农业农村部-CABI 生物安全联合实验室影响评估(2008-2020)

万敏, 陈巨莲, 李红梅, 张金平, 袁博, 张巧巧, 张峰,

吴孔明, 周雪平, Ulrich Kuhlmann

摘要

农业农村部-CABI 生物安全联合实验室（以下简称“联合实验室”）成立于 2008 年。截至 2020 年底，联合实验室成功开发并实施了以农业有害生物绿色防控为主的国际合作项目 32 项（包括研究项目和技术转移项目），参与项目的国内外合作单位 80 多家，项目总经费达 3300 万美元。经过 12 年的良好运行，联合实验室已经成为中国与国际机构开展农业科技合作的样板和典型案例。

本研究主要采用定性的研究方法，系统地开展了联合实验室影响评估工作。全面了解利益相关方对联合实验室功能定位和重点合作领域的需求和反馈， 综合评估联合实验室的经济效益、社会效益和生态效益。评估的主要结果和经验总结将有助于联合实验室未来发展方向和工作重点的规划，促进中国农业科技国际合作的可持续发展，提升中国在农业生物安全领域的国际影响力与话语权。而联合实验室在合作模式上的探索与创新，也将为 CABI 与其他成员国的合作提供参考。

主要结论

- CABI 及其成员国的全球分布，以及与中方合作单位和专家的合作伙伴关系，为联合实验室在有害生物综合防治（IPM）、外来入侵物种管理（IAS）和生物农药领域开展前沿性研究奠定了良好的基础，并使联合实验室能够通过技术转移项目推动南北合作或南南合作等多方合作。
- 双方共同协商、协同管理的管理机制，及与 CABI 东亚中心和中国农科院植保所充分融合的运行机制是联合实验室高效运行、务实合作的制度保障。
- 联合实验室四个功能定位涵盖并体现了所有利益相关方对国际合作的需求，按重要性大小排序为：技术研发平台，培训交流中心，第三方合作平台，为政府政策提供参考。
- 联合实验室的项目经费主要集中在 IPM 和 IAS 两个合作领域，其经费额占总经费的 60.4%，这一比例与 CABI 基于生物防治的 IPM 和 IAS 传统专业优势地位相匹配，也符合中国农业绿色发展战略。
- 从经费角度分析联合实验室的投资回报率，即双方对联合实验室的投入与其成功申请到的项目经费的比率，其投资回报率为1:4.1，表明联合实验室具有很好的资金利用效率，验证了中国和CABI成功的双赢伙伴关系。
- 中国农业农村部提供的经费保障，CABI、中国农科院植保所，及所有合作单位的非现金投入（如人员、设备等配套投入）对联合实验室的成功可持续运转至关重要。
- 联合实验室的社会效益和生态效益主要体现在两个方面：一是通过完成合作项目目标而实现的，包括减少了化学农药使用量，贡献于生态安全；提高了作物产量和品质，贡献于粮食安全和减贫等；二是通过合作产生的非预期影响实现的社会效益，包括 CABI 和合作伙伴在相关领域影响力的提升，合作伙伴的拓展，项目团队综合能力的提升，及对本地绿色防控政策的推动作用等。
- 合作伙伴对联合实验室的总体满意度非常高，所有受访者都给出了 8-10 分的高分（满分 10 分），其中，65%的受访者给了满分，认为合作非常成功，产出达到、甚至超出了预期目标。

背景

在中国农业农村部（原农业部）与 CABI 共同签署的合作谅解备忘录框架下，2008 年 9 月，农业农村部-CABI 生物安全联合实验室在中国农业科学院植物保护研究所（以下简称“中国农科院植保所”）揭牌成立，由中国农科院植保所代表农业农村部，负责联合实验室的日常行政管理工作。

自成立以来，联合实验室基于双方的优势和专长开发并实施国际合作项目，搭建人才培养和技术转移渠道，加强多方合作和南南合作，成功开发并实施了以农业有害生物绿色防控为主的国际合作项目 32 项（包括研究项目和技术转移项目），项目总经费达 3300 万美元，参与项目的国内外合作单位共 80 多家。

