

农业领域若干颠覆性技术初探

王栋¹, 陈源泉², 李道亮², 朱万斌², 谭伟明², 杜太生², 田见晖², 康绍忠²

(1. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193; 2. 中国农业大学, 北京 100193)

摘要: 本文是中国工程院咨询项目“农业领域颠覆性技术战略研究”课题的初步成果。主要围绕当前和未来技术创新活跃的农业生物技术、农业信息技术、纳米材料技术等领域, 从动植物育种、农业生物药物与生物肥料、农业生物质工程、智能农业技术以及非传统种植空间利用五个方面开展分析研究。通过会议调研、访谈以及文献分析, 梳理出未来农业领域的颠覆性技术发展方向, 以期为政府、企业的研发投入以及科学研究方向提供参考。

关键词: 农业领域工程科技; 颠覆性技术; 战略研究

中图分类号: S-1 文献标识码: A

Foresight of Disruptive Technologies in Agricultural Engineering

Wang Dong¹, Chen Yuanquan², Li Daoliang², Zhu Wanbin², Tan Weiming²,
Du Taisheng², Tian Jianhui², Kang Shaozhong²

(1. Institute of Animal Science, China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This study was the preliminary results of the “Research on Disruptive Technologies in the Agricultural Field” under the Consulting Research Project of the Chinese Academy of Engineering. Our report mainly focused on those active fields in current and future technological innovations including agricultural biotechnology, agricultural information technology and nanomaterial technology. Specifically, five critical directions were investigated in the report, consisting of animal and plant breeding, agricultural biotech medicine and bio-fertilizer, agricultural biomass engineering, intelligent agricultural technology, and non-traditional planting space. Through the analysis of conferences, patents, interviews, and literatures, the development directions of disruptive technology in the agricultural field were suggested. Hopefully, our results can provide references for the development investment of the government and enterprises as well as research directions of scientists.

Keywords: science and technology in agricultural engineering; disruptive technologies; strategy research

一、前言

当前, 生物技术、信息技术、新材料技术、新

能源技术等不断创新发展, 正带动以绿色、智能、泛在为特征的群体性重大技术变革, 并将深刻影响农业科技和产业发展。未来 15~20 年内, 这些革命

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-10-31

通讯作者: 康绍忠, 中国农业大学, 教授, 中国工程院, 院士, 研究方向为农业水土工程; E-mail: kangsz@cau.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”(2017-ZD-10)

本刊网址: www.enginsci.cn

性技术向农业领域渗透，必将掀起新一轮农业生物技术浪潮，促进“互联网+”产业兴起，引领和支撑农业实现节能、减排、绿色、低碳的可持续发展。当前，我国整体上形成了少量领跑、多数并行和跟跑的农业科技基本格局，与发达国家相比，仍然存在原始创新能力不足、产业支撑能力偏弱等差距。面对即将到来的新一轮世界科技革命，必须面向世界农业科技前沿、面向农业农村主战场、面向国家农业科技重大需求，研究提出我国农业领域颠覆性技术的研究方向，抢占全球农业科技竞争先机，提升我国农业科技创新力和产业竞争力。本研究通过会议调研、访谈、文献研究及专利分析等方法，以具有重大技术创新和突破、颠覆了传统技术路线、改变了现有业态形式并催生和构建新兴产业、产生重大综合效益、影响和改变了社会经济发展道路与方式为标准，梳理出未来农业领域颠覆性技术的发展方向。

二、农业领域颠覆性技术发展态势

当前和未来技术创新活跃的农业生物技术、农业信息技术、纳米材料技术等方向，对农业领域各子领域研究方向具有重要意义，并呈现出不同的发展趋势。

（一）动植物育种

育种技术创新为确保食品安全与稳定供给提供保障。据世界银行预测，随着城镇化发展及国民经济和人口的持续增长，到2020年，我国粮食需求将增加到 6.7×10^8 t，2030年将达到 7×10^8 t [1]。由于土地资源以及饲养规模的限制，只有通过育种技术创新，不断提高动植物单产水平和生产效率，我国才能在现有资源条件下提高动植物食品生产总量。以动物育种为例，随着动物基因组测序技术的突破，利用基因组信息直接进行基因组选择，就可对目标性状进行准确选育，颠覆了大群体遗传评估、后裔验证的传统育种技术路线，基因组育种正成为各大育种公司争夺的战略高地 [2]；家畜胚胎基因编辑育种取得突破，通过直接编辑决定遗传性状的胚胎基因，即可精确改良家畜遗传性状，获得一批传统育种较难培育、肉用性能和抗病力显著提高的牛、羊、猪，彻底颠覆了通过表

