

七、农业

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

农业领域工程研究前沿 Top 10 主要分为 3 类：

传统深入研究前沿，包括植物保护学科的植物免疫调控机理、资源生态学科的气候变化对农业生态的影响、资源生态学科的生物多样性与生态系统服务、水产科学学科的人工诱导产卵繁殖、资源生态学科的全球气候变化与作物生产；新兴研究前沿，包括作物科学学科的作物基因组选择育种、动物科学的动物疫病发病机理及防控、农业工程学科的智能生物工厂、林业科学学科的林业高光谱遥感监测；颠覆性研究前沿，如农业生物工程的农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑。

每类研究前沿的支撑核心论文数分布不均，平均约 30 篇，篇均被引约 40 次，集中在 2015—2017 年出版（见表 1.1.1），变化规律不明显（见表 1.1.2）。其中，人工诱导产卵繁殖发表论文有逐年上升趋势。数据同时表明，前沿论文中常被引

论文比例不超过 30%，专利引用的论文数量极少。

（1）农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑

属于农业生物工程学科，是颠覆性研究前沿。基因组编辑技术是通过核酸内切酶特异切割脱氧核糖核酸（DNA）靶位点，产生 DNA 双链断裂，诱导 DNA 的损伤修复，从而实现对基因组的定向编辑。CRISPR-Cas9 技术是一种准确、高效、便捷的生物基因编辑技术。CRISPR 是存在于古细菌基因组中有规律、成簇、间隔短回文的重复序列，主要依赖 Cas9 核心蛋白，在核糖核酸（RNA）的介导下，识别目标序列进行切割造成 DNA 的双链断裂，修复时可为生物机体提供特异性免疫保护机制，以抵抗外来质粒、病毒等遗传物质的入侵。CRISPR-Cas9 解决了生物常规育种需要进行多代杂交、所需时间长的问题，可以定向加快育种进程。

（2）动物疫病发病机理及防控

属于农业生物工程和动物医学学科，是新兴研究前沿。动物疫病是指动物传染病和寄生虫病等，对人与动物危害严重，需要采取紧急、严厉的强制

表 1.1.1 农业领域 Top 10 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	农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑	42	3261	77.64	2015.6
2	动物疫病发病机理及防控	11	153	13.91	2017.3
3	作物基因组选择育种	6	174	29.00	2017.3
4	智能生物工厂	26	547	21.04	2015.8
5	植物免疫调控机理	43	1265	29.42	2015.8
6	气候变化对农业生态的影响	11	795	72.27	2016.1
7	生物多样性和生态系统服务	35	1356	38.74	2015.9
8	人工诱导产卵繁殖	44	704	16.00	2016.5
9	全球气候变化与作物生产	85	2298	27.04	2015.5
10	林业高光谱遥感监测	15	937	62.47	2015.5

表 1.1.2 农业领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑	1	5	14	12	8	2
2	动物疫病发病机理及防控	0	0	0	2	4	5
3	作物基因组选择育种	0	0	0	0	4	2
4	智能生物工厂	3	4	3	5	3	4
5	植物免疫调控机理	7	5	8	1	12	10
6	气候变化对农业生态的影响	1	1	2	2	2	3
7	生物多样性与生态系统服务	6	4	2	3	14	6
8	人工诱导产卵繁殖	1	2	6	10	14	11
9	全球气候变化与作物生产	10	11	22	18	19	5
10	林业高光谱遥感监测	1	4	3	3	1	3

措施进行防控。目前全球发现的动物传染病共有 250 多种，近一半是人畜共患病，对人类健康、畜牧业安全生产、畜产品安全和公共卫生造成重大危害。一般根据生物信息特征，采用计算机技术来研究生物数据，即利用生物信息学来收集、处理和分析病原体的基因组信息，通过基因组对比确定疫病病原的蛋白质结构，针对导致疫病发作的分子特性开发新的药物以提高疗效。随着经济全球化的发展，人员、商品、牲畜的流动日益频繁，一些区域流行病逐渐演变成世界性疾病，公共卫生状况堪忧。如 1986 年英国首次暴发的疯牛病，已经扩散到日本、欧洲、加拿大等 20 多个国家和地区。考虑其外部性和公共性，各方高度重视动物疫病，采取了必要的防控策略。考虑到动物疫病防控是影响畜牧业健康发展的重要因素，动物出生之后就要从饲料、饲养环境、免疫等各方面来防止疾病的发生，实现健康养殖的目标。健康养殖是从源头保障动物产品安全，重点考虑畜禽健康、产品安全和环境保护。

(3) 作物基因组选择育种

属于作物科学学科，是新兴研究前沿。自 20 世纪 80 年代以来，分子生物学的迅猛发展为基于分子遗传标记进行辅助育种提供了可能，即标记辅助选择 (MAS)。MAS 具有准确性高、不受性

别限制、快速提高有利基因筛选频率或清除有害基因、能够早期选种等优点，然而受限于数量性状基因组 (QTL) 定位研究结果之间难以相互验证、定位区间过大、QTL 估计效应偏高，MAS 在作物育种的应用受到很大限制。为了克服利用少量标记进行选择的不足，将功能基因组研究的最新成果和先进的单核苷酸多态性 (SNP) 芯片技术相结合，Meuwissen 等提出利用覆盖全基因组的高密度遗传标记计算个体的基因组估计育种值 (GEBV) 方法。与传统基于系谱信息的估计育种值 (EBV) 相比，GEBV 通常能获得更高的估计准确性，实现的估计育种值称为基因组育种值，在此基础上进行选种则称为基因组选择育种 (GSB)。GSB 的具体操作过程为：建立参考群体，其中的个体都有已知的表型和基因型，通过合适的统计模型估计出每个 SNP 或不同染色体片段的效应值；对候选群体中的个体进行基因分型，利用参考群体中估计得到的 SNP 效应值来计算候选群体中每个个体的 GEBV；根据 GEBV 排名对个体进行选留，待选留个体完成性能测定后，这些个体又可以被放入参考群体，用于重新估计 SNP 的效应值，如此反复。随着商业化高密度 SNP 芯片的普及和测序价格的下降，GSB 已较大规模应用于农业动植物的育种实践。

（4）智能生物工厂

属于农业工程学科，是新兴研究前沿。以大数据、人工智能为代表的“智能革命”深刻改变了生物工程的内涵和外延，在作物生产、大分子设计、合成生物学、微化工等领域均取得变革性成果。设施农业是在环境相对可控条件下，采用工程技术手段进行植物高效生产的一种现代农业方式。在“智能革命”大环境下出现的智能生物工厂成为设施农业的前沿发展方向。智能设施农业包括设施种植、设施养殖和设施食用菌等。在设施种植、养殖业由自动化向高级智能化转变的过程中，环境与生物信息采集与监测（如设施环境因子、生物生产生长过程）、智能化系统控制平台、生物（如作物、菌类或养殖品种）管理模型、智能光源、智能饲喂、采摘机器人以及基于物联网的农产品质量溯源系统等的开发将是未来的技术研发核心。此外，智能生物工厂利用动物干细胞制造出来的“人造肉”也将逐步端上大众的餐桌。

（5）植物免疫调控机理

属于植物保护科学学科，是传统深入研究前沿。植物的抗病性分为抗侵染、抗扩展、诱导抗性、结构抗性、生化抗性、过敏性坏死反应和系统获得性抗性等。植物在自然环境中会受到多种病原物的威胁，植物表层作为第一道防线能阻止病原物的进入，表现出非寄主抗性。当致病菌成功侵入植物内部，植物的天然免疫系统将启动工作，其免疫调控机理分为4个阶段：病原微生物保守成分（PAMPs）触发的免疫反应（PTI）途径，植物的识别受体（PRRs）能识别病原物表面的相关模式分子；病原微生物分泌效应因子抑制PTI途径使植物对病原菌敏感；富含亮氨酸重复单位的受体激酶（NB-LRR）蛋白特异性识别效应因子触发的免疫反应（ETI）；植物在自然选择的压力下抗病基因产生新的R蛋白，引起病原微生物感染位点处的细胞死亡，表现出超敏反应（HR）。植物HR