在联合实验室合作框架下，“农业农村部-CABI 欧洲实验室”于 2019 年在 CABI 瑞士中心正式成立；联合实验室的两个国内分中心先后在山东省和安徽省成立；此外，在 CABI 及其成员国的推动下，中肯和中巴联合实验室也都在筹备中。联合实验室逐步形成了一个基于北京总部的、分布于“一带一路”沿线重点国家的开放式国际化科技平台。

联合实验室已经成为中国与国际机构开展农业科技合作的样板和典型案例。2012 年，以联合实验室作为依托平台之一，中国农科院植保所入选科技部“农业生物安全国际联合研究中心”。同年，联合实验室外方主任 Ulrich Kuhlmann 博士（CABI 国际发展部执行主任）荣获中国政府“友谊奖”。

2020 年，在联合实验室成功运转十二年之际，对联合实验室进行影响评估，归类梳理工作进展、分析投入产出比、综合评价其社会效益和生态效益、并总结经验提出建议，对联合实验室的进一步发展意义重大。同时，CABI 与其他成员国的类似合作也将从这些经验中获益。

评估方法

本研究主要针对以下问题开展研究：

- 实验室的功能定位和重点合作领域是否符合利益相关方的需求？
- 联合实验室的经济效益如何？(投入、产出、投入产出比)?
- 联合实验室平台上开展的工作带来的社会效益和生态效益，及效益的可持续性如何？
- 联合实验室发展是否达到了 2016-2020 年中期发展战略所设定的预期目标？哪些经验教训有利于联合实验室的进一步发展？

2020 年 6 月-12 月，研究通过查阅报告文献、关键人物访谈（KII）和专题小组讨论（FGD）开展调研，收集数据信息，共组织实施了 11 个 KII 和 3 个 FGD。其中，11 个 KII 受访人来自联合实验室的 6 个类型的利益相关方，包括政府农技推广部门、大学、科研院所、私营机构、海外合作伙伴、联合实验室指导委员会；3 个 FGD 参与讨论的人员分别来自参与研究和技术转移项目的科学家，参加联合实验室培训的科技人员，联合实验室联合培养的研究生。受新冠肺炎疫情影响，大部分 KII 和 FGD 都通过视频会议的形式进行。研究主要采用定性的方法，对采集到的数据和信息进行汇总、分析，提取关键信息总结经验教训，并提出改善建议。

评估结果

联合实验室的功能定位（主要职能）是为双方合作提供技术研发平台、为双方合作提供培训基地、成为一个与第三方合作交流的开放平台、为政府指定相关政策标准提供参考。重点合作领域包括：农业有害生物综合治理、外来入侵生物防控、生物农药研发、农药残留污染减少和控制、转基因生物环境安全性评价。

功能定位

大部分利益相关方认为联合实验室的四个功能定位符合他们对国际合作的需求，但因为合作伙伴各自不同的工作性质和职能，其对联合实验室功能的重要性排序不尽相同。总的来说，重要性排序符合联合实验室成立协议中的设定，即按重要性从大到小的排序为：技术研发平台，培训交流中心，第三方合作平台，为政府政策提供参考。对于每一个功能而言， 47-60%的受访者赞同其原定序位（见图 1 中黑色方框所示），具体反馈如下：

