## 全球纳米农业发展现状及对中国的启示

王晓梅一,杨娇一,崔海信2,杨小薇

(1. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081;

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要: 纳米技术应用于农业的全要素、全过程与全生命周期管控, 其以纳米肥料、饲料、农药、兽药、疫苗、传感器、农副产品、环境改良技术和育种技术的研发为主。欧美等国家非常重视纳米农业技术发展, 希望整合纳米农业基础研究、应用研究和产业化开发引领新一轮世界农业科技革命和产业变革。当前, 中国正进一步加大纳米农业领域的政策布局, 取得了一系列科学技术发现和成果转化应用, 但发展中仍存在企业创新主体作用较弱, 安全性、规范性监管评价不足的问题, 建议进一步加强纳米农业科技创新政策体系的构建, 营造纳米农业产业发展市场环境, 抢占纳米农业科技发展制高点。

关键词:纳米农业;发展现状;研发趋势;战略部署

中图分类号: G311; G301 文献标识码: A DOI: 10.3772/j.issn.1009-8623.2023.11-12.007

纳米技术与信息技术、生物技术等传统科技的 渗透融合,推动现代产业体系发生重大变革<sup>[1]</sup>。纳 米技术在农业中的渗透和应用呈现多元化的特征, 尤其在农药与化肥的缓释和精准输送、病虫害防 治、植物生长发育、农产品质量安全检测和农产品 加工等方面的示范为人类解决粮食安全、资源短缺 和环境污染等问题开辟了重要科学路径,将对未来 农业的发展产生广泛而深远的影响<sup>[2-3]</sup>。

近年来,欧美等发达国家相继开展了相关科技战略部署和科学研究工作。中国纳米农业研究发展迅速,尤其是在利用纳米技术提高农业投入品的有效性和安全性方面,涌现了一批高价值的研究成果,引起了广泛的国际关注。为推动纳米农业科技发展及学科布局,建议从科技政策体系、产业市场环境、科学发展前沿3个方面协同推进,加强与促进中国纳米农业科技领域长足发展。

#### 1 全球纳米农业发展现状

纳米农业研发主要是通过物理、化学和生物学 手段构建纳米活性成分或物质,或利用纳米载体负 载功能性成分、元器件提升农业科技创新和产业化 发展水平。当前,纳米技术主要以应用为导向,可 植入于农业动植物遗传转化、病虫害防控、环境监 测改良、农产品加工和资源化利用等农业发展的全 要素、全过程与全生命周期管控(见图 1),主要 以研发纳米药品、纳米传感器、纳米物料、纳米环 境改良、农产品及副产品和育种技术为主(见图 2), 在农业产业设施改造升级、农业系统环境监控、病 虫害防控、动植物新品种挖掘和农产品品质提升等 方面潜力巨大[4-5]。

#### 1.1 纳米物料

#### 1.1.1 纳米肥料

纳米肥料是纳米农业技术的"里程碑"式研

第一作者简介:王晓梅(1987-),女,博士,副研究馆员,主要研究方向为农业科技情报研究。

通信作者简介:杨小薇(1977—),女,硕士,研究馆员,主要研究方向为战略情报决策研究。电子邮箱:yangxiaowei@caas.cn

**项目来源:**中国农业科学院公益性科研院所基本科研业务费(JBYW-AII-2023-36, JBYW-AII-2023-43); 国家科技图书文献中心专项任务(2022XM88)。

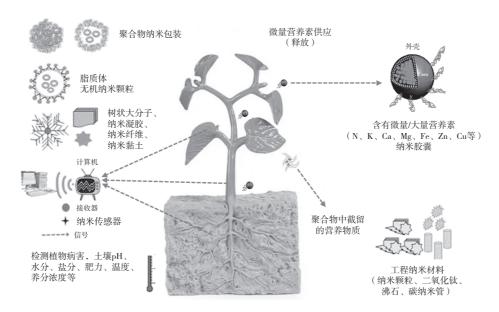


图 1 纳米技术在提高作物生产力和提供可持续农业实践中的作用 [6]



图 2 纳米农业的主要应用研究和产品分类

发应用,包括纳米颗粒肥料、纳米包被肥料、纳米复合肥料和纳米生物肥料<sup>[7]</sup>。黏土矿物、羟基磷灰石、壳聚糖、聚丙烯酸和沸石等纳米结构材料用于开发土壤和叶面施用的肥料,从而实现肥料的有效控制释放和生物利用率的持续提升<sup>[8]</sup>。许秀成等<sup>[9]</sup>指出,在化肥中添加质量分数 0.3% ~ 0.4% 的纳米氢氧化镁,可减少 20% ~ 30% 的化肥施用量,并使大田作物水稻、小麦产量保持不减产或有所增

加。Raliya等<sup>[10]</sup>将纳米氧化锌应用于绿豆生产,使绿豆根系体积增加,对磷的吸收率提高了 10.8%。目前,市售的纳米肥料包括美国 Aqua-Yield 公司的复合钾和锌的 NanoRiseTM 纳米胶囊,美国 Agro Nanotechnology 公司的植物生长调节剂和免疫增强剂 Nano-GroTM,印度 Nano Green Sciences 公司从玉米、谷物、大豆、土豆、椰子和棕榈中提取的复合肥 Nano Green,印度 Tropical Agrosystem公司蛋白质—

乳酸-葡萄糖酸盐与微量营养素、维生素、益生菌、海藻提取物、腐殖酸螯合的 TAG NANO 复合肥等。

#### 1.1.2 纳米饲料

纳米饲料是将纳米技术应用于畜禽改进饲料,包括纳米矿物质、纳米载体、纳米抗菌剂、纳米酶和纳米粉体添加剂等[11]。纳米硒、纳米铬、纳米银、纳米磷酸钙和纳米胶囊 / 胶束等纳米材料用于开发动物营养、益生菌和矿物质的饲料,能够提高饲料利用率、增加畜禽动物体重和促进营养物质的消化吸收。Sadeghian等[12] 口粮给予绵羊 1 mg/kg 的纳米硒时,对血液成分的过氧化损伤有积极作用。Andi 等[13] 研究发现纳米银可以改善肉鸡的采食量、增重量和饲料效率,从而改善肠道健康,提高营养物质消化吸收率。Bunglavan等[14] 研究发现在饲料中添加纳米颗粒可促进营养物质吸收,如直径为 50 nm 的纳米螯合物可以在不改变饲料颜色或味道的情况下有效地传递维生素、番茄红素和 ω 脂肪酸等营养成分。