型性状进行选育的传统育种技术路线，成为畜牧种业革命的新引擎 [3~5]；干细胞育种以更早、更高效的育种潜力，正在逐渐被认可，特别是干细胞与诱导分化、体外受精、基因组选择等技术结合，可根本改变以往出生初选、断奶再选等选择时限和技术路线 [6]。这些技术对动植物育种技术路线、繁育形式与效率将产生颠覆性影响。我国基因组育种技术已在奶牛上率先突破 [7]，并由跟跑逐渐走向并跑，家畜胚胎基因编辑育种和诱导性多能干细胞（iPS）技术世界领先，而畜禽干细胞等技术还处于跟跑阶段。深入开展相关研究，将有助于我国在国际竞争中抢占动物种业制高点。

（二）农业生物药物与生物肥料

化肥和农业化学药物带来的严重环境污染、抗药性和健康等问题，日益受到关注。发展生物肥料和生物药物（主要包括生物农药、生物兽药等），替代和减少化肥和化学药物使用、保证农业稳产高产、保障食品安全和公众健康意义重大，也是改善生态、实现环境安全和农业可持续发展的重要途径。生命科学和新型纳米材料等技术，为农业生物肥料和生物药物发展提供了全新途径和技术支撑，并将推动相关战略性新兴产业快速成长。如利用合成生物学制备微生物次生代谢产物、利用核糖核酸（RNA）干扰技术防治病毒病等技术，开辟了从基因水平进行病虫害防治技术研发和药物制备的生物学新途径；利用新材料研发高效药物传递系统，实现农药靶向施用；革新施药器械，促进药剂在靶标沉积，提高药剂利用率，减少环境污染。利用作物微生物组学和合成菌群学构建生态稳定的多菌种复合微生物肥料；通过互作信号调控增强微生物肥料在植物根际的定殖与作用效果。农业生物肥料和生物药物的成功产业化，将彻底改变农业生产严重依赖化学肥料和化学药物的局面，改变相关产业结构，提高我国相关产业的国际竞争力。

（三）农业生物质工程

生物质产业是战略性新兴产业，具有可再生、清洁、低碳、惠农和对化石能源多途径替代等优势，还能够将秸秆、粪污等农林废弃物资源化利用，大幅度减少面源污染 [8,9]。中近期内生物质工程每年可为我国提供 1×10^8 t生物质运输燃料和

$1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 生物天然气, 在世界贸易格局洗牌的大形势下, 对降低石油和天然气的进口依赖度, 提高国家能源乃至金融安全具有重大意义。生物质能源已经成为领先风能和太阳能的全球第一大可再生能源品种 [10,11], 到 21 世纪中叶, 将很可能进一步成为全球第一大能源品种; 生物基材料是不可再生化工原料唯一的替代途径, 已成为生物质转化的主导方向和化工材料的重要来源; 生物质原料成为全球农业生产的主要目标之一。高效低成本利用木质纤维素原料已成为研究的热点和难点, 以生物质原料生产化工平台化合物是生物质工程未来 20 年的发展重点。关键技术一旦取得突破, 能源和材料不可再生的威胁、生物质能源与粮食安全的矛盾、生物质产业的规模限制、生物质工程的转化效率和能源转化率等问题都将迎刃而解。我国生物质产业起步晚, 研发投入力度小, 相关科技相对落后。加快生物质颠覆性技术研发, 才能使我国生物质产业跻身世界一流行业, 支撑国家强盛。

(四) 智能农业技术

信息化是农业现代化的制高点, 智能化是驱动农业现代化的先导力量 [12]。智能技术驱动的农业科技变革对农业发展呈现系统性颠覆趋势, 以物联网、大数据、人工智能和机器人为典型代表, 通过物联网传感系统实现物物相连, 为大数据提供渠道和数据基础 [13]; 通过对大数据进行处理与分析, 为人工智能提供精准数据处理手段和决策依据 [14]; 通过人工智能实现农业智能决策, 为机器人无人化作业提供核心处理手段, 四项技术高度融合构成了未来无人化、精准化、智能化、生态化农业的核心支撑 [15]。农业动植物生理传感器、动植物生长优化模型、装备管理与优化和智能机器人将是智能农业技术未来的研究热点; 农业物联网将向平台化、标准化、低成本化、高可靠性方向发展, 农业大数据将由数据高效存储向农业数据挖掘和知识发现技术方向发展, 人工智能将向物联网和大数据融合的人机智能信息识别、分类和决策方向发展, 农业机器人向基于语言理解的全过程智能化方向发展 [16]。