能有效阻碍病原微生物（特别是那些靠吸器获取细胞养分的寄生虫）的生长，而且反应通常不会超出被病原微生物感染的区域。

（6）气候变化对农业生态的影响

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。大气中CO₂浓度升高、气温升高及降水量的变化等是全球气候变化对农业生态系统影响最为重要的生态因子。CO₂浓度升高将促进作物光合产物流向根系，从而提高农田生态系统地下部分对碳的固定以及植物根系对水分的吸收，农田生态系统的初级生产力将有所增加。土壤有机碳的增加可为土壤微生物提供更多的可降解底物，增强了土壤的呼吸作用。气温升高导致的全球气候变暖，意味着外界向农业生态系统输入了更多的能量，将导致农业生态系统结构和功能的变化。气候变化通过影响作物的生理过程和种间相互作用，可以逐步改变物种的遗传特性，进而影响农业生态系统的种类组成、结构和功能。降水量的改变、全球海平面的上升也会直接或间接影响农业生态系统的功能。

（7）生物多样性与生态系统服务

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。生物多样性是指所有存在于陆地、海洋及其他水生生态系统中的动物、植物和微生物等生命体之间的变异性和多样性，以及生态系统各组成部分之间的复杂生态过程，包括物种多样性、生态环境多样性、营养方式多样性、生命周期多样性和遗传多样性等。生物多样性对于保护自然资源具有重要贡献。生态系统服务是指人类从各种生态系统中获得的所有利益，由生态系统的支持功能、供给功能、文化功能、调节功能及其相互作用构成。生态系统的生物、物理学结构和过程体现出生态系统结构与功能特征，其稳定性保证了生态系统服务的持续供给。全球范围内关键生态系统服务趋于减少，使人类社会面临巨大的威胁。利用生态恢复工程对退化的生态系统服务和生物多样性进行修复，对于缓解人类环境压

力具有积极意义。

(8) 人工诱导产卵繁殖

属于水产科学学科，是传统深入研究前沿。大多数鱼虾类的生殖活动都有季节性，只有少数是常年连续产卵的，且生殖周期的精确时间性能够保证所产出幼苗获得适宜的生存条件。温度、光周期、降雨和食物等环境因子对调节鱼虾类的生殖周期尤为重要。鱼虾类的感觉器官可以把这些环境因子变化的信息传送到脑，使下丘脑分泌促性腺激素释放激素（GnRH）和其他一些神经内分泌因子，激发脑垂体分泌促性腺激素（GtH），刺激性腺产生性类固醇激素，从而促使性腺发育成熟与排出精子和卵子。由外界环境因子启动的鱼虾类周期性生殖生理活动是由一系列神经内分泌激素调控的，起主要作用的是促性腺激素。人工诱导产卵繁殖的方法主要有：环境胁迫方法，生活环境发生较大改变时（如干旱、洪涝、高温酷暑和冰冻严寒），小龙虾以种族延续、繁殖需求为生存第一要素，繁殖性能会发生改变，表现为环境胁迫下的早繁、多繁现象；使用高效、低成本无副作用的新型催产剂，如GnRH类似物（LHRH-A或sGnRHA）和多巴胺D-2型受体拮抗剂（DOM）组成的高活性鱼类催产剂。

(9) 全球气候变化与作物生产

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。自1990年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第一次气候变化科学评估报告问世以来，研究未来气候变化情景下作物产量成为评价未来气候变化对农业影响的重要内容，据此可以了解土壤生产潜力和粮食安全保障能力。全球气候变化带来的温度升高、大气CO₂浓度增加等现象对作物产量的影响需要在长时间尺度上进行评价。为研究全球气候变化对作物生产的影响，学者提出生态系统功能模型、作物生长模型、净初级生产力模型、大气模型、生物地理化学模型、生态模型等一系列模型。其中，基于作物生长模型研究气候变化对作物产量形成、生长发育的影响评估以及作物区域气候适应

性等内容得到了广泛开展。利用作物生长模型进行数值模拟和预测研究是目前量化研究气候变化对农业生产影响的主要手段，可以确定历史气候变化对农作物的影响规律、分析作物品种更替适应气候变化的机制。

(10) 林业高光谱遥感监测

属于林业科学学科，是新兴研究前沿。高光谱遥感技术是以极其狭窄的电磁波段从地面获取地物连续光谱信息的一种新技术，高光谱影像具图谱合一、光谱分辨率极高的独特优势。作为在电磁波谱的中红外区、可见光、近红外、紫外区域获得大量连续且极窄的图像数据技术，高光谱遥感主要应用于：森林火灾监测，考虑所探测的地表温度是否异常及该处地被物等因素是否可燃等因素，结合常规遥感数据，可对森林火灾的发生地点及燃烧后果进行定性和定量分析；森林病虫害监测，在森林遭受病虫害侵袭时，叶绿素含量通常会降低，叶绿素吸收带的强度衰减，导致整体可见光的反射率增加，这种变化信息可从遥感影像上提取，进而为防范病虫害提供参照标准；森林资源变化监测，对林地变化进行监控，对林地进行生态学评价，对森林类型以及树种进行细分。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑

基因组编辑技术是连续多年的全球性研究前沿，2012年《Science》将之列入年度十大科学进展，2014年《Nature Methods》将之列入过去10年间对生物学研究最有影响力的10项研究方法。基因组编辑技术通过核酸内切酶特异切割DNA靶位点，产生DNA双链断裂，诱导DNA的损伤修复，从而实现对基因组的定向编辑。它解决了常规育种需要进行多代杂交、所需时间长的问题，可以加快育种进程；但是由于人为加速突变效率、改变作物自然的进化过程，相应增加了基因组编辑植物

的环境安全和食用安全风险。基因编辑技术已经发展更新了4代：ZFNs 编辑技术、TALENs 编辑技术、MGN 编辑技术和 CRISPR-Cas9 系统。CRISPR-Cas9 作为一种准确、高效、便捷的生物基因组编辑工具，原理是外源基因组中称为前间区序列邻近基序（PAM）的三个保守核苷酸 NGG（N 可以为任何核苷酸）可以被向导 RNA（sgRNA）识别，sgRNA 引导 Cas9 蛋白在 PAM 上游切割；断链的 DNA 进行非同源末端连接修复时，会导致插入缺失效应，进而造成基因的移码突变而达到基因敲除的目的。由于 CRISPR 的 sgRNA 只需 20 多个核苷酸的序列就能识别 PAM 基序，并且 Cas9 蛋白单聚体就能发挥作用，CRISPR-Cas9 系统相对于其他几种基因编辑工具而言，操作更加简便，敲除效率更高，编辑更加精准，可以显著降低脱靶概率，被广泛应用于包括重要动植物在内的生物基因编辑。

国家或地区的核心论文分布方面（见表 1.2.1），数量从高到低首先是中国和美国，其次是德国和日本。被引次数排序为中国、美国和德国。研究机构分布方面（见表 1.2.2），中国科学院以 7 篇核心论文数与美国明尼苏达大学并列榜首，中国科学院的被引次数也高居榜首。国家或地区间的合作网络方面（见图 1.2.1），国家间的研究合作较为普遍，

以中国和美国之间合作最为紧密，美国 and 英国也有明显的合作关系。产出主要机构间的合作网络方面（见图 1.2.2），中国科学院与中国科学院大学合作紧密，其他各机构间也存在一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家或地区以中国和美国为主，施引核心论文比例也远远高于其他国家或地区（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），中国占据 6 位，且前 5 位机构均来自中国。这些机构施引核心论文的平均施引年为 2017 年，普遍晚于其他机构，表现出强劲的发展势头。

超过 40 余篇核心论文被引频次大于 200 次，多数为综述性文章。2014 年《Cell》发表的“Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering”论文被引频次达 1700 次，充分说明 CRISPR-Cas9 系统在生物基因编辑中的引领者地位。CRISPR-Cas9 技术不但在拟南芥、酵母、鼠、人和果蝇等模式生物中广泛应用，而且已成功在经济动物如牛、猪和羊，重要农作物如小麦、高粱、水稻和玉米等物种中实现了定点基因编辑。中国科学院、中国农业科学院和华中农业大学等机构在农作物的遗传改良方面进展显著，中国农业大学等机构则在经济动物的基因编辑方面居于领先地位。