#### 1.2 纳米药品

#### 1.2.1 纳米农药

纳米农药是将具有杀虫、杀菌、除草作用的活 性成分, 通过物化手段使其以纳米尺寸存在于农药 制剂中的农药形态[15],例如,纳米颗粒农药、纳 米乳液农药、纳米胶体农药、纳米包被农药和纳米 胶囊农药等。纳米农药具有降低农药使用量、提升 药物控释性能和降低农药残留的作用。Kaziem 等[16] 以 α-环糊精为封装分子,制备阿维菌素胶囊控释 剂,体外释放试验结果表明,控释剂具有良好的控 释性能。Peng等[17]以木质素磺酸钠为原料,通过 自组装的强疏水性阴离子和阳离子木质素载体制备 阿维菌素纳米制剂,阿维菌素在纳米制剂中的保留 率为 46.67% ~ 63.41%, 是市售阿维菌素乳化剂保 留率 2~3倍。目前,通过纳米技术处理可实现农 药的高效利用,已知的纳米农药产品包括氧化锌纳 米颗粒、二氧化硅纳米颗粒、二氯苯醚菊酯和多杀 菌素负载壳聚糖纳米颗粒等。国内市售的纳米农药 产品包括艾津集团 40% 三环唑悬浮剂的呵稻、新 农股份 20% 噻唑锌悬浮剂的碧生和明德立达纳米 的明润丰等。

#### 1.2.2 纳米兽药

纳米兽药通过载药系统进行靶向传递,用药后 到达特定组织和器官发挥作用,其颗粒小、比表面 积大、表面反应活性高、吸附能力强, 能控制释放 性,改变药物在动物体内的半衰期,延长药物作用 时间,降低毒副作用[18]。纳米兽药包括纳米晶体、 纳米聚合物、脂质纳米药物输送系统和高分子纳米 药物输送系统,具有较强的药物功效,药物生物利 用度高并可精确控制药物的释放。陈胡羚[19] 按 20 mg/kg 剂量给鸡灌胃,给药氟苯尼考原粉和氟苯尼 考纳米晶, 研究发现氟苯尼考纳米晶组的达峰时间 缩短,药时曲线下面积和峰浓度均明显提高,相对 生物利用度是对照组的 3.6 倍。Duong 等 [20] 研究发 现,大鼠皮下注射纳米结构的盐酸昂丹司琼,用以 预防放疗和化疗引起的恶心呕吐, 给药后盐酸昂丹 司琼混悬注射液平均驻留时间延长, 目前, 纳米兽 药产品的安全性和效果要经过严格评估方能投入市 场,纳米兽药的使用应遵循相关兽药使用指南。国 内市售的纳米"正清"消毒剂采用了纳米技术加工 工艺, 其药效提高了200倍。

#### 1.3 纳米传感器

#### 1.3.1 植物传感器

纳米植物传感器用以监测和报告植物体内的 生物、化学和物理参数,主要分为利用纳米感应元 件监测胁迫信号分子的传感器、利用纳米材料递送 的遗传编码传感器和基于纳米技术的可穿戴传感器 等[21]。Lew 等[22] 使用基于单壁碳纳米管的纳米传 感器实时监测植物内伤口引起的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 信号波形, 结果发现 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和 Ca<sup>2+</sup>信号通路在调节植物损伤后 的防御反应中相互作用,植物纳米柔性传感器可用 于快速监测合成植物生长素激素。Ang 等 [23] 利用 碳纳米管选择性监测植物的 1- 萘乙酸和 2,4- 二氯 苯氧乙酸, 结果表明纳米传感器可实时监测不同培 养基中不同植物的吸收和代谢规律,揭示敏感性水 稻与抗性水稻叶片中激素吸收和积累差异。目前, 基于纳米技术的生物传感器包括 Au/Ag 纳米颗粒、 聚吡咯/电化学还原石墨烯/玻碳、卟啉基纳米金 属有机骨架、石墨烯量子点和碳纳米材料(多壁碳 纳米管和石墨烯)等。碳纳米管传感器已在农业生 产中获得商业化应用,用以监测植物挥发性气体, 如乙烯、二氧化碳等。

#### 1.3.2 动物传感器

纳米动物传感器技术可连续不间断地提供有效、可靠和可行的实时数据,用于考量动物健康状况并及时预防和发现疾病。例如,通过纳米传感器

传入的数据实时监测畜禽动物的体温、位置、状态、体重和摄食等基本情况。碳纳米管传感器技术可检测动物身体分子活动,如炎症反应、血糖和血脂水平等。

#### 1.3.3 环境传感器

纳米环境传感器可用于多种场景下的智能监测,如植物生长环境、畜禽舍环境、农兽药残留、动植物疫情、土壤及水污染等方面的监测。Palaparthy等<sup>[24]</sup>使用氧化石墨烯作为测量相对湿度和土壤水分的传感薄膜,在相对湿度 50% ~ 94%范围内,网格阵列化的氧化石墨烯微传感器显示出较高的灵敏度(约 1 240%)。Chaudhary等<sup>[25]</sup>利用氧化石墨烯制作了电化学免疫传感器,可用于快速、灵敏地检测花生芽坏死病毒,有望克服传统病毒检测方法在田间条件下的局限性,从而转变农业诊断方法。目前,基于纳米技术的便携式畜禽口蹄疫病毒和伤寒沙门氏菌传感器已获得应用<sup>[26]</sup>。

#### 1.4 纳米环境改良

#### 1.4.1 土壤改良

纳米颗粒由于具有较大的比表面积和特殊的 吸附和催化性质, 可去除、降解污染物, 主要包括 表面吸附、专性吸附和氧化还原反应等[7,27]。纳米 氧化锌、纳米二氧化硅、多壁碳纳米管、碳纳米纤 维和纳米膨润土等可用于土壤病原体抑制、有机物 降解和水力传导增强等方面。李一丹等[28]研究发 现纳米碳的施加可以增加土壤中有机碳、全氮、钾 和总磷脂脂肪酸量,改善土壤微生物群落,而且在 土壤保水力方面有积极的影响。Beck 等 [29] 将生物 炭投加到绿色屋顶土壤中, 研究表明生物炭的投加 对土壤持水性、总氮、总磷、NO、和部分有机物 的降解有促进作用。目前,纳米土壤改良剂的产品 仍处于不断发展和研究的阶段, 市场上的产品种 类相对有限。一些可能的纳米土壤改良剂产品包 括二氧化硅纳米土壤改良剂、纳米黏土土壤改良 剂、纳米氧化锌土壤改良剂和纳米磷酸铁锂土壤 改良剂等。

