

七、农业

1 工程研究前沿

1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势

农业领域工程研究前沿 Top 11 主要分为两类：一是传统深入研究前沿，包括动物重要病毒与宿主相互作用，动植物精准设计育种，作物功能性基因组结构的挖掘，农业资源高效利用与循环经济，土壤生物多样性与生态系统功能，病原菌与作物相互作用机制，动物病毒的溯源、进化、遗传变异，森林土壤碳循环微生物驱动机制，水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制；二是新兴研究前沿，包括农业生物信息、环境信息的智能感知，农业机器人作业对象识别与定位。

农业领域工程研究前沿的核心论文数区间为 8~109 篇，平均为 50 篇；篇均被引频次区间为 7.13~86.83 次，平均为 43 次；核心论文出版年度较早，以 2015 年和 2016 年为主，但“农业资源高效利用与循环经济”和“土壤生物多样性与生态系统功能”两条前沿的核心论文出版以近 3 年为主，

且呈上升趋势（见表 1.1.1 和表 1.1.2）。

(1) 动物病毒的溯源、进化、遗传变异

动物病毒的溯源过程是寻找病毒最原始的自然生存宿主、中介储存宿主/中介过渡宿主、终末感染宿主的过程。通过动物病毒的溯源研究，可以了解病毒感染的源头宿主、媒介宿主、跨物种过渡储藏适应宿主和终末宿主，在切断传染源、避免病毒长期在不同宿主中循环与传播、从源头防控传染病等方面具有重大的生物学意义。病毒溯源的核心科学问题是在源头宿主中找到满足科赫法则的病原体，解析病毒的基因组特征以及病毒感染的源头宿主、媒介宿主、终末宿主的生物学表征。进化与遗传变异是病毒为拮抗、逃逸、躲避宿主的复杂免疫系统以维持复制生命周期、适应新宿主的一种自然选择，是一种异常复杂的生命现象。目前，病毒进化与遗传变异的诸多奥秘仍未破解，如病毒进化与遗传变异的驱动力、方式，病毒突破物种屏障的传播机制和方式，宿主影响病毒遗传变异与进化的途径，病毒与宿主的生存环境是否影响病毒的遗传变

表 1.1.1 农业领域 Top 11 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	动物病毒的溯源、进化、遗传变异	58	4480	77.24	2015.4
2	农业生物信息、环境信息的智能感知	89	3370	37.87	2015.9
3	农业机器人作业对象识别与定位	77	2879	37.39	2016.7
4	动植物精准设计育种	109	8871	81.39	2015.4
5	作物功能性基因组结构的挖掘	39	655	16.79	2016.5
6	农业资源高效利用与循环经济	8	57	7.13	2018.1
7	土壤生物多样性与生态系统功能	55	2189	39.80	2017.4
8	动物重要病毒与宿主相互作用	61	740	12.13	2016.5
9	病原菌与作物相互作用机制	31	1934	62.39	2016.8
10	森林土壤碳循环微生物驱动机制	12	1042	86.83	2015.3
11	水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制	10	180	18.00	2016.3

表 1.1.2 农业领域 Top 11 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
1	动物病毒的溯源、进化、遗传变异	15	20	10	9	4	0
2	农业生物信息、环境信息的智能感知	16	23	21	15	8	6
3	农业机器人作业对象识别与定位	0	10	23	26	14	4
4	动植物精准设计育种	23	37	31	16	2	0
5	作物功能性基因组结构的挖掘	10	2	7	5	9	6
6	农业资源高效利用与循环经济	0	0	0	1	5	2
7	土壤生物多样性与生态系统功能	3	4	9	9	13	15
8	动物重要病毒与宿主相互作用	11	8	15	6	8	13
9	病原菌与作物相互作用机制	3	5	6	6	3	7
10	森林土壤碳循环微生物驱动机制	2	6	3	1	0	0
11	水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制	1	4	1	1	1	2

异等。解析病毒的进化与遗传变异规律具有重大的流行病学意义，有助于了解病毒应对宿主的复杂免疫系统而维持生命、突破种间屏障以实现跨物种传播的奥秘，有助于掌握动物在疫苗免疫后（病毒或传染病）间断性反复发生的规律。

（2）农业生物信息、环境信息的智能感知

农业生物信息、环境信息的智能感知指通过物理、化学和生物等传感机理，实现动植物生命信息、植物生长中环境信息以及动物养殖中环境信息的原位、快速和实时测量。该前沿主要包括两个研究方向：①动植物生命信息感知机理。近几年的研究前沿主要是基于核酸适配体、免疫传感器等新型生物感知器件，运用机器视觉、成像光谱等方法，实现对动植物活体状态下的行为、早期性别、激素、代谢物，以及作物生化组分、病虫害等各种生物与化学量的精确测量，并在此基础上探索作物表型的高通量快速获取方法。②动植物生长环境感知机理。随着新型物理测量机理的不断涌现和激光器器件单色性、功率、波段的不断发展，近几年的研究前沿主要包括土壤氮素、土壤重金属、土壤微生物等微量物质的原位感知和养殖环境中的感知重点，如基于金属氧化物、红外吸收、质谱等多种不同原理

的畜禽舍有害气体电子鼻的探索研究。

可以预见，农业生命和环境的感知技术将随着基础科学的进步而迅速发展。在感知机理上，光电、化学、纳米科学等方法将进一步推动感知范围、精度和灵敏度的不断提高。在感知对象上，常规方法不能原位测量的、更加微观和重要的指标将是未来的研究热点。

（3）农业机器人作业对象识别与定位

农业机器人作业对象识别与定位重点解决机器人识别作业对象与环境，并快速计算作业对象距离的问题。主要包括目标对象信息采集和信息处理两个部分。①农业机器人作业对象识别技术。主要用于解决农业机器人准确区分作业对象与作业环境的问题，尤其是在复杂环境下的作业对象识别方法优化。例如，基于多特征和图像融合的作物、杂草、作物病虫害识别算法，基于多光谱成像的病害感知算法等，提高作业对象识别准确率。②农业机器人作业对象定位技术。光学元器件被广泛应用于农业机器人的作业对象定位与感知技术中。例如，使用双目、深度相机等设备，获得作业对象的立体信息，优化作业对象的大小、距离和位置的计算方法，设计避免机械臂触碰采摘对象的优化算法等。

农业机器人作业对象识别与定位技术的发展趋势是研发与使用低成本信息采集设备,优化改进识别与定位方法,使农业机器人在复杂、非结构化的农业生产环境中可以稳定、准确地识别与定位作业对象。

(4) 动植物精准设计育种

动植物精准设计育种已经成为未来动植物种质资源创新、国际农业科技竞争和种业竞争的战略核心。设计育种的概念在2003年首次提出,主要技术环节包括基因定位、筛选优良等位基因,将分散在不同个体中的优良基因聚合在一起,最终实现设计育种的目标。随着多组学技术、大数据平台和基因编辑等新兴技术的发展,为解析生物复杂性状的遗传调控网络带来了机遇,为动植物定向分子设计育种奠定了科学基础,为创制高产、优质、抗病动植物新品种提供了精准解决方案。目前,动植物精准设计育种的主要技术环节包括:①发掘控制育种性状的关键功能基因、数量性状基因座(QTL)和调控模块,明确基因型、表型与环境之间的相互关系;②利用大数据生物信息学平台和技术,面向高效繁殖、优质及抗病等育种目标,分析和设计具有特定育种目标的基因型;③分析达到目标基因型的途径,制定生产品种的育种方案,利用设计育种方案开展育种工作,培育优良品种。

(5) 作物功能性基因组结构的挖掘

作物重要农艺性状主要是由该性状的有关基因所决定的。基因功能不仅受自身结构影响,其表达调控还取决于基因组的结构,包括基因所在染色体的开放程度、基因表观修饰以及基因所在区段的空间结构等。这些因素不仅能影响基因的表达量,还可能影响基因的可变剪切,从而产生不同的功能。转座子是基因组的主要组成部分,通过插入基因的不同部位影响基因的结构与功能。转座子也与基因的表达、开放状况及远程互作关系密切,对基因的结构变异与表达均会产生重要影响。多倍体指基因组中含有两套或两套以上的染色体组的生物。

植物中70%以上的物种是多倍体,如小麦、棉花、油菜等主要农作物。与二倍体相比,多倍体具有明显的产量与适应性优势,被称为多倍体优势。

作物种质资源存在着丰富的基因组变异。通过构建突变体库、作物种质资源基因组变异库、转录组变异库、表观组变异库、表型组变异库与代谢组变异库等,可以建立挖掘作物功能基因的技术、信息与材料平台。利用上述平台,结合连锁分析与关联分析方法,获得高产、高效、优质、抗病、抗逆的优异候选基因,并通过突变体、转基因或基因编辑进行验证;阐明目标基因的分子机制、等位基因的数量与功能,明确其育种利用价值与高效利用途径;揭示多倍体优势的分子机理,促使多倍体优势的开发与利用取得突破性进展。

(6) 农业资源高效利用与循环经济

农业资源高效利用指以水土、生物、肥料、技术和气候等农业生产资源为核心,以农业生产活动为主体,围绕品种资源、土地利用与耕作制度、农业节水技术与应用、土壤肥力与肥料施用、农业废弃物资源化利用以及饲料与畜禽管理、种养一体化等环节开展科学研究,达到资源节约和高效利用的目的。循环经济是以资源节约和循环利用为特征,实现与生态环境和谐共赢的经济发展模式,强调把农业生产与经济发展组织成为“资源投入—产品生产—再生资源”的反馈循环式流程,通过加强循环利用促进物质和资源的合理和持续利用,将经济活动对自然环境的不利影响降到最低。农业资源高效利用与循环经济是从全链条的角度出发,实现资源投入源头控制、资源利用过程提升、终端废弃物循环利用,实现资源利用效率最大化、废弃物排放量最小化,是资源效益、经济效益和生态效益的有机统一,是实现农业绿色发展与全球可持续发展目标的重要前提。

