世纪的历史。例如, 1973年Ro-truck等人^[18]研究发现, 当缺硒(Se)大鼠的红细胞裂解物在体外与抗坏血酸或H₂O₂培养时, 外源添加的谷胱甘肽并不能保护血红蛋白免受氧化损伤。这是因为缺硒大鼠红细胞几乎没有谷胱甘肽过氧化物酶; 相比之下, 高度纯化的谷胱甘肽过氧化物酶则含有大鼠体内标记的大部分⁷⁵Se。这些结果证实了硒可能参与了谷胱甘肽过氧化物的合成, 并且可能促进过氧化物的消除^[18]。同年, 世界卫生组织(World Health Organization, WHO)将硒列入人体必需的微量元素, 确认其具有清除过氧化物, 防止细胞损伤和延缓细胞衰老等作用^[19]。类似已经被WHO列入人体必需维生素和矿物质的还包括维生素A、维生素D、钙、维生素E、维生素K、维生素C、维生素B1、维生素B2、烟酸(也称为维生素B3)、维生素B6、泛酸(也称为维生素B5)、生物素(也称为维生素B7或维生素H)、镁、锌、铁、碘、维生素B12、叶酸及其合成态等^[19]。为了进一步了解全球不同国家对这些微量营养素研究的差异性和可能存在的不足, 有必要综合比较全球不同国家和地区对微量营养素的研究趋势。这将有助于功能农业概念的推广和发展。

1 全球功能农业领域研究趋势

1.1 整体发展趋势

截至2023年9月8日, 基于矿物质营养素(如硒、铁、钙、锌、镁、碘、硼、硅)和营养素及生物活性化合物(如植酸、抗性淀粉、类黄酮、花青素、茶多酚、类胡萝卜素、叶黄素等), 我们在SCI-E, SSCI, CPCI-S, CPCI-SSH数据库, 共检索到功能农业领域相关论文12283篇, 中国功能农业领域相关论文共2570篇, 占比约20.92% (图1A)。

总体来看, 全球每年关于微量营养素(即功能农业领域)的研究在时间尺度上呈指数上升趋势(图1A)。一方面, 该趋势可能与近些年科学技术的飞速发展有关, 这些技术包括但不限于: (i) 可定量农产品中硒形态及含量的高效液相色谱-质谱联用(HPLC-MS)^[20], (ii) 可量化矿质微量元素含量的电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)^[21], (iii) 可解析有机物质如ω-3脂肪酸分子模型的核磁共振(NMR)技术^[22], (iv) 可快速、无损评估作物微量营养状况的近红外光谱(NIR)技术^[23], (v) 可