#### 1.4.2 水质净化

纳米技术用于修复污染水中的铀、碳氢化合物、废水和重金属<sup>[7,30]</sup>,碳纳米管、纳米金、纳米银、纳米铁、纳米二氧化钛等可用于水体有害微生物杀灭、消毒、除臭和除污等净化处理。目前,商用纳米水质净化技术涉及活性炭纳米复合吸附材料、二氧化

钛纳米光催化剂涂层、纳米银抗菌材料和纳米氧化 铁吸附材料等。Zhang 等 <sup>[31]</sup> 将碳纳米管和炭黑的分 散液沉积在商业化正渗透膜表面,利用碳纳米管自 身属性与电场的灭活效应缓解膜污染程度。研究表 明,电场辅助的碳纳米管膜比商业化正渗透膜运行 成本大幅降低的同时污水的净化能力提高了 45.6%。 Rikhtehgaran 等 <sup>[32]</sup> 使用分子动力学模拟研究了电场 强度对碳纳米管 – 石墨烯复合膜脱盐效率的影响, 发现电场可加速离子传输的动力学过程,同时强化 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 的分离效果,离子分离效率随电场强度 增加而升高,在微电场作用下可获得高达 95% 的 脱盐率。

#### 1.5 农产品及副产物

#### 1.5.1 食品或农产品

利用纳米技术将食品或其营养成分纳米化,可 以提高食品的稳定性和生物利用度,改善其质地和 营养。同时, 纳米级的食品添加剂可以用于改善食 品的颜色、稳定性和质感,如纳米级颜料可用于调 节食品的颜色[33]。巴斯夫公司已成功研发出多种 纳米胶囊化的类胡萝卜素, 芬兰保利希食品公司将 植物固醇制成纳米微粒[34]。王晓岚等[35]通过大鼠 实验研究发现, 纳米级番茄红素在水中的分散性和 稳定性有所增加, 目比脂溶性番茄红素有更好的抗 肿瘤性能。常超等[36]采用纳米脂质载体的方法, 制备了一种白芸豆 α-淀粉酶抑制剂功能性食品, 招募志愿者进行该食品的降脂减重实验,并在食用 后对志愿者身体进行检查,结果表明该食品具有降 脂减重功能, 且安全性良好。在纳米食品进入市场 之前,必须进行纳米粒子对人类健康和环境的安全 性评估,制定对应纳米产品的科学监管方法,以确 保纳米材料的安全性和清除潜在风险,并用以规范 纳米食品的生产和使用。

#### 1.5.2 副产物、废弃物综合利用

农产品加工副产物和农业废弃物可通过有效加工生产纳米产品,是可再生能源、纳米硅和生物炭以及其他增值产品的最佳原料之一。纳米木质纤维素材料是最好的例子,它由纳米颗粒和木质素以及植物部分的纤维素组合而成<sup>[37]</sup>。密歇根生物技术公司首次开发了利用麦秸生产纤维素晶须的技术。王晴<sup>[38]</sup>使用 2,2,6,6- 四甲基哌啶 -1- 氧基氧化法制备纳米纤维素,研究小麦秸秆循环利用制备的生物质材料及其在绿色新型储能装置超级电容器

中的应用。Min 等<sup>[39]</sup> 首次以马铃薯皮为原料合成了碳点,制备的明胶膜具有较好的抗紫外线、抗氧化和抗菌性能,添加质量分数 2% 和 4% 的碳点后,明胶膜的自由基清除能力分别达到 99.2% 和 99.6%,同时碳点对的亲水性官能团增加了明胶膜的水蒸气透过率。

#### 1.5.3 贮藏、保鲜和包装

利用可降解的生物纳米复合材料制备食品包装可以提供更好的屏障性能 [40],如聚合物基纳米复合材料、纳米二氧化钛壳聚糖、纳米二氧化硅海藻酸钠涂膜、纳米碳酸钙改性聚乙烯膜等,用以防止氧气、水分和细菌的渗透,延长食品的保质期。李喜宏等 [41] 制备研究了纳米氧化锌 /PVC 膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的体外抑菌作用,研究结果表明膜内氧化锌粒子含量越高,抑制细菌的效果越好,保鲜性能也就越好。Parya等 [42] 利用硫功能化姜黄碳点制备了果胶 / 明胶基膜,均匀分散的碳点薄膜提高了防紫外线功能和力学性能,降低了薄膜的水蒸气渗透性和水接触角,且具有良好的抗氧化性能,对食源性致病菌、大肠杆菌和单核增生乳杆菌具有较强的抑菌活性。

#### 1.6 育种技术

纳米技术可用于基因传递和转录调控,纳米粒子可以作为基因载体传递基因到植物细胞中,实现基因编辑和转基因作物的培育。常用的有机高分子纳米基因载体有树枝状高分子聚合物、聚乙烯亚胺、多聚赖氨酸和壳聚糖;常用的无机纳米基因载体有硅纳米颗粒、四氧化三铁磁性纳米颗粒、金纳米粒子和碳纳米管等<sup>[7]</sup>。Wang等<sup>[43]</sup>将磁性纳米载体与精子介导的基因转染相结合研发转基因小鼠,在磁场作用下首次将装载有外源质粒 DNA 的四氧化三铁磁性纳米颗粒导入小鼠精子细胞,孵育完成受精,并获得转基因小鼠。Zhao等<sup>[44]</sup>将磁性纳米颗粒与外源 DNA 结合磁转染棉花花粉,外源 DNA 成功整合到棉花植株中且获得稳定遗传,为利用花粉磁转染其他农作物提供了理论基础和实践依据,促进了转基因作物新品种的培育。