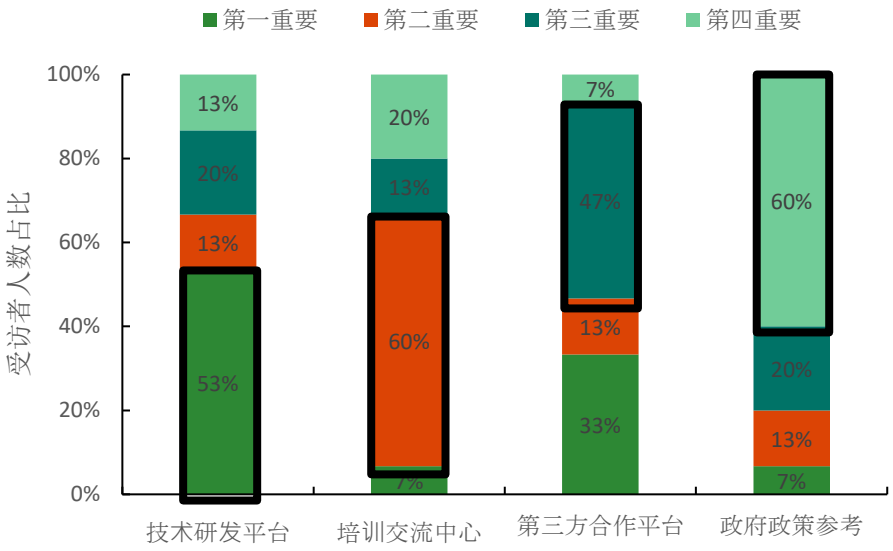

图 1. 利益相关方对联合实验室四个功能重要性排序结果

- **功能 1. 技术研发平台：**除私营机构和政府推广部门的合作伙伴，大部分受访者均认为这一功能对他们最重要。受访私营机构将这一功能排位靠后，是因为与联合实验室合作的私营机构大多是中小型生物防治企业，技术研发并不是他们当前最关注的问题。
- **功能 2. 培训交流中心：**大学的合作伙伴都非常重视这一功能，将其排在第一位。而且，所有受访者都对联合实验室选送中国优秀青年科技工作者赴海外学习和工作抱有很高的期望。
- **功能 3. 第三方合作平台：**近一半的受访者（47%）将这一功能的重要性排在第三位，而来自企业和政府推广机构的受访者（占总受访者人数的 33%）认为与第三方合作是联合实验室对他们最有价值的功能。另外，80%受访的科研人员将这一功能排在前两位，希望在联合实验室平台上能够与企业建立合作关系，促进科研成果转化应用。

- **功能 4. 为政府政策制定提供参考：** 大部分受访者将这一功能排在后两位，而政府推广机构的合作伙伴对这一功能非常关注，希望联合实验室能够加强对国际先进农业发展理念和技术的引进，为中国政府的相关决策提供参考。

重点合作领域和合作模式

截至 2020 年底，联合实验室已成功开发并实施了 32 项国际合作项目，将项目经费按联合实验室的重点合作领域归类，不属于五个重点领域的项目归为其他。由项目经费领域分布图（图 2）可见，项目主要集中在农业有害生物综合治理（IPM）和外来入侵生物防控（IAS）两个合作领域，其经费量占总经费的 68%；其次是其他类占 25.5%，主要包括合作平台建设和管理项目；生物农药研发和农药减量领域经费较少，分别占 10.1%和 3.8%；转基因生物环境安全性评价类项目占比最少，仅占 0.2%。项目经费的分布与 CABI 基于生物防治的 IPM 和 IAS 传统专长相符合，而合作伙伴对合作内容的需求也多集中在 IPM，IAS 和生物农药研发三个领域。

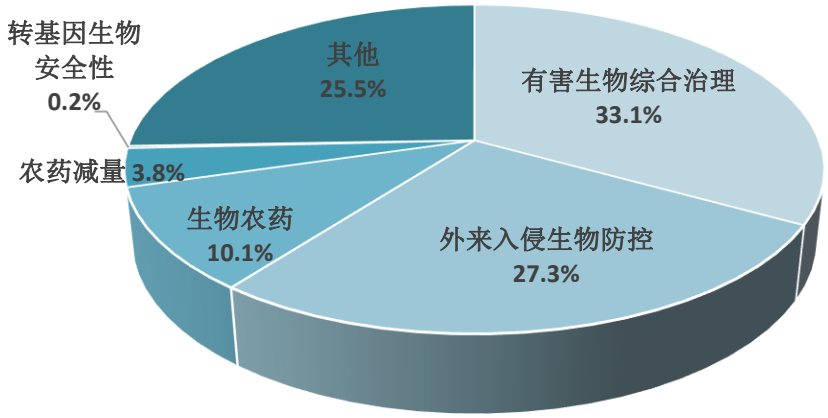

图 2. 2008-2020 年联合实验室项目总经费专业领域分布图

中国农业科学院认为 CABI 是中国在植物保护和农业安全领域合作最紧密的国际组织之一，联合实验室的五个重点合作领域与中国现代农业发展的“四个安全”（粮食安全、农产品质量安全、生态安全和产业安全）密切相关，非常符合中国农业绿色发展的需求。而将于 2021 年 4 月正式实施《中华人民共和国生物安全法》也是联合实验室进一步发展的契机。建议联合实验室，结合中国农业科学院发起的国际农业科技创新计划，以参与“跨境作物重大病虫害监测与防控项目”为契机，优化现有资源、加强实验室建设。联合实验室指导委员会 CABI 方委员则建议联合实验室在继续加强目前优势合作领域的基础上，积极推进其他国际热点领域的合作，如气候智能型农业、生态安全和食品安全，以及经济和环境影响评估等。

