

合约稳定性、专用性投资与农机服务 质量提升

——基于人工智能自动驾驶植保无人机轨迹
大数据的经验证据

张航宇 袁菱苒 刘欣煜 黄季焜*

摘要: 人工智能技术显著降低了农机服务的监督成本,但本地服务商的质量优势并未因此消失。本文创新性地基于 A 市 2020—2024 年植保无人机厘米级飞行轨迹,构建“格点-飞手-日度”面板数据集,研究发现,稳定合约关系使轨迹覆盖率提高 4.9 个百分点,单位面积施药液量提升 13.0%。机制分析表明,稳定合约关系促进了专用性资产投资,进而提高了自动驾驶采纳率。本文的研究结论对于准确认识人工智能在农业及其他领域的应用成效、推动具有资产专用性特征的应用场景创新与深化,具有重要的理论与实践意义。

关键词: 人工智能;农机社会化服务;合约稳定性

DOI: 10.13821/j.cnki.ceq.2026.03.16

一、引言

当前,以人工智能为代表的新一代信息技术正深刻重塑农业生产方式,为传统农业转型升级提供重要契机(黄季焜,2024)。在大国小农的国情农情下,农机社会化服务是小农户获取新技术的主要渠道,但服务质量问题始终是制约农机服务高效发展的核心症结(刘守英和王瑞民,2019;Foster and Rosenzweig, 2022;仇童伟等,2024)。已有文献指出,农机服务的作业质量较难被农户有效监督,信息不对称导致服务商的机会主义行为难以遏制(孙顶强等,2019)。为缓解这一困境,农机服务逐渐呈现出本地化趋势。基于长期的熟人关系与声誉机制,农户更倾向于信任并选择本地的农机服务商(李佩和罗必良,2022)。

* 张航宇,福建农林大学经济与管理学院;袁菱苒、黄季焜,北京大学现代农学院、北京大学中国农业政策研究中心;刘欣煜,北京大学经济学院。通信作者及地址:刘欣煜,北京市海淀区颐和园路5号北京大学经济学院,100871;电话:13730694668;E-mail:xyliu2018@nsd.pku.edu.cn。作者感谢国家自然科学基金项目(72442001、72433001)和教育部人文社会科学研究青年基金项目(25YJC790143)的资助。感谢匿名审稿人和期刊主编的宝贵建议,文责自负。

随着人工智能算法在植保无人机作业中的深度应用,飞行轨迹、单位面积施药液量等关键作业参数已实现全程精确采集与标准化记录,作业质量具备了高度可观测性与可监督性。在此背景下,本地服务商依赖信息与信任建立的优势理应被削弱,其服务质量与外地服务商之间的差距亦应趋于消失。这一趋势已在金融科技与平台经济等领域得到广泛验证(Cramer and Krueger, 2016; Berg et al., 2020)。然而,本文基于植保无人机轨迹大数据的实证分析发现,在农业植保服务领域,本地服务商依然保持着显著的服务质量优势。该结果与既有文献中的理论预期相悖,由此引出本文的核心研究问题:在人工智能深度介入的背景下,为何农业领域的本地化服务质量优势不仅未消失,反而得以持续存在?

具体而言,本文利用A市2020—2024年植保无人机轨迹大数据,构建了一个高精度的“格点-飞手-日度”面板数据集进行实证分析。该数据集包含厘米级的空间坐标、秒级的时间及毫升级的喷洒量等高频客观记录,为服务质量的精确测度提供了独特的数据支撑。在此基础上,本文综合运用多维固定效应模型和工具变量法进行因果识别,检验了合约稳定性对服务质量的影响及其作用机制。研究发现,合约稳定性显著提升了植保无人机作业质量,使轨迹覆盖率提升约4.9个百分点,单位面积施药液量提升约13.0%。机制分析表明,搭载人工智能技术的植保无人机高度依赖服务方对数字化高精地图等地块专用性资产的前期投入,合约稳定性通过增强长期收益预期,有效激励本地化飞手增加专用性数字资产投资,从而推动服务质量提升。

本文的创新体现在以下三个方面:第一,本文解决了基于关系合约理论的经验研究中“服务质量”难以被直接观测的难题。区别于以往研究依赖主观问卷或间接代理变量的做法,本研究创新性地构建了一套“格点-飞手-日度”高频面板数据集。通过利用植保无人机轨迹大数据,本文直接计算出轨迹覆盖率与单位面积施药液量等客观指标,从而精准量化了服务质量,有效克服了传统研究中的测量误差与估计偏误,为理论的严谨检验提供了坚实的经验证据。

第二,现有研究主要基于“个体-年度”的农户调查数据刻画人工智能技术应用情况,本文利用“格点-日度”高频大数据的优势,对人工智能在农机服务领域实际应用进行了直接测度,能更精准地捕捉技术应用的动态轨迹与区域差异。传统调研数据因时间频率低及农户回忆偏差,难以精细测度技术采纳与扩散的时空变化与局部特征;而农业人工智能技术应用具有显著的时空异质性(Xiao et al., 2024),其实际应用效果的评估亟需更高时空精度的数据提供支撑,本文研究的数据弥补了以上不足,为人工智能在农业中的应用的影响研究提供更精细的经验证据。

第三,本文从资产专用性视角切入,揭示了人工智能技术在依赖高专用性

投资场景下的落地条件。研究发现,人工智能驱动的植保无人机服务高度依赖服务方对地块专用性数字资产的前期投入,而此类投资因具有强专用性和高沉没成本,极易受到合约不稳定性的抑制。稳定的合约关系通过降低投资风险、保障长期收益预期,有效激励飞手进行专用性资产投资,从而释放人工智能的技术效能。这一发现不仅阐明了农业领域中制度安排对专用性投资与技术应用的关键作用,也为智能制造、物流运输、医疗健康等同样依赖专用性数字或物理资产的行业,在构建激励相容的合约机制以促进人工智能有效落地方面,提供了可借鉴的理论逻辑与实践路径。