#### 2 全球纳米农业研发趋势

结合当前国际学科前沿发展趋势和国内外研究基础,本文从前沿基础研究、核心技术创新、新产品创制和产业化开发等方面考虑,未来纳米农业

创新研发重点方向如下: (1)农业原材料纳米制 备技术, 开发纳米粒度化、载体化和结构化制备技 术和工艺装备。(2)纳米农业投入品提质增效机制, 阐述有效性、安全性和功能性的作用机制[45]。(3)绿 色纳米农药, 开发生物利用率高、低残留的高效安 全纳米农药新制剂。(4)纳米智能控释肥料,开 发响应作物吸肥规律的氮素智能控释复合肥料以及 速溶性磷肥与矿物微肥[46]。(5)高效低残留纳米 兽药,开发可控缓释与低残留等功能性纳米微囊剂、 口服型片剂和纳米乳注射剂等兽药新产品。(6)兽 用靶向纳米疫苗, 创制靶向疫苗、超长效疫苗、多 联多价疫苗和口服疫苗等新型纳米功能制剂。(7)功 能性纳米饲料,通过复合加工改性发展功能性和营 养强化饲料、纳米饲料添加剂及替代药物新产品。 (8) 纳米功能新材料, 创制超断热、耐老化与光 转换新型农膜与温室覆盖材料,调温、保湿、调光 与可控降解新型地膜, 理化与机械性能优良的贮 藏、保鲜与包装材料,作物秸秆生物基新材料等。 (9)食品纳米技术,创制新型功能性保健食品、 纳米生物反应器、固相酶与仿生催化、分离纯化 膜、食品安全检测技术装备和农产品溯源方位标识 等[47]。(10)纳米生物技术,开发基因编辑与遗 传转化等生物育种与合成生物学新方法, 创新基因 测序、多基因表达系统组装、人工染色体合成、细 胞克隆移植新型生物工程技术。(11)纳米生物安 全监测, 开发高通量、超灵敏与特异性纳米探针和 试剂盒等原位检测与快速检测技术。(12)纳米生 物传感器,研发基于纳米传感器、纳米芯片与器件

#### 3 全球主要国家纳米农业战略选择

的生物信息结合环境因子的精准农机装备[48]。

纳米技术是提升粮食安全、食品安全、生态安全以及农业资源的高效利用和可持续发展的重要手段之一。自2000年来,美国、日本、印度、中国和欧盟等国家和地区高度重视纳米技术发展,在相关科技领域及农业技术领域加大战略部署力度(见图3),希望通过整合纳米农业基础研究、应用研究和产业化开发,引领新一轮世界农业科技革命和产业变革[49-50]。

# 3.1 美国:从农业的不同维度开展纳米技术前沿研究

美国国家科技咨询委员会联合美国国家自然

科学基金委员会于2000年推出全球第一份《国家 纳米技术计划(NNI)战略规划》,之后每年更新[51]。 纳米技术在农业和食品工业中的研究、应用和推 广主要由美国农业部食品与农业研究院(NIFA)负 责[52]。近年来 NNI 对 NIFA 的纳米农业科技支持 力度逐年加大,2022年的投入高达1940万美元。 NIFA 从农业的不同维度积极开展纳米技术前沿研 究,包括促进科学技术发展、推进成果转化标准 化及食物链的安全性评价等,以期为改善粮食生 产、营养健康、可持续发展及食品安全提供纳米 技术解决方案。同时,美国相关战略规划涉及纳 米技术在多维度及交叉学科的应用属性,如"推 动食品与农业研究科学突破计划"强调探索利用 纳米技术、合成生物学和植物微生物组学等学科 应用, "美国制造业技术路线图"强调支持高性 能纳米材料加工, "工程生物学与材料科学, 跨 学科创新研究路线图"强调基础纳米结构和介观 结构模板的开发。在纳米农业技术领域,美国重 点关注利用纳米技术开发农用材料与设备、抗菌 食品加工包装材料、家畜疫苗递送系统、作物耐旱增强粒子,以及家畜繁殖活动检测、食源性病原体检测和水产品药物检测等设备;将纳米技术用于农业资源利用,主要利用植物蛋白、纤维素和木质素开发各种纳米材料,如介电材料、阻燃材料及其他多种复合材料等<sup>[53]</sup>。

#### 3.2 日本: 重点开展纳米农产品加工及检测

日本于 2001 年开始推进农业领域纳米技术的应用研究, "第二期科学技术基本计划(2001—2005)"中明确将纳米技术与材料列为国家研究开发的四大重点领域之一,同年日本政府组织制定了"纳米领域推进战略"<sup>[54]</sup>。2004 年,日本综合科学技术会议将农业领域的纳米生物技术列入《科学技术协作政策群计划》重点推进,由文部科学技术协作政策群计划》重点推进,由文部科学技术协作政策群计划》重点推进,由文部科学技术协作政策群计划》重点推进,由文部科学技术协作政策群计划》重点推进,由文部科学技术及协作政策。2015 年,日本科技厅研发战略中心发布"纳米技术和材料研发"计划,强调纳米技术在促进日本农业发展中的重要作用。日本政府在"第五期科学技术基本计划(2011—2020)"中明确提出,要加强对

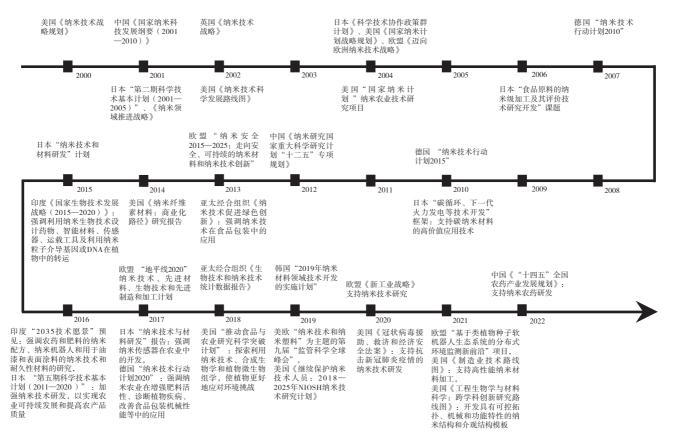


图 3 主要国家纳米技术及纳米农业技术发展政策演进

纳米技术的研究与开发,以实现农业生产的可持续发展和提高农产品质量。日本政府和企业对农业纳米技术研究给予了充足的经费支持,鼓励产学研各方的紧密合作,推动农业纳米技术从实验室走向实际应用。日本纳米农业技术主攻生物功能的创新利用,依托纳米技术、生物技术和食品加工技术等领域的交叉融合,进行纳米级的生物分子解构和功能解析、功能生物材料研发及产业化应用等<sup>[54]</sup>。已开展的研究包括食品加工领域纳米技术应用、评价技术、生物影响的评估以及新功能解析等,同时也积极开展了纳米级食品材料的安全性评估。