(五) 非传统种植空间

目前, 全球约 25% 的农地由于过度耕作、干

旱和污染等原因严重退化。未来 30 年, 全球粮食需求至少增长 60%。除坚守原耕地面积, 拓展传统耕作空间, 实现单位资源高效利用, 变相增加种植空间外, 还应科学开发利用盐碱地及荒漠等土地资源。目前, 城市农业、植物工厂、沙漠种植和虚拟种植等多项颠覆性技术逐步建立, 并成为新的科技热点和新的冲突爆发点, 对于缓解全球粮食安全严峻形势意义重大 [17,18]。未来 10~15 年, 颠覆性技术将源于各领域技术融合, 或基于传统技术深化后的跃迁突变, 将推动着农业用地不断向空间 (包括太空) 拓展。开发和改良盐碱土, 综合治理养分失衡土地, 深化传统耕地技术, 对于增加后备耕地, 保障粮食安全具有重要意义。

三、未来 10~15 年内我国农业领域颠覆性技术的重点方向

(一) 动植物高效生物育种领域重大颠覆性技术方向

1. 动植物基因编辑技术

由最初的锌指核酸内切酶 (ZFN) 发展为类转录激活因子效应物核酸酶 (TALEN) 技术, 再到目前的 CRISPR/Cas9 (clustered regulatory interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated protein 9) 系统, 基因编辑技术靶向性更强、更高效, 也更廉价。已成功改良了猪、牛、羊和鱼等抗病性和肉质等, 使性状测量、变异发现、变异筛选等传统育种路径更改为目标性状的直接编辑和表型确认, 育种群体大大缩小, 育种周期大大缩短。但性状基因解析研究还不能提供更多的可编辑基因位点。随着功能基因解析的逐渐深入, 在今后 10~15 年间, 该技术将逐渐走向大规模应用, 并对相关性状育种产生颠覆性影响。目前, 该原创技术来自国外。高效自主知识产权技术将是我国研发的重点。

2. 家畜干细胞育种技术

干细胞育种包括干细胞建系培养、生殖细胞定向分化诱导、体外受精、基因组选择等技术环节, 目前, 家畜干细胞建系培养及生殖细胞定向分化诱导尚未取得突破性进展, 估计今后 15~20 年, 人类将攻克上述技术瓶颈, 建立成熟的干细胞育种技术体系。干细胞育种实现了实验室育种, 由于细胞选育环节的开发, 使饲养的成年动物种群数量大幅缩

减。育种周期的缩短、成本的降低、场所的改变等都是颠覆性的。我国 iPS 技术国际领先，但畜禽干细胞技术处于跟跑阶段，应加快发展。

3. 动植物品种分子设计技术

“品种分子设计”是指以分子设计理论为指导，综合运用各种生物信息和基因操作技术，从基因(分子)到整体(系统)不同层次对目标性状进行设计与操作，以实现优良基因的最佳配置，培育新品种。品种分子设计技术体系将推动传统育种向“精准育种”转变，大幅提高动植物育种效率和技术水平，引领动植物育种的创新与发展。估计通过 15~20 年努力，将突破动植物多基因聚合和基因编辑操作技术瓶颈，创建动植物分子设计技术体系。我国在动植物多基因聚合与基因编辑领域取得了一些突破性成果，但是，迫切需要加强对动植物重要经济性状形成机理进行研究，为分子设计鉴定出更多的功能基因。

4. 体外肉类合成与培养技术

通过肌肉干细胞培养与分化诱导，进行动物肉品生产，已对牛、鸡、鱼等物种实验成功，该技术越过了饲草料生产与加工、动物饲养、动物屠宰等多个生产环节，在实验室即可完成动物肉品生产的全过程，不但减少了资源与环境压力，还可进行产品订制和批次化生产。但多组织联合培养、组织深度代谢和循环技术还在研发中。预计今后 15 年内，该技术将大规模应用，并对产业产生颠覆性影响。我国学者仅进行肌肉干细胞相关研究，未见细胞培养肉领域的相关报道。