(7) 土壤生物多样性与生态系统功能

土壤生物多样性指土壤生态系统中的动物、微生物、植物等生命体之间的变异性与多样性以及生

物与环境之间相互作用的多样化程度，包括物种多样性、遗传多样性、结构多样性和功能多样性等。生态系统功能是土壤生物多样性价值的具体体现。土壤生物多样性在凋落物降解、养分转化等生物地球化学循环方面起着不可替代的作用，同时还提供土壤发育、土壤侵蚀控制、土壤污染修复、农业病虫害防治、气候调节和初级生产力维持等多种生态系统服务功能。对人类社会而言，土壤生物多样性还能提供食物、净水、药物、工业原料、燃料等多种供应服务功能。土壤生物多样性的维持是土壤健康和生产力持续提高的基本保障，是人类社会赖以生存和可持续发展的基础。当前，各国政府和有关国际组织都高度重视土壤生物多样性的保护与健康土壤的培育。总之，全面深入开展土壤生物多样性保护基础研究，建立土壤生物多样性检测网络与生态系统功能评价体系，制定科学合理的土壤生物多样性保护策略，对确保人类福祉和社会可持续发展具有重要意义。

（8）动物重要病毒与宿主相互作用

病原与宿主相互作用的外在表现是感染与免疫。病原通过感染宿主而生存，宿主需要清除病原感染以保持健康。一些动物病原在长期进化中获得了规避宿主免疫应答的能力，产生了免疫逃逸，造成持续性感染或引发动物疫病大流行，威胁食品安全甚至引发严重经济损失。尤其是近年来动物病毒性疫病的暴发和流行影响着养殖业的发展，带来了严重的经济损失，如非洲猪瘟、高致病性蓝耳病、猪病毒性腹泻、伪狂犬病、禽流感、传染性法氏囊病、传染性支气管炎、口蹄疫、小反刍兽疫等动物疫病。传统方法研制的疫苗对某些动物疫病保护效果欠佳，要研制新型高效的保护性疫苗须了解病毒的致病机理，而只有通过研究病毒与宿主相互作用才能解析病毒的致病机理。因此，以解决问题为导向的动物重要病毒与宿主相互作用研究一直是研究的热点和前沿。病毒通过结合细胞表面特定的受体入侵细胞，进入细胞后在蛋白和核酸两个层面上与宿主

细胞相互作用。在蛋白层面上，病毒通过表达某些蛋白抑制宿主抗病毒免疫信号转导，为自身复制创造条件。然而，宿主则通过模式识别受体（PRRs）识别病原特征结构（病原相关分子模式，PAMPs）启动天然免疫应答产生抗病毒分子，抑制病毒复制。在核酸层面上，某些脱氧核糖核酸（DNA）病毒可以直接编码小分子核糖核酸（micro-RNA），而核糖核酸（RNA）病毒则巧妙调控宿主表达 micro-RNA，抑制宿主抗病毒免疫信号转导，而宿主在识别 PAMPs 后通过表达特定的 micro-RNA 直接靶向作用于病毒基因组或免疫负调控分子抑制病毒复制。只有通过研究动物重要病毒与宿主相互作用解析病毒的致病机理，才能利用反向遗传学或基因编辑技术制备新型高效的动物疫苗，为有效防控重大动物疫病奠定基础。

（9）病原菌与作物相互作用机制

病原菌与作物互作机制是发展绿色农业病害防治的重要基础。近年来，病原菌与作物相互作用机制这一研究方向实现了一批重大理论突破，发展了若干重要的作物抗性调控技术。科研人员在水稻、小麦等重要作物以及重大病原物的全基因组、群体基因组研究的基础上，克隆了多个具有重要理论与应用价值的作物抗病相关基因和病原菌的致病、变异关键基因；揭示了一批重要作物抗病基因的分子作用机制；获取了植物抗病相关蛋白的晶体结构，破解了抗病基因的工作原理，提出了抗病小体这一突破性概念；提出了作物免疫与产量平衡的关键机制及改良作物综合性状的路径；利用基因编辑技术创制了一批综合抗性优良的作物品种；深入研究了多种病原物感知作物，并利用代谢产物、效应蛋白、小 RNA 等调节寄主免疫的致病机理，提出了诱饵模式等致病新理念；阐明了病原物逃避农作物抗性的多种遗传与表观遗传机制。此外，植物和病原菌互作过程中鉴定的生物源诱抗和抗菌物质，为开发新型作物病害绿色防控策略提供了理论和应用支撑。

(10) 森林土壤碳循环微生物驱动机制

森林中 70% 的碳储存在土壤中。森林土壤碳的来源主要有植物凋落物分解、根系分泌物及周转、微生物和土壤动物等，森林土壤碳的输出主要包括淋溶和有机质分解等。为应对全球气候变化，如何更好地维持森林生态系统土壤碳固持功能的稳定需要进一步了解特定功能微生物群落的调控作用及驱动机制。具体来看，土壤微生物通过活性微生物群落（异化代谢）和微生物死亡残体（同化代谢）调控并影响土壤有机碳的积累。根际微生物群落具有比土壤微生物群落更高的有机碳固持效率。外生菌根和菌丝通过对氮素的竞争优势降低了腐生分解者的活性和酶的生产，从而减少了土壤呼吸并增加了土壤碳储量；而从枝菌根真菌不仅可以通过菌丝的作用形成土壤团聚体阻止有机质分解，还能外渗易被分解者利用的糖类物质促进腐生微生物接近根际土壤并加快有机质分解。随着土壤微生物高通量测序和土壤有机碳分子生物地球化学结构分析等方法的应用，调控土壤有机质中不同碳组分分解所对应的微生物功能基因及其编码的蛋白质得以不断被发现。然而，由于森林生态系统土壤微生物多样性丰富，环境变化对土壤微生物与土壤碳循环的影响过程极为复杂，因此，未来仍需整合多学科的理念和方法进一步明确森林土壤碳循环过程中微生物的调控机制。

(11) 水产养殖生物性别和发育的分子基础与调控机制

性别决定与发育是生命科学研究领域的热点。水产养殖生物的性别决定机制与哺乳动物相比更加复杂多样，例如，具有 XX / XY、ZZ / ZW、XO / XX 等多种性别决定系统。许多水产养殖生物在雌雄同体、性反转等方面具有独特性，可为研究动物性别决定机制提供独特材料，同时对水产养殖生物的性别与发育研究也是水产养殖过程中亟须解决的产业问题。黄鳝、石斑鱼具有天然性反转性状，高温会导致尼罗罗非鱼的遗传雌性发育为生理

雄性，半滑舌鳎、褐牙鲈、泥鳅等的雌性个体比雄性个体生长快。目前，针对水产生物种质创制中面临的性别决定、性腺发育的分子机制及其调控机理等关键科学问题，主要研究：鱼、鳖、虾蟹、贝、参等生物性别决定与分化的分子机制；发掘性别决定的关键基因及调控元件，阐明相关分子功能及其调控网络；研究性别发育与重要生产性状的相互关系，解析性别转换与环境因子互作响应的规律与机制；筛查性别特异分子标记，研究具有经济价值新种质的繁殖特性并阐明其调控机理。

利用具有两性异形生产性状表型的鱼、鳖、虾蟹、贝、参等水产养殖动物，研究水产养殖动物性别决定、性腺发育与环境互作的机制及其演化进程。运用基因组学、转录组学和表观遗传学分析，对各类水生动物性别决定、发育情况进行研究，确定性别分化、发育的关联因子及其表达特征和表观遗传学修饰特性。该领域未来的研究热点将聚焦于水产养殖动物基因组解析与性别连锁遗传标记鉴定、性别决定与发育的调控机制、性别转换与环境因子的互作机制、基因组倍性对性别和育性的作用机制、性别发育与生产性状的关联机制等方向。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 动物病毒的溯源、进化、遗传变异

自 2000 年以来，人类已经历多次重大病毒性传染病：2002—2004 年的严重急性呼吸综合征，2009 年的甲型 H1N1 流感，2009—2010 年在西非发生的大面积传染性脑膜炎，2012 年至今的中东呼吸综合征，2013—2016 年的埃博拉病毒病以及 2019 年新发的新型冠状病毒肺炎等。经济动物的病毒性疾病也是老病新发、新病不断。

对动物病毒溯源，解析其进化及遗传变异规律是预防和控制传染病传播的有效手段，是多年来流行病学领域备受关注的研究热点。在病毒溯源研究中，传统方法主要有充分的流行病学调查和对动物

及其环境中的病毒进行的全方位分布调查；新兴方法得益于生物信息学技术的应用，通过基因同源性比对和进化树的拓扑结果来确定不同病毒间亲缘关系的远近。对动物病毒的准确溯源和病毒遗传变异规律的全面掌握，可以及时切断传染源，有效监测、预防及控制传染病的发生。事实上，病毒溯源工作难度大，研究过程较为复杂，存在许多不确定性。如2019年底出现的新型冠状病毒，自出现以来迅速在全球蔓延，全球科学家都在积极探寻该病毒的起源，但至今仍是未解之谜。相关研究表明，新型冠状病毒在人群中出现的时间可能比设想的更早，在隐秘传播期间逐渐获得了关键突变位点，适应了人类。回顾性的呼吸道感染血液检测或亚基因组研究也许能帮助破解这种判断是否正确。在源头探索上，通过对2003年暴发的SARS病毒进行流行病学和生物信息学研究，取得了很大进展，研究发现蝙蝠是该病毒的自然宿主而野生动物市场的果子狸是该病毒进入人群前的中间宿主，但仍需进行深入研究。