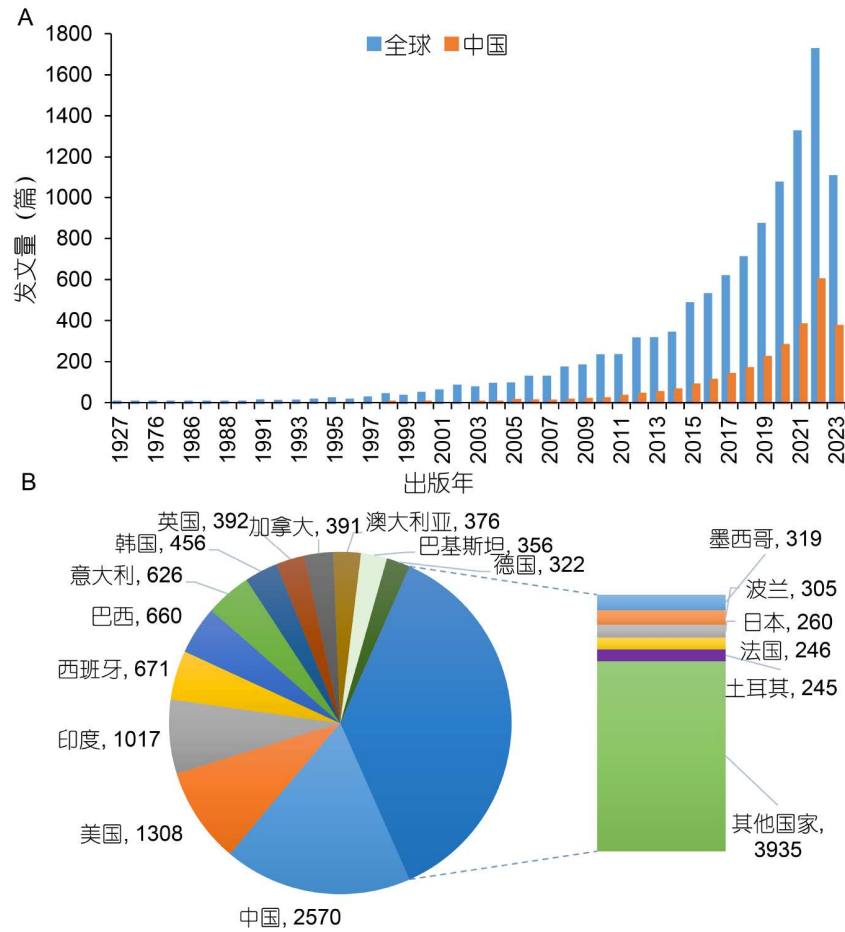


图 1 全球功能农业领域年度发文趋势

Figure 1 Annual global publication trends in the field of functional agriculture

在细胞水平鉴定细胞对微量营养素响应的单细胞拉曼 (SCRS)^[24]和(vi) 可在群落水平评估微量营养素对群落组成影响的高通量测序(NGS)技术^[25-27]。这些技术的发展有助于研究者从物质总量研究到形态组成研究的转变, 也有助于研究者从微生物群落水平和单细胞水平阐明微量营养素变化的生态和生物效应^[27]。另一方面该趋势也可能与人们对高质量生活的追求和对自身健康的关注度增加有关^[28]。值得注意的是, 相比于全球整体功能农业领域研究发展趋势, 中国功能农业领域研究的发展可明显地分为两个阶段, 即2009年以前和以后。例如, 2008年全球功能农业相关主题研究论文年度发文量约为167篇, 中国约占5.99%; 而在2009年以后中国相关主题年度发文量占全球年度发文量从2010年的7.52%上升到2022年的34.11%。这意味着在

2009年以后中国对功能农业领域研究的重视度正在显著地增加。

1.2 不同国家对功能农业领域研究的关注

通过分析不同国家对功能农业领域的关注程度, 我们发现尽管全球对功能农业相关领域的关注度(即年均发文量)整体呈上升趋势(图1A), 但是不同国家的关注程度差异明显(图1B)。例如, 截至检索日期(2023年9月), 全球功能农业领域相关研究主要集中于少数几个国家。总体发文量占据前10的国家主要包括中国(2570篇)、美国(1308篇)、印度(1017篇)、西班牙(671篇)、巴西(660篇)、意大利(626篇)、韩国(456篇)、英国(392篇)、加拿大(391篇)和澳大利亚(376篇)。这些国家共发表相关学术论文8467篇, 占总体发文数量的

酸水平以及高血压和脑卒中的发病风险^[41]. 因此, 在全球功能农业研究中精准加工和精准营养是重点关注领域.

基于全球功能农业领域的12283篇论文, 提取全部关键词(作者关键词和WOS数据库提取的关键词), 并使用VOSviewer软件对该领域的主题热点进行挖掘, 遴选出现频次大于40次的关键词, 通过主题聚类计算关键词的共现关系, 生成研究热点聚类图(图2B). 可以发现全球功能农业领域相关研究主要集中于5个主题. 第一个主题(红色聚类)聚焦于功能农业方向土壤中功能性物质的生物利用度研究, 该主题的研究热词包括bioavailability (生物利用度), biofortification (生物强化), iron (铁), growth (生长), zinc (锌), wheat (小麦)和soil (土壤)等. 第二个主题(黄色聚类)主要聚焦于农作物中功能性物质的生物强化作用研究; 如functional-properties (功能性能), dietary fibers (膳食纤维), g-protein (g蛋白), resistant starch (抗性淀粉)等. 第三个主题(绿色聚类)聚焦于功能性食品抗氧化活性成分研究, 如antioxidant activity (抗氧化活性), antioxidant (抗氧化剂)和anthocyanins (花青素)等. 相比之下, 第四个主题(紫色聚类)关注于功能性食品或产品的加工/封装技术研究, 该研究的关键词包括: microencapsulation (微胶囊技术), stability (稳定性)和probiotics (益生菌)等. 第五个主题(蓝色聚类)则聚焦于功能食品中功能性成分或外源功能性成分对疾病的影响研究, 该研究涉及关键热点包括oxidative stress (氧化应激), health (健康), absorption (吸收), metabolism (新陈代谢)和supplementation (补充)等.