#### 3.3 印度: 重点关注纳米农业药品开发

纳米科技是印度重点发展的领域之一。近年 来,印度政府持续加大纳米领域的研发投入支持, 2015年,印度生物技术部发布《国家生物技术发 展战略(2015-2020)》,强调利用纳米技术开 展生物技术研究。2016年,印度技术信息预测与 评估委员会公布的《2035技术展望》中重点强 调了纳米技术在农药和肥料配方中的研发利用。 2020年,印度成为首个发布纳米农业投入品(包 括纳米农药和肥料)和纳米农产品评价指南的国 家[55]。印度在纳米农业领域重点关注的方向包括: 农药和肥料的纳米配方;基于纳米技术设计药物 (包括化学药物、siRNA)运载工具;提升现有药 物的效果和应用范围: 开发疾病早期诊断与成像 技术;设计开发智能纳米材料;开发探测食物和 作物中化学物质及有毒物质的传感器, 开发农药、 信息素和营养成分的纳米运载工具;利用纳米粒 子介导基因或 DNA 在植物中的转运, 开发抗虫害 植物品种。

#### 3.4 欧盟:利用纳米技术提升先进材料加工及制造

欧盟利用纳米技术持续提升现有优势产业(如先进材料、汽车制造、消费类产品生产和通信技术产业等)的世界竞争力,纳米技术在光学、机械、电力和化工等工业新兴领域得到应用<sup>[56]</sup>。2017年,欧盟发布了面向"地平线 2020"的纳米技术、先进材料、生物技术、先进制造及加工的计划,用以支持纳米技术的产业化发展。欧盟工业制造业围绕纳米技术的研发创新活动,主要集中于四大优先领域:高纯度纳米尺度颗粒物的规模化生产制造;纳米尺度基质材料加工组件的研发;纳米

材料表面涂层技术的研发;纳米材料规模化生产 及生产线加工工艺的研究开发。德国联邦教育及 研究部发布的"纳米技术行动计划 2020"突出强 调了纳米技术方法可应用于农业和食品工业,如 增强肥料活性、诊断植物疾病和改善食品包装机 械性能等。欧盟在纳米食品、药品和农业方面投 入大量公共财政经费进行技术安全可靠性基础研 究和安全监管 [57]。

#### 4 中国纳米农业发展现状及存在问题

自 2001 年以来,中国在纳米科技领域的顶层设计逐步加强。2009 年,中国农业科学院组建了国内第一家农业纳米研究中心,积极开展纳米农业科技相关研究,并取得不错进展,但中国的纳米农业发展仍处于初级阶段,科研和产业发展有待进一步完善。

#### 4.1 中国纳米农业发展现状

#### 4.1.1 政策布局及时推进

2001年,中国成立了国家纳米科技指导协调委员会并印发《国家纳米科技发展纲要(2001-2010)》,对中国纳米科技工作做出顶层设计,提出通过农业纳米技术提高作物抗病虫害能力、改良动植物品种、提升动植物产品价值、减少化肥农药施用,进一步促进农业发展提质增效 [58]。农业农村部发布的《"十四五"全国农药产业发展规划》《乡村振兴科技支撑行动实施方案》《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》等文件中均将纳米农业或农业纳米药物列为重点发展技术。

#### 4.1.2 科技发展稳步迈进

科技部、农业农村部、国家自然科学基金委等从不同层面对纳米农业科技研究予以支持,中国科学院国家纳米科学中心、中国农业科学院农业纳米研究中心、清华大学等单位积极致力于纳米农业创新研究及应用,在纳米农业研究方面取得了一系列原创性的重要成果。截至2022年12月,中国在纳米农业相关领域的SCI总发文量为33014篇,排名世界第一位,主要学科领域包括材料科学、化学、物理学、环境科学、食品科学及交叉学科,主要研究内容涉及纳米颗粒制备、电化学、生物传感器、光催化剂、食品科学和水处理等领域。

#### 4.1.3 科学研究扎实开展

中国科研工作者在新型农业纳米材料创制与

功能挖掘、农业投入品提质增效与节量减排、纳米农业投入品核心制备技术与工艺、新型纳米农业投入品开发方面取得了长足进展;在生物农药、兽药与疫苗的靶向传输与控制释放技术、纳米药物载体与新剂型创制等方面取得一批创新性的研究成果;在利用纳米基因工程载体培育转基因猪和转基因棉花,农药的叶面亲和修饰与高效剂量传输、纳米光催化农产品保鲜技术、病原微生物超灵敏与特性检测探针技术等研究方面也取得了重要进展;积极推进产学研联合与新成果的应用于转化工作,加速实现成果转化与大规模产业化。

#### 4.1.4 转化应用逐步推广

中国纳米农业技术产业化应用涉及种植业、畜牧养殖业、环境保护等。国内农用化学品公司推出了纳米钾肥、海藻精纳米微颗粒、纳米液体硅肥,呵稻、碧生、明润丰等纳米肥料和农药制剂,已先后在全国各个省份开展了农作物的田间应用和病虫害防治应用;同时也积极开展研发致力于挖掘纳米技术的潜力,如高效、高渗透的纳米活性成分制备,农药杀虫剂改性,土壤有害物质、水分储运改良等。

#### 4.2 中国纳米农业发展存在问题

#### 4.2.1 纳米农业发展处于初级阶段

纳米农业科学理论与基础研究相对薄弱,创新平台与基础研究设施条件相对落后,且研究普遍处于实验室阶段,理论研究不够系统,且受制于产能技术、生产成本、规模化生产设备和社会影响等多重因素,纳米农业科技产品应用规模较小、成本较高、产业化进程较长。同时,纳米农业学科阵容及专业化人才队伍规模较小,学术层次及专业化结构有待完善,且科研对产业的推动能力较弱,产学研协作机制不健全。加之,目前对纳米农业应用价值的开发欠缺,大部分纳米材料多以原材料形式供应给企业,对纳米器件、纳米加工与检测等配套技术的应用开发力度不足,纳米农业的切入点仍然有大部分空白领域有待研究。