二、文献综述与特征事实

(一) 人工智能、监督成本与持续的本地化服务质量优势

农业生产的生物特性与空间分散性,使得传统外包服务中普遍存在严重的信息不对称与高昂的监督成本。Allen and Lueck(1998)的经典文献指出,农业生产时刻面临天气、病虫害等自然冲击的随机干扰,这种自然的不确定性容易掩盖人为的努力水平,导致委托人难以验证产出的波动是源于不可控的自然冲击,还是代理人的道德风险。国内相关研究也指出,植保对操作时间、强度、精准度的要求更为复杂和精细,难以建立统一的量化标准,为服务方的机会主义行为提供了更大的空间(杨志海,2019)。这使得传统农机服务往往需要农户依赖实地检查或经验判断来评估作业效果(马九杰等,2019),制约了农机服务市场的发展。

人工智能与数字传感技术的引入,通过作业过程的可视化与数据化,显著降低了农户验证服务质量所需的监督成本。数字经济领域的共识之一,即人工智能等数字技术的采纳将大幅降低市场交易中的“验证成本”(Goldfarb and Tucker, 2019)。无人机植保服务,区别于以往传统农机服务的核心特征,也在于通过数字化传感器和实时数据传输与显示,显著降低了农户验证服务质量所需的监督成本。搭载人工智能技术的植保无人机,允许农户通过操作界面实时监控作业动态,能够即时呈现精密的飞行与喷洒参数,包括厘米级的作业轨迹、飞行速度、高度及实时喷洒量等。这种基于客观可验证数据的可视化监督方式,极大地降低了对农户专业知识和物理在场的要求,使其能够有效评估喷洒覆盖均匀度、精准度等关键质量指标,从而缓解了传统服务模式质量难以监督的问题。^①

^① 具体内容见附图 A1。限于篇幅,附录未在正文列示,感兴趣的读者可在《经济学》(季刊)官网(<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>)下载。

理论上,监督成本的降低应削弱因信息不对称而产生的本地化优势。在金融市场和平台经济等领域,技术进步带来的透明度提升确实带来对本地优势的侵蚀(Coval and Moskowitz, 2001; Cramer and Krueger, 2016; Berg et al., 2020)。然而,在农业社会化服务领域,本地化优势仍然广泛存在。如图1所示,本地与非本地服务飞手在两项关键指标上均存在显著差异:一是飞行路径对地块边界的拟合程度(轨迹质量),二是单位面积施药液量的达标率与均匀性(喷洒质量)。Kolmogorov-Smirnov 检验结果亦证实,两组飞手在两种质量指标上的分布差异均在1%水平上显著。从分布形态看,本地飞手的服务质量分布系统性地优于非本地飞手,其密度函数明显向高质量区间右偏。这一反常现象表明,尽管数字技术使得服务过程与质量高度可观测,农业植保服务领域中本地服务商的质量优势却持续存在。这构成了本研究的核心问题。

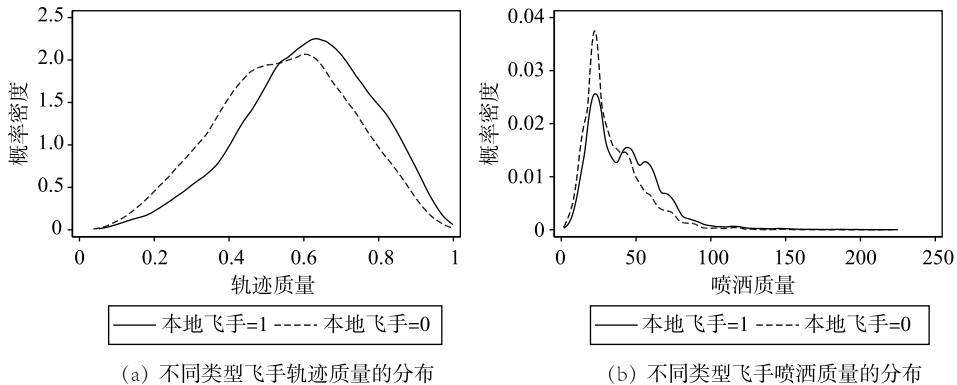


图1 不同类型飞手服务质量的分布

注:图1(a)两组分布的Kolmogorov-Smirnov 检验统计量为0.1473, $p < 0.001$ 。图1(b)两组分布的Kolmogorov-Smirnov 检验统计量为0.1676, $p < 0.001$ 。

数据来源:NPDS数据(详见下文)。

结合Macchiavello(2022)的研究,本文指出法院与植保服务在治理逻辑上的根本区别在于执行机制的不同。正如Baker et al.(2002)的研究指出,法院等第三方机构行使的是基于法律权威的强制执行,但在植保领域,由于缺乏统一的植保标准,第三方往往陷入监督难题,导致强制执行路径在实际操作中难以奏效。相比之下,植保服务更多依赖于关系合约下的“自执行”机制。这种自执行不依赖于外部权力的介入,而是建立在双方对未来合作价值的预期之上。本文在调研过程中也发现,农户因故无法在场时通常并不要求调整服务时间,而是在事后查看无人机飞行轨迹记录。^①这进一步证明了植保服务治理已从依赖外部强制转向了内部的自我约束。