这些研究表明, 目前功能农业领域的科学研究多集中于功能性食品、膳食保健品、营养添加剂等产业链后端相关研究^[6], 而土壤改良、农田种植、养殖等产业链前端的相关研究较少^[14]. 此外, 类似于氮、磷、钾等营养素, 微量矿质营养素(如硒、锌、铁、锰等)也存在不同化学形态和相态间的循环. 因此, 气候和环境变化、微生物多样性和农业机械作业方式等也将影响以微量矿质营养素为研究对象的功能农业. 为实现功能农业整体链条的协同发展, 未来应加强功能农业全链条前端科学基础研究及相关功能微量矿质营养素的土壤含量标准、营养强化标准和生产标准定制, 为功能产业链的功能食品提供充足的农产品供应基础^[12,13].

2 中国在功能农业领域的发展趋势

2.1 功能农业领域发展趋势和热点省市

基于全球主要国家尤其是占全球GDP前20的国家(如美国、印度、英国、巴西、意大利、加拿大和西班牙等国)在功能农业领域的发展和布局, 这表明经济基础可能是功能农业领域发展的内在驱动力之一. 相比之下, 中国功能农业相关领域的研究布局和发展模式也存在类似的规律(图3A). 例如, 中国功能农业领域总发文量排前5的省/直辖市分别为北京(419篇)、江苏(270篇)、广东(176篇)、浙江(148篇)和陕西(148篇). 这些省/市共发文1161篇, 占中国功能农业领域总发文量的45.18%左右. 从发文趋势来说, 中国功能农业领域发文趋势与全球在该领域的发文增长模式相似, 不同之处在于布局时间. 中国排名前5的省/市发文始于2002年, 2002~2023年的发文量在波动中呈增长趋势(图3B).

除经济基础外, 中国主要省/市的高校数量及其科研水平也可能是功能农业在这些地区得以快速发展的重要原因之一. 例如, 北京科研机构集中, 具有较大的科研优势, 发文量远高于其他省/市. 相比之下, 江苏省拥有较多农业领域的科研院所, 农业现代化水平相对较高, 在功能农业领域的研究成果也较多. 江苏省内相关科研单位早在2002年就建立了断贯流动氢化物发生原子荧光法测定富硒食品中微量硒的方法, 并将该方法应用于鸡蛋、富硒米和富硒盐中微量硒的测定^[42]. 同时, 江苏省也是较早开展区域居民膳食硒摄入量调查研究的省份之一. 例如, 2011年中国科学技术大学苏州研究院功能农业重点实验研究调查了苏州地区居民的膳食硒摄入量, 测定了苏州市典型食物中硒的含量, 以确定该地区居民是否易患中度硒缺乏症^[43]. 研究发现, 在该地区猪肉和谷类是当地居民日常硒摄入的主要来源, 分别占人均每天总摄入量的24.7%和22.6%. 另外, 该研究还发现, 头发中硒浓度可作为长期硒摄入量的重要生物指标之一^[43]. 这些研究为江苏省和国内功能农业的快速发展奠定了一定的研究基础.