在调研中，合作伙伴对联合实验室的合作模式提出了许多建议，概括如下：

- 利用国际和国内多样化经费来源，发展多方参与合作模式，支持项目合作。在国内，联合实验室目前的活动和影响力还局限于农业农村部，应该争取科技部、商务部、自然基金委、CIDCA 等各大部委对联合实验室的了解和认可，从而开拓新的经费来源，拓展合作；

- 广泛加强与国内相关单位间的联系，跨越单位行政界限，组建专业大团队，利用多方资源，发挥各方优势，深化项目合作；
- 有具体工作内容支撑的短期人员交流（如 3-6 个月），如遴选中国优秀青年科技人员赴海外学习和工作，在中国政府引智项目支持下邀请外国专家来华工作等；
- 与研究生（包括留学生）培养相结合的项目合作，通过共同培养研究生，建立长期有效的合作。

管理和运行机制

联合实验室由 8 人组成的联合指导委员会管理，其中中方代表 4 人，CABI 代表 4 人，由中方和 CABI 方轮流担任委员会主席。联合实验室设联合主任 2 人（中方和 CABI 各 1 人），负责总体管理工作；设联络秘书 2 人（中方和 CABI 各 1 人），负责双方的联络、工作计划的执行；联合实验室的研发工作由技术咨询组指导。联合指导委员会每年召开一次会议，审议联合实验室提交的年度工作报告和财务报告、下一年的工作计划以及联合实验室中短期发展战略等重要事项。截至目前，共召开了 13 次联合指导委员年会。

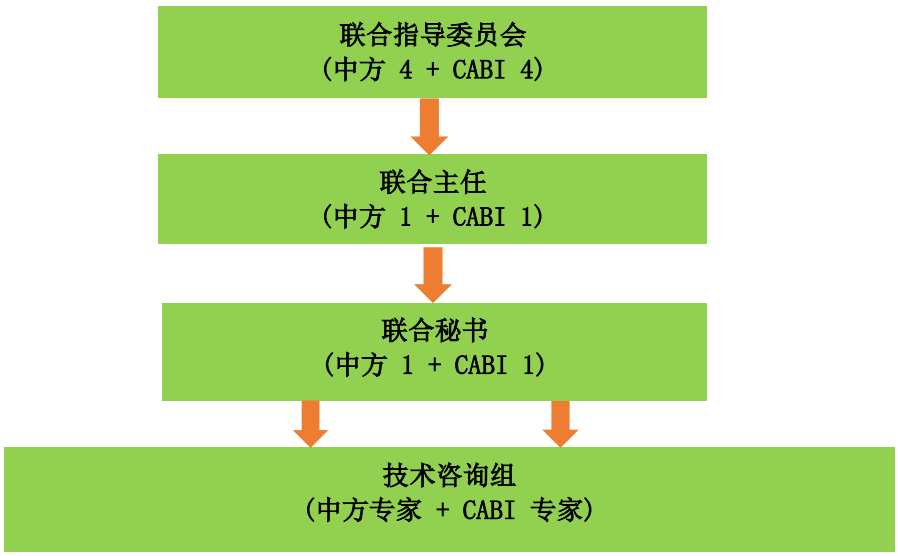

图 3. 联合实验室管理框架

CABI 东亚中心的三位科学家常驻联合实验室，能够高效跟进执行联合指导委员会的管理决策，带领团队开展项目开发和合作研究。双方共同协商、协同管理的管理机制，及与 CABI 东亚中心和中国农科院植保所充分融合的运行机制，是联合实验室高效运行、务实合作的关键要素之一。

同时，“农业农村部-CABI 欧洲实验室” 及联合实验室国内分中心的建立，中肯、中巴联合实验室的规划筹备，及定期选派中方青年科学家赴欧洲实验室开展合作研究等运行机制的探索与创新，都有力推动了这一开放式国际化科技合作平台的建设。