(二) 农业生物药物与生物肥料领域重大颠覆性技术方向

1. 基于 RNA 干扰技术的基因农药

利用 RNA 干扰技术，防治病毒病、防除杂草、调节植物重要阶段的生长(脱叶、打顶等)，颠覆了以往化学农药防治思路。该技术瓶颈是靶标基因选择和高效特异运载体系开发。澳大利亚和英国科学家利用纳米材料 BioClay 装载 dsRNA，沉默同源 RNA，控制了烟草病毒病 [19]。目前国际农业化学巨头已开始进行相关技术和产品的研发 [20]。预计未来 5~10 年将有产品进入应用，15~30 年大规模应用。化学农药将逐渐被取代。我国目前还没有相关的研究报道。

2. 基于智能生物材料的农药控释技术

智能生物材料是指利用对温度、酸碱性和氧化还原势等生物或非生物胁迫信号敏感的材料，将药物传递至靶标位置，通过生物信号变化精确控制给药。靶向给药和精准施药，对提高农作物抗病性以及受到干旱、低温等非生物逆境的防御保护意义重大。澳大利亚对介孔二氧化硅载体进行修饰，制备了对氧化还原势敏感的功能材料，智能控制水杨酸释放，提高拟南芥抗病性 [21]。目前，医药领域有很多相关研究。预计未来 10~15 年将有农药产品出现。我国目前还没有相关的研究报道。

3. 人造病毒作为预防性疫苗或者治疗性疫苗

利用反向遗传学和合成生物学技术，按照计算机模拟程序，突变病毒基因组三联码，人为控制病毒复制从而将病毒直接转化为预防性疫苗，再突变为治疗病毒感染的药物。这种通用方法可以研制任意致命性病毒的疫苗和治疗性药物，并开发影响国防安全的预防性生化武器。目前北京大学已在实验室水平研制了流感疫苗 [22]。

4. 纳米佐剂

纳米颗粒与微生物相当，能够更好地被抗原递呈细胞吞噬，还可以增加小分子抗原的尺寸，并对其表面进行修饰，增强疫苗的机体免疫应答效果 [23,24]。因此，纳米颗粒有可能发展成为一类新型纳米佐剂。但是其作用机理及副作用仍不清楚，很少有纳米佐剂进入临床试验阶段。我国已提出一套标准化纳米材料安全评价体系，以评价纳米材料的生物毒性和纳米效应等，有待解决以上问题。

5. 作物微生物组技术

应用作物微生物组技术，通过对不同作物微生物组的高通量分离和大数据分析，获取对不同作物发挥各种有益功能的微生物组 [25~27]，通过微生物合成菌群学原理和技术，理性设计出对不同作物发挥特定功能、结构稳定的组合微生物群，开发基于作物微生物组技术的高效微生物肥料。

(三) 农业生物质工程领域颠覆性技术方向

1. 生物质油、气联产工程技术

以木质纤维素为原料，大规模、高效率、低成本的生产生物质油和生物天然气，是对常规化石运输燃料应用体系的颠覆。通过关键工艺、设备和酶、菌的突破，结合生物质资源多级利用和多产品联合

生产模式,使生物质油、气产品具有较强的经济竞争力,大规模进入市场,中期内实现每年 1×10^8 t 生物燃油、 1×10^{11} m³ 生物天然气,中远期翻番的生产能力,完成对进口石油、天然气 60% 以上的替代,保障国家能源和金融安全,减少秸秆、畜禽粪污等农林废弃物污染。我国在该领域的技术已经接近产业化,生物天然气领域具有一定领先性。

2. 能源作物分子和基因调控技术

颠覆作物育种降低作物总生物量,提高收获指数的思路,培育高光合效率、高生物产量和易于降解转化利用的新型作物品种。通过基因调控,改变作物光合特性和作物木质纤维素组成,培育适宜特定降解转化途径的专用能源作物,如高含油微藻、木质素含量低的林木等,使总生物量和转化效率大幅提高、转化成本大幅降低。新型能源作物将改变农业生产和产业链模式,推动生物质工程发展。我国在该领域的技术处于起步阶段,具备较好的基因育种技术基础。