^① 具体内容见附表A1。

（二）人工智能驱动的自动驾驶技术优势与专用性投资要求

植保无人机服务质量的提升,很大程度上依赖于人工智能驱动的自动驾驶模式的采纳。该模式的操作主要包括两个阶段:第一步是“地块测绘与航线规划”。如图2所示,服务方需实地勘测目标田块,沿地块边界采集控制点坐标,生成厘米级精度的数字边界地图(图2中外侧边界线)。在此基础上,飞手根据设定作业参数(如行距、飞行高度、喷洒速率等),人工智能算法随后依据地块边界与参数自动规划覆盖全域的最优作业航线(图2中内部平行线),实现全局路径优化。这一数字地图与航线方案高度匹配特定地块的形状与边界,构成了一项典型的地块专用性投资,因其对服务其他地块几乎没有复用价值。

第二步是“自动化精准执行”,无人机依据预设航线与参数自主飞行并完成标准化喷洒作业,其操作一致性、转弯平顺度及处理精度通常优于人工模式,能有效避免重喷漏喷,相较于手动模式展现出显著的技术效率优势。附图A2通过比较两种模式达到同等服务质量水平(纵轴)所需的单位面积飞行时间(横轴),直观地揭示了这一点。结果显示,自动模式的曲线始终位于手动模式曲线的左上方,表明在任意给定的质量水平下,自动驾驶所需时间均显著更短,效率更高。



图2 某受访者规划的地块以及基于地块所生成的自动驾驶航线

数据来源:某飞手的大疆农服APP,受访者授权截图。

然而,生成高精度数字地图的前期投入构成了一项专用性资产投资,其成本回收依赖于对同一地块的多次服务。^①在缺乏长期、可信合约保障的情况下,

^① 具体内容见附表A2。

服务方面临较高的投资被“套牢”的风险。农户可能在后续服务或续约谈判中,利用服务方已投入的沉没成本,压低服务价格或拒绝为质量提升支付溢价。自动驾驶模式采纳受限的现实印证了这一困境:附图 A3 展示了 2020—2024 年间两种作业模式的分布情况,尽管样本中所有无人机均具备自动驾驶功能,代表手动模式的黄色散点在整个观测期内无论在作业频次还是单次作业峰值面积上均显著占优。这表明存在显著的障碍阻碍了效率更高的自动驾驶技术的广泛应用。

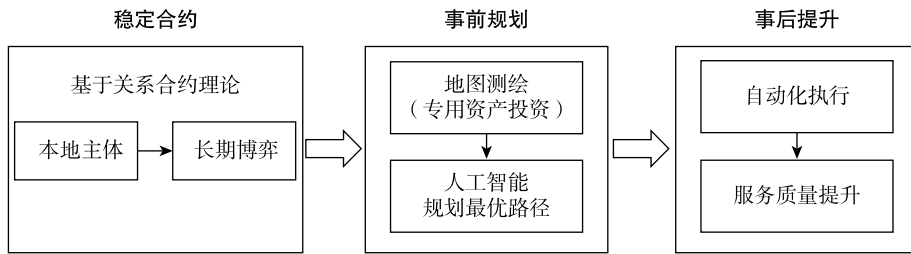
(三) 合约治理、专用性投资与自动驾驶技术采纳

专用性投资面临潜在套牢问题,可以通过稳定的合约关系得到缓解。正如我们在实地调研中一位一线飞手(内部访谈编号:INT-FS-01)的典型陈述:“如果给一个地方只服务一次的话,没有必要做高清地图,要不然来不及去下一家。”这表明,自动驾驶的投资需要长期合约进行支撑。如果缺乏稳定的回报预期,服务方往往进行短期优化。本地服务商通常与农户存在更强的社会联系、声誉约束和重复博弈预期,这种关系稳定性可以有效降低专用性投资的风险,保障其长期收益。因此,合约稳定性预期会正向影响服务方采纳自动驾驶模式的决策。

附图 A4 进一步对上述逻辑进行阐述:附图 A4(a)显示,本地飞手采纳自动驾驶的概率对作业面积的弹性显著大于非本地飞手;附图 A4(b)则表明,在多次合作关系下,自动驾驶采纳概率随作业面积增加的幅度也远超单次合作。这说明,对于缺乏稳定预期的合约,尽管自动驾驶的固定投入成本可在更大面积上被摊薄,服务方投资数字地图并采纳自动驾驶的意愿依然不足。相反,稳定的合约关系则能有效激励服务方进行专用性投资,在地块面积较大的情景下尤为明显。^①

综上所述,合约稳定性通过保障专用性数字资产投资的回报预期,促进了服务方采纳更高效的自动驾驶技术,进而实现了服务质量的提升。图 3 总结了这一核心机制流程:以“本地主体(本地飞手)”作为研究起点,基于关系合约理论,论证了本地身份所蕴含的“长期博弈”与“预期多次合作”特征。正是这种稳定的合约预期,激励了飞手进行事前专用性资产投资和事后服务质量的提升。人工智能技术的引入并未消除合约的重要性,反而将合约治理的核心聚焦于如何激励和保障新型数字化专用性资产投资。这一框架为理解人工智能时代背景下农业社会化服务的合约安排、技术采纳的互动提供了新的分析视角,也为解释本地化质量优势的持续存在提供了基于专用性投资和合约理论的解释。