2021 年第十三届联合实验室指导委员会会议（视频会议）

联合实验室的经济效益

联合实验室的经济效益评估能够为农业农村部和 CABI 双方的决策者提供有价值的参考信息，有助于资源的合理分配和优化利用，从而提高联合实验室的产出效率，促进其可持续发展。鉴于联合实验室投入双方的性质及其公益性服务职能，本研究未采用复杂的经济模型，而是以资金投入和平台获得的项目经费总额计算投资回报率，进行联合实验室的经济效益评估。

产出

以联合实验室成功开发并实施的项目经费总额作为产出，截至 2020 年，联合实验室平台上开发并实施了 32 项国际合作项目，项目总经费达 3318 万美元。其中，21 项研究项目经费占比 55.3%；8 个技术转移项目经费占比 29.5%；3 个混合类项目经费占比 15.2% （图 4）。

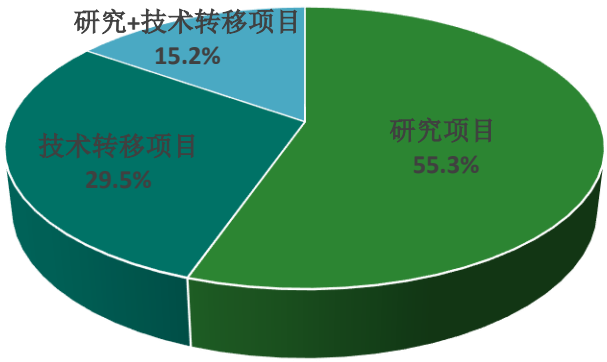

图 4. 2008-2020 年联合实验室平台上不同类型项目经费占比

投入

2008-2020 年，中国对 CABI 发展基金（CDF）定向联合实验室的捐赠总额共计 336 万美元，同时，农业农村部国际合作专项资金向中国农科院植保所累计提供 361.35 万元（约合 55.21 万美元），用于联合实验室管理和项目开发相关费用（图 5）。另外，双方对联合实验室的非直接资金投入（包括人员、差旅和培训等）约合 343 万美元。因此，双方对联合实验室的投入共计 723 万美元。

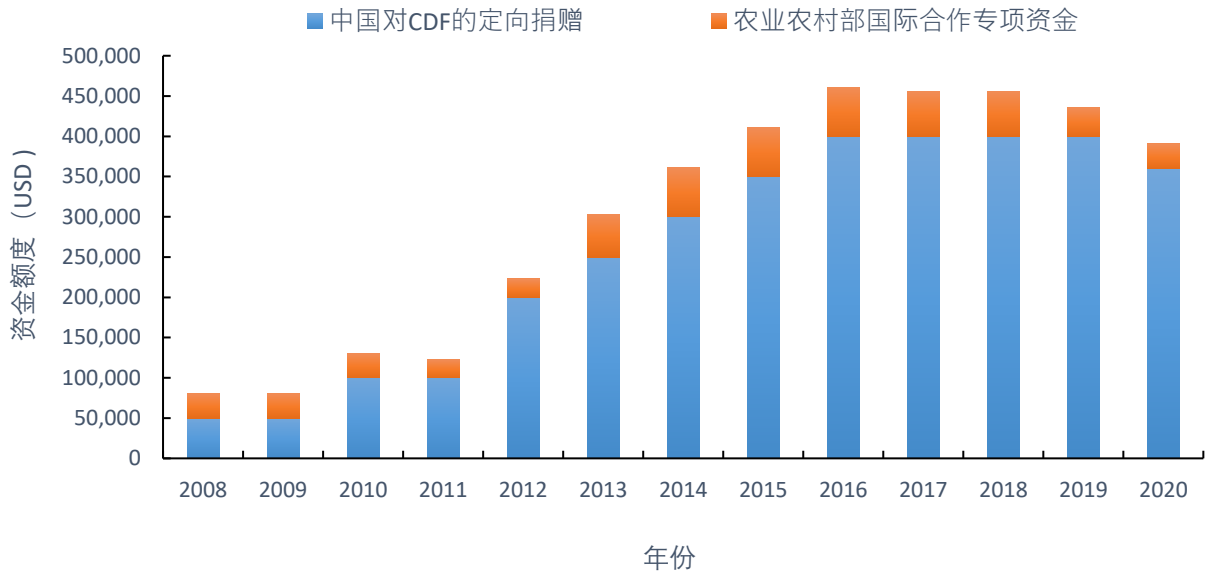

图 5. 联合实验室获得的直接资金投入（2008-2020）

经济效益分析

基于上述产出和投入资金的具体分析，可计算得出联合实验室的投资回报率为 1:4.1，即双方向联合实验室每投入 1 美元，联合实验室能够争取到 4.1 美元的项目经费。表明联合实验室具有很好的资金利用效率，显示了中国和 CABI 成功的双赢伙伴关系。