表 1.2.1 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	China	17	40.48%	1437	44.07%	84.53
2	USA	17	40.48%	1399	42.90%	82.29
3	Japan	5	11.90%	156	4.78%	31.20
4	Germany	5	11.90%	455	13.95%	91.00
5	South Korea	3	7.14%	171	5.24%	57.00
6	Italy	2	4.76%	99	3.04%	49.50
7	UK	2	4.76%	219	6.72%	109.50
8	Sweden	1	2.38%	47	1.44%	47.00
9	Mexico	1	2.38%	17	0.52%	17.00
10	Philippines	1	2.38%	17	0.52%	17.00

表 1.2.2 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑” 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	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Univ Minnesota	7	16.67%	486	14.90%	69.43
2	Chinese Acad Sci	7	16.67%	688	21.10%	98.29
3	Karlsruhe Inst Technol	4	9.52%	395	12.11%	98.75
4	Yokohama City Univ	4	9.52%	116	3.56%	29.00
5	Chinese Acad Agr Sci	4	9.52%	176	5.40%	44.00
6	Seoul Natl Univ	3	7.14%	171	5.24%	57.00
7	Natl Agr & Food Res Org	3	7.14%	77	2.36%	25.67
8	Univ Chinese Acad Sci	3	7.14%	218	6.69%	72.67
9	Inst for Basic Sci Korea	2	4.76%	111	3.40%	55.50
10	Univ Elect Sci & Technol China	2	4.76%	195	5.98%	97.50

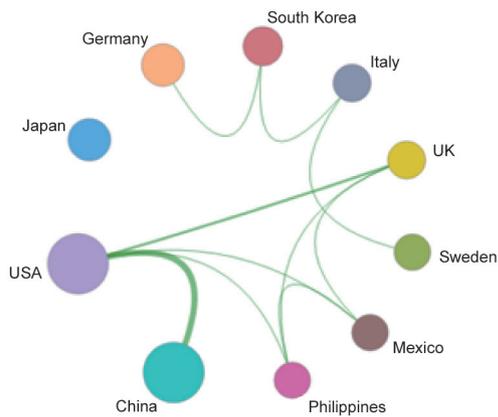


图 1.2.1 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑” 工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

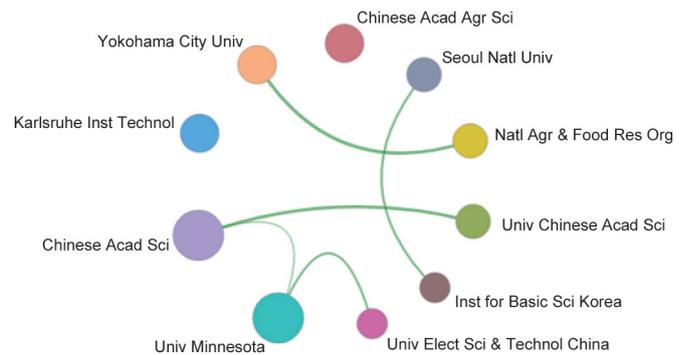


图 1.2.2 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑” 工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑” 工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	419	30.17%	2017.2
2	USA	388	27.93%	2016.9
3	Germany	104	7.49%	2016.7
4	UK	93	6.70%	2017.1
5	Japan	78	5.62%	2017.0
6	India	70	5.04%	2017.2
7	Australia	68	4.90%	2017.4
8	France	58	4.18%	2017.2
9	Italy	43	3.10%	2017.0
10	Netherlands	34	2.45%	2017.6

表 1.2.4 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑” 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	Chinese Acad Sci	100	23.15%	2017.1
2	Chinese Acad Agr Sci	65	15.05%	2017.3
3	Huazhong Agr Univ	52	12.04%	2017.3
4	Univ Chinese Acad Sci	43	9.95%	2017.3
5	China Agr Univ	34	7.87%	2017.3
6	Univ Minnesota	30	6.94%	2016.4
7	Karlsruhe Inst Technol	24	5.56%	2016.3
8	Iowa State Univ	23	5.32%	2016.8
9	Univ Calif Davis	21	4.86%	2017.0
10	South China Agr Univ	20	4.63%	2016.9

1.2.2 动物疫病发病机理及防控

常见动物疫病有：口蹄疫、非洲猪瘟、牛传染性胸膜肺炎（牛肺疫）、牛海绵状脑病（疯牛病）、蓝舌病、高致病性禽流感等。从传染病疫情的整体形势来看，按照传播途径可以分为接触型传染病和非接触型传染病。从单个传染病疫情的时间阶段来看，重大传染病属于典型的突发事件，一般具有发生、发展、演化、衰退的生命周期。按照传染病流行的特点，可以将重大传染病的生命周期分为潜伏期、扩散期、暴发期和终结期 4 个阶段。重大传染病在经过长时间潜伏之后，感染动物并产生症状，疫情开始扩散，在短时间内呈现出大规模暴发的态势，一般直接采取扑杀消毒措施控制疫情。没有新病例出现时，传染病依次进入衰退期、终结期。

传染病的传播必须具备 3 个条件：传染源、传播途径和易感种群。传染源是指受传染病病原体感染的人或动植物，病原体不仅能在传染源体内生存和繁殖，还能借助传染源的移动向外界散布。传播途径是指病原体从传染源体内排出后感染人或动物的过程，不管是接触型传染病还是非接触型传染病，病原体都需要通过一定的介质传播才能感染动物。非洲猪瘟（ASF）是由非洲猪瘟病毒（ASFV）引起的一种广泛出血性高度接触性疫病，猪病死率

可达 100%。ASF 自 1921 年首次报道后，主要流行于撒哈拉以南的非洲地区。2007 年格鲁吉亚暴发 ASF，随后疫情迅速蔓延至整个高加索地区和俄罗斯。2014 年 ASF 传入东欧大部分国家并初步呈现出扩大流行趋势。2018 年 8 月，中国开始暴发 ASF。世界动物卫生组织（OIE）将 ASF 列为必须通报的动物疫病，而目前尚无商业化 ASF 免疫疫苗。牛海绵状脑病（BSE）又称疯牛病（CMD），是一种以大脑灰质出现海绵状病变为主要特征的慢性致死性的神经系统退行性疾病，主要致病因子是朊蛋白（Prion）——一种具有“自我复制”能力和传染性的蛋白质。禽类流行性病毒（AIV）是一种主要流行于禽类的急性传染病，也可感染人类，被 OIE 定为甲类传染病。动物疫病的防控，本质上取决于免疫疫苗的研发和大批量生产应用。亚单位疫苗、核酸疫苗、病毒活载体疫苗的保护效力一般偏低，基因缺失疫苗才可以提供完全保护，这是目前各国疫苗研发的首要目标。

核心论文发表的国家或地区分布方面，主要是巴西、美国、德国和中国，被引次数占优的是德国和美国（见表 1.2.5）。研究机构分布方面，美国 Iowa State Univ、德国 Boehringer Ingelheim Vetmed Inc 产出的核心论文及被引次数较多（见表 1.2.6）。

主要国家或地区间的合作网络方面，美国和巴西有较为紧密的相互合作关系（见图 1.2.3），中国在该研究方向上表现一般。主要机构间的合作网络方面分为两个阵营，美国和巴西的机构间合作紧密，德国和波兰的机构间合作紧密（见图 1.2.4）。施引核心论文的主要产出国家或地区主要是中国、德国和巴西，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（见表 1.2.7 和表 1.2.8）。