^① 本文通过与提供服务的飞手和经销商进行案例访谈,进一步印证了这一核心结论。

图3 合约稳定性对服务质量影响的机制^①

三、数据与模型设定

（一）数据来源与处理

本文所使用的无人机飞手数据及航线轨迹数据，主要来源于对福建省A市2020—2024年间植保无人机作业情况的记录与调查。^②通过对区域内无人机飞手实施的问卷调查与深度访谈，收集了涵盖教育背景、从业经历、服务定价策略以及所属乡镇等关键信息。进一步地，本文结合相关应用软件的数据记录，获取了详细的航线轨迹信息和植保无人机作业记录数据(Nanping Plant-Protection Dataset, NPDS)。本文获取的高精度无人机作业数据主要包含三类：一是基于实时动态差分定位技术(Real-Time Kinematic, RTK)记录的飞行轨迹数据，其以厘米级空间分辨率和秒级时间间隔连续采集作业路径，并以地理信息系统线要素格式存储；二是飞行模式参数数据，涵盖自动驾驶状态、作业高度、作业行间距等关键技术指标；三是喷施数据，通过流量传感器实时采集作业过程中的实际施药量(见附图A5)。通过上述数据收集方法，本研究最终获取的数据集共包含453015条植保无人机飞行轨迹数据。^③该数据集覆盖A市植保无人机市场约48%的市场份额^④，能够较好地反映区域植保无人机应用现状。附图A6展示了样本作业轨迹的空间分布情况，轨迹点遍布A市各区域，分布较为均匀，表明该数据集具有良好的空间代表性，能够反映A市无人机植保服务市场的整体情况。

本研究的数据处理包括三个步骤：空间界定、时间筛选和格点面板数据构建：^①首先，鉴于水稻在福建省粮食安全中的战略地位，且依据官方农业统计年

^① 本文在Levin(2003)经典关系契约理论框架的基础上进行适度拓展，构建了适用于农机服务情境的理论模型。具体见附录I。

^② 数据的获取得到了福建省A市主要植保无人机经销商(截至2024年)及当地农业机械化发展中心的支持。我们向所有购机飞手发放了问卷，经由飞手同意并提供账号后，导出其账号自开通以来的所有作业数据。

^③ 具体界面见附图A5。

^④ 计算方法：2024年A市无人机作业总面积为200万亩，本研究2024年记录的作业面积为96万亩。

鉴数据,A市水稻种植面积截至2024年位居全省首位,本研究将水稻种植作为核心研究对象。在空间范围界定方面,参考Qiu(2023)的研究方法,本研究整合卫星遥感土地覆盖分类数据与10m×10m高分辨率水稻遥感分类数据集,实现无人机作业航线与水稻种植空间分布的精准匹配。②其次,在时间维度上,本研究将样本数据限定在水稻生长季节(4月至9月),以确保不同无人机植保作业质量评价的可比性。③鉴于原始飞行轨迹具有高度的空间不规则性,且单一地块的完整作业任务往往需经由多次起降(架次)协同完成,直接基于架次层面的分析难以精确控制空间固定效应并有效衡量服务质量。为此,我们将研究区域划分为200m×200m的标准化格点,并按照“格点-飞手-日度”维度,将几何中心落入格点内的同一飞手轨迹进行聚合处理(具体的轨迹到格点聚合过程详见附录II)。最终,我们将涉及144957个架次、总作业面积达927978亩的水稻植保数据,整合为覆盖9172个独立网格的46874个面板观测值。①各指标定义及数据来源详见附表A3。

本研究建立了完整的服务质量测度,包含轨迹质量与喷洒质量两个维度的质量指标。第一,本文以轨迹缓冲区域占最小外接多边形比例(即轨迹占凸包^②面积比例)来测度轨迹质量,即轨迹缓冲区域占最小外接多边形比例= $\frac{A_{actual}}{A_{convexHull}}$ 。其中 A_{actual} 为轨迹线段缓冲机型行距后的实际有效覆盖面积^③, $A_{convexHull}$ 为作业轨迹最小凸包多边形面积。本文采纳的轨迹覆盖比率评估方法具有较强的理论基础与实践意义。通过将实际覆盖面积与凸包面积的比值作为判断依据,能够有效识别作业过程中潜在的问题区域(不同覆盖率轨迹的直观对比见附图A8)。该指标能有效衡量飞行路径的均匀性和覆盖完整性。④

第二,本文以单位面积施药液量作为衡量无人机植保喷洒质量的关键指标,该指标在多地市场交易中被广泛采用(Zhang et al., 2026)。从农药相关文献来看,曾文等(2021)在水稻防治实验中发现,相同农药有效成分下,施药液量22.5升/公顷比15升/公顷在冠层上部的雾滴沉积量高出60.53%,且施药液量与防治效果紧密相关,在一定范围内施药液量越大、农药剂量越大,防治效果越好。同时,施药液量与飞行高度、速度等操作参数也存在关联,高度、速度等因素变化会对防治效果产生影响(Xiao et al., 2020)。在市场交易方面,施药液量易于监督,农民可通过药水用量和作业面积直接核算,避免飞手偷工减料。

① 具体数据聚合规则见附录II。

② 凸包英文为Convex Hull,几何学中指包含给定点集的最小凸多边形。具体可见附图A8。

③ 即基于无人机原始航线数据,依据对应机型作业幅宽或行距设置缓冲距离、进行缓冲区处理后得到的实际有效覆盖面积。

④ 大疆(2024)的作业规范(大疆内部培训资料,由南平大疆飞机培训商提供)表明,即使是2024年载重量最大的飞机T60,在水稻作业上最大的推荐幅宽也只有7m。从实际数据来看,即使在作业较为规范的自动驾驶的轨迹中,仍然存在约10%的情况行距超过7m,意味着潜在漏喷区域的质量风险。

本研究采用飞手是否来自本地作为合约稳定性的主要代理变量。^① 基于本地知识效应和社会网络嵌入性,本地服务主体能够有效识别与应对农业中的自然冲击,建立更稳定的合约关系,从而有效降低交易成本(仇童伟等,2024)。具体而言,本研究将服务地块所在乡镇与无人机飞手主要业务所在乡镇一致的服务定义为“本地飞手”服务,反之则归类为“非本地飞手”服务。附图 A7 进一步印证了本地飞手具备更高频的合作次数,长期合作关系提高了隐性知识传递效率,促进了专用性资产投资,这种稳定的合约关系为服务质量的提高提供了制度保障。控制变量借鉴以往文献(Rosenzweig and Udry, 2019),包括地区自然条件(温度、降水量)、飞手特征(教育程度、非农就业经历)和无人机作业特征(作业面积、价格)等多个维度。数据主要来自 NPDS APP 轨迹记录与对应的飞手问卷调查,辅以气象数据库(ERA5-Land^②)控制作业当天的气象因素。