联合实验室的社会效益和生态效益

联合实验室的社会效益和生态效益是通过合作项目的实施所取得的，总的说来体现在两个方面：1）通过完成项目目标而实现的社会效益和生态效益；2）合作带来的非预期的影响所带来的社会效益。

通过完成项目目标而实现的社会效益和生态效益

通过项目开发和实施，联合实验室都直接或间接地在其相关领域产生着积极的社会效益和生态效益。总的来说，研究项目提高了对目标有害生物为害规律的认识，为相关生防产品和生物农药的开发奠定了理论基础；对农技服务人员和农民的培训，提升了当地植保服务专业水平，提高了农民的绿色植保和科学植保意识；绿色防控技术的推广应用直接或间接地减少了化学农药使用量，保护了生态环境；而生防产品的本地工厂的建立也增加了本地的就业机会等。尤其联合实验室利用国际援助资金开展的技术转移项目，将中国和 CABI 成熟的绿色植保技术向非洲和东南亚的其他发展中国家转移，为受援国带来了良好的社会效益和生态效益的同时，也协助中方合作单位践行了国家“农业走出去”的发展战略。

鉴于社会效益和生态效益评估的复杂性，大多数项目未开展系统性评估工作，但是很多项目的量化产出可以间接反映其社会效益和生态效益。如，项目培训技术人员数、培训农户数、服务农户数、技术推广和示范面积、农药使用量的减少率，以及媒体报道等（示例见表框 1）。

表框 1. 联合实验室项目产出反映的社会效益和生态效益示例

- ✓ 主要作物病虫害遥感监测与预测方法研究项目的研究成果在河南、安徽和海南省等省推广应用，利用空间遥感技术指导作物病虫害精准防控，使当地化学农药施用量减少了 20-30%。
- ✓ 植物智慧项目在北京、四川、广西和河南共培训了 810 名植物医生，建立了 231 家植物诊所，免费为超过 24 万人次农户提供了个性化的植保服务。《人民日报》、《农民日报》、《CCTV-7》等媒体对植物诊所进行了 30 余次全面报道，高度评价了植物诊所在农药减量和保障农产品质量安全方面的积极作用。
- ✓ 联合攻关水稻和玉米害虫天敌赤眼蜂的规范化和田间应用技术，在广西和云南省培训技术员和农民 41200 余人，累计示范、推广应用面积 153.07 万亩次。
- ✓ 将中国 3 项成熟的玉米、十字花科蔬菜和马铃薯等作物害虫的天敌生产技术转移到朝鲜和卢旺达等国家。建立了 43 个生物防治天敌工厂或生物农药工厂，培训了 1218 名植保技术人员和 31400 余名农民，技术示范田 1.75 万亩，累计推广应用面积 66 万亩次，在朝鲜实现粮食增产 5-10%，在卢旺达减少蔬菜和块茎作物产量损失 20-30%。
- ✓ 将水稻和玉米害虫生物防治技术转移到老挝和缅甸，建立了 14 个生物防治天敌工厂；以当地语言制作了 50 种技术培训材料 9 万份，培训技术员和农民 29390 余人；累计应用面积 40.5 万亩次，在当地实现增产 2-10%，减少化学农药使用次数 30-50%。老挝和缅甸官方媒体《Vientiane times》、《The Global New Light of Myanmar》对于项目技术在当地的示范应用进行了 6 次报道。

植物智慧项目植物医生在北京一家植物诊所为农户开具绿色防控处方（2019 年）

合作的非预期影响带来的社会效益

除了论文、专利、技术培训、服务农户等目标产出外，与联合实验室的合作还对合作伙伴产生了很多非预期的积极影响，这些影响也从另一方面体现了联合实验室的社会效益，主要概况为以下几点：