2.2 功能农业领域研究方向和热点异同

与全球在功能农业方向和功能食品方向的发展趋势相比(图2A), 中国在功能农业方向和功能食品方向

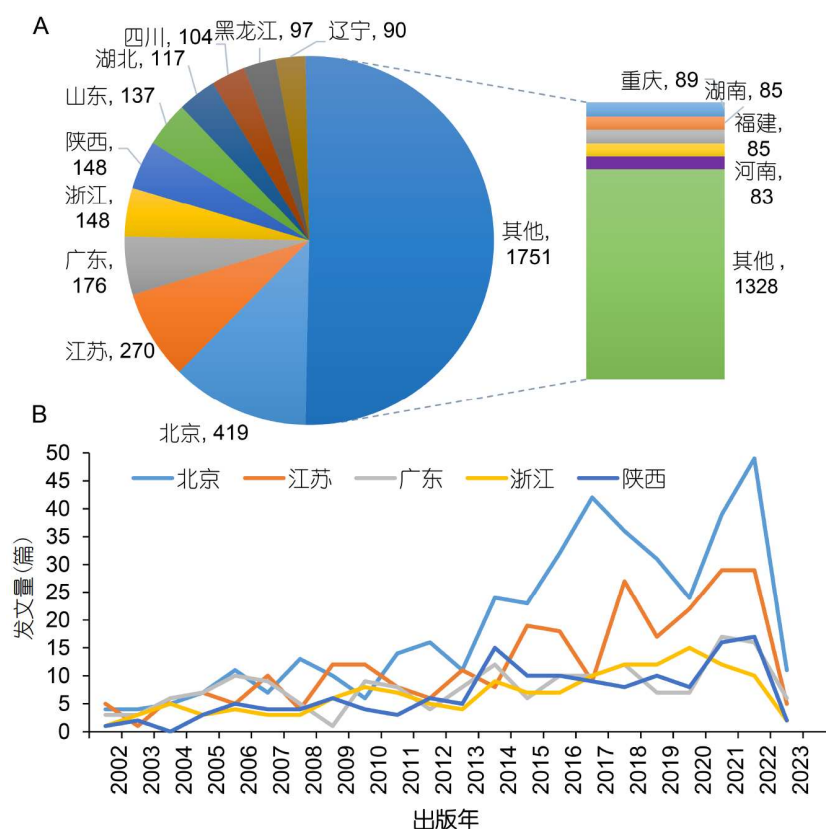


图3 中国主要省/市功能农业领域研究布局(A)和趋势(B)

Figure 3 Research layout (A) and trends (B) in functional agriculture from major provinces/cities in China

上的发展均有较多布局(图4A)。具体来说,在功能农业方向总发文量为1326篇左右,占功能农业领域发文量(2570篇)的51.59%左右。其中,主要研究方向为土壤(554篇)和养殖(503篇)。在功能农业研究方向中涉及的土壤研究主要包括现代农业中的黑土、砖红壤、红土、盐碱土、富硒土、富硒土壤、富锌土壤、富钙土壤、富铁土壤等特色土壤在功能农业领域中的应用与开发技术及其生物有效性研究。由于土壤方面的研究主要与农产品种植有关,因此,功能农业方向上土壤和养殖的并重发展意味着当代农业发展不仅关注植物源产品的品质也注重动物源产品的品质。另外,与全球在功能食品方向上的研究相似,中国在该方向上也主要关注于精准加工(297篇)和精准营养(833篇)。两者占功能食品方向发文量(1304篇)的86.66%左右,占功能农业领域发文量的32.41%左右。无论是在全球还是在中国,功能农业领域的发展多集中于特色土壤,功能性食品营养成分,膳食保健品品种(如高抗性淀粉、不

饱和脂肪酸、 γ -氨基丁酸、抗氧化等产品),功能性农产品选育和养殖的相关研究;而功能农产品精准收储、多维打印、盐碱地土壤改良及农田种植等产业链前端的研究均处于起步阶段,相关科研成果相对较少。

进一步基于热图共现网络分析,我们发现中国功能农业领域的研究热点主要集中在4个主题(图4B)。与全球在功能农业领域研究热点有所不同的是,中国功能农业领域研究中可能更关注于富含微量营养素农产品的生产和土壤环境背景调查(蓝色聚类)。不仅如此,在中国功能农业相关检索论文中还包括大量肥料学相关研究(黄色聚类)主题,相关科研论文聚焦于评估肥料(fertilizer)养分有效性,对土壤生物多样性影响和适用作物等。这些结果表明,在中国功能农业领域研究和发展过程中除关注农产品质量提升外,也关注农产品产量和潜在生态效应。此外,与全球在功能农业领域的研究相似,中国在功能农业领域也较关注功能食品中抗氧化生物活性成分/功能性成分研究以及功能