传统的病毒溯源方法，流行病学调查一般是从首例患病者的接触史开始，即所谓的“零号病例”，但有时“零号病例”很难追溯，如患有艾滋病病毒患者的追溯；对动物和环境中的病毒分布调查在溯源过程中是最直接、最重要的方法，并成功应用于猴免疫缺陷病毒的研究。与传统方法相比，生物信息学技术通过基因组序列与计算流行病学相结合，采用分子钟理论来推算病毒的演化时间，推测病毒间的亲缘远近关系。如新型冠状病毒与蝙蝠携带的蝙蝠冠状病毒的基因组比对结果表明，新型冠状病毒完成从蝙蝠到人的进化传播，至少需要一个中间宿主作为传播载体。在病毒溯源过程中存在诸多不可控因素，任一环节都可能是重中之重，因此，在“唯一健康（One Health）”背景下，需加大动物病毒的流行病学监测力度，有效预防及控制新发传染病的出现和传播。

达尔文进化理论中的优胜劣汰，同样也适用于

病毒的生存，也就是说，病毒只有在不断地突变进化中才能使其优秀突变体存活下来。病毒可以通过多种机制发生变异，使基因组能够发生重排，这可以让新复制出的病毒表现出与上一代不同的特征。另外，病毒遗传物质上的碱基会随机发生突变，这种遗传漂变现象也会引起病毒的突变。研究表明，RNA病毒更容易发生遗传变异，因为与DNA病毒相比，RNA病毒在复制过程中更容易出错、稳定性更低，如禽流感病毒的跨宿主传播事件时有发生。犬流感病毒H3N2亚型于2005年左右在亚洲的犬中出现，起源于禽类，该病毒可以分为7个主要谱系，一些突变位点提供了适应性进化的证据；该病毒的主要谱系显示了相似的基因组进化速率，但与其他禽类病毒相比，在每个位点上始终按比例显示更多的非同义替换，这表明选择压力有大规模的改变。根据进化速率和氨基酸位点突变分析发现，禽流感在进入哺乳动物犬之后进行着相对快速的进化变异，以更加适应哺乳动物宿主之间的传播。

病毒尤其是RNA病毒，容易发生变异且进化速率较高，因此，掌握病毒的遗传演化规律成为控制病毒传播的关键所在。为解决相关问题，将基因组序列以及相关信息与依靠高性能计算机的生物信息学和统计学方法相结合，通过大数据更好地解析病毒的遗传变异规律和传播规律。在研究病毒的溯源、进化、遗传与变异规律中，流行病学知识、统计科学以及计算机算法相结合形成了一门新兴学科，能够更好地服务于病毒预防与控制策略的指定。

在动物病毒的溯源、进化、遗传变异这一研究前沿中，核心论文发表的国家分布方面（见表1.2.1），位于前3位的是美国、英国和法国，中国位于第5位；此研究前沿的核心论文篇被引频次分布在50.75~109.00。研究机构分布方面（见表1.2.2），来自牛津大学、美国疾病控制和预防中心的核心论文及被引次数较多。国家间的合作网络方面（见图1.2.1），国家间的研究合作较为普遍，其中英国、美国、法国之间的合作相对更为紧密。

产出主要机构间的合作网络方面（见图 1.2.2），各机构间均存在一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家是美国、中国和英国，美国占比为 36.29%；中国和英国占比超过 10%，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（见表 1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构方面（见表 1.2.4），美国疾病控制和预防中心和法国巴斯德研究所位居前两位，中国科学院的施引论文量排在第 6 位。

1.2.2 动植物精准设计育种

动植物精准设计育种已成为未来动植物种质资

源创新、国际农业科技竞争和种业竞争的战略核心。2018 年，美国发布《到 2030 年推动食品与农业研究的科学突破》（*Science Breakthroughs to Advance Food and Agricultural Research by 2030*），将基因组学与生物精准育种列为未来农业发展的重大方向之一。精准设计育种这一概念，源于 2003 年 Peleman 和 Van der Voot 提出的设计育种（Breeding by Design）概念。设计育种主要针对植物育种，技术环节包括基因定位、筛选优良等位基因，把分散在不同个体中的优良基因聚合在一起，从而实现设计育种的目标。目前，精准设计育种已经扩展到动物

表 1.2.1 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	36	62.07%	3292	91.44	2015.5
2	英国	17	29.31%	1648	96.94	2015.2
3	法国	12	20.69%	609	50.75	2015.3
4	澳大利亚	10	17.24%	873	87.30	2015.4
5	中国	8	13.79%	743	92.88	2016.0
6	比利时	6	10.34%	547	91.17	2015.2
7	德国	6	10.34%	449	74.83	2015.5
8	荷兰	5	8.62%	540	108.00	2014.4
9	西班牙	4	6.90%	205	51.25	2015.8
10	印度	3	5.17%	327	109.00	2014.3

表 1.2.2 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	牛津大学	7	12.07%	861	123.00	2015.3
2	美国疾病控制和预防中心	7	12.07%	823	117.57	2016.0
3	福瑞德·哈金森癌症研究中心	6	10.34%	1007	167.83	2015.8
4	美国国立卫生研究院	6	10.34%	639	106.50	2015.2
5	悉尼大学	6	10.34%	468	78.00	2016.0
6	法国巴斯德研究所	6	10.34%	318	53.00	2015.8
7	美国国立医学图书馆	5	8.62%	287	57.40	2016.6
8	爱丁堡大学	4	6.90%	790	197.50	2015.8
9	哈佛大学	4	6.90%	495	123.75	2016.2
10	墨尔本大学	4	6.90%	451	112.75	2015.3

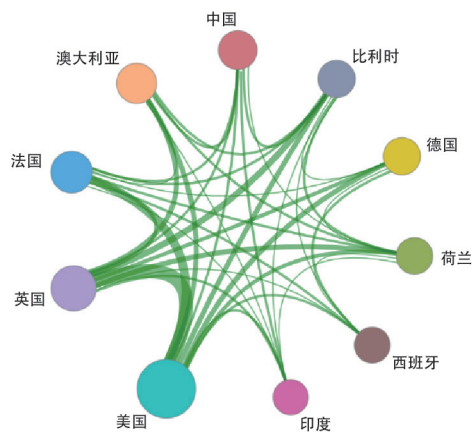


图 1.2.1 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿主要国家间的合作网络

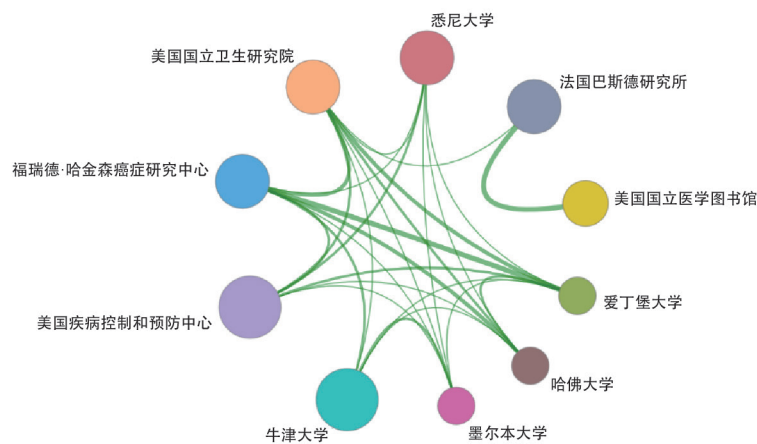


图 1.2.2 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	1724	36.29%	2017.8
2	中国	613	12.90%	2018.5
3	英国	513	10.80%	2017.8
4	法国	374	7.87%	2017.6
5	德国	319	6.71%	2017.9
6	澳大利亚	279	5.87%	2017.9
7	加拿大	213	4.48%	2018.0
8	巴西	197	4.15%	2018.2
9	西班牙	181	3.81%	2017.9
10	意大利	181	3.81%	2018.3

表 1.2.4 “动物病毒的溯源、进化、遗传变异”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国疾病控制和预防中心	170	14.66%	2018.0
2	法国巴斯德研究所	134	11.55%	2017.6
3	牛津大学	121	10.43%	2018.0
4	哈佛大学	115	9.91%	2017.9
5	悉尼大学	108	9.31%	2017.6
6	中国科学院	104	8.97%	2018.3
7	美国国家过敏症和传染病研究所	99	8.53%	2017.7
8	美国国立卫生研究院	82	7.07%	2017.2
9	德克萨斯大学医学部	79	6.81%	2017.2
10	剑桥大学	77	6.64%	2017.6

育种研究领域，全球在植物、哺乳动物、水生动物等领域已经开展了深入研究，取得了显著成效。农业生物精准设计育种技术的不断创新，正在颠覆传统农业生产模式，并向现代农业飞速迈进。