3. 生物质一锅法转化利用技术

生物质一锅法转化利用技术颠覆了先将生物质分离为纤维素、半纤维素和木质素,然后分别单相催化转化的过程繁复、成本高、得率低的传统技术路线,依据纤维素及其降解产物特性,设计以石墨烯为载体的碳基无金属催化、高效多相催化体系,实现从纤维素等糖类物质到生物基平台化合物 5-羟甲基糠醛(5-HMF)及其系列呋喃衍生物的一锅法(one-pot reaction)转化,极大地简化操作步骤并提升效率、降低能耗。大幅提高生物质利用率和效益,整体推动产业发展。我国在该领域具有一定先进性。

4. 木质素天然结构利用技术

木质素转化利用技术限制了木质纤维素的利用。木质素催化转化可生成环烷烃化合物,生产高性能航空燃料,综合性能可以超过石油基航空煤油;利用木质素天然苯环结构,通过纳米技术碳化重整,制造纳米碳管材料、光解材料等高性能或可降解材料。直接利用木质素天然结构,颠覆了传统降解木质素再利用模式。该领域是国际生物质工程的新方向,我国在该领域具有一定领先性。

5. 生物质热化学和生物转化耦合技术

利用热化学方法降解生物质材料,再利用生物方法将小分子化合物转化成长碳链化合物。可实现

温和条件下高转化率、低成本的生物质资源高值利用。例如,采用碳原料(CO、CO₂、CH₄等)生产生物基能源和材料产品,是对石油化工大分子裂解路线的颠覆。通过多种技术耦合将生物质原料液化,可以克服生物质松散、分散和能量密度低等问题,使之能够像原油那样采集、运输和集中加工。该方向的突破将彻底改变整个生物质工程的产业形态。该领域是国际探索的新方向,我国在该领域具有一定先进性。

(四) 智能农业领域颠覆性技术方向

1. 农业物联网技术

运用传感器等各类感知技术、实时获取农业现场信息,通过各类网络传输,将信息融合处理并通过农业作业终端实现最优化的精准作业与控制。2035—2050年,农业物联网技术将实现全面应用和彻底实现农业颠覆。2035年将达到2000亿~3000亿元的市场规模。农业生产过程将完全可感知,并实现精细化、精准化、无人化。我国农业物联网整体技术完全成熟,商业化机制也完全形成。

2. 农业大数据技术

对大规模多源异构农业数据进行采集、清洗、存储、挖掘,用于农业智能与精准决策。2035年,大数据技术进入成熟期,将为农业生产、经营、管理和服务提供全面、准确、客观的指导,农业生产数据化,农村治理透明化,农民服务个性化,产业规模将达2000亿元人民币以上。

3. 农业人工智能技术

基于大数据智能、感知计算、人机混合智能、群体智能、自主协同与决策等的新一代人工智能技术将覆盖农业生产、农村治理和农民生活。2035年市场规模将接近2500亿元人民币。农业生产效率、资源利用率、土地产出率都将成倍增加,农村治理更加高效透明,农民生活更加便利。再过10~15年,我国人工智能将深入到农业生产、农村治理和农民生活的各个层面,并进入更高层次。

4. 农业机器人技术

导航、定位、识别、作业等智能机器人技术和装备将逐渐应用于农业,2035年将进入成熟期,并大规模应用和实现产业颠覆,达到约3000亿~5000亿元的市场规模。将极大解放劳动生产力,提高劳动效率。农业机器人技术与工业制造、人工

智能技术发展密切相连，随着我国农村城镇化的进一步推进和劳动力老龄化趋势，再过 10~15 年，我国将成为世界农业机器人技术的引领者，在农业耕种、收获、植保以及畜禽和水产养殖各个环节，农业机器人均会得到大规模利用。

（五）非传统种植空间利用重大颠覆性技术方向

（1）根据收集的土壤和植物数据，利用电脑虚拟种植农作物，加快选择性作物育种并对耐盐品种进行筛选和分类，通过分布式种植，实现农田节水、抑盐平衡调控和精量灌溉。

（2）开发高效抗堵塞的根区水盐精准调控灌溉系统；揭示暗管排盐工程与土壤界面盐分积聚堵塞机制；筛选高效排盐材料、优化阶梯式暗管排盐工程结构与布局；严格预防地下水埋深较浅区域土壤次生盐碱化。