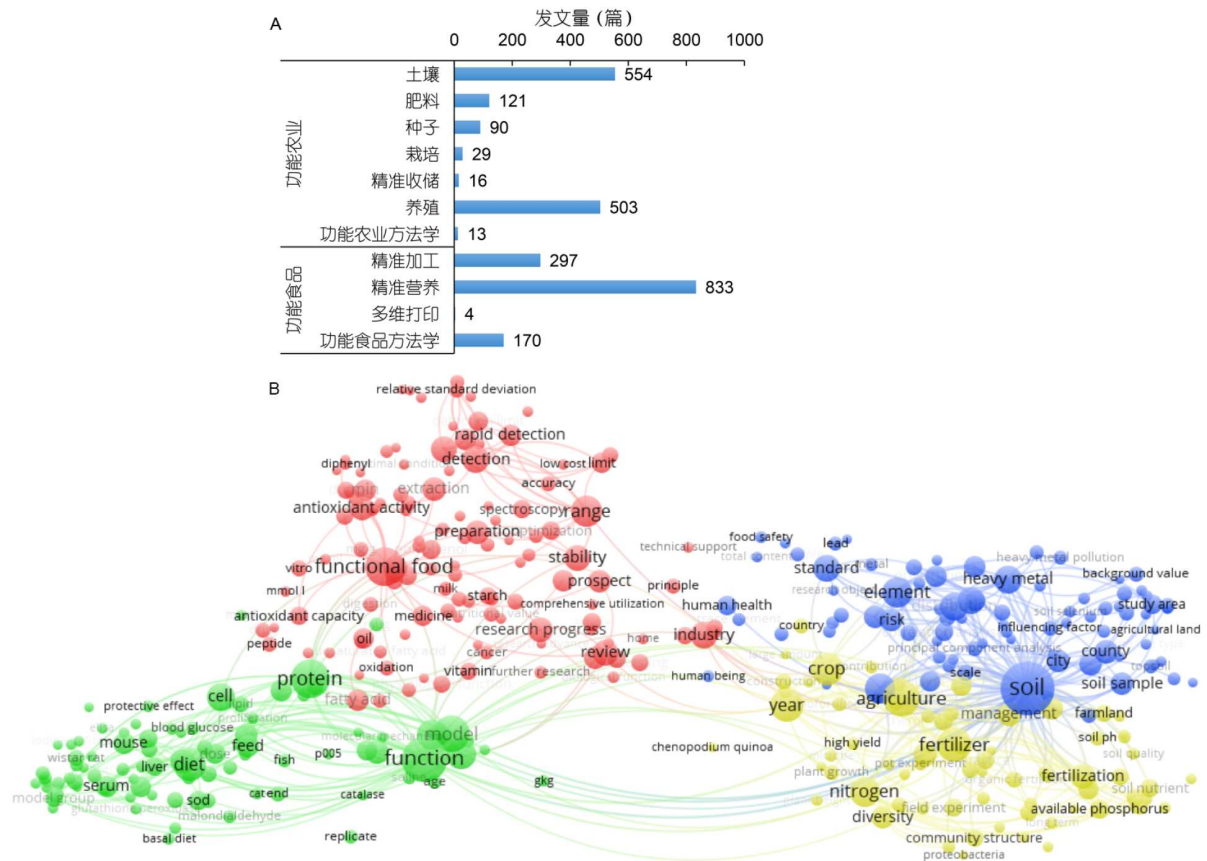


图 4 中国功能农业领域研究方向(A)和热点共现网络分析(B)
Figure 4 Research directions in China's functional agriculture field (A) and hotspot co-occurrence network analysis (B)

性成分的生物利用度和稳定性研究。在热图共现网络中(红色聚类和绿色聚类),该部分研究主要涉及关键词包括functional food (功能食品), antioxidant activity (抗氧化活性), amino acid (氨基酸), polysaccharides (多糖), bioactivity (生物活性), phenolic-compounds (酚类化合物)和antioxidant (抗氧化剂)等。

3 结论与展望

总体来看,中国、美国、印度、西班牙和巴西是全球功能农业领域科学研究论文成果数量最多的5个国家,自赵其国院士2008年提出“功能农业”概念后,中国在该领域的发展极为迅速,年度发文量超过美国排名全球第一,且近年来在土壤、肥料、种子、功能食品方法学、栽培等方向均有较明显的优势。通过分析功能农业领域前沿研究主题,本研究发

农业领域的前沿研究集中在5个主题,分别为:(i)功能性食品抗氧化活性成分研究;(ii)土壤中功能性物质的生物利用度研究;(iii)饮食中添加功能性成分对疾病的影响研究;(iv)功能性加工/封装技术研究;(v)作物中功能性物质的生物强化作用研究。