1.2.3 作物基因组选择育种

作物基因组选择育种是结合了功能基因组研究最新成果与国际先进的 SNP 芯片技术，构建服务于作物育种的一种基因组技术工具。利用这种方法

在实验室检测作物的种子或幼苗，准确鉴定并筛选带有优良基因的个体，预测作物在田间的性状表现，使育种过程更具目的性和针对性，从而精准挑选聚合多个优良基因位点、性状表现潜力突出的植株培育作物新品种，实现育种过程的科学控制，为最终实现“设计育种”提供手段。作物基因组育种芯片在种质资源多样性分析、基因鉴定、基因定位、育种材料基因型选择、品种基因指纹检测等方面均可发挥重要作用。

通过设计特定的作物训练群体收集基因型数据、表型数据以及与之相关的环境因子（地域差异、试验处理和季节等），使用特定的模型算法构建训练模型，通过训练模型来计算个体的育种值或

表 1.2.5 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Brazil	3	27.27%	18	11.76%	6.00
2	USA	3	27.27%	45	29.41%	15.00
3	Germany	3	27.27%	52	33.99%	17.33
4	China	2	18.18%	16	10.46%	8.00
5	Spain	1	9.09%	9	5.88%	9.00
6	Austria	1	9.09%	24	15.69%	24.00
7	Poland	1	9.09%	3	1.96%	3.00

表 1.2.6 “动物疫病发病机理及防控”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	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Iowa State Univ	3	27.27%	45	29.41%	15.00
2	Boehringer Ingelheim Vetmed Inc	2	18.18%	40	26.14%	20.00
3	Sao Paulo State Univ Unesp	2	18.18%	11	7.19%	5.50
4	Vet Resources Inc	2	18.18%	11	7.19%	5.50
5	Univ Vet Med	2	18.18%	37	24.18%	18.50
6	Generalitat Catalunya	1	9.09%	9	5.88%	9.00
7	Inst Agrifood Res Tech	1	9.09%	9	5.88%	9.00
8	Univ Alabama Birmingham	1	9.09%	9	5.88%	9.00
9	Univ Autonoma Barcelona	1	9.09%	9	5.88%	9.00
10	Traunkreis Vet Clin	1	9.09%	24	15.69%	24.00

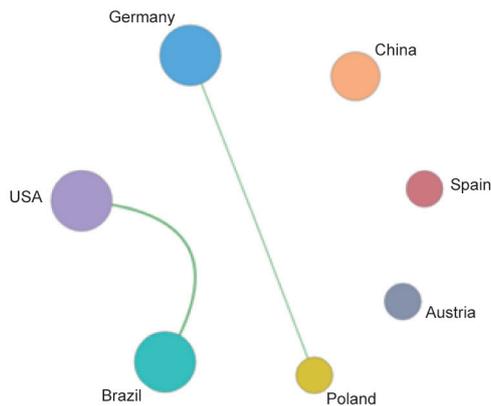


图 1.2.3 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

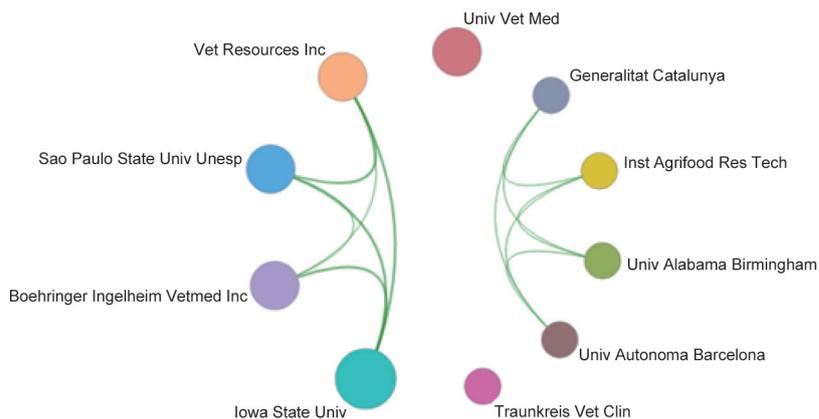


图 1.2.4 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	14	25.93%	2018.0
2	Germany	12	22.22%	2017.3
3	Brazil	10	18.52%	2017.9
4	USA	5	9.26%	2017.6
5	Spain	4	7.41%	2017.8
6	Italy	2	3.70%	2017.5
7	Austria	2	3.70%	2017.0
8	Netherlands	2	3.70%	2017.0
9	Serbia	1	1.85%	2017.0
10	Taiwan of China	1	1.85%	2017.0

者每个标记对性状的贡献值，以及待测群体中预测的表型值。采用预测值与实际值的皮尔逊相关系数来表征模型精度。但基于训练群体构建的模型常常对测试群体的预测效果不佳，可能存在着过拟合现象。为了增强模型的预测能力、筛选优化的模型参数，需要使用交叉验证的方式对模型的实际预测能力进行评估，进而通过测试群体提供的基因型数据和环境因子等信息对所有可能的组合目标性状进行预测，以达到预测和筛选的目的。

核心论文的国家或地区分布方面(见表 1.2.9)，主要是德国、美国和荷兰，被引次数前 3 位与之

一致。研究机构分布方面(见表 1.2.10)，荷兰 Wageningen Univ & Res、美国 Univ Calif Davis 和法国 Univ Paris Saclay 并列榜首。国家或地区间的合作网络方面(见图 1.2.5)，国家之间的研究合作较为普遍，以德国、美国、荷兰和法国的合作最为紧密。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或地区以美国和中国为主(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 2017 年。

表 1.2.8 “动物疫病发病机理及防控”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	Univ Vet Med	9	22.50%	2017.2
2	South China Agr Univ	6	15.00%	2017.7
3	Univ Vet Med Hannover	4	10.00%	2018.0
4	Sao Paulo State Univ Unesp	4	10.00%	2018.0
5	Univ Med Ctr Hamburg Eppendorf	3	7.50%	2017.3
6	Univ Autonoma Barcelona	3	7.50%	2017.7
7	Iowa State Univ	3	7.50%	2017.7
8	Heinrich Pette Inst	2	5.00%	2016.5
9	German Ctr Infect Res	2	5.00%	2018.5
10	Generalitat Catalunya	2	5.00%	2017.5

表 1.2.9 “作物基因组选择育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Germany	4	66.67%	152	87.36%	38.00
2	USA	4	66.67%	132	75.86%	33.00
3	Netherlands	3	50.00%	115	66.09%	38.33
4	France	3	50.00%	47	27.01%	15.67
5	Australia	1	16.67%	85	48.85%	85.00
6	Saudi Arabia	1	16.67%	85	48.85%	85.00
7	Israel	1	16.67%	19	10.92%	19.00
8	Austria	1	16.67%	11	6.32%	11.00
9	Norway	1	16.67%	11	6.32%	11.00

表 1.2.10 “作物基因组选择育种”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	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Wageningen Univ & Res	2	33.33%	96	55.17%	48.00
2	Univ Calif Davis	2	33.33%	30	17.24%	15.00
3	Univ Paris Sac lay	2	33.33%	36	20.69%	18.00
4	Brigham Young Univ	1	16.67%	85	48.85%	85.00
5	Christian Albrechts Univ Kiel	1	16.67%	85	48.85%	85.00
6	King Abdullah Univ Sci Tech	1	16.67%	85	48.85%	85.00
7	Univ Melbourne	1	16.67%	85	48.85%	85.00
8	Wageningen UR	1	16.67%	85	48.85%	85.00
9	Washington State Univ	1	16.67%	85	48.85%	85.00
10	Commissariat Energie Atom & Energies Alternat	1	16.67%	19	10.92%	19.00