近年来，基因组、功能基因组、表观组、转录组、蛋白组和代谢组等多组学技术的突飞猛进式发展，使得对动植物重要性状相关的功能基因、QTL 和调控模块的解析不断深入，基因、表型与环境相互作用的机制不断被阐明，为动植物精准设计育种奠定了理论基础。同时，生物信息学、全基因组选择和基因编辑等技术的快速发展，为动植物性状精准设计育种提供了技术支撑。以各种组学数据库为基础，利用生物信息学技术和计算机辅助对育种过程进行模拟，根据育种目标来设计育种材料，培育符合育种目标的新品种。具体来说，全基因组选择技术，基于高通量的基因型分析和预测模型，在全基因组水平上聚合优良基因型以改良动植物重要性状。基因编辑技术，已成为精准育种的重要手段之一，它不但可以对基因组内源目标基因进行定点删除、替换和插入等精确改造，而且还可以打破物种界限实现跨物种基因定向转移，特别是 CRISPR-Cas9 系统的开发显著提高了基因编辑的效率和准确性。综合运用多组学群体遗传信息、全基因组选择和基因

编辑技术，使动植物育种更加高效、精准、可控，从而实现从传统育种到精准育种的跨越，解决常规方法不能解决的重大生产问题。

传统的杂交育种方法难以将多个优良基因组合到一个品种上，且选择效率低、周期长。动植物精准设计育种针对定向培育高产、优质和抗病动植物新品种的重大需求，以植物、水生动物、哺乳动物（家畜）等为对象，阐明重要经济性状基因协同调控网络，创建新一代动植物精确设计育种技术体系，培育了一批具有重要价值的动植物新品种和育种材料。2018 年，全球转基因作物种植面积已达 $1.917 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，全球 70 个国家和地区已批准种植或进口转基因作物及其产品。转基因作物的推广应用显著提高了作物单产，减少了农药用量，产生了巨大经济和社会效益。例如，耐旱玉米、抗除草剂磷高效玉米、耐低温贮存土豆、高油酸大豆等基因编辑产品的产业化进程加快；小麦和水稻全基因组测序完成，在主要农艺性状基因功能明确的基础上，通过有利基因的剪切、聚合，培育出多种产量、品质及抗性较高的新品种。动物的生理条件比植物复杂，现阶段的研究主要是依据分子标记技术进行基因聚合、基因渗入以及利用基因编辑技术进行新品种培育，获得了如 CD163 基因编辑猪、Polled 基

因替换无角奶牛、MSTN 敲除双肌家畜等高产或抗病家畜。2015 年，美国 AquaBounty 公司培育的鲑鱼 AquAdvantage 正式获准上市销售，加速了基因编辑动物的商业化进程。农业生物精准设计育种技术产品不断创新，正在颠覆传统生产模式。

“动植物精准设计育种”工程研究前沿领域，核心论文发表量排在前 3 位的国家分别为美国、中国、英国；篇均被引频次排在前 3 位的国家依次为德国、日本、法国（见表 1.2.5）。在发文量 Top 10 的国家中（见图 1.2.3），美国与墨西哥、肯尼亚、英国、中国、法国、德国、印度、澳大利

亚均有合作，日本与其他国家没有合作。核心论文发文量排在前 3 位的机构分别为康奈尔大学、美国农业部农业研究局、国际玉米和小麦改良中心（见表 1.2.6），其中康奈尔大学 Spindel Jennifer 等发表的“Genomic selection and association mapping in rice (*Oryza sativa*): Effect of trait genetic architecture, training population composition, marker number and statistical model on accuracy of rice genomic selection in elite, tropical rice breeding lines”一文被引频次最高（205 次），该文评价了基因组选择在水稻自交系育种中的效果。在发文量 Top 10 的机构中（见

表 1.2.5 “动植物精准设计育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	美国	48	44.04%	4004	83.42
2	中国	28	25.69%	2120	75.71
3	英国	14	12.84%	1155	82.50
4	墨西哥	13	11.93%	1090	83.85
5	德国	10	9.17%	922	92.20
6	法国	9	8.26%	775	86.11
7	印度	8	7.34%	641	80.12
8	肯尼亚	7	6.42%	435	62.14
9	澳大利亚	6	5.50%	389	64.83
10	日本	5	4.59%	452	90.40

表 1.2.6 “动植物精准设计育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	康奈尔大学	12	11.01%	1018	84.83
2	美国农业部农业研究局	12	11.01%	953	79.42
3	国际玉米和小麦改良中心	11	10.09%	908	82.55
4	堪萨斯州立大学	8	7.34%	549	68.62
5	中国农业科学院	7	6.42%	660	94.29
6	明尼苏达大学	7	6.42%	345	49.29
7	杜邦先锋公司	5	4.59%	740	148.00
8	亚利桑那大学	5	4.59%	604	120.80
9	中国科学院	5	4.59%	578	115.60
10	塞恩斯伯里实验室	5	4.59%	485	97.00

图 1.2.4)，康奈尔大学、美国农业部农业研究局、国际玉米和小麦改良中心、堪萨斯州立大学之间的合作较多。施引核心论文发文量排在前三的国家分别为美国、中国、印度（见表 1.2.7）。施引核心论文的主要产出机构分别为美国农业部农业研究局、中国农业科学院、中国科学院等（见表 1.2.8）。

1.2.3 土壤生物多样性与生态系统功能

健康的土壤中含有丰富的生物，包括细菌、真菌、放线菌、线虫、脊椎动物、蚯蚓、螨虫、昆虫等多种生物，这些土壤生物在土壤生态系统中发挥

着促进植物生长、保护土壤肥力、促进有机质分解、维持生态系统稳定和抑制害虫、寄生虫与病菌的重要作用。当前，人类活动对土壤生物多样性和生态系统功能带来的压力与日俱增。砍伐森林、集约化耕作、过度使用化肥农药等加剧了土壤生物数量和种类的减少，生态系统的稳定性越来越脆弱，危害着土壤生产力的可持续发展和土壤生态系统功能的发挥。面对生物多样性的丧失，联合国最早于 2001 年正式启动“千年生态系统评估”项目，对全世界生态系统及其提供的服务功能状况与趋势进行了科学评估，提出了恢复、保护或改善生态系统

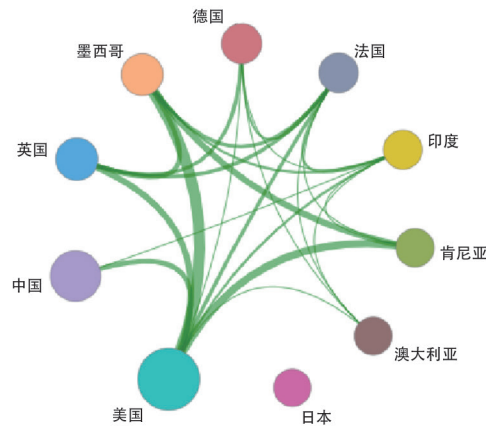


图 1.2.3 “动植物精准设计育种”工程研究前沿主要国家间的合作网络

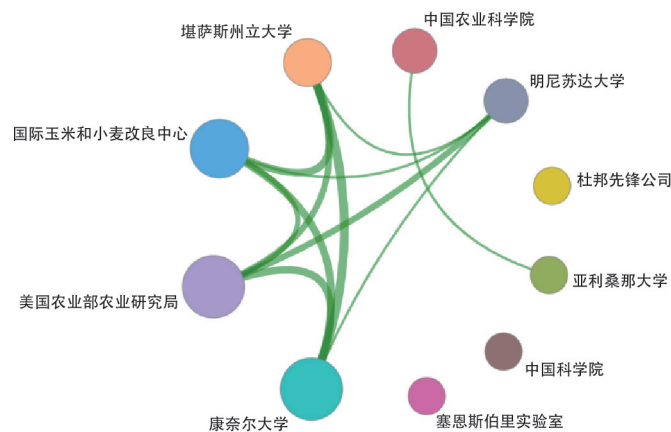


图 1.2.4 “动植物精准设计育种”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “动植物精准设计育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国	1640	29.39%	2017.8
2	中国	1413	25.32%	2018.0
3	印度	400	7.17%	2018.0
4	德国	384	6.88%	2017.8
5	英国	333	5.97%	2017.8
6	澳大利亚	323	5.79%	2017.7
7	巴西	252	4.52%	2018.2
8	法国	247	4.43%	2017.6
9	日本	223	4.00%	2017.9
10	墨西哥	190	3.40%	2017.8

表 1.2.8 “动植物精准设计育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	美国农业部农业研究局	262	16.18%	2017.8
2	中国农业科学院	253	15.63%	2018.1
3	中国科学院	194	11.98%	2017.8
4	国际玉米和小麦改良中心	137	8.46%	2017.6
5	康奈尔大学	133	8.21%	2017.6
6	华中农业大学	131	8.09%	2018.0
7	佛罗里达大学	120	7.41%	2018.1
8	爱荷华州立大学	101	6.24%	2017.5
9	中国农业大学	98	6.05%	2018.2
10	明尼苏达大学	97	5.99%	2017.6

可持续利用状况的各种对策。2012年，在联合国环境规划署的主导下，正式成立了生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台（IPBES），是继联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）之后又一个政府间全球性环境评估计划。土壤中蕴含着世界 1/4 的生物多样性，土壤生物多样性的保护对土壤健康、土壤生产力以及粮食安全都至关重要。

近 40 年来，土壤生物多样性和生态系统功能关系的研究发展迅速，已成为生态学、农学、微生物学、环境学、经济学等多学科交叉的重要研究方向。该研究前沿从最开始关注物种丧失对生态系统