#### 4.2.2 企业创新主体作用较弱

中国纳米农业领域企业未充分发挥创新主体作用,纳米农业领域与其他学科交叉融合受限,纳 米技术成果向农业领域渗透辐射不足,科技交流合 作主要依靠各科研机构和高校主导完成,影响力和 引领作用不够。纳米技术在农业领域的研究、应用 和推广主要基于国家纳米科研行动计划进行推动, 经费主要依赖财政,社会资本注入不足。同时,仅 个别有潜力的应用产品在国家纳米技术整体发展规 划下获得资助,中国尚未制订全面系统的纳米农业 发展专项计划,引导企业创新主体发挥创新要素集 聚作用。

#### 4.2.3 科学研究辐射引领不足

中国纳米农业科学研究方向主要包括农业化学品纳米载体递释、纳米基因操作、纳米食品和农业生态安全与环境修复方向。研究领域主要为食品加工技术以及化肥、农药和饲料等农业化学品的资源利用,其他领域的研究及发文较少。研究主题聚焦在纳米农药、兽药、疫苗及食品添加剂,部分研究涉及了纳米技术,如磁性纳米基因载体、纳米流体光谱分频和币金属纳米结构合成,其他主题领域研究及报道较少,如纳米感应元件监测递送信号传感器、基因编辑工具或特定基因的靶向输送等。这表明中国在纳米农业科技领域的综合研究实力及跨学科辐射协同发展方面仍有较大空间。

#### 4.2.4 产品商业化应用场景存在局限性

尽管纳米技术在其他领域取得了巨大的应用 进展,但在农业中纳米产品的应用较少且场景有 限,应用领域主要以纳米肥料为主。中国纳米农 业相关的产品的应用尚处于初期阶段,已知国内 市场的部分产品在国际市场的流通量较少,国际 市场流通较多的纳米农业产品为美国企业和印度 企业的产品。国内商业化应用的滞后可能源于许 多技术需要经过进一步验证以确保实际生产中的 可行性和稳定性。纳米材料的制备和应用成本较 高,也限制了其在规模较小或资源有限的农业生 产中的应用。虽然存在一定的局限性,鉴于纳米 技术广阔的应用前景在未来会为农业带来更多的 创新机会。

#### 4.2.5 安全性、规范性监管评价不足

纳米材料在全球范围内的安全性评价及相关标准并未统一,文献研究中涉及纳米材料的评价方法和评价标准较多,纳米材料因其种类、大小、形态以及应用范围不同,其安全性评价标准也不能一概而论<sup>[7]</sup>。目前纳米农业在监督评价方面,着重评价纳米材料在不同环境中的使用剂量、理化性质、穿越细胞壁和细胞膜的机制及其暴露风险等,在相

关产品进入市场应用之前必须对其进行人类健康及 环境安全性的综合评估,制定对应纳米产品的使用 规范和科学监管方法。

#### 5 启示与建议

着眼未来,纳米技术将成为未来农业技术革命的重要驱动力。聚焦纳米农业发展要以深化基础研究和促进产业化为主线,发挥中国在纳米农业科技领域的研发优势,推动基础研究、应用研究和技术转移转化的一体化进程,突出原始创新和集成应用,抢占未来科技和产业发展的制高点,促进中国纳米农业领域的高质量发展。

(1)建立纳米农业科技创新政策体系。

纳米农业科技创新政策体系要以创新主体政策、要素政策和关联政策为核心,通过制度创新、政策突破和体系完善优化创新环境和提升创新能力。首先,相关部门应主张建立专门的组织管理机构,精心布局纳米技术在农业中的发展,制定国家长期规划,统筹发挥政府在战略布局、产业规划和监督规范等方面的作用。其次,相关科研院所要围绕国家农业发展重大需求,制定中国纳米农业的科研和产业发展路线,开展具有战略意义的纳米农业技术研究。最后,建立创新高效和开放合作的产业研发体系,以企业为主体,促进产学研合作发展,充分发挥高校、科研院所和企业的资源优势互补,以开源技术和开放科学为依托,促进学科发展,以创新要素流动和双循环发展为路径,营造国际化的产业发展环境。

(2)抢占纳米农业科技发展制高点。

纳米农业科技发展要立足于现代科技发展前沿,以创新驱动产业为导向,持续推动纳米农业技术的继承创新与应用。首先,纳米农业发展中要强化首创精神,科学家及战略科学家需及时研判纳米农业科技发展趋势,增强技术及产业敏感度,针对创新技术、产品及产业发展要素超前布局,创造更多的科技资源供给。其次,要以形成自主知识产权的纳米农业技术为主攻方向,加强功能物质靶向传输与控释、基因工程操作、智能传感器和仪器装备制造等关键新技术研究。最后,政府要加大重大项目支持和实施力度,积极推进跨学科的协同创新研究,攻克纳米农业关键核心技术难题,推动技术和产品的升级改造和规模化生产,促进科技成果的转

化应用和产业化。

(3) 营造纳米农业产业发展市场环境。

纳米农业的价值体现在对产业市场的颠覆性变革,其高质量发展离不开市场经济发展和资源配置优化。首先,要充分发挥政府在科技资源配置中的宏观引领作用,积极布局和完善农业纳米科技创新发展的各项促进政策,加大财政、税收和各项金融扶持政策。其次,要积极引导社会资本注入,畅通多渠道投资融资引资,完善担保机制灵活运用担保方式,降低实体经济融资成本,拓宽纳米农业研发资金来源。最后,要加快产品安全性、可行性和标准化的监管和评价,推动创新技术及产品市场化超前布局,依托绿色审批通道缩短产品准入周期,同时,积极加强和完善创新技术产品的知识产权保护。■

#### 参考文献:

- [1] 汪玉洁,陈日远,刘厚诚,等.纳米材料在农业上的应用及其对植物生长和发育的影响[J].植物生理学报,2017,53(6):933-942.
- [2] HU K, LIU J, LI B, et al. Global research trends in food safety in agriculture and industry from 1991 to 2018: A data-driven analysis[J]. Trends in food science and technology, 2019, 85: 262-276.
- [3] GRIESCHE C, BAEUMNER A J. Biosensors to support sustainable agriculture and food safety[J]. TrAC-Trends in analytical chemistry, 2020: 115906.
- [4] 李冬霞, 陈红新, 朱焕焕, 等. 纳米科技如何影响农业, 又将推动农业走向何方[J]. 蔬菜, 2019(1): 1-12.
- [5] DASGUPTA N, RANJAN S, MUNDEKKAD D, et al. Nanotechnology in agro-food: from field to plate[J]. Food research international, 2015, 69: 381-400.
- [6] SINGH H, SHARMA A, BHARDWAJ S K, et al. Recent advances in the applications of nano-agrochemicals for sustainable agricultural development[J]. Environmental science-processes impacts, 2021, 23: 213-239.
- [7] 孙长娇,崔海信,王琰,等.纳米材料与技术在农业上的应用研究进展[J].中国农业科技导报,2016,18(1):18-25.
- [8] 齐明阳,王秀峰,冯文博,等.不同纳米材料在纳米肥料上的应用研究进展[J]. 肥料与健康,2023,50(2): 1-5,23.