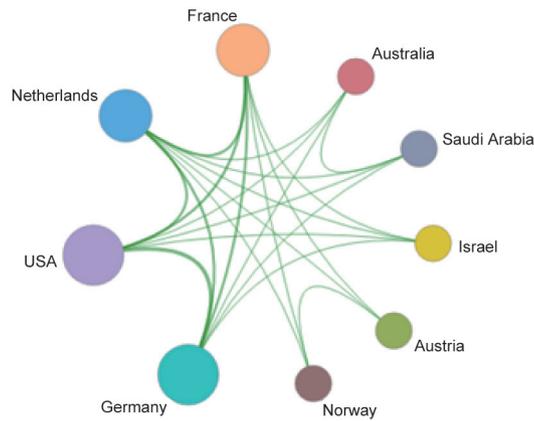


图 1.2.5 “作物基因组选择育种”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

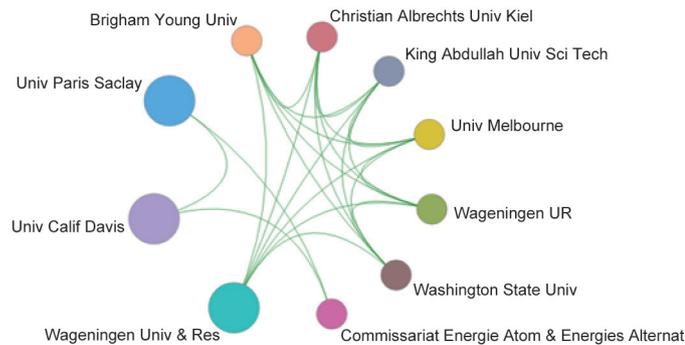


图 1.2.6 “作物基因组选择育种”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “作物基因组选择育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	50	29.59%	2017.9
2	China	31	18.34%	2017.9
3	Australia	19	11.24%	2018.0
4	Germany	16	9.47%	2017.9
5	UK	12	7.10%	2018.1
6	France	9	5.33%	2017.9
7	Saudi Arabia	7	4.14%	2018.0
8	Netherlands	7	4.14%	2018.1
9	Denmark	6	3.55%	2017.5
10	South Korea	6	3.55%	2018.0

表 1.2.12 “作物基因组选择育种”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	Chinese Acad Sci	12	21.43%	2017.9
2	Univ Copenhagen	5	8.93%	2017.4
3	Univ Illinois	5	8.93%	2017.8
4	Univ Calif Davis	5	8.93%	2017.6
5	Univ Paris Saclay	5	8.93%	2017.8
6	J Craig Venter Inst	4	7.14%	2018.0
7	Univ Tasmania	4	7.14%	2018.0
8	King Abdullah Univ Sci & Technol	4	7.14%	2017.8
9	Donald Danforth Plant Sci Ctr	4	7.14%	2018.0
10	Michigan State Univ	4	7.14%	2017.8

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

农业领域工程开发前沿 Top 10 主要分为 3 类：

颠覆性开发前沿，如农业生物工程学科的农业生物基因编辑技术；新兴开发前沿，包括资源生态科学学科的土壤重金属污染防治、农业工程学科的智能农业装备、林业科学学科的林产物生物质利用、作物科学学科的作物 DNA 序列与基因组分析；

传统深入开发前沿，包括植物保护学科的绿色植保技术、动物科学学科的动物健康管理系统、作物

科学学科的作物杂交新品种选育、作物科学学科的精准栽培技术、水产科学学科的苗种高效培育。

本领域专利的年度公开量一般为 100 ~ 300 项，平均被引数 10 ~ 20 次，专利平均公开年集中在 2014 年（见表 2.1.1）。其中，农业生物基因编辑技术的逐年施引专利数与其他项目相反，在 2017 年前呈快速上升趋势（见表 2.1.2）。

（1）绿色植保技术

属于植物保护科学学科，是传统深入开发前沿。农药污染是指：过量使用农药以及不恰当地选择农药品种和施用时间，造成农产品中农药的超标残留，

表 2.1.1 农业领域 Top 10 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	绿色植保技术	225	3129	13.91	2014.8
2	农业生物基因编辑技术	198	3301	16.67	2015.9
3	土壤重金属污染防治	178	1927	10.83	2014.4
4	智能农业装备	106	1382	13.04	2014.7
5	林产物生物质利用	122	1343	11.01	2014.4
6	动物健康管理系统	121	2517	20.8	2014.5
7	苗种高效培育	131	689	5.26	2014.2
8	作物杂交新品种选育	269	4330	16.1	2014.5
9	精准栽培技术	102	1659	16.26	2014.3
10	作物 DNA 序列与基因组分析	246	5158	20.97	2014.6

表 2.1.2 农业领域 Top 10 工程开发前沿的逐年施引专利数

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	绿色植保技术	59	50	32	45	35	4
2	农业生物基因编辑技术	8	19	37	63	70	1
3	土壤重金属污染防治	48	46	56	20	7	1
4	智能农业装备	25	22	28	19	11	1
5	林产物生物质利用	36	38	27	11	10	0
6	动物健康管理系统	41	28	20	20	11	1
7	苗种高效培育	42	36	44	9	0	0
8	作物杂交新品种选育	75	61	65	50	17	1
9	精准栽培技术	41	24	17	11	7	2
10	作物 DNA 序列与基因组分析	65	67	50	39	21	4

对人类的健康造成严重威胁；消灭害虫的一些捕食性、寄生性天敌，使自然界害虫与天敌间失去平衡，造成害虫猖獗，也消灭了传粉的昆虫而使作物产量受到影响；过量的农药经过降雨、农田渗滤和排水等进入土壤和水体，破坏生态系统。此外，病虫害对化学农药也会产生抗药性。绿色防控技术（GCT）综合利用生物防治、物理防治、农业防治、科学用药等技术来预防和治理农作物病虫害，是一种环境友好型农业技术。

（2）农业生物基因编辑技术

属于生物工程学科，是颠覆性开发前沿。基因

编辑技术是一种能够对生物体的基因组及其转录产物进行定点修饰或者修改的技术。进入 21 世纪，基因组编辑技术得到迅猛发展，ZFNs、TALENs、MGN 和 CRISPR-Cas9 4 种新型基因组编辑系统先后诞生。基因组编辑技术能够精确靶向修饰生物体基因组特定位点、人为改造生物遗传信息，特别是 2013 年开发的 CRISPR-Cas9 系统，操作更加简便、成本较低，具有更高的效率和打靶准确率，在生物基础研究、基因治疗、遗传改造等领域展现了巨大的潜力。由于 TALENs 和 CRISPR-Cas9 潜在的巨大应用价值，2012 年和 2013 年分别被《Science》

评为年度十大科学突破之一。

(3) 土壤重金属污染防治

属于资源生态科学学科，是近年的新兴开发前沿。农作物重金属污染直接影响农业生产和粮食安全，危及人类生存环境，已经成为当今世界面临的重大生态环境问题。重金属是指密度大于 4.5 g/cm^3 的金属元素，主要包括铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铬(Cr)、类金属砷(As)等。重金属污染是指由重金属或其化合物造成的环境污染，主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属超标制品等人为因素所致。农田重金属污染本身具有较强的隐蔽性，且重金属毒性大、化学行为和生态效应复杂、在土壤中存留时间长，可经农作物吸收、代谢进入食物链，或迁移进入水体、大气环境，对人类生存和可持续发展构成极大威胁。土壤重金属污染防治对作物的生长发育、产量和品质及生理生化代谢途径等均会产生一定的影响。有关重金属污染修复的技术主要有两种类型：直接清除重金属污染的土壤；改变土壤中重金属的存在形态，降低其活性、迁移性和生物可利用性。有关土壤重金属污染的修复方法主要分为物理修复、化学修复、电化修复以及生物修复等。鉴于农田重金属污染对生态环境与食品安全的破坏及其对农业发展的制约，也是环境科学等相关领域广泛关注、重点研究的前沿问题。

(4) 智能农业装备

属于农业工程学科，是新兴开发前沿。智能农业装备集现代信息与通信技术、计算机网络技术、智能控制与检测技术，以及先进制造技术于一体，是传统农机制造业升级改造、实现农业生产过程自动化和智能化的重要工具。智能农业装备配备的中央处理器芯片和各种传感器，能够实时监控农机自身状态、作业状态和作业环境，根据采集的信息及时调整工作状态，对装备其他功能进行智能化控制，实现农业生产和管理的智能化、标准化，成为国际高端农业装备制造业发展的重要方向。装备有各种传感器、机器视觉系统(立体视觉系统)、全球定