结构和功能的影响，逐渐发展到利用试验或理论模型，研究生物多样性对初级生产、生物地球化学循环、环境净化、气候调节、有害生物控制、经济价值等多种服务与功能的贡献大小和作用机制。目前，针对土壤生物多样性和生态系统功能的研究，基本形成了 5 个方面的共识：①生物多样性能够提高生态系统生产力和资源利用效率；②生物多样性提高了生态系统稳定性，且时间越长，效应越显著；③生物多样性对单一生态系统过程或功能的影响具有非线性饱和性特征；④不同营养级之间物种丧失对生态系统功能的影响比营养级内部物种丧失

造成的影响大；⑤生物体的功能性状对生态系统功能发挥具有重要影响。在前期大量研究的基础上，出现了4个新兴的研究方向：①全球变化背景下的土壤生物多样性和生态系统功能。除了生物多样性本身，气候和环境条件的变化如干旱、增温、土壤酸化等均可能影响生态系统功能的发挥。因此，剖析土壤生物多样性、气候、环境因素对生态系统功能的影响和贡献大小，以及全球气候变化如何影响土壤生物多样性和生态系统功能，是应对未来全球可持续发展面临的重大挑战。②土壤生物多样性和生态系统服务功能的时空尺度特征。当前研究多集中在小范围、短时间尺度，对于更大范围的景观尺度以及随时间尺度的变异性研究较少。因此，明确土壤生物多样性和生态系统服务的时空尺度特征对景观层次的保护、土地合理利用等具有重要意义。③土壤生物多样性与生态系统多功能性。维持多种生态功能比一种生态功能需要更多物种的参与，因此，当前土壤生物多样性与生态系统中多功能性的实现成为近年来的研究热点。④土壤生物多样性的生态效益与物种进化的关系。随着分子分析技术的发展，相关研究表明物种间系统发生距离越大，越有利于生态系统功能的发挥，这可能与物种间遗传多样性导致的功能性状增加有关。

核心论文发表的国家分布方面（见表1.2.9），主要是美国、中国和西班牙，被引次数占优的是瑞士和荷兰。研究机构分布方面（见表1.2.10），西班牙胡安卡洛斯国王大学、中国科学院、美国科罗拉多大学博尔德分校产出的核心论文较多，而瑞士Agroscope研究所和苏黎世大学的被引次数较多。高被引代表论文有2014年在《美国国家科学院院刊》（*PNAS*）上发表的“*Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality*”，是由瑞士Agroscope研究所和苏黎世大学等单位的科学家合作完成的，被引频次达544次。该文章研究了土壤生物多样性和土壤群落组成对生态系统多功能性的影响，表明了土壤生物多样性的降低及群落组成的简化会降低植物多样性，同时影响着土壤中有机质降解、养分固持和转化能力，从而降低了生态系统的多功能性。

主要国家间的合作网络方面（见图1.2.5），美国、澳大利亚、西班牙和中国间有较为紧密的相互合作关系。产出主要机构间的合作网络方面（见图1.2.6），各机构间均有一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家以中国和美国为主，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（见表1.2.11）。施引核心论文的主要产出机构方面（见表1.2.12），中国科学院遥遥领先，相关论文的平均施引年为2018年。

表 1.2.9 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿中核心论文主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	24	43.64%	450	18.75	2017.5
2	中国	18	32.73%	241	13.39	2018.2
3	西班牙	17	30.91%	368	21.65	2017.4
4	澳大利亚	14	25.45%	276	19.71	2017.4
5	德国	11	20.00%	260	23.64	2017.3
6	瑞士	10	18.18%	1506	150.60	2016.4
7	荷兰	5	9.09%	1359	271.80	2016.4
8	法国	5	9.09%	618	123.60	2017.0
9	瑞典	5	9.09%	173	34.60	2017.0
10	英国	5	9.09%	142	28.40	2016.8

表 1.2.10 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿中核心论文主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	胡安卡洛斯国王大学	15	27.27%	302	20.13	2017.5
2	中国科学院	10	18.18%	176	17.60	2018.0
3	美国科罗拉多大学博尔德分校	8	14.55%	95	11.88	2018.4
4	西悉尼大学	7	12.73%	79	11.29	2018.0
5	北亚利桑那大学	6	10.91%	162	27.00	2016.0
6	明尼苏达大学	6	10.91%	114	19.00	2017.5
7	苏黎世大学	5	9.09%	1349	269.80	2016.4
8	Agroscope 研究所	5	9.09%	1106	221.20	2017.2
9	瑞典农业科学大学	5	9.09%	173	34.60	2017.0
10	中国林业科学研究院	5	9.09%	152	30.40	2017.6

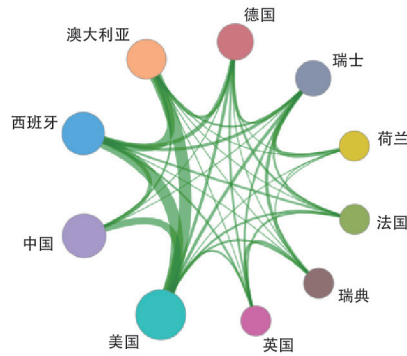


图 1.2.5 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿主要国家间的合作网络

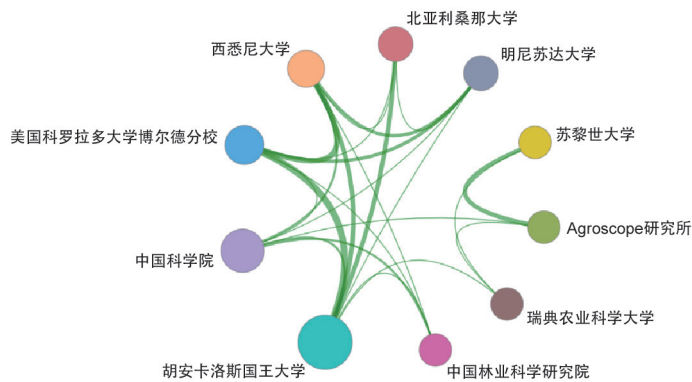


图 1.2.6 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿主要机构的合作网络

表 1.2.11 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿的施引核心论文主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	520	19.62%	2018.6
2	美国	475	17.92%	2018.0
3	德国	279	10.52%	2018.0
4	英国	207	7.81%	2018.1
5	法国	201	7.58%	2017.9
6	西班牙	195	7.36%	2017.9
7	瑞士	186	7.02%	2017.7
8	澳大利亚	177	6.68%	2018.0
9	荷兰	169	6.38%	2017.8
10	加拿大	130	4.90%	2018.4

表 1.2.12 “土壤生物多样性与生态系统功能”工程研究前沿的施引核心论文主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	203	25.47%	2018.5
2	中国科学院大学	84	10.54%	2018.6
3	苏黎世大学	73	9.16%	2017.4
4	瑞典农业科学大学	71	8.91%	2018.1
5	德国整合生物多样性研究中心	61	7.65%	2018.2
6	胡安卡洛斯国王大学	59	7.40%	2017.8
7	中国船舶集团有限公司	55	6.90%	2017.6
8	莱比锡大学	50	6.27%	2018.2
9	Agroscope 研究所	48	6.02%	2017.3
10	乌得勒支大学	47	5.90%	2016.9

2 工程开发前沿

2.1 Top 9 工程开发前沿发展态势

农业领域工程开发前沿 Top 9 主要分为三类：
 ①与农业生产装备相关的开发前沿，包括无人农场智能装备、农业先进传感机理与技术、植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药；②与环境治理相关的开发前沿，包括农业农村有机废弃物绿色资源化利用、土壤有机污染物修复；③与促进农产品生产及保障食品安全相关的开发前沿，包括人工智能辅助育种、经济林高产株型构建、水产人工配合

饲料开发应用、高效安全动物疫苗与诊断试剂研制。

农业领域 Top 9 工程开发前沿的概况如表 2.1.1 所示。从中可以看出，来自无人农场智能装备、土壤有机污染物修复、经济林高产株型构建 3 个开发前沿的核心专利较多，均在 100 项以上；植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药的平均被引数最高，为 9.31，远高于其他开发前沿；农业农村有机废弃物绿色资源化利用、人工智能辅助育种的开核心专利平均公开年最新，这表明这两个开发前沿近几年的专利申请量较大，技术发展较快。

农业领域 Top 9 工程开发前沿核心专利的公开

趋势（见表 2.1.2）表明，无人农场智能装备、农业农村有机废弃物绿色资源化利用、人工智能辅助育种的核心专利自 2017 年起出现较大涨幅，增长势头强劲。

（1）无人农场智能装备

无人农场是智慧农业的一种生产方式，是实现智慧农业的一种途径。无人农场有五个特点，一是耕种管收生产环节全覆盖；二是机库田间转移作业全自动；三是自动避障异况停车保安全；四是作物生产过程实时全监控；五是智能决策精准作业全无人。无人农场主要依托生物技术、智能装备和信息技术的支撑。生物技术主要为无人农场生产提供适应机械化作业的品种和栽培模式；智能装备主要为

无人农场生产提供智能感知、智能导航、智能作业（精准作业）和智能管理；信息技术主要为无人农场生产的信息获取、传输和处理，农机导航与自动作业，农机远程运维管理提供支持。

无人农场智能装备前沿技术主要包括智能感知、智能导航、智能作业、智能管理和系统集成。智能感知主要包括农业传感器、环境信息感知、动植物信息感知和数据智能处理。智能导航包括农场高精度地图构建技术、路径智能规划技术、复杂农田环境下农机导航精准定位技术、路径跟踪控制技术和多智能装备协同作业技术。智能作业包括精准播种、变量施肥、施药和灌溉等。智能管理包括智能装备状态监测和远程运维管理等。