- 提升了合作伙伴在国内和国际相关领域的影响力。比如，植物智慧项目成果获得了北京市农业技术推广奖一等奖，“植物诊所”已成为北京市植保站在农技推广体系内的一张名片；中国科学家借助联合实验室平台在国际学协会中任职；CABI 被新西兰皇家植物与食品研究院认可为在外来入侵害虫防控领域的首选合作伙伴。
- 拓展了国际和国内的合作关系。比如，山东省农科院和中国农科院植保所都反馈，得益于联合实验室平台上的欧盟援助大湄公河水稻、玉米 IPM 项目，他们与老挝和缅甸的合作伙伴后续还开展了一系列双边交流和能力建设项目。
- 提升了合作伙伴国际项目管理、任务组织和英文交流等方面的综合能力。除专业技能的提升，合作伙伴的项目团队在国际项目管理（如: 项目逻辑框架的开发和使用、监测与评估、项目财务管理，及项目英文报告撰写等）、任务组织和英语交流等方面的能力都有显著提升。有多个团队反馈，联合实验室对他们国际项目开发和管理能力的提升是其他合作渠道无法比拟的，是联合实验室平台对国内合作伙伴能力建设方面最有价值的贡献之一。
- 推动本地绿色防控政策的形成和实施。比如，植物诊所推动了北京市绿控补贴政策的落地，使绿控补贴从项目发展到政策；河北省衡水市一个天敌生产企业因参与欧盟援助大湄公河水稻、玉米 IPM 项目，提升了本地政府对生物防治的认识和重视，因而加大了政府对天敌产品推广应用的支持力度，促进了绿控政策的实施。

联合实验室的中外科学家们在卢旺达开展地下害虫防治培训（2015 年）

中期发展战略目标的实现及合作满意度

联合实验室中期发展战略目标的实现(2016-2020 年)

响应中国“十三五”规划，联合实验室制定了 2016-2020 年的中期发展战略，该战略在 2017 年初举行的第九届联合实验室指导委员会年会上得到批准。在农业农村部、中国农科院、中国农科院植保所和

CABI 的有力支持下，联合实验室成功实现了中期战略所设定的目标，关键指标基本全部达成，具体情况如下：

- **论文发表：**共 91 篇，其中影响因子大于 2 的 SCI 文章 31 篇；
- **研究生培养：**15 名博士、硕士研究生，20 余名本科实习生；
- **植物智慧项目：**全国有 180 多家活跃运行的植物诊所，累计服务农户 24 万人次，在北京与政府绿控补贴政策结合，开发、运行了“北京市农药减量使用管理系统”，并于 2020 年 3 月获得了北京市农业技术推广奖一等奖。
- **合作关系拓展：**联合实验室在国内外稳步发展，已在山东省和安徽省建立实验室分支，在瑞士建立欧洲实验室，国内外合作伙伴达 80 多个。
- **项目开发执行：**实施了 20 多个国际合作项目，组织撰写了 35 个新的项目建议书，其中获批 20 项，申报成功率达 66.7%。

合作满意度

合作伙伴根据合作是否达到预期效果、并综合考虑合作中的沟通和工作效率等因素，为其与联合实验室合作的总体满意度打分，分数采用 10 分制，1-10 分，分数越高满意度越高。所收到的 17 个反馈分数均为 8-10 分，反映出合作伙伴对联合实验室的总体满意度非常高（分数占比见图 6）。其中，11 位合作伙伴给了满分 10 分，对合作总体效果非常满意，认为项目进展依照计划按部就班，项目产出达到甚至超出了预期。而未打满分的受访者主要关注合作的延续性、发展项目的本地变通性，以及培训的个性化辅导等问题。针对这些问题，合作伙伴也提出了以下建议：

- 建立一个合作伙伴长期交流机制，使合作伙伴间在项目结束后还能持续沟通，共同寻找进一步合作的机会，提高合作的延续性。比如，每年召开一次线上学术研讨会；
- 在技术转移项目中，从提高项目可持续性出发，充分考虑技术输入国农业发展现状，政治体制和人文特征，在项目方案和实施上要有一定的灵活性；
- 加强现有培训课程的个性化辅导部分，创立高质量精品培训课程。