位系统(GPS)的联合收获装备，不仅可实现作物含水量与区域产量等参数实时传送，形成作物产量图，为处方农作提供技术支撑；还可实现多机协同作业中的协同控制，包括收获机粮仓无线电载荷控制以及可控制推送速度的粮食推送控制器、联合收获机脱粒机构与集粮箱性能的改进等。未来智能农业装备研究的主要方向有：智能装备数字化设计与仿真系统，智能装备测试平台，微机电系统(MEMS)农业传感器，农业机器人(尤其是自主劳作机器人)，无人机，智能导航控制技术，融合物联网、大数据、云计算与云服务等先进技术的智能装备设计。

(5) 林产物生物质利用

属于林业科学学科，是新兴开发前沿。林业生物质能利用原料有：以生物质固体燃料为主，来源于林业加工如板材、造纸等产业的废弃物；结合生物质能源产业发展布局建立能源林基地，培育生长速度快、热值高、含油率高的林业生物质林，保障原料生产和供给。生物质能源开发技术集中在气化、压缩燃料、燃烧发电、生产燃料乙醇以及生物柴油5个方面。其中，生物质气化燃料及生物质压缩成型技术已趋成熟，属于传统研究内容；高效直燃发电被认为是最可行的生物质利用方式，成为未来重要发展方向。

(6) 动物健康管理系统

属于动物科学学科，是传统深入开发前沿。动物健康养殖是动物健康、动物生产性能提升、动物产品安全的保证。动物健康管理是促进动物健康的重要环节，包括：对动物的健康状况进行监测，对动物的健康状况进行评估，及时发现动物存在的非健康状态，在育种、营养、疾病、环境及生产等角度寻求解决影响动物健康的因素。在动物养殖工作的各个环节，利用现有理论和数据，结合知识发现和数据挖掘的方法，建立科学合理的动物健康管理系统，主要涉及健康评估标准、健康促进方法、疾病诊断知识、疾病防治方法、兽药配伍知识、动物兽药使用标准等。目前，动物生产及动物产品的溯

源信息化管理系统发展迅速。通过对动物养殖过程中各环节的网络通信、二维码、射频识别(RFID)、嵌入式设备、智能卡、数据库等技术运用,把生产场地、生产过程、饲料配方、免疫、屠宰检疫及商品流通各个环节串联起来,全程记录并跟踪动物及动物产品的主要业务数据,实现从耳标生产、配发,到动物饲养、流通,再到动物屠宰、动物产品销售的全程监管追溯管理。5G物联网的应用,有助于进一步完善规模养殖的动物健康管理及产品服务系统。

(7) 苗种高效培育

属于水产科学学科,是传统深入开发前沿。发展海洋鱼类的增殖和养殖是海洋鱼类资源的合理开发利用与持续性发展的根本措施和策略。水产类苗种高效培育,除了做好培育前的准备工作、合理放养苗种、注重饲养方法及做好日常管理外,采用最新生物技术方法已成为苗种高效培育的开发前沿。新技术重在诱导海洋鱼类性腺发育成熟和改善卵子质量、排卵与产卵、提早性成熟和性别转换,调控海洋养殖鱼类在全年都能性腺发育成熟和产卵、改善幼苗培育与提高成活率及生长率、采用基因工程技术生产各种促进鱼类生殖与生长的激素与神经肽等。具体包括:目标品种的全基因组精细图谱绘制、性别控制技术、三倍体规模化制种技术及建立单性精子库等技术。利用高雌性苗种制种技术、高产抗病良种培育技术、性别控制和杂交育种技术等培育水产新品种。

(8) 作物杂交新品种选育

属于作物科学学科,是传统深入开发前沿。作物自交系是指一个单株经连续自交后,所获得的性状整齐一致的后代。通过高配合力自交系之间杂交获得的杂种优势,一直是大幅提高作物单产、改良作物品质、提高作物抗逆性、增加作物适应性的重要途径。随着细胞生物学和分子生物学的飞速发展,关于亲本的选择,除了考虑其农艺性状优势互补、亲缘关系远近及配合力、遗传力和抗性外,还利用

基因组原位杂交、分子标记等技术对亲本进行筛选。利用基因组中与目标基因紧密连锁的可跟踪检测的分子标记(如RFLPs、RAPDs、AFLPs、SSRs和SNPs等)结合基因组测序技术,可以提高亲本材料重组筛选的效率。从分子水平上对目标性状加以探究和利用,提高了对育种预测的准确性及杂种优势的效应。杂种优势利用的基础研究主要方向有:

如何利用种质资源最大限度的开发和利用杂种优势;对杂种优势群进行深入研究,在分子水平上鉴定杂种优势群;筛选与产量因素相关的杂种优势形成QTL;研究杂种优势的适宜遗传群体。

(9) 精准栽培技术

属于作物科学学科,是传统深入开发前沿。传统的农业发展主要靠人力,时间长、耗费多、效率低。随着科技发展,精准栽培技术产生并逐渐发展,将农业带入数字和信息时代,加快作物栽培过程,节省人力物力,成为21世纪农业的重要发展方向。智能化精准栽培技术体系,通过建立精准栽培物联网系统,实时、全程周期化比对来获取监测参数,对大数据、样本的特征节点视频进行监视;建立精准栽培控制的参数模型,利用监测与控制设备的实时传感监测和过程控制参数迭代,构建智能专家系统能力,实现智能化精准栽培的目的。作物精准栽培物联网系统主要由现场基础设施、设备监测与控制、数据传输与存储、计算机云平台应用管理4部分组成。采用精准栽培技术实现智慧农业场景下的农业生产,可以有效降低劳动强度、提高生产效率、提升作物的质量和产量。

(10) 作物DNA序列与基因组分析

属于农业生物工程学科,是新兴开发前沿。作物DNA序列与基因组分析是实现作物转基因工程育种、基因组选择育种以及分子设计育种的基础性研究工作,常用的技术是DNA微阵列、大规模平行测序(MPSS)、基因表达系列分析(SAGE)、表达序列标签文库测序技术数字表达谱(DGE)。不断进化的基因组分析方法,有利于作物分子育种

技术的快速发展。对转基因新品种进行检测，利用现代生物技术，将人们期望的目标基因，经过人工分离、重组后，导入并整合到生物体的基因组中，从而改善生物原有的性状或赋予其新的优良性状。除了转入新的外源基因外，还可以通过转基因技术对生物体基因的加工、敲除、屏蔽等方式改变生物体的遗传特性，获得人们希望得到的性状。对基因表达谱进行深入分析，也有利于揭示杂种优势形成的分子机理。

2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 绿色植保技术

植物保护技术向绿色、环保、安全的方向发展。绿色植保技术创新体系包括：生态综合防控技术，生物防控措施，新型植物免疫调控剂，绿色农药的研发、管理和应用等。具体内容如下：生态调控技术，主要从宏观角度采取措施，如选育和推广抗病虫品种、优化作物布局、培育健康种苗、改善水肥管理等，结合农田生态工程、果园生草覆盖、作物间套种、天敌诱集带等生物多样性调控与自然天敌保护利用等技术，改造病虫害发生源头及孳生环境，人为增强自然控害能力和作物抗病虫能力。

生物防治技术，加强赤眼蜂、捕食螨、绿僵菌、白僵菌、微孢子虫、苏云金杆菌（BT）、蜡质芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、核型多角体病毒（NPV）等的防治技术研究，以及牧鸡牧鸭、稻虾稻鸭共育等成熟技术的应用；开发以虫治虫、以螨治螨、以菌治虫、以菌治菌等生物防治关键技术；发展植物源农药、农用抗生素、植物诱抗剂等生物生化制剂应用技术。理化诱控技术，采用昆虫信息素（性引诱剂和聚集素）、杀虫灯、诱虫板（黄板和蓝板）防治蔬菜、果树和茶树的农作物害虫，积极开发和推广应用植物诱控、食饵诱杀、防虫网阻隔和银灰膜驱避害虫等理化诱控技术。科学用药技术，重视高效、低毒、低残留、环保型农药的研发；大力推广高效、低毒、低残留、环境友好型农药；优化集成农药的轮换使用、交替使用、精准使用和安全使用等配套技术；加强农药抗药性监测与治理；普及规范使用农药的知识，严格遵守农药安全使用间隔期。