（3）发展数字农业，从土壤墒情监测到田间施肥及灌溉决策，从作物病虫害监测及预防到判断收获时间及采摘等，通过通信网络、人工智能、微型机器人、无人机和传感器等先进设备实现智能化和信息共享化，同时向农民实时反馈决策实施过程。

（4）综合农业—水产养殖系统实现水的二次利用，在远离海岸线的盐碱地区进行水产养殖，实现水产养殖增氧机、投料机、水泵等电器设备管理智能化 [28]。5%~30% 的微咸水养殖对虾，颠覆了内陆地区养殖箱养殖海虾需外加海盐的技术路线，摆脱了海盐添加成本与海岸线距离正相关的限制 [29,30]。

四、促进农业领域颠覆性技术发展的建议

（一）加快创新性人才培养

长期以来，对农业重视不够，以及农业领域基础条件较差等原因，导致农业领域高层次创新型人才总体不足，质量有待提高，需要加大培育力度。

（二）设立农业领域颠覆性技术基础研究专项

颠覆性技术主要源于基础研究的长期积累，而我国农业科研多年来多关注短期效益的技术攻关，对于基础性、交叉性研究重视不足，需要建立长期、稳定的研究专项，进行长期培育。此外，也需要借

鉴农业产业技术体系的组织方法，组建一批长期从事农业重大战略问题和战略技术研究的专门团队，对农业长远发展的关键战略问题和战略方向进行长期的创新研究。

（三）建立以企业为主体的创新机制

建立以企业为主体的创新机制，加快形成以企业为主体的自主创新局面，以促进技术研发与实施，并更快地形成产业规模。需要准确定位政府、企业与高校间的关系，既要更好激发高校科技创新能力，又保证风险利益的主体企业肯投入、乐于投入，形成“产学研”合作链条的良性循环。不采用行政手段强制性派任务、压指标，充分发挥技术服务和市场开发的潜力，使农业“产学研”一体化向新的水平发展。需要尽快建立商业化技术应用体系，充分尊重人才、科技、资金、种质等资源自由流动的社会属性，积极构建以市场为主导的资源自由流动与优化配置的政策环境，确立人才和科技在颠覆性技术产业发展中的经济地位，健全保护与利用人才和科技的政策机制。

（四）建立适应产业发展的政策体系

颠覆性技术往往会带动大范围产业变革、大范围投资和商业开发，新型商业模式和新兴产业往往不适应现有产业政策。对于颠覆性技术带动的产业发展，需要给予宽松的发展环境，在优先促进产业发展中去解决存在的问题。由于颠覆性技术开发投资大，不确定性强，失败率高，短期的、集中的攻关难以取得实质性效果，后期应用推广亦面临许多挑战，须建立长效研究机制，并逐步建立其与市场相结合的体制机制及相关法律法规。

参考文献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. World agriculture towards 2030/2050 [R]. New York: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- [2] Hickey J M, Chiurugwi T, Mackay I, et al. Genomic prediction unifies animal and plant breeding programs to form platforms for biological discovery [J]. Nature Genetics, 2017, 49: 1297-1303.
- [3] Liu X, Wang Y S, Guo W J, et al. Zinc-finger nickase-mediated insertion of the lysostaphin gene into the beta-casein locus in cloned cows [J]. Nature Communications, 2013, 4(2565): 1-11.
- [4] Wu H B, Wang Y S, Zhang Y, et al. TALE nickase-mediated SP110 knockin endows cattle with increased resistance to tuberculosis [J].

- Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(13): 1530–1539.
- [5] Gao Y P, Wu H B, Wang Y S, et al. Single Cas9 nickase induced generation of NRAMP1 knockin cattle with reduced off target effects [J]. *Genome Biology*, 2017, 18(13): 1–15.
- [6] Bogliotti Y S, Wu J, Vilarino M, et al. Efficient derivation of stable primed pluripotent embryonic stem cells from bovine blastocysts [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(9): 2090–2095.
- [7] 李宏伟, 王瑞军, 王志英, 等. 家畜基因组选择研究进展 [J]. *遗传*, 2017, 39(5): 377–387.
- Li H W, Wang R J, Wang Z Y, et al. The research progress of genomic selection in livestock [J]. *Hereditas*, 2017, 39(5): 377–387.
- [8] Office of the President of the White House. Executive order of developing and promoting biobased products and bioenergy [R]. Washington DC: Office of the President of the White House, 1999.
- [9] 石元春. 决胜生物质(第二版) [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- Shi Y C. *Biomass: To win the future (Second edition)* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.
- [10] 中国工程院. 我国交通运输用生物燃料产业关键技术开发、示范与应用研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2014.
- Chinese Academy of Engineering. Report on key technologies development, demonstration and application of biofuels industry for transportation in China [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2014.
- [11] World Bioenergy Association. World biomass energy statistics report 2014 [R]. New York: World Bioenergy Association, 2014.
- [12] 中华人民共和国农业部. “十三五”全国农业农村信息化发展规划 [R]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016.
- Ministry of Agriculture of the PRC. National agricultural and rural informatization development plan for the “13th Five-Year” period [R]. Beijing: Ministry of Agriculture of the PRC, 2016.
- [13] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 1–20.
- Li D L, Yang H. State-of-the-art review for Internet of things in agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 1–20.
- [14] 段青玲, 刘怡然, 张璐, 等. 水产养殖大数据技术研究进展与发展趋势分析 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 1–16.
- Duan Q L, Liu Y R, Zhang L, et al. State-of-the-art review for application of big data technology in aquaculture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 1–16.
- [15] 赵春江. 人工智能引领农业迈入崭新时代 [J]. *中国农村科技*, 2018 (1): 29–31.
- Zhao C J. Artificial intelligence leads agriculture into a new era [J]. *China Rural Science & Technology*, 2018 (1): 29–31.
- [16] 李道亮. 农业4.0——即将来临的智能农业时代 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- Li D L. *Agriculture 4.0—The coming era of intelligent agriculture* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2018.
- [17] 李家洋. “跨越2030”农业科技发展战略 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
- Li J Y. “Spanning 2030” agricultural science and technology development strategy [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2016.
- [18] 高宁, 华晨, 朱胜萱, 等. 农业城市主义策略体系初探——浅析荷兰《鹿特丹城市农业空间》研究 [J]. *国际城市规划*, 2013, 28 (1): 74–79.
- Gao N, Hua C, Zhu S X, et al. A preliminary study on the strategic system of agricultural urbanism—Brief analysis of the study of *Rotterdam Urban Agricultural Space* in the Netherlands [J]. *Urban Planning International*, 2013, 28 (1): 74–79.
- [19] Neena M, Elizabeth A W, Karl E R, et al. Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses [J]. *Nature Plants*, 2017, 3: 16207.
- [20] James A B, Thierry B, William C, et al. Control of coleopteran insect pests through RNA interference [J]. *Nature Biotechnology*, 2007, 25: 1322–1326.
- [21] Yi Z F, Hashmath I H, Feng C F, et al. Functionalized mesoporous silica nanoparticles with redox responsive short-chain gatekeepers for agrochemical delivery [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2015, 7: 9937–9946.
- [22] Si L, Xu H, Zhou X, et al. Generation of influenza A viruses as live but replication-incompetent virus vaccines [J]. *Science*, 2016, 354(6316): 1170–1173.
- [23] Xu L, Xiang J, Liu Y, et al. Functionalized graphene oxide serves as a novel vaccine nano-adjuvant for robust stimulation of cellular immunity [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(6): 3785–3795.
- [24] Peleteiro M, Presas E, González-Aramundiz J V, et al. Polymeric nanocapsules for vaccine delivery: Influence of the polymeric shell on the interaction with the immune system [J]. *Frontiers in Immunology*, 2018, 9: 791–799.
- [25] Peiffer J A, Spor A, Koren O, et al. Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110: 6548–6553.
- [26] Edwards J, Johnson C, Santos-Medellín C, et al. Structure, variation, and assembly of the root-associated microbiomes of rice [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112: 911–920.
- [27] Pieterse C M, de Jonge R, Berendsen R L. The soil-borne supremacy [J]. *Trends in Plant Science*, 2016, 21: 171–173.
- [28] Hu L, Ren W, Tang J, et al. The productivity of traditional rice–fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 177(2): 28–34.
- [29] Andrew J R, Jeffrey M L. Comparing salinities of 10, 20, and 30‰ in minimal-exchange, intensive shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture systems [J]. *Aquaculture*, 2017, 476(1): 29–36.
- [30] Yan B, Wang X, Cao M. Effects of salinity and temperature on survival, growth, and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2007, 26(4): 141–146.