表 1 的描述性统计结果显示,本地飞手的服务质量显著优于非本地飞手。具体表现为:本地飞手的轨迹质量指标(轨迹占凸包面积比例)均值为 61.0%,较非本地飞手高出 6.3 个百分点,这一差异在 1% 水平上显著;在喷洒质量方面,本地飞手的单位面积施药液量达 42.27 升/公顷,显著高于非本地飞手的 34.25 升/公顷。值得注意的是,本地飞手的自动驾驶技术采纳率(0.315)显著高于非本地组(0.226),表明其更倾向于通过自动化技术提升作业标准化水平。这些发现初步印证了本地飞手在植保服务中的质量优势,下文将通过计量模型控制混杂因素,进一步严谨检验合约稳定性与服务质量的因果关系。

表 1 变量描述性统计结果

变量名称	总体		本地		非本地		差异
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(3)-(5)
轨迹占凸包面积比例	0.577	0.179	0.610	0.174	0.547	0.179	0.063***
施药液量(升/公顷)	38.082	22.690	42.270	24.714	34.246	19.906	8.024***
自动驾驶	0.268	0.443	0.315	0.464	0.226	0.418	0.089***
作业行距(米)	5.737	1.122	5.561	1.030	5.972	1.194	-0.411***
作业面积(公顷)	1.320	1.166	1.182	1.093	1.446	1.217	-0.264***
飞手教育年限(年)	12.252	2.643	11.719	2.668	12.740	2.523	-1.021***
飞手非农就业	0.624	0.484	0.591	0.492	0.654	0.476	-0.063***
服务价格(元/公顷)	162.833	23.492	165.203	26.290	160.663	20.357	4.540***

① 具体示意图见附录 III。

② 来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECM-WF)的 ERA5-Land 小时级再分析数据集。

(续表)

变量名称	总体		本地		非本地		差异
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(3)-(5)
温度(摄氏度)	25.056	4.010	25.541	3.642	24.611	4.271	0.930***
降水(毫米)	3.564	7.132	3.600	7.043	3.530	7.212	0.070
降雨预报错误	0.003	0.05	0.001	0.04	0.004	0.06	-0.003***

注:虚拟变量包括自动驾驶(1=自动驾驶;0=手动驾驶),飞手非农就业(1=非农就业;0=没有非农就业),天气预报错误(1=预报错误;0=预报正确)。***表示在1%水平显著,**表示在5%水平显著,*表示在10%水平显著。

(二) 实证模型设定

基于“格点-飞手-日度”面板数据结构,本研究采用多维固定效应模型进行基准回归分析,旨在检验同一网格单元内飞手类型(本地/非本地)对其服务质量的影响。模型设定如下:

$$Y_{igt} = \beta_0 + \beta_1 Local_{igt} + \delta Individual_{iy} + \vartheta Area_{igt} + \gamma Weather_{gt} + \mathcal{O}_g + \eta_m + \rho_d + \varepsilon_g, \quad (1)$$

其中,下标 i 、 g 、 t 分别表示飞手、格点单元和时间窗口(日度)。被解释变量 Y_{igt} 表示在日度 t , 飞手 i 在格点 g 的服务质量,包括轨迹覆盖率和每公顷施药液量。核心解释变量 $Local_{igt}$ 为是否是本地(本乡镇)飞手的虚拟变量(1=本地,0=非本地)。回归方程包含三类控制变量,其时间变化特征各不相同。一是飞手特征变量 $Individual_{iy}$: 不随日度 t 变化。该变量随个体 i 和年份 y 变化,包括受教育年限、非农就业和服务价格等。由于这些特征在年度内保持稳定,因此在日度层面属于时间不变量。二是作业面积 $Area_{igt}$: 随日度 t 变化。该变量随个体 i 、格点 g 和日度 t 三个维度变化,捕捉每日作业规模的动态特征。三是天气条件 $Weather_{gt}$: 随日度 t 变化。该变量随地块 g 和日度 t 变化,包括温度、降水等,反映每日气象条件的波动。 \mathcal{O}_g 代表格点固定效应,用于控制与特定格点相关的不随时间变化的影响因素; η_m 为年-月固定效应,控制与时间相关的不随区域变化的不可观测因素。 ρ_d 为无人机型号固定效应(如型号 T30、型号 T50 等),控制与机型相关的不随时间变化的影响因素。 ε_g 在格点层面聚类。系数 β_1 是本文关注的核心,其捕捉了格点所匹配的本地和非本地飞手的转变对格点植保服务质量的影响。

尽管本文采用高维固定效应模型缓解了由不可观测的时不变混淆因素导致的内生性问题,基准回归仍可能存在遗漏变量和反向因果等问题,如高技能飞手更易被本地雇用,历史服务质量驱动长期本地合作。为缓解潜在的内生性

问题,本文借鉴 Rosenzweig and Udry(2019)将天气预报误差视为外生冲击的思路,采用服务日前一天“预报有雨但实际无雨”的偏差作为本地飞手合约安排的工具变量。