- [9] 许秀成,侯翠红.地球磷资源流与肥料跨界融合[M]. 北京:化学工业出版社,2020:258-261.
- [10] RALIYA R, TARAFDAR J C, BISWAS P. Enhancing the mobilization of native phosphorus in the mung bean rhizosphere using ZnO nanoparticles synthesized by soil fungi[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2016, 64: 3111-3118.
- [11] 蔡政忠. 纳米材料在动物营养中的作用模式及其在饲料的应用[J]. 中国饲料, 2020(20): 5-7.
- [12] SADEGHIAN S, KOJOURI G A, MOHEBBI A. Nanoparticles of selenium as species with stronger physiological effects in sheep in comparison with sodium selenite [J]. Biological trace element research, 2012, 146: 302-308.
- [13] ANDI M A, HASHEMI M, AHMADI F. Effects of feed with/without nanosil on cumulative performance, relative organ weight and some blood parameters of broilers[J]. Global veterinaria, 2011, 7: 605-609.
- [14] BUNGLAVAN S J, GARG A K, DASS R S, et al. Use of nanoparticles as feed additives to improve digestion and absorption in livestock[J]. Livestock research international, 2014, 2: 36-47.
- [15] 王淼,周杰,陈鸽,等.纳米生物农药的设计及控缓释研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 9-18.
- [16] KAZIEM A E, GAO Y H, ZHANG Y, et al. α-Amylase triggered carriers based on cyclodextrin anchored hollow mesoporous silica for enhancing insecticidal activity of avermectin against *Plutella xylostella*[J]. Journal of hazardous materials, 2018, 359:213-221.
- [17] PENG R F, YANG D J, QIU X Q, et al. Preparation of self-dispersedlignin-based drug-loaded material and its application in avermectin nano-formulation[J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 151: 421-427.
- [18] 严素凡,姜源明,何莫斌,等.纳米技术在兽药中的应用及研究进展[J].浙江畜牧兽医,2015,40(6):11-12.
- [19] 陈胡羚. 氟苯尼考纳米晶的研制及在鸡体内的生物利用度评价 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [20] DUONG V A, NGUYENT T L, HAN-JOO M, et al. Nanostructured lipid carriers containing ondansetron hydrochloride by cold high-pressure homogenization method: preparation, characterization, and pharmacokinetic

- evaluation[J]. Journal of drug delivery science and technology, 2019, 53: 101185.
- [21] 李俐莹, 严义君, 赵鹤然, 等. 用于植物健康监测的柔性传感器研究进展 [J]. 半导体技术, 2023, 48(10): 870-878, 941, 828.
- [22] LEW T T S, KOMAN V B, SILMORE K S, et al. Real-time detection of wound-induced H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> signalling waves in plants with optical nanosensors[J]. Nature plants, 2020, 6(4): 404-415.
- [23] ANG M C Y, DHAR N, KHONG D T, et al. Nanosensor detection of synthetic auxins in planta using corona phase molecular recognition[J]. ACS sensors, 2021, 6(8): 3032-3046.
- [24] PALAPARTHY V S, KALITA H, SURYA S G, et al. Graphene oxide based soil moisture microsensor for in situ agriculture applications[J]. Sensors and actuators B: chemical, 2018, 273: 1660-1669.
- [25] CHAUDHARY M, VERMA S, KUMAR A, et al. Graphene oxide based electrochemical immunosensor for rapid detection of groundnut bud necrosis orthotospovirus in agricultural crops[J]. Talanta, 2021, 235: 122717.
- [26] KUZMA J. Nanotechnology in animal productionupstream assessment of applications[J]. Livestock science, 2010, 130(1): 14-24.
- [27] 李亚娇, 林星辰, 李家科, 等. 生物炭作为土壤/填料改良剂的应用研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(11): 2688-2693, 2697.
- [28] 李一丹, 孙磊. 纳米碳与氮肥配施对水稻土壤养分和微生物群落结构的影响 [J]. 中国稻米, 2019, 25(1): 70-73, 79.
- [29] BECK D A, JOHNSON G R, SPOLEK G A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality[J]. Environmental pollution, 2011, 159(8/9): 2111-2118.
- [30] 李若,尤世界,刘艳彪.电活性碳纳米管膜水质净化原理与应用研究进展[J].中国给水排水,2022,38(4):63-70.
- [31] ZHANG Q Y, WANG J W, VECITIS C D. Fouling reduction and recovery during forward osmosis of wastewater using an electroactive CNT composite membrane[J]. Journal of membrane science, 2021, 620: 118803.