相比于国外功能农业领域的研究,中国在功能农业领域的研究中率先提出了“土地-肥料-育种-种养-收储-加工-购销-健康”这一科学创新链条。因此,中国在功能农业领域相关产业链前、中、后端均有布局,其中在功能成分(如富硒、锌等矿物质食品,高抗性淀粉产品,不饱和脂肪酸产品, γ -氨基丁酸和抗氧化产品),精准营养和规划等方向均有较多的文章产出。北京、江苏、广东、浙江和陕西是国内功能农业领域科研论文成果数量前5位的省市,其中北京、江苏和陕西在该领域的论文质量较好,影响力较大,被广泛认可和引用。中国科学院、中国农业科学院和中国农业大学等

是国内功能农业领域值得重点关注的研究机构。此外,与国外功能农业领域的研究前沿不同,中国功能农业的研究热点集中于(i) 含/富硒农产品生产和功能成分加工/封装技术;(ii) 抗氧化生物活性成分/功能性成分;(iii) 功能性成分的生物利用度和稳定性等。

目前国外和中国功能农业研究的热点互有侧重,但整体集中在土壤中功能性成分对作物生长的影响,食物中多酚类物质的生物活性成分,功能性食品的吸收及对健康的影响,功能成分的理化性质和功能性封

装加工技术等主题。未来功能农业领域可就以下几个方向加强研究和布局^[6,12,13]:(i) 成土母质和过程对土壤功能物质影响;(ii) 功能成分在土壤-作物间迁移转化规律;(iii) 超积累植物的发现及其机理探索和应用;(iv) 功能农业领域发展过程中涉及的生态效应,如功能微量营养素对植物健康和土壤生物多样性的调控;(v) 建立功能农业长期试验站;(vi) 评估功能微量营养素的人体健康效应;(vii) 加强功能农业领域的新技术、新方法和新装备的研发和应用。

参考文献

- 1 Shenkin A. The key role of micronutrients. *Clin Nutr*, 2006, 25: 1–13
- 2 Gödecke T, Stein A J, Qaim M. The global burden of chronic and hidden hunger: trends and determinants. *Glob Food Secur*, 2018, 17: 21–29
- 3 Jones G D, Droz B, Greve P, et al. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 2848–2853
- 4 Feinberg A, Stenke A, Peter T, et al. Reductions in the deposition of sulfur and selenium to agricultural soils pose risk of future nutrient deficiencies. *Commun Earth Environ*, 2021, 2: 10.1038
- 5 Agricultural Strategy Research Group, Chinese Academy of Sciences. *Agricultural Science & Technology in China: A Roadmap to 2050* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [中国科学院农业领域战略研究组. 中国至2050年农业科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009]
- 6 Zhao Q G, Yin X B, Sun M, et al. A ten-year overview of functional agriculture from 2008 to 2018 (in Chinese). *Soils*, 2018, 50: 1061–1071 [赵其国, 尹雪斌, 孙敏, 等. 2008–2018年功能农业的理论发展与实践. *土壤*, 2018, 50: 1061–1071]
- 7 Danso O P, Asante-Badu B, Zhang Z, et al. Selenium biofortification: strategies, progress and challenges. *Agriculture*, 2023, 13: 416
- 8 Huang R, Bañuelos G S, Zhao J, et al. Comprehensive evaluation of factors influencing selenium fertilization biofortification. *J Sci Food Agric*, 2024, 104: 6100–6107
- 9 Radawiec A, Szulc W, Rutkowska B. Selenium biofortification of wheat as a strategy to improve human nutrition. *Agriculture*, 2021, 11: 144
- 10 Zhao Q G, Yin X B. *Functional Agriculture* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [赵其国, 尹雪斌. 功能农业. 北京: 科学出版社, 2016]
- 11 Yin X B. *100 FAQs of Functional Agriculture* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [尹雪斌. 功能农业百问. 北京: 科学出版社, 2020]
- 12 Yin X B, Zhao Q G. Key scientific issues and development strategies of functional agriculture (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 459–460 [尹雪斌, 赵其国. 功能农业关键科学问题与发展战略. *科学通报*, 2022, 67: 459–460]
- 13 Yin X B, Zhao Q G, Yin Y L, et al. The review of key scientific issues of functional agriculture and development suggestions for “14th Five-Year Plan” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 497–510 [尹雪斌, 赵其国, 印遇龙, 等. 功能农业关键科学问题研究进展与“十四五”发展建议. *科学通报*, 2022, 67: 497–510]
- 14 Yin X B, Niu S S, Zhao Q G, et al. Development in functional agriculture innovation facing the hidden hunger problem in China (in Chinese). *Sci Technol Dev*, 2021, 17: 1824–1830 [尹雪斌, 牛珊珊, 赵其国, 等. 我国硒(Se)、锌(Zn)和钙(Ca)生物营养强化研究进展. *科技促进发展*, 2021, 17: 1824–1830]
- 15 Williamson C. Functional foods: What are the benefits? *Br J Community Nurs*, 2009, 14: 230–236
- 16 Lang T. Functional foods. *BMJ*, 2007, 334: 1015–1016
- 17 Hanssen M. The validity of the concept of health foods. In: Birch G G, Parker K J, eds. *Food and Health: Science and Technology*. Dordrecht: Springer, 1980. 27–41
- 18 Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: biochemical role as a component of glutathione peroxidase. *Science*, 1973, 179: 588–590
- 19 WHO, FAO. *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*, 2nd edition. 2004. Available from URL: <https://www.who.int/publications/item/9241546123>
- 20 Su D, Xue S, Tie M, et al. Exogenous selenium foliar application on nutrition, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.). *J Food Composit*