本文的实际降水数据来源于前文所述的 ERA5-Land 数据,天气预报数据来源于中国气象局“次日预报”历史数据,如果预报次日存在全天降水,但 ERA5-Land 实际降水数据小于降水百分位数的 5%(约 0.25mm),则认为存在“天气预报降雨但实际晴天”的错误,以此作为合约安排的工具变量^①。选择这一工具变量的理由如下:首先是工具变量的相关性,该变量显著影响飞手每日服务地点选择,笔者调研发现,本地飞手通常倾向于提前锁定本地订单以最大化作业效率。然而,当天气预报显示本地有降雨预期时,为规避人员与设备的闲置成本,本地飞手往往倾向于放弃当日订单或推迟作业计划(因降水会造成农药流失,显著削弱病虫害防治效果)。随之,若当日天气实际转晴,而本地飞手已转移至外地作业,该区域将面临临时的服务供给短缺。鉴于农业生产的强时效性约束,农户往往不得不寻求邻近区域的非本地飞手进行替代作业。其次,其不直接影响植保服务质量,由此产生的本地与非本地飞手分配差异主要由预报误差驱动,与飞手的技能和历史质量无关,在控制当天实际降水后,该变量对服务质量不存在直接影响路径,因此可用于识别本地飞手服务对服务质量的因果效应。

四、实证结果

(一) 合约稳定性与低空经济服务质量

表 2 考察了合约稳定性对服务质量的影响,被解释变量分别为轨迹覆盖率(第(1)–(3)列)和单位面积施药液量的对数(第(4)–(6)列)。第(1)、(4)列为单变量检验结果,第(2)、(5)列加入控制变量,第(3)、(6)列进一步纳入格点、时间及机型固定效应。第(3)列结果显示,本地飞手的轨迹面积占比平均高出非本地飞手 4.9 个百分点,以非本地飞手样本均值(0.547)为基准,相当于 9.0% 的相对质量提升。第(6)列结果表明,本地飞手的单位面积施药液量显著高于非本地飞手约 13.0%($e^{0.122} - 1 \approx 0.130$)。在逐步加入控制变量的过程中,核心解释变量的系数始终保持 1% 的统计显著性。控制变量的估计结果均符合理论预期:作业面积对施药液量呈显著负向影响,与农业规模报酬递减的预期一致;温度系数在两个质量维度上均显著为正,反映了飞手在高温天气下会提升服务质

^① 不使用“天气预报为晴天而实际降雨”的原因在于,降雨会直接冲刷叶面已经喷洒的农药,导致农药效果物理性降低,所以飞手普遍不会在降雨天进行作业,进而导致使用“天气预报为晴天而实际降雨”较难满足排他性假设。进一步从数据中可以看到无人机作业记录中 89% 的作业都发生在无雨及小雨(10mm 以下)的天气条件下。

量以抵消药液蒸发效应。以上结果共同表明,更稳定的合约安排能够同时提升容易监督与不易监督的服务质量。

表2 合约稳定性与飞手服务质量

被解释变量	轨迹占凸包面积的比例			单位面积施药液量		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
本地飞手	0.063*** (0.003)	0.052*** (0.003)	0.049*** (0.004)	0.205*** (0.013)	0.122*** (0.012)	0.122*** (0.010)
作业面积		-0.016*** (0.001)	-0.005*** (0.001)		-0.103*** (0.005)	-0.099*** (0.003)
飞手受教育年限		-0.002*** (0.001)	-0.003*** (0.001)		-0.038*** (0.002)	0.005*** (0.002)
飞手非农就业		0.009*** (0.003)	0.008** (0.004)		-0.023* (0.013)	-0.009 (0.011)
服务价格		0.000 (0.000)	-0.000** (0.000)		-0.002*** (0.000)	0.001*** (0.000)
温度		0.006*** (0.000)	0.001** (0.000)		0.025*** (0.001)	0.006*** (0.001)
降水		0.001*** (0.000)	0.000** (0.000)		-0.001** (0.000)	0.000* (0.000)
格点固定效应	否	否	是	否	否	是
时间固定效应	否	否	是	否	否	是
机型固定效应	否	否	是	否	否	是
观测值	46 874	46 874	44 054	46 874	46 874	44 054
R ²	0.031	0.058	0.388	0.032	0.128	0.732

注:括号内为聚类至格点层面的稳健标准误。*、**、***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。样本量在加入格点高维固定效应后有所减少,原因为仅出现一次服务的格点被删除。下同。

(二) 工具变量估计

基准回归表明,本地化的合约安排可以提升飞手的农机服务质量。然而,上述估计结果可能受到遗漏变量或反向因果等内生性问题的干扰,导致系数估计存在偏误。为此,本文借鉴 Rosenzweig and Udry(2019)关于天气预报经济影响的研究思路,以“天气预报降雨但实际晴天”的预报误差作为工具变量。表3报告了本地飞手对服务质量的两阶段最小二乘法(2SLS)估计结果。工具变量第一阶段结果如第(1)列所示,本地“天气预报降雨但实际晴天”的错误预报会显著抑制本地飞手服务。工具变量第二阶段结果如第(2)、(3)列所示,本地飞

手显著促进了当前服务质量,提升轨迹占凸包面积的比例约 18.8 个百分点。对比后可发现,工具变量结果高于 OLS 结果,估计系数变大的原因可能如下:根据 Angrist and Pischke(2009)的理论总结,当因果效应存在异质性时,工具变量估计值刻画的是局部平均处理效应(Local Average Treatment Effect, LATE),而非全局平均处理效应,可能会使得估计结果偏大。表 3 中的 Kleibergen-Paap rk LM 检验在 1%水平上拒绝了工具变量识别不足的假设,Kleibergen-Paap F 统计量大于 Stock-Yogo 检验 10%水平上的临界值,拒绝了弱工具变量的原假定,表明工具变量与潜在的内生变量之间具有较强的相关性。综上所述,本文选取的工具变量是合理的,在考虑内生性问题的基础上,基准回归的主要结果保持不变。