表 2.1.1 农业领域 Top 9 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	无人农场智能装备	206	990	4.81	2017.2
2	高效安全动物疫苗与诊断试剂研制	80	67	0.84	2016.8
3	农业先进传感机理与技术	49	50	1.02	2017.4
4	农业农村有机废弃物绿色资源化利用	90	45	0.50	2018.3
5	土壤有机污染物修复	116	421	3.63	2017.4
6	人工智能辅助育种	56	15	0.27	2018.4
7	植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药	45	419	9.31	2017.5
8	经济林高产株型构建	142	402	2.83	2016.9
9	水产人工配合饲料开发应用	65	88	1.35	2016.3

表 2.1.2 农业领域 Top 9 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	无人农场智能装备	11	16	34	48	47	50
2	高效安全动物疫苗与诊断试剂研制	15	8	11	12	10	24
3	农业先进传感机理与技术	6	4	3	6	14	16
4	农业农村有机废弃物绿色资源化利用	2	0	0	14	28	46
5	土壤有机污染物修复	12	18	5	13	9	59
6	人工智能辅助育种	0	0	3	9	17	15
7	植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药	6	2	2	7	11	17
8	经济林高产株型构建	13	20	23	27	30	29
9	水产人工配合饲料开发应用	16	5	5	12	8	15

（2）高效安全动物疫苗与诊断试剂研制

动物疫苗指将病原微生物（病毒、细菌等）及其代谢产物，经过人工减毒、灭活或利用基因工程技术等制成的用于预防动物传染病的制剂。传统灭活疫苗具有成本高、免疫效果有限、弱毒疫苗毒株存在毒力返强等问题与风险，因此，研制高效安全的基因工程动物疫苗，如DNA疫苗、基因缺失疫苗、活载体疫苗、病毒样颗粒疫苗、合成肽疫苗等，是今后发展的重要方向。目前，国内已上市的动物新型疫苗包括禽流感DNA疫苗、口蹄疫合成肽疫苗、伪狂犬基因缺失疫苗等。

有效诊断试剂是动物疫病准确诊断、预防控制和扑灭的关键前提。诊断试剂研制主要包括：检测样本前处理技术研究；基于免疫反应的抗原抗体检测技术研究，例如单克隆抗体、酶联免疫吸附试验（ELISA）、胶体金诊断试剂条、免疫荧光技术、纳米抗体技术等；基于核酸的分子生物学检测，如聚合酶链式反应（PCR）、荧光定量PCR、等温环介导扩增（LAMP）、荧光标记适配体技术、全基因组测序等。未来，诊断试剂研制的发展方向是简便、快速、敏感、准确、高通量和在线检测。

（3）农业先进传感机理与技术

农业先进传感机理与技术是农业传感器的支撑性技术。农业传感器是实现农业作业中环境信息、生命信息、农机状态信息进行监测的器件，由新型敏感元件、处理芯片和核心算法组成，并由新型物理机理支撑的复合系统。

该领域主要包括两个研究方向：一是农业传感器的新原理、原创性方法研究。近年来，新型物理、化学和生物传感方法与农业对象不断融合，涌现出多种新原理传感器，有望实现土壤氮素/土壤重金属/水质的原位传感、作物养分/离子/代谢物的无损检测、动物发情/泌乳生化指标的在线监测。二是农业传感器的高集成化工艺设计。目前农业传感器技术研究的一大热点是运用微机电

系统（MEMS）等技术，实现传感器芯片的高度集成化。一些国家、研究机构和企业已在布局生产农业环境多参数MEMS芯片传感器、微纳动物瘤胃传感器等。通过芯片式设计和流片，实现了农业传感器器件的免维护、高可靠、低功耗和低成本。

农业先进传感器的发展趋势为新型传感机理将迅速发展，以往很多必须在实验室分析的指标，将可能实现在线、原位检测；实现农业传感器产业化应用的必由之路是打造传感器芯片设计、生产、测试、中试的产业链路。

（4）农业农村有机废弃物绿色资源化利用

属于资源生态科学学科，是传统深入开发前沿。农业农村有机废弃物是农业生产和农村生活所产生的有机废弃物总和，主要包括畜禽粪便、秸秆等农产品副产物，稻壳、果皮（渣）、下脚料等农产品加工副产物以及家庭厨余等生活垃圾。农业农村有机废弃物面广量大，具有分散性、复杂性、多样性等特点，其资源化利用难度大、潜在环境风险高，严重制约着美丽乡村的建设与农业的绿色发展。农业农村有机废弃物的资源化利用主要依赖还田改土、厌氧发酵、好氧堆肥、焚烧发电以及生物质碳化等技术途径，但仍存在关键技术不成熟、资源化收益低、无害化不彻底等绿色发展瓶颈。鉴于农业农村有机废弃物对农村生态环境的破坏及其对农业绿色发展的制约，其绿色资源化利用是当前需要重点关注的前沿技术问题。

（5）土壤有机污染物修复

土壤有机物污染直接影响农业生产、粮食安全和农产品质量，已成为亟待解决的全球性问题之一。农田土壤有机污染物主要包括有机氯杀虫剂（OCPs）、多环芳烃（PAHs）、多氯联苯（PCBs）和邻苯二甲酸酯类（PAEs）化合物。这些有机污染物具有较强的环境持久性、一定的毒性和潜在的致癌性，危害生态环境和人体健康。因而，土壤有机污染物的修复研究和治理技术开发是当前全球土壤健康保护工作的重点。土壤有机污染物修复指通过技术手

段使遭受有机物污染的土壤恢复正常功能的过程。目前土壤有机污染物修复的技术方法有物理法、化学法、生物法和联合修复法。物理法主要是通过物理手段将土壤中的有机污染物去除的方法，包括蒸汽抽提法和热脱附法。化学法指利用化学物质的氧化还原性和催化性，将土壤有机污染物转化为无毒或者低毒物质，主要方法有化学氧化法和催化降解法。生物法指利用特定动物、植物和微生物对有机污染物的降解作用，达到净化土壤的目的，主要有动物修复、植物修复和微生物修复方法。联合修复法，将以上3种方法有效结合起来，实现低成本和高效率修复土壤的目的，是目前土壤有机物污染修复的重要手段。

（6）人工智能辅助育种

近年来，人工智能技术不断向育种的各个环节深度渗透融合，使育种变得更加精准高效。面临新的机遇和挑战，人工智能技术正在支撑和酝酿新一轮绿色革命，具体体现在4个方面：①基于人工智能的精准杂交育种。杂交育种的本质是通过种质资源的有性杂交和人工选择，实现有利等位变异的富集和有害等位变异的清除。通过人工智能技术从自然变异中高效发掘有利和有害等位变异，可以指导精准杂交育种。②基于人工智能的基因编辑育种。基因编辑技术将成为未来育种的重要工具。人工智能技术可以解决在基因组哪些位点编辑、如何编辑，以获得理想农艺性状这一瓶颈问题。人工智能技术通过设计自然界不存在的有利等位变异，为基因编辑这一“导弹”提供“制导”。③基于人工智能的合成生物学。人工智能领域的生成模型技术可以用于设计自然界不存在的具有特定功能的基因组元件、蛋白质、甚至基因和基因调控网络，为动植物的智能设计提供蓝图。④基于人工智能的表型组学。随着传感器、无人机、田间机器人等的普遍应用，人工智能技术已广泛用于从多尺度、多维度图像数据中精准提取表型，有力支撑了育种模型的构建和育种流程的决策。综上所述，人工智能技术正

在引领育种进入新一轮革命，人工智能辅助育种正在成为世界各国抢占的科技制高点。

（7）植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药

植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药系统主要由遥感系统、地理信息系统、精准导航系统、变量喷施系统组成。病虫害智能识别，以无人驾驶飞机为探测平台，搭载各种传感器获取农田图像，通过对数据进行后期处理、挖掘和建模，对农作物病虫草害信息进行判别。农田遥感影像采集包括数码相机成像遥感、高光谱相机成像遥感、多光谱相机成像遥感、红外热成像遥感、激光雷达成像遥感等方法。遥感图像解译方法可以分为经典统计分析方法和基于模式识别和机器学习的解译方法。植保无人飞机变量喷雾系统尚缺少较为成熟的技术，处于试验阶段的两种方法是基于脉宽调制的变量喷雾技术和改变液泵转速的变量喷雾技术。为了能够按照处方图进行精准对靶作业，还需要植保无人飞机飞行控制系统结合风速、风向等气象信息对飞行轨迹进行实时调整，以确保将准确的喷施农药量精准的投放在确定的区域内。

（8）经济林高产株型构建

株型是构成经济林丰产的重要影响因子之一，经济林产量主要是由光合产物转化而来，树体结构决定了获取的碳、水及养分在树体各部分的分配，进而影响产量和品质。经济林高产株型，指树体高度适宜，主干、主枝及枝组等具有一定的数量关系和明确的主从关系，营养枝和结果枝比例平衡，枝叶密度和分布方向合理，树体通风透光条件良好，树冠有效光合面积达到最大限度的树体结构类型。提高经济林产量的根本途径是改善植物的光合性能，其中高产株型主要是通过增加光合面积实现增产的目的，即为高光效树形。经济林高产株型的构建主要通过良种选育和培育两个途径实现。理想株型的良种选育是从遗传层面调控构建经济林高产株型；株型培育则采用整形、修剪等树体管理措施调