- Anal*, 2024, 130: 106145
- 21 Burgon V H, Silva M L N, Milani R F, et al. Trace elements in bean-to-bar chocolates from Brazil and Ecuador. *J Trace Elem Med Biol*, 2024, 84: 127431
 - 22 Venianakis T, Primikyri A, Alexandri E, et al. Molecular models of three ω -3 fatty acids based on NMR and DFT calculations of ^1H NMR chemical shifts. *J Mol Liq*, 2021, 342: 117460
 - 23 Martínez-Martín I, Hernández-Jiménez M, Revilla I, et al. Prediction of mineral composition in wheat flours fortified with lentil flour using NIR technology. *Sensors*, 2023, 23: 1491
 - 24 Li H Z, Bi Q, Yang K, et al. D_2O -isotope-labeling approach to probing phosphate-solubilizing bacteria in complex soil communities by single-cell raman spectroscopy. *Anal Chem*, 2019, 91: 2239–2246
 - 25 De Feudis M, Massaccesi L, D'Amato R, et al. Impact of Na-selenite fertilization on the microbial biomass and enzymes of a soil under corn (*Zea mays* L.) cultivation. *Geoderma*, 2020, 373: 114425
 - 26 Tolu J, Bouchet S, Helfenstein J, et al. Understanding soil selenium accumulation and bioavailability through size resolved and elemental characterization of soil extracts. *Nat Commun*, 2022, 13: 6974
 - 27 Jiao L, Zhang L, Zhang Y, et al. Transcriptome analysis provides new insight into the distribution and transport of selenium and its associated metals in selenium-rich rice. *Environ Pollut*, 2022, 301: 118980
 - 28 Lange S, Vollmer S. The effect of economic development on population health: A review of the empirical evidence. *Br Med Bull*, 2017, 121: 47–60
 - 29 Pritchett L, Summers L H. Wealthier is healthier. *J Hum Resour*, 1996, 31: 1–46
 - 30 Subramanyam M A, Kawachi I, Berkman L F, et al. Is economic growth associated with reduction in child undernutrition in India? *PLoS Med*, 2011, 8: e1000424
 - 31 Behrman J R, Deolalikar A B. Will developing country nutrition improve with income? A case study for rural south india *J Polit Econ*, 1987, 95: 492–507
 - 32 Farag M, NandaKumar A K, Wallack S, et al. The income elasticity of health care spending in developing and developed countries. *Int J Health Care Finance Econ*, 2012, 12: 145–162
 - 33 Dong H, Gao J, Li J Y, et al. Study on the technology of keeping nutrient elements in moderate processing of refined corn oil (in Chinese). *Mod Food*, 2021, 27: 56–59 [董华, 高健, 李洁艳, 等. 精炼玉米油适度加工营养元素保留技术的研究. *现代食品*, 2021, 27: 56–59]
 - 34 Zhu Y. Content of squalene in vegetable oils and its change during oil processing and utilization (in Chinese). *China Oils Fats*. 2019, 44: 136–138 [朱云. 植物油中角鲨烯含量及其在油脂加工与使用过程中的变化. *中国油脂*. 2019, 44: 136–138]
 - 35 Ding K Y, Jin J, Ren Y, et al. Recent research progress of 3D printing technology in food products (in Chinese). *J Nanjing Agric Univ*, 2024: 32: 1148 [丁可盈, 金晶, 任玉, 等. 3D打印技术在食品中的研究进展. *南京农业大学学报*. 2024: 32: 1148]
 - 36 Li X, Fan L, Li J. Utilization of polysaccharide-based high internal phase emulsion for nutraceutical encapsulation and 3D printing: Reinforcement of curcumin stability and bioaccessibility. *LWT-Food Sci Technol*, 2023, 189: 115478
 - 37 Wang H, Hu L, Peng L, et al. Dual encapsulation of β -carotene by β -cyclodextrin and chitosan for 3D printing application. *Food Chem*, 2022, 378: 132088
 - 38 Rosas-Val P, Adhami M, Brotons-Canto A, et al. 3D printing of microencapsulated *Lactobacillus rhamnosus* for oral delivery. *Int J Pharm*, 2023, 641: 123058
 - 39 Jiang Y G. Precision nutrition: a new frontier in military nutrition research (in Chinese). *Mil Med Sci*, 2023, 47: 721–724 [蒋与刚. 精准营养在军事营养学研究中的应用及展望. *军事医学*. 2023, 47: 721–724]
 - 40 Ni Y, Du J, Yin X, et al. Folate intake, serum folate, and risk of esophageal cancer: a systematic review and dose–response meta-analysis. *Eur J Cancer Prev*, 2019, 28: 173–180
 - 41 Moazzen S, Dolatkhah R, Tabrizi J S, et al. Folic acid intake and folate status and colorectal cancer risk: a systematic review and meta-analysis. *Clin Nutr*, 2018, 37: 1926–1934
 - 42 Wang Z, Li F S. Determination of trace selenium in selenium-enriched foods by intermittent flow-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry (in Chinese). *Guangdong Trace El Sci*, 2002, 9: 56–60 [王喆, 李方实. 断续流动氢化物发生原子荧光法测定富硒食品中的微量硒. *广东微量元素科学*. 2002, 9: 56–60]
 - 43 Gao J, Liu Y, Huang Y, et al. Daily selenium intake in a moderate selenium deficiency area of Suzhou, China. *Food Chem*, 2011, 126: 1088–1093