表 3 工具变量回归结果

被解释变量	第一阶段		第二阶段	
	本地飞手		log(施药液量)	轨迹占凸包面积的比例
	(1)		(2)	(3)
工具变量=本地降雨预报错误	-0.374*** (0.033)			
本地飞手			0.437*** (0.129)	0.188*** (0.048)
控制变量	是		是	是
格点固定效应	是		是	是
时间固定效应	是		是	是
机型固定效应	是		是	是
观测值	44 054		44 054	44 054
Kleibergen-Paap F 统计量			128.301	128.301
Kleibergen-Paap rk LM			55.616	55.616

注:列(1)为第一阶段回归结果,列(2)和列(3)为第二阶段回归结果。Kleibergen-Paap F 统计量远大于 10(Stock-Yogo 临界值),表明不存在弱工具变量问题;Kleibergen-Paap rk LM 统计量对应的 p 值小于 0.01,强烈拒绝工具变量不可识别的原假设。所有回归均包含了控制变量,并控制了格点、时间及机型固定效应。

(三) 稳健性分析

为验证研究结论的可靠性,本文进行了一系列稳健性检验,主要从替换合约稳定性的定义,改变空间尺度、改变服务质量测度等方面展开。

(1) 改变“本地飞手”定义。由于地理临近性和社会网络嵌入的空间范围具有多层次性,本文将“本地飞手”的定义从乡镇级别放宽到县级别,检验声誉机制在更大空间范围内的有效性。调研发现飞手在县级同样存在长期合作的约

束。大疆和极飞植保无人机在全国普遍采用县级代理制,县级代理商承担了销售、培训以及售后等多个职责,在飞防行业具备较强的信息优势,因此对接了大量政府订单及农业合作社的大规模飞防项目资源。^①附表 A4 的实证结果表明,本县飞手显著促进了轨迹占凸包面积的比例约 6.2%(第(2)列),其次对施药液量的正向影响依然显著,系数值为 0.127(第(4)列),在 1%水平上显著;均较基准回归有一定程度的提升。这一系数的提升可能源于样本范围的变化:采用县级定义后,“本地”样本占比上升至 78%,而“非本地”样本主要涵盖跨县飞手,其服务质量的异质性可能更为显著,验证了基准结果的有效性。

(2) 改变网格单元大小。考虑到空间单元的大小选择可能影响估计结果,本文通过改变格点大小,从标准的 200m 调整为 100m 和 300m,来检验主要结论是否对空间尺度敏感。结果如附表 A5 显示,无论采用 100m 还是 300m 的格点大小,本地飞手的系数始终显著为正,且数值与基准回归的系数相近,均在 1%水平显著。这表明本文的主要结论对空间单元尺度的选择不敏感,进一步证实本地飞手服务对提升农业服务质量具有稳健的正向效应。

(3) 替换服务质量指标。为进一步验证服务质量指标选取的稳健性,本文采用一个更保守的几何指标,即“内部孔洞率”来测度服务质量。“内部孔洞”特指在无人机飞行轨迹的拓扑结构中,由于路径规划不当或执行中的急转、避障等复杂操作,导致轨迹自身完全包围、闭合而形成的未喷洒空白区域。这一指标不受地块边界的影响,因此相比于凸包的算法更为严格。附表 A6 的结果表明,替换服务质量的测度指标后本文的主要结论仍然成立。

(4) 改变固定效应维度。本文进一步检验了将年-月固定效应改为日度固定效应的回归结果,旨在通过更加严格的时间控制来验证结论的可靠性。附表 A7 的结果显示,核心变量的系数符号和显著性均未发生明显改变。

(5) 因变量的对数处理。考虑到近期计量文献对取对数带来的估计偏差的担忧(Chen and Roth, 2024),本文对施药液量这一核心因变量的水平值进行回归。结果如附表 A8 所示,核心解释变量的系数符号和显著性与基准回归保持一致,证明了本文结果的稳健性。

五、机制分析

合约稳定性主要通过缓解专用性资产的投资不足问题,进一步促进服务质量。在无人机飞防服务中,规划高精度自动驾驶航线所需的高清地图即为一种

^① 在山东省潍坊市、福建省南平市和江西省上饶市的调研均发现这一现象。本文访谈的多个县级代理商表示:“在分配这些大单时,飞手的历史服务质量和本地口碑是首要考虑因素。如果一个飞手在服务个体农户时名声不好,基本不会考虑让他接大项目。”

典型的专用性资产。其高昂的初始投入属于沉没成本,只有在长期、稳定的服务关系中才能被有效摊销(详情可见附图 A9)。因此,预期合约的不稳定会显著抑制服务提供者的事前投资意愿,导致其与拥有稳定合约预期的同行之间产生投资差异。稳定的合约关系通过保障未来的交易,提升了此类投资的预期回报,从而激励服务提供者提升针对技术精度和效率的资本投入。

表4汇报了合约稳定性对事前专用性数字资产投资及其质量的机制检验结果。第(1)一(3)列逐步加入控制变量与多维固定效应,本地飞手对自动驾驶技术采纳的正向效应始终在1%水平上显著。第(3)列结果表明,在同一格点同一时期,本地飞手的自动驾驶采纳率较非本地飞手高出约10.9个百分点;第(4)列工具变量估计进一步印证了这一因果关系。控制变量的估计结果均符合合理理论预期:作业面积对自动驾驶采纳呈显著正向影响,表明规模化作业场景更有利于资本密集型技术的应用;飞手拥有非农就业经历亦显著促进技术采纳,印证了跨行业人力资本积累对新技术吸收能力的正向选择效应。第(5)列以自动驾驶样本的作业行距衡量数字地图的投资质量,结果显示本地飞手的作业行距显著更窄。行距由飞手在航线规划阶段直接设定,增大行距虽可降低规划复杂度与作业成本,但过大的行距会导致相邻路径间距增加,造成喷洒覆盖不均甚至漏喷。本地飞手显著更窄的行距设定表明,稳定的合约关系激励飞手在作业前投入更多精力进行精细测绘与航线规划,从而生成更高质量的数字地图资产,最终体现为作业过程中更高的轨迹覆盖精度。综合来看,表4的实证结果表明,合约稳定性通过激励服务方进行事前专用性数字资产投资并改善其投资质量,构成了服务质量提高的核心路径。