- [32] RIKHTEHGARAN S, WILLE L T. The effect of an electric field on ion separation and water desalination using molecular dynamics simulations[J]. Journal of molecular modeling, 2021, 27(2): 21.
- [33] 陈榕钦, 孙潇鹏, 刘灿灿. 纳米食品的研究进展 [J]. 包装与食品机械, 2018, 36(4): 49-53.
- [34] 许晶, 李洋洋, 金花, 等. 纳米乳在食品工业中应用 [J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(5): 89-96.
- [35] 王晓岚,王璇,张连富.番茄红素纳米分散体抗小鼠肝移植瘤的作用[J].食品与生物技术学报,2010,29(3):376-380.
- [36] 常超. 纳米脂质功能食品研发及对体育健康产业的影响 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 182-185.
- [37] 丁可,葛帅,孔慧,等.食品加工副产物源碳点制备及在食品智能活性包装中的应用研究进展[J/OL].食品科学,2023,44(23):202-214.
- [38] 王晴. 小麦秸秆制备纳米纤维素及其应用 [D]. 郑州:河南工业大学, 2023.
- [39] MIN S, EZATI P, RHIM J W. Gelatin-based packaging material incorporated with potato skins carbon dots as functional filler [J]. Industrial crops and products, 2022, 181: 114820.
- [40] 李丹, 李中华, 金林宇, 等. 纳米技术在食品包装领域的应用[J]. 上海包装, 2019(10): 34-37.
- [41] 李喜宏, 李伟丽, 张培培, 等. 纳米 ZnO/PVC 保鲜膜抑菌性能及应用研究 [J]. 包装工程, 2009, 30(10): 5-7, 17.
- [42] PARYA E, SWARUP R, JONG-WHAN R. Pectin/gelatin-based bioactive composite films reinforced with sulfur functionalized carbon dots[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2022, 636: 128123.
- [43] WANG Y, ZHAO X, DU W, et al. Production of transgenic mice through sperm-mediated gene transfer using magnetic nano-car riers[J]. Journal of biomeddical nanotechnology, 2017, 13(12): 1673-1681.
- [44] ZHAO X, MENG Z, WANG Y, et al. Pollen magnetofection for genetic modification with magnetic nanoparticles as gene carriers[J]. Nature plants, 2017, 3(12): 956.
- [45] KAH M, TUFENKJI N, WHITE J C. Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection[J]. Nature nanotechnology, 2019, 14(6): 532-540.

- [46] VERMA K K, SONG X P, JOSHI A, et al. Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global good security[J]. Nanomaterials (Basel), 2022, 12(1): 173.
- [47] SAMPATHKUMAR K, TAN K X, LOO SC J, et al. Developing nano-delivery systems for agriculture and food applications with nature-derived polymers[J]. iScience, 2020, 23(5): 101055.
- [48] ALI S S, AL-TOHAMY R, KOUTRA E, et al. Nanobiotechnological advancements in agriculture and food industry: applications, nanotoxicity, and future perspectives[J]. The science of the total environment, 2021, 792: 148359.
- [49] 张莉,程晓宇,刘洪霞.农业纳米技术应用分析与展望[J].农业展望,2018,14(5):63-67.
- [50] 熊书玲,傅俊英,曾文,等.基于论文和专利计量的 纳米技术研发态势研究 [J]. 全球科技经济瞭望,2022,37(8):37-46.
- [51] 汪凌勇,董瑜.美国国家纳米技术计划评估及启示 [J]. 全球科技经济瞭望,2020,35(6):26-31.
- [52] 王璐, 刘红忠. 纳米技术在农业中的应用与促进政策: 中美两国比较分析及启示 [J]. 中国科技论坛, 2014(9): 149-154.
- [53] National Institute of Food and Agriculture. National Institute of Food and Agriculture (NIFA) reporting portal/ Current Research Information System (CRIS)[EB/OL]. [2023-08-08]. https://data.nal.usda.gov/dataset/nationalinstitute-food-and-agriculture-nifa-reporting-portalcurrent-research-information-system-cris.
- [54] 吴松. 日本政府的纳米科技发展战略与重大举措 [J]. 全球科技经济瞭望, 2008, 23(6): 16-21.
- [55] 申继忠, 余武秀. 纳米农药的监管现状与展望 [J]. 世界农药, 2021, 43(4): 8-18, 49.
- [56] 张志勤. 欧盟纳米技术的研发现状及趋势分析 [J]. 全球科技经济瞭望, 2014, 29(6): 23-32.
- [57] Press Information Bureau, Government of India, Ministry of Science & Technology. National biotechnology development strategy 2015-2020[EB/OL]. [2023-08-08]. https://www.pib.gov.in/newsite/PrintRelease.aspx?relid=134035.
- [58] 袁志彬. 科技政策议程设置中的内参模式研究 [J]. 创新科技, 2022, 22(1): 30-36. (下转第78页)

# Performance Evaluation Experience of National Laboratories of U.S. Department of Energy and Its Enlightenment to Guangdong Provincial Laboratory Evaluation

XUE Lu, LI Sha

(Guangdong Science and Technology Infrastructure Center, Guangzhou 510033)

Abstract: This paper examines the evaluative practices of the National Laboratories of the U.S. Department of Energy (DOENL) with a focus on the entire assessment process. The assessment objectives, operational mechanisms, evaluation methodologies, assessment contents, evaluation procedures, and the application of results within the context of DOENL are thoroughly reviewed. Drawing from a comprehensive summary of the distinctive features observed in the evaluation of DOENL, this paper identifies existing shortcomings in the evaluation of technological innovation bases in China. Consequently, several suggestions are proposed to address these deficiencies, including enhancing the formulation of evaluation objectives, improving the participation of multiple stakeholders in the evaluation process, and establishing a robust information system, in order to provide reference for the laboratory evaluation work in Guangdong province.

Keywords: Guangdong province; the U.S. Department of Energy; national laboratory; performance evaluation

(上接第60页)

### Current Status of Global Nanoagriculture Development and Its Enlightenment for China

WANG Xiaomei<sup>1</sup>, YANG Jiao<sup>1</sup>, CUI Haixin<sup>2</sup>, YANG Xiaowei<sup>1</sup>

- (1. Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;
- Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
  Beijing 100081)

Abstract: Nanotechnology is applied to the full element, process, and lifecycle control of agriculture, mainly focusing on the research and development of nanofertilizers, feed, pesticides, veterinary drugs, vaccines, sensors, agricultural by-products, environmental improvement technologies, and breeding technologies. European countries and the United States attach great importance to the development of nanoagriculture, hoping to integrate basic research, applied research, and industrial development of nanoagriculture, leading a new round of world agricultural technology revolution and industrial transformation. At present, China is further expanding the policy layout in the field of nanoagriculture, and has made a series of scientific and technological discoveries and achievements transformation and application. However, there are still problems in the development, such as weak role of enterprise innovation subject, insufficient safety and normative regulatory evaluation. It is suggested to further strengthen the construction of the policy system for scientific and technological innovation in nanoagriculture, create a market environment for the development of nanoagriculture industry, and seize the high groud of the development of nanoagriculture science and technology.

Keywords: nanoagriculture; development status; research and development trends; strategic deployment