相关专利的公开量以日本、德国、美国、中国和瑞士为主。日本专利的被引数超过德国、美国、中国和瑞士之和，其单项专利的平均被引数达20.54，约是其他国家或地区的1倍（见表2.2.1）。核心产出机构是德国 Bayer Cropscience AG 公司，

表 2.2.1 “绿色植保技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Japan	74	32.89%	1520	48.58%	20.54
2	Germany	58	25.78%	578	18.47%	9.97
3	USA	40	17.78%	438	14.00%	10.95
4	China	32	14.22%	318	10.16%	9.94
5	Switzerland	15	6.67%	139	4.44%	9.27
6	UK	3	1.33%	123	3.93%	41.00
7	France	2	0.89%	23	0.74%	11.50
8	Netherlands	2	0.89%	12	0.38%	6.00
9	India	1	0.44%	12	0.38%	12.00
10	Belgium	1	0.44%	7	0.22%	7.00

其他产出机构分布在日本、美国和中国(见表 2.2.2)。除日本和英国之外，其他国家或地区之间存在一定的合作开发关系(见图 2.2.1)，机构间的合作相对较少(见图 2.2.2)。

2.2.2 农业生物基因编辑技术

基因编辑技术能够对生物体的基因组及其转录产物进行定点修饰或者修改，通过限制性核酸酶对基因组特定位点进行切割，产生 DNA 双链断裂

(DSB)。DSB 经细胞内 DNA 的主要修复机制非同源末端连接 (NHEJ) 或同源重组 (HDR) 后实现靶基因的遗传学修饰。NHEJ 是真核生物基因组的主要修复机制，不需要或仅需有限的同源序列即可将断开的 DNA 游离末端重新缝合，常伴随着核苷酸的插入或缺失 (indels) 并形成编码区移码突变，继而敲除内源基因。在同源片段存在的情况下，DSB 处发生 HDR 的概率大幅提高，通过将同源 DNA 置换或重组至 DSB 以恢复或修改遗传信

表 2.2.2 “绿色植保技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	FARB	Germany	52	23.11%	530	16.94%	10.19
2	SUMO	Japan	24	10.67%	748	23.91%	31.17
3	DOWC	USA	24	10.67%	340	10.87%	14.17
4	SYGN	Switzerland	16	7.11%	252	8.05%	15.75
5	NIPY	Japan	16	7.11%	201	6.42%	12.56
6	NISC	Japan	13	5.78%	349	11.15%	26.85
7	BADI	Germany	8	3.56%	68	2.17%	8.50
8	SNCM	China	7	3.11%	52	1.66%	7.43
9	NIPS	Japan	7	3.11%	46	1.47%	6.57
10	SNFI	China	5	2.22%	35	1.12%	7.00

注：FARB 表示 Bayer Cropscience AG；SUMO 表示 Sumitomo Chem Co., Ltd.；DOWC 表示 Dow Agrosociences LLC；SYGN 表示 Syngenta Participations AG；NIPY 表示 Nihon Nohyaku Co., Ltd.；NISC 表示 Nissan Chemical Ind Ltd.；BADI 表示 BASF SE；SNCM 表示 Sinochem Agro Co., Ltd.；NIPS 表示 Nippon Soda Co., Ltd.；SNFI 表示 Merial Inc.。

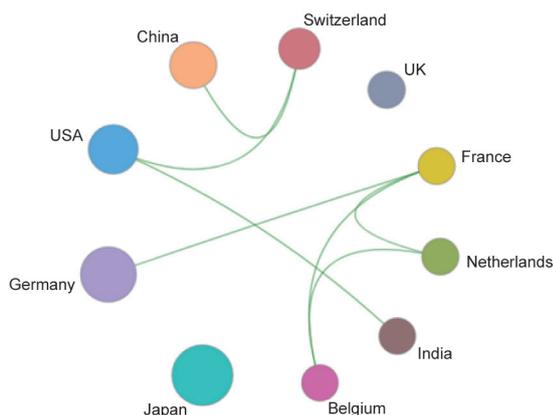


图 2.2.1 “绿色植保技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

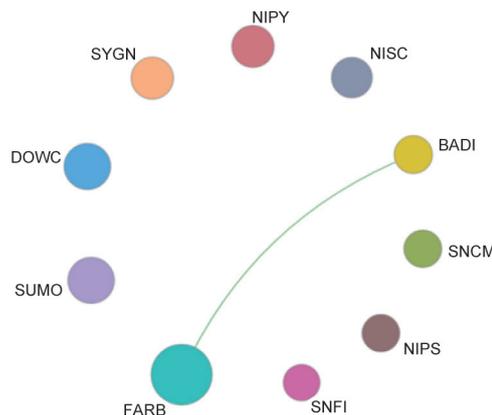


图 2.2.2 “绿色植保技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

息，实现基因定点编辑或敲入。NHEJ 和 HDR 都依赖于 DSB 的产生，然而基因组中自然发生 DSB 的频率极低，因此如何诱导特定基因位点产生 DSB 成为对动植物进行基因编辑所面临的主要问题。ZFNs、TALENs、MEG 和 CRISPR-Cas9 系统等新型基因组编辑技术可以靶向切割基因组，产生 DSB，继而激发细胞的 NHEJ 或 HDR 修复，实现多种生物基因组的高效而精确的编辑。

相关专利的公开量以美国和中国的数量居多

(见表 2.2.3 和表 2.2.4)，而美国的专利被引数占据绝对优势。立陶宛、德国、法国、瑞士和英国虽然公开量较少，但被引数比例较高。美国专利的单项平均被引达 23 次，是中国的 3 倍。美国和瑞士之间相对合作紧密(见图 2.2.3)。核心专利的主要产出机构方面，美国哈佛大学、麻省理工学院和 BROAD 研究所的专利数位列前 3 名，并且 3 个机构间具有较为紧密的合作关系(见图 2.2.4)。由于能对生物体内源基因进行精确靶向修饰，

表 2.2.3 “农业生物基因编辑技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	90	45.45%	2095	63.47%	23.28
2	China	79	39.90%	623	18.87%	7.89
3	Germany	6	3.03%	104	3.15%	17.33
4	Japan	5	2.53%	40	1.21%	8.00
5	France	4	2.02%	94	2.85%	23.50
6	Switzerland	4	2.02%	74	2.24%	18.50
7	Lithuania	3	1.52%	331	10.03%	110.33
8	South Korea	3	1.52%	37	1.12%	12.33
9	UK	2	1.01%	69	2.09%	34.50
10	Netherlands	2	1.01%	24	0.73%	12.00

表 2.2.4 “农业生物基因编辑技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HARD	USA	17	8.59%	475	14.39%	27.94
2	MASI	USA	10	5.05%	501	15.18%	50.10
3	BROD	USA	7	3.54%	451	13.66%	64.43
4	SPHS	China	7	3.54%	55	1.67%	7.86
5	REGC	USA	6	3.03%	94	2.85%	15.67
6	AGIL	USA	5	2.53%	54	1.64%	10.80
7	CARI	USA	4	2.02%	169	5.12%	42.25
8	ALNY	USA	4	2.02%	74	2.24%	18.50
9	UCAG	China	4	2.02%	53	1.61%	13.25
10	WHED	USA	4	2.02%	47	1.42%	11.75

注：HARD 表示 Harvard College；MASI 表示 Massachusetts Inst Technology；BROD 表示 Broad Inst Inc；SPHS 表示 2nd Peoples Hospital Shenzhen；REGC 表示 Univ California；AGIL 表示 Agilent Technologies Inc；CARI 表示 Caribou Biosciences Inc；ALNY 表示 Alnylam Pharmaceuticals Inc；UCAG 表示 Univ China Agricultural；WHED 表示 Whitehead Biomedical Inst.