控经济林高产株型的构建。今后，经济林高产株型构建的研发核心是选育光能利用率高的高产株型新品种；利用天文学太阳视运动理论和数学球面三角相关理论，研究经济林光能高效利用的最佳树体参数，构建高产株型模型等。

（9）水产人工配合饲料开发应用

在传统的水产养殖中，饲料原料如谷类和鲜杂鱼等的直接投喂非常普遍。这种投喂方式不但会产生营养物质的浪费对养殖水环境造成压力，而且还会导致病原菌从饲料原料向水产养殖动物的传播。人工配合饲料是按照特定水产养殖动物的营养需要，使用现代化生产设备生产的营养全面、易于储存和运输的颗粒或粉状饲料。按照工艺方法的不同，人工配合饲料有膨化饲料、硬颗粒饲料和粉料等形式。高效人工配合饲料的开发依赖对水产养殖动物营养素精准需求量的深入全面研究，包括对不同生长阶段、不同养殖环境条件、不同生产模式下的需求差异等的研究。养殖户片面看重水产动物的生长速度阻碍了人工配合饲料在水产养殖中的全面应用，亟须政府政策的指导来推进其推广应用。水产动物开口饲料和亲体繁育期配合饲料的推广落后于养成期人工配合饲料的推广，需要营养学研究与生产工艺的协同配合研发。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 无人农场智能装备

无人农场是智慧农业的一种生产方式，是实现智慧农业的一种途径。无人农场有5个特点：①耕种管收生产环节全覆盖，即覆盖农作物生产中的耕整、种植、田间管理（水、肥、药）和收获的各个环节；②机库田间转移作业全自动，即农机自动从机库转移到田间，完成田间作业后自动回到机库；③自动避障异况停车保安全，即在农机转移和作业过程中能实现自动避障，遇到异常情况能自动停车，以确保安全；④作物生产过程实时全监控，即能对

作物生产过程中的长势和病虫害情况进行实时监控；⑤智能决策精准作业全无人，即能根据作物的长势和病虫害情况及时做出决策并自动进行精准作业，包括精准灌溉、精准施肥和精准施药等。

无人农场主要依托生物技术、智能装备和信息技术的支撑。生物技术主要为无人农场生产提供适应机械化作业的品种和栽培模式；智能农机主要为无人农场生产提供智能感知、智能导航、智能作业（精准作业）和智能管理；信息技术主要为无人农场生产的信息获取、传输和处理，农机导航与自动作业，农机远程运维管理提供支持。

智能装备指具有感知、分析、推理、决策和控制功能的生产装备，是先进制造技术、信息技术和智能技术的集成和深度融合。无人农场智能装备是农业生产整个过程中所用到智能装备和机器人等设备的统称，采用物联网、第五代移动通信（5G）、大数据、云计算和人工智能等新一代技术构成的智能化系统，通过远程智能管控实现设施、智能农机装备和农业机器人等全程自动控制或自主控制，完成农场所有生产作业。传感器、物联网和5G技术实现了农场农业生产信息感知和传输，并与智能装备互联；大数据与云计算技术完成了农业信息存储、分析和处理；人工智能、智能装备和机器人技术实现了智能学习、智能决策以及装备和机器人自主精准作业。

无人农场智能装备前沿技术主要有智能感知、智能导航、智能作业、智能管理和系统集成。①智能感知主要包括农业传感器、环境信息感知、动植物信息感知和数据智能处理。②智能导航包括农场高精度地图构建技术、路径智能规划技术、复杂农田环境下农机导航精准定位技术、路径跟踪控制技术和多智能装备协同作业技术。③智能作业包括精准播种、变量施肥、施药和灌溉等。④智能管理包括智能装备状态监测和远程运维管理等。⑤系统集成方面包括智能装备线控技术、底盘通信技术和农机具通信技术。

该前沿领域今后的发展热点为通过运用动植物表型及生长优化调控模型、智能装备技术与先进种养农艺融合以及无人大田、无人温室、无人果园、无人牧场和无人渔场等无人农场应用实践，为种植业、畜牧业和渔业等提供全过程无人化生产模式形成无人农场智能装备的解决方案。

相关核心专利公开量和被引数排前2位的是中国与美国，韩国与哥伦比亚并列第3位（见表2.2.1）。其中，中国在专利公开量上位居第1。被引排名前五的核心专利（见表2.2.2），主

要集中在农机智能感知、智能控制与智能导航方面，是无人农场智能装备研究的重点方向。国家间的合作网络较少，仅美国与哥伦比亚间有少量的合作（见图2.2.1）。核心专利主要产出机构排名前3位的是AUTONOMO公司、凯斯纽荷兰工业美国公司和Rowbot系统公司，不同机构之间合作较少（见图2.2.2）。

2.2.2 人工智能辅助育种

人工智能技术带来了诸多领域的变革性发展，

表 2.2.1 “无人农场智能装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	102	49.51%	218	22.02%	2.14
2	美国	67	32.52%	668	67.47%	9.97
3	哥伦比亚	8	3.88%	76	7.68%	9.50
4	韩国	8	3.88%	3	0.30%	0.38
5	俄罗斯	6	2.91%	8	0.81%	1.33
6	日本	5	2.43%	39	3.94%	7.80
7	荷兰	4	1.94%	17	1.72%	4.25
8	德国	4	1.94%	10	1.01%	2.50
9	瑞士	3	1.46%	6	0.61%	2.00
10	以色列	2	0.97%	20	2.02%	10.00

表 2.2.2 “无人农场智能装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	AUTONOMO 公司	美国	14	6.80%	39	3.94%	2.79
2	凯斯纽荷兰工业美国公司	美国	11	5.34%	23	2.32%	2.09
3	Rowbot 系统公司	美国	8	3.88%	86	8.69%	10.75
4	无锡卡尔曼导航技术有限公司	中国	6	2.91%	14	1.41%	2.33
5	迪尔公司	美国	5	2.43%	39	3.94%	7.80
6	爱科国际公司	瑞士	5	2.43%	9	0.91%	1.80
7	江苏大学	中国	5	2.43%	5	0.51%	1.00
8	AgJunction 公司	美国	4	1.94%	95	9.60%	23.75
9	国家农场相互汽车保险公司	美国	4	1.94%	37	3.74%	9.25
10	Kinze 制造公司	美国	4	1.94%	34	3.43%	8.50

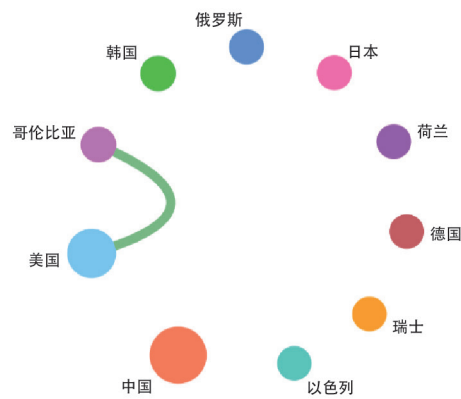


图 2.2.1 “无人农场智能装备” 工程开发前沿主要国家间合作网络

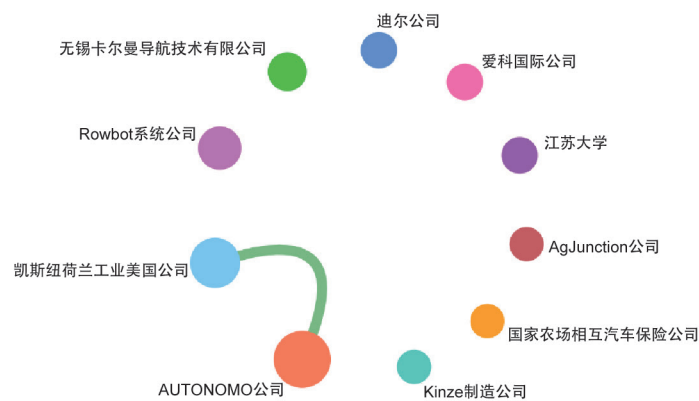


图 2.2.2 “无人农场智能装备” 工程开发前沿主要机构间合作网络

已成为世界各国抢占的科技制高点。人工智能指研究开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用的一门新科学。人工智能最核心的一个分支学科是机器学习，机器学习指由计算机替代人找到问题的解决方案。在机器学习技术中，发展最为迅猛的是基于深度神经网络算法的深度学习技术。目前，人工智能技术，尤其是深度学习技术，已开始应用于动植物育种的 4 个方向。

发掘功能变异，指导杂交育种。动植物群体中存在着海量的自然变异，但是只有极少一部分变异可以影响表型，称为功能变异。在杂交育种中，育种家通过有性杂交和选择，实现有利等位变异的富集（即有害等位变异的清除），从而实现动植物遗传改良。那么，如何从海量的自然变异中发掘影响

分子表型的功能变异？功能变异通过影响不同层次的分子表型（如 micro-RNA 与蛋白质水平的表达量或蛋白质生化活性），进而影响最终表型（如人类疾病、畜禽品质等）。因此，可以构建从基因组序列预测分子表型的深度学习模型，然后利用该模型扫描自然变异，从而系统精准发掘功能变异。深度学习技术不依赖于自然群体，具有成本更低、不受等位基因频率影响、可以从高度连锁的变异位点中发掘功能变异和可以实现知识在不同位点、不同群体、不同物种间的迁移等优点。深度学习技术已被广泛用于预测控制人类疾病的功能变异，在动植物育种领域也开始蓬勃发展。