Global trends in functional agriculture: a mini-review

HUANG RuiLin^{1,3†}, LIN Qiao^{2†}, KONG LingBo², HU ShiYu¹, CHEN YouTao^{3,7}, HE PeiHuan^{3,8},
XIN ZhuLin^{5,6}, ZHANG ZeZhou^{1,3}, SONG JiaPing^{1,3}, ZHAO JianRong¹, YIN XueBin^{3*},
ZHAO RuiXue^{2,4*} & NIE YingLi^{2*}

¹College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China

²Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

³Anhui Province Key Laboratory of Functional Agriculture and Functional Food, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 239000, China

⁴Key Laboratory of Agricultural Integration Publishing Knowledge Mining and Knowledge Service, National Press and Publication Administration, Beijing 100081, China

⁵National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

⁶Department of Information Resources Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

⁷College of Agriculture, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China

⁸School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

† Contributed equally to this work

* Corresponding authors, E-mail: xbyin@ahstu.edu.cn; zhaoruiXue@caas.cn; nieyingli@caas.cn

As the global population increases, the desire for a higher quality of life is becoming more common, and agricultural production methods are transforming and undergoing new challenges. Functional agriculture, which focuses on the “nutrition and functionality” of agricultural products, is gradually gaining scientific attention in China and worldwide. Although the concept of functional agriculture was introduced only 16 years ago, in 2008, studies on functional micronutrients have a worldwide history of over a century. The present study found that reports regarding functional agriculture are steadily increasing domestically and internationally. Moreover, international studies mainly focus on the precise regulation and processing of functional foods, whereas domestic studies focus on the assessment of soil functional components and technologies for processing and encapsulating functional foods. This review provides crucial insights into the current research landscape, identifies existing gaps, and highlights future research topics in functional agriculture.

functional agriculture, development trends, precision nutrition, trace nutrients, biofortification

doi: [10.1360/SSV-2024-0117](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0117)