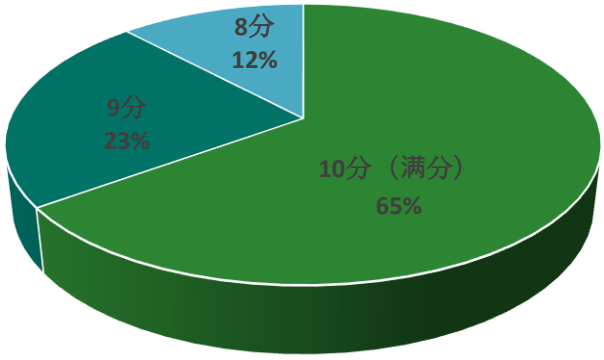

图 6. 合作伙伴对联合实验室合作满意度分数分布

展望

联合实验室的发展目标是成为世界一流的绿色植保技术研发和技术转移中心，尤其是在利用生物防治和 IPM 技术进行跨境有害生物防控的专业领域。研究表明，联合实验室的主要功能和重点合作领域能够充分满足利益相关方的合作需求和合作重点，正在按规划实现其良好的社会效益和生态效益，丰硕的项目产出和较高的资金利用效率也体现了联合实验室进入良性循环的发展道路。同时，联合实验室成功开发并实施的一系列国际合作项目，有效推动了 IPM 和外来入侵物种管理领域的南南合作和技术转移。

在未来，我们将继续拓展联合实验室在国内外的合作伙伴协作网，为中国 “十四五”规划、“一带一路”倡议，及 CABI 中期发展战略（2020-2022）的成功实施提供技术支撑，提升中国在农业生物安全领域的国际影响力与话语权。具体而言，将积极争取各方的持续投入，并战略性地协调发展联合实验室（北京）和欧洲实验室（瑞士）；继续拓展与中国国内其他合作伙伴的合作，如：中国科学院，中国热带农业科学院，山东、安徽和广东等省级农业科学院，农业大学和各级政府植保部门等；积极探索与马来西亚 MARDI–CABI 联合实验室的合作，推进与巴基斯坦和肯尼亚开展合作平台建设的机会，从而进一步拓展联合实验室与其他国家合作伙伴的合作。

致谢

本研究由 CABI 发展基金（CDF）资助，国际应用生物科学中心（CABI）是一个非盈利的政府间国际组织。感谢成员国及其代表机构为 CABI 提供资助，主要包括：英国（外交、联邦和发展部）、中国（农业农村部）、澳大利亚（国际农业研究中心）、加拿大（农业及农业食品部）、荷兰（外交部国际合作总司）、瑞士（发展与合作署）、国际农业发展基金和爱尔兰（爱尔兰援助署）等。更多信息请见 https://www.cabi.org/about-cabi/who-we-work-with/key-donors/ for details

感谢联合实验室资助方的资金支持，感谢联合实验室海内外所有合作伙伴为项目成功申请和实施所付出的努力，感谢 CABI 其他地区中心的同事对建立和发展联合实验室的支持，感谢 Frances Williams 和 Dannie Romney 对本研究报告英文版语言润色所提供的耐心、细致的帮助。

研究资助方

China's donation to CDF

研究合作伙伴

作者

万敏[1]，CABI 东亚中心，项目协调员
陈巨莲[1]，中国农业科学院植物保护研究所，研究员
李红梅，CABI 东亚中心，项目科学家
张金平，CABI 东亚中心，项目科学家
袁博，CABI 东亚中心，财务专员
张巧巧， CABI，成员国事务主任
张峰， CABI 东亚中心，主任
吴孔明，中国农业科学院，副院长
周雪平[2]，中国农业科学院植物保护研究所，所长
Ulrich Kuhlmann[2]， CABI，全球运行执行主任

编辑团队

Frances Williams, CABI，监测与评估全球主管

引用信息

万敏，陈巨莲，李红梅，张金平，袁博，张巧巧，张峰，吴孔明，周雪平，Ulrich Kuhlmann (2021). 农业农村部-CABI 生物安全联合实验室影响评估. CABI 研究简报 37：影响
DOI https://dx.doi.org/10.1079/CABICOMM-62-8151

---

[1] 同等贡献作者
[2] 通讯作者：xpzhou@ippcaas.cn; u.kuhlmann@cabi.org