设计优异等位变异，指导基因编辑育种。杂交育种依赖自然产生的功能变异。但是，功能变异自

然发生的速度非常缓慢，其表型效应具有随机性，且常存在遗传累赘。未来的作物育种能否突破自然变异的限制，实现功能变异的理性设计和创制？随着基于 CRISPR-Cas9 系统的基因编辑技术的出现（如高通量碱基敲除、单碱基编辑、先导编辑等），未来可以根据育种目标，对功能变异进行定向设计，然后利用基因编辑技术将功能变异导入动植物基因组。但在基因组哪些位点编辑、如何编辑，才能实现性状改良，将成为基因编辑育种的关键问题，从生物学序列预测分子表型的深度学习模型可以系统高效地解决上述问题。

创制新型功能元件，指导合成生物学。目前，深度学习领域的生成模型技术（generative models），已经广泛用于合成生物学。该技术能够通过海量生物数据的学习，设计出新的具有特定生物学功能的基因组元件，如具有优异生化活性的蛋白质、顺式元件等。利用基因编辑技术将这些新元件定点敲入基因组，可以实现农艺性状的改良。人工智能指导下的合成生物学将为动植物遗传改良带来新的思想和技术变革。

智能分析图像，提取表型特征。近年来，新型高通量表型组学迅速发展。搭载近红外和可见光传感器的无人机、田间机器人等仪器产生大量图像数据。利用机器学习尤其是深度学习技术从图像数据中精准获取表型特征（如光合效率、冠层温度等），已经成为表型组学领域的常用技术。

“人工智能辅助育种”工程开发前沿中相关核心专利的主要产出国家方面（见表 2.2.3），共有 56 项专利，最主要的产出国是中国（47 项），其次是韩国（5 项），再次是澳大利亚、德国、印度和日本各有 1 项专利，中国的平均被引数为 0.32 次。核心专利 TOP 10 产出机构方面（见表 2.2.4），研发机构主要为企业和高校，但研发机构之间缺少合作。另外，专利产出机构较为分散，仅安徽省东昌农业科技有限公司产出数量是 2 项，其他机构均为 1 项；祥创科技北京有限公司的平均被引较高，为 4 次。

2.2.3 植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药

农业生产正从粗放、高消耗走向精细、节约化，未来农业生产将呈现高度区域化、一体化、机械化和智能化的特点，智能植保机械和精准施药将成为植保作业的发展方向。植保无人飞机可在空中实时获取农田地理位置、作物长势、病虫害害等信息，再将农田分为作业网络，结合气象和历年数据等多源信息对病虫害进行精准预报和监测，并制定作业处方图，通过精准对靶施药系统，实现网格化的农作物精准施药。该工程前沿的主要研发点包括：

① 农田遥感影像获取。农作物信息采集传感器主要有数码相机、多光谱相机、高光谱相机、热成像仪、激光雷达等。数码相机可获取 RGB 可见光图像，

表 2.2.3 “人工智能辅助育种”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	47	83.93%	15	100.00%	0.32
2	韩国	5	8.93%	0	0.00%	0.00
3	澳大利亚	1	1.79%	0	0.00%	0.00
4	德国	1	1.79%	0	0.00%	0.00
5	印度	1	1.79%	0	0.00%	0.00
6	日本	1	1.79%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “人工智能辅助育种”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	安徽省东昌农业科技有限公司	中国	2	3.57%	0	0.00%	0.00
2	祥创科技北京有限公司	中国	1	1.79%	4	26.67%	4.00
3	云南农业大学	中国	1	1.79%	3	20.00%	3.00
4	北京奥金达农业科技发展有限公司	中国	1	1.79%	1	6.67%	1.00
5	苍南博雅科技有限公司	中国	1	1.79%	1	6.67%	1.00
6	青海大学	中国	1	1.79%	1	6.67%	1.00
7	安徽省雷氏农业科技有限公司	中国	1	1.79%	0	0.00%	0.00
8	旭水农事组合法人	日本	1	1.79%	0	0.00%	0.00
9	中农致远(北京)农业科技发展有限公司	中国	1	1.79%	0	0.00%	0.00
10	Bigstone House	韩国	1	1.79%	0	0.00%	0.00

成本低，但是光谱分辨率也低。多光谱相机光谱分辨率为 0.1 mm 数量级，可根据病虫害的特征光谱进行量身定做，基本满足农情信息和病虫害识别要求，在农业生产中已有商业化产品。高光谱相机光谱在可见光和近红外区域有几个到数百个波段，光谱分辨率可达纳米级，波段信息丰富、分辨率高，能准确反映田间各种作物之间的光谱差异，因而在农作物病虫害监测上更显优势，但其价格较高，主要用于科研领域。激光雷达是近年出现的新型遥感技术，可获取高精度的三维数据，目前主要用于农作物株高、生物量、叶面积指数等农情监测，未来可与光谱成像结合，作为多源遥感，对农作物病虫害进行全方位解析，从而提高农作物病虫害识别准确度。

②遥感图像解译。图像解译指对遥感图像进行处理、挖掘和建模，以便对农作物和病虫害信息进行判别，主要方法有经典统计分析方法和基于模式识别和机器学习的解译方法。基于模式识别和机器学习的图像解译所需样本和设备性能要求低，模型更容易理解。深度学习和机器学习是一个新兴领域，具有特征学习和深层结构两个显著特点，有利于遥感图像分类精度的提升。当前农作物病虫

害智能识别主要是针对特定农作物、特定试验园区以及特定病害监测进行的可行性研究，未来需要进一步与农学、植保、病理等紧密结合，实现大规模生产应用。

③精准变量喷施。植保无人机按照作业处方图对确定的区域精准投放施药量需要有农药变量喷施系统和精准投放技术的支持。农药变量喷施系统尚未应用于生产，在科研中主要采用两种方法：一种是基于脉宽调制的变量喷雾技术，此技术主要针对液力雾化喷头；另外一种是通过改变液泵转速来改变喷头流量，此技术主要针对离心雾化喷头。农药精准投放技术指植保无人机在飞行过程中，根据风速、风向并结合飞行高度、飞行速度、雾滴大小、作物特征等因素，对飞行轨迹进行实时调整，以确保农药雾滴能够精准地沉积到指定区域。

植保无人机是近年来的新型植保作业方式，因此，对雾滴的沉积与飘移机理研究还不够深入，这是未来植保无人机精准投放技术的主攻点之一。

该前沿相关核心专利共 45 项，最主要的产出国是中国（37 项），其次是美国和韩国，分别有 7 项和 1 项。美国的平均被引数为 36.29 次，中国的

第二章 领域报告：农业

平均被引数为 4.46 次（见表 2.2.5）。产出较多的机构有广州极飞科技有限公司、无锡同春新能源科技有限公司、仲恺农业工程学院等中国机构，而美国的 Working Drones 公司和 Elwha 公司各公开 1 项（见表 2.2.6）。其中 Working Drones 公司的利用移动终端对无人飞机进行导航和控制的专利被引数为 242 次，是本前沿最有影响的专利，也是无人飞机

研究的重点方向之一。由于中国是全球植保无人机应用最多的国家，而中国又是专利的主要产出国，其他国家在植保无人机方面的专利相对较少，因此在查询范围内的专利不存在国家之间的合作。中国植保无人飞机市场竞争激烈，各单位之间的竞争大于合作，加之植保无人飞机的开发涉及商业机密，因此在机构之间也没有发现合作关系。

表 2.2.5 “植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	37	82.22%	165	39.38%	4.46
2	美国	7	15.56%	254	60.62%	36.29
3	韩国	1	2.22%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “植保无人飞机病虫害智能识别与精准对靶施药”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	广州极飞科技有限公司	中国	5	11.11%	51	12.17%	10.20
2	无锡同春新能源科技有限公司	中国	4	8.89%	34	8.11%	8.50
3	仲恺农业工程学院	中国	3	6.67%	5	1.19%	1.67
4	北京农业信息技术研究中心	中国	2	4.44%	29	6.92%	14.50
5	深圳市道通智能航空技术有限公司	中国	2	4.44%	10	2.39%	5.00
6	成都优力德新能源有限公司	中国	2	4.44%	0	0.00%	0.00
7	华南农业大学	中国	2	4.44%	0	0.00%	0.00
8	Working Drones 公司	美国	1	2.22%	206	49.16%	206.00
9	Elwha 公司	美国	1	2.22%	25	5.97%	25.00
10	北京艾森博航空科技股份有限公司	中国	1	2.22%	13	3.10%	13.00

领域课题组成员

课题组组长：

张福锁

专家组成员：

郭世伟 李新海 林敏 刘录祥 刘少军

刘世荣 刘学军 刘英杰 卢琦 罗锡文
 马文奇 马有志 谯仕彦 沈建忠 万建民
 王光州 王桂荣 王红宁 王军辉 王锴
 王小艺 王晓武 王源超 吴孔明 吴普特
 杨宁 张斌 张福锁 张守攻 张涌
 赵春江 周继勇 朱齐超

课题组成员：

郜向荣 焦小强 李红军 李云舟 刘德俊
刘 军 刘治岐 师丽娟 孙会军 汤陈宸
王桂荣 姚银坤 臧 英 张晋宁 赵 杰
周丽英 朱齐超

郭世伟 胡 炼 胡 炜 李 谷 李新海
刘 军 刘录祥 刘少军 刘学军 刘英杰
刘治岐 罗锡文 马有志 宋坚利 汪 海
汪阳东 王光州 王红宁 王 晖 王 锴
王晓武 王源超 乌云塔娜 赵春江 张涌
郑世军 周继勇 朱齐超

执笔组成员：

艾庆辉 曹光乔 陈松林 丁艳峰 董莎萌