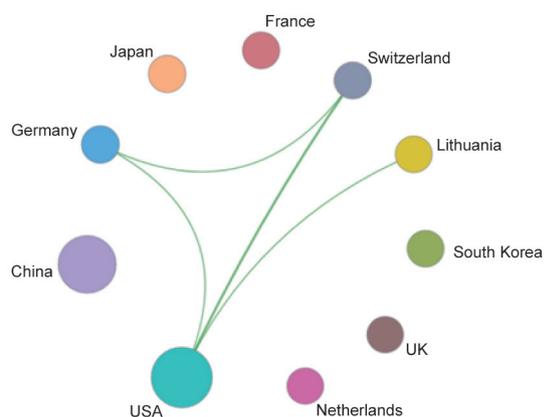


图 2.2.3 “农业生物基因编辑技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

CRISPR-Cas9 申请专利数已远大于 ZFNs、TALENs 和 MEG 系统，相关专利申请目前以应用为主。在动物改良和农作物研究领域中国的专利数成长较快，其中，中国农业大学在动物育种相关的基因编辑技术方面专利数较多，着重于猪羊牛等动物疾病模型的开发利用；中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国农业科学院等机构则在农作物遗传育种方面申请的专利数较多。

2.2.3 土壤重金属污染防治

土壤重金属污染直接影响作物的生长发育、进而影响作物的产量形成和农产品品质。土壤重金属污染具有污染物在土壤中移动性差、滞留时间长、隐蔽、不可逆转等特点，可通过农作物进入人类食物链，严重影响食品安全并危及人类健康。关于土壤重金属的污染治理技术主要涉及生物修复、物理修复、化学修复以及各种技术的联合修复等方法。

随着填埋操作的监管以及相关费用的增加，异位修复技术的改进以及与原位修复技术的结合运用改变了原来的污染修复方式。归纳起来，有关重金

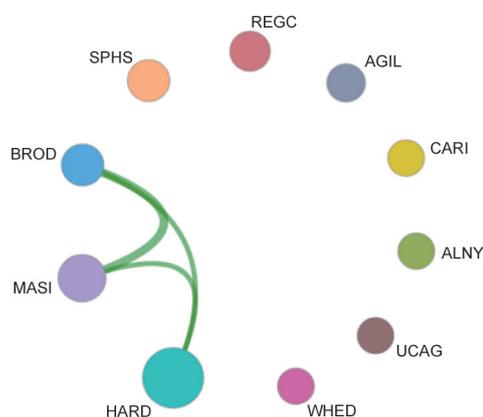


图 2.2.4 “农业生物基因编辑技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

属污染修复的技术主要有两种类型：直接清除重金属污染的土壤；改变土壤中重金属的存在形态，降低其活性、迁移性和生物可利用性。具体可分为：

原位稳定化技术，如原位化学钝化、微生物吸附及植物固定等；工程修复技术，如植物修复、客土、深翻稀释及土壤淋洗修复等；农艺调控措施，如水肥管理、调节土壤 pH、间套作措施等；植物阻控技术，如叶面生理阻控、低吸收作物品种应用、基因工程、种植结构调整等。

美国、欧盟、日本和中国等多个国家和地区在土壤重金属污染修复技术研发方面进行了积极部署与研究。日本开展的与土壤污染修复相关的研究项目主要分布在土壤重金属污染的测定方法、土壤修复技术（化学修复、生物修复）、土壤修复机理和土壤污染的环境评估方面；韩国为了应对日益严重的重金属污染问题，加大了土壤淋洗和电动修复技术的研发；中国台湾地区近年来多采用原位组合、复合修复技术；美国在污染场地修复技术应用领域居于世界领先地位，应用较多的是原位土壤气体抽提（SVE）技术、异位固化/稳定化技术、异位焚烧处理技术；欧盟最常见土壤修复技术是

污染土壤的挖掘和填埋。

相关专利的公开量方面，共有 7 个国家拥有专利，中国占绝对多数，美国和日本也有一定比例（见表 2.2.5）。中国专利项目的公开量虽然多，但平均被引数约为美国的一半。核心专利的主要产出机

构方面，中国江苏上田环境修复有限公司表现不俗，其他国家各机构公开的专利数则较为分散（见表 2.2.6）。国家或地区间合作网络及机构间合作网络方面，基本不存在合作开发的相关专利（见图 2.2.5 和图 2.2.6）。

表 2.2.5 “土壤重金属污染防治”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	154	86.52%	1592	82.62%	10.34
2	USA	12	6.74%	226	11.73%	18.83
3	Japan	7	3.93%	69	3.58%	9.86
4	South Korea	2	1.12%	12	0.62%	6.00
5	Australia	1	0.56%	14	0.73%	14.00
6	Italy	1	0.56%	8	0.42%	8.00
7	Netherlands	1	0.56%	6	0.31%	6.00

表 2.2.6 “土壤重金属污染防治”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CAEM	China	4	2.25%	46	2.39%	11.50
2	USCU	China	3	1.69%	56	2.91%	18.67
3	JIAN	China	3	1.69%	52	2.70%	17.33
4	UYJN	China	3	1.69%	42	2.18%	14.00
5	UYHD	China	3	1.69%	40	2.08%	13.33
6	CRSM	China	3	1.69%	35	1.82%	11.67
7	UYGU	China	3	1.69%	34	1.76%	11.33
8	USJT	China	3	1.69%	33	1.71%	11.00
9	UYHU	China	3	1.69%	24	1.25%	8.00
10	CHAN	China	2	1.12%	33	1.71%	16.50

注：CAEM 表示 Res Center for Eco-Environmental Sciences CAS；USCU 表示 Univ Sichuan；JIAN 表示 Jiangsu Suntime Environmental Remediation Co., Ltd.；UYJN 表示 Univ Jiangnan；UYHD 表示 Univ North China Elec Power；CRSM 表示 Inst of Rock & Soil Mech CAS；UYGU 表示 Univ Guangxi；USJT 表示 Univ Shanghai Jiaotong；UYHU 表示 Univ Huna；CHAN 表示 Changsha Hasky Environmental Protection。

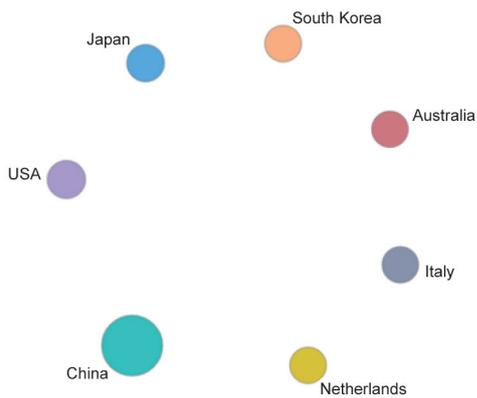


图 2.2.5 “土壤重金属污染防治”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

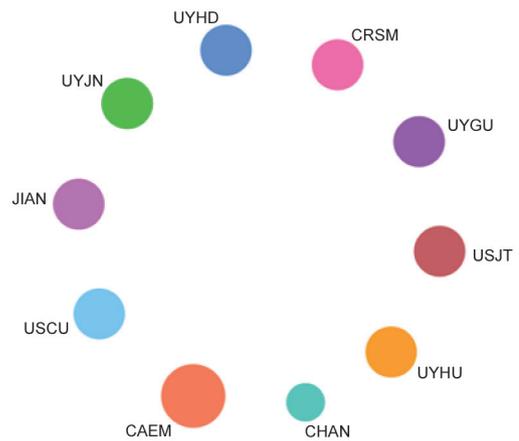


图 2.2.6 “土壤重金属污染防治”工程开发前沿主要机构间的合作网络

领域课题组成员

领域课题组：

康绍忠 张福锁 赵要风 李 隆 黄海涛
缴 旭 梁真真 闻丹岩 许建香 袁文业
李晨英 师丽娟 刘子瑜 刘迎春 吕晓梅
杨爱东 王 岩 秦 梅 邢 璐 赵 杰
姚银坤 李云舟

执笔组：

康绍忠 张福锁 袁文业 李晨英 师丽娟
许建香 赵 杰 刘迎春 吕晓梅 杨爱东
王 岩 秦 梅 邢 璐