表4 机制检验:合约稳定性对事前专用性数字资产投资和资产质量的影响

被解释变量	自动驾驶				log(作业行距)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
本地飞手	0.089*** (0.010)	0.096*** (0.010)	0.109*** (0.009)	0.329*** (0.073)	-0.061*** (0.011)
控制变量	否	是	是	是	是
格点固定效应	否	否	是	是	是
时间固定效应	否	否	是	是	是
机型固定效应	否	否	是	是	是
回归模型	OLS	OLS	OLS	2SLS	OLS
Kleibergen-Paap F 统计量				128.301	

(续表)

被解释变量	自动驾驶				log(作业行距)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
观测值	46 874	46 874	44 054	44 054	10 994
R ²	0.010	0.058	0.623	-0.018	0.793

注:列(5)使用了大疆后台记录的采用自动驾驶模式的行距记录,并未记录手动模式下行距的指标,因此此表仅采用自动驾驶的样本。

六、拓展讨论

本部分旨在从技术进步与地块规模两个维度,进一步探讨合约稳定性对专用性投资和服务质量激励效应的异质性。一方面,为检验技术进步在调节合约治理效能中的作用,本文以植保无人机载药量(以30L为界)作为技术先进性的代理变量,将样本分为“大飞机”与“小飞机”两组进行对比检验。另一方面,在地块规模维度,本文按面积均值将样本划分为“大地块”与“小地块”两组进行考察;回归结果如表5所示。

表5第(1)—(4)列从技术水平维度检验合约稳定性提升服务质量的异质性。以载重量30L为界将样本分为“小飞机”与“大飞机”两组,轨迹覆盖率的结果显示,本地飞手对大飞机的提升幅度(5.5个百分点)是小飞机(2.1个百分点)的两倍以上,组间差异在1%水平上显著,表明技术进步与合约安排之间存在显著互补性——更先进机型的技术潜力释放高度依赖飞手的高质量事前投资,稳定合约恰好为此提供关键激励。施药液量的结果则呈现相反趋势,本地飞手的正向效应在大飞机上显著减弱,反映了技术进步导致质量监督重心的转移:小飞机动力有限,施药液量是飞手“偷工减料”的主要维度;大飞机的强大动力与先进喷洒技术使足量喷洒不再是瓶颈,合约治理重心随之从“喷得够”转向“飞得准”。

第(5)—(6)列从地块规模维度进一步检验合约稳定性对专用性投资的激励效应。结果显示,本地飞手在大地块上将自动驾驶采纳率提高11.1个百分点,显著高于小地块的8.8个百分点,组间差异在1%水平上显著。该结果表明,高精度航线建图属于前期固定成本高昂且高度专用的投资,地块面积越大,单位建图成本被摊薄越多,预期收益越高。此时,本地化合约所提供的长期稳定关系与收益保障,恰好为飞手承担前期固定投入、释放技术潜能提供了关键激励,从而将规模化经营的成本优势转化为现实的服务质量提升。

本文进一步通过成本收益核算发现,高质量作业需5元/亩测绘投入,单次作业亏损风险导致非本地飞手倾向低质手动模式。尽管自动驾驶每亩净收益

1.5元,但需至少3.33次作业方能覆盖前期成本。这一核算结果表明:仅在“本地化”长期合约预期下,技术带来的质量溢价才能有效覆盖专用性投资,进而实现服务质量的帕累托改进(具体见附录IV)。

表5 异质性分析

被解释变量	轨迹占凸包面积的比例		log(施药液量)		自动驾驶	
	载药量<30L	载药量≥30L	载药量<30L	载药量≥30L	小地块	大地块
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
本地飞手	0.021*** (0.007)	0.055*** (0.005)	0.183*** (0.02)	0.091*** (0.012)	0.088*** (0.011)	0.111*** (0.016)
组间系数差异	0.027*** (0.006)		-0.083*** (0.017)		0.031*** (0.008)	
控制变量	是	是	是	是	是	是
格点固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
机型固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	13 643	28 735	13 643	28 735	26 450	15 459
R ²	0.349	0.418	0.809	0.69	0.665	0.679

注:列(5)和列(6)以地块面积均值(1.32公顷)为界,将样本划分为大、小地块两组。

七、政策含义和未来拓展

在人工智能深刻重塑农业生产方式的背景下,本文聚焦于人工智能与农机社会化服务融合发展这一核心议题,以植保无人机服务为研究对象,探究了人工智能技术介入下服务质量提升的内在机制。鉴于农业生产具有显著空间异质性特征,高精度数字地图资产将成为未来智慧农业发展的核心生产要素。基于本文的实证分析结果,提出如下政策建议:

第一,建议完善数据交易和流转平台。如在农业领域构建区域统一的高精度地图交易与流转平台。该平台应允许飞手将其测绘的专用性数字地图资产进行市场化交易,通过建立地图产权的二级市场,有效缓解专用性资产投资的“锁定效应”和“套牢问题”。这不仅能够提高专用性资产的流动性和可回收性,降低供给方面临的投资风险,还能够通过市场机制实现地图资产的优化配置,推动数据专用资产投资和人工智能技术的实际落地。

第二,建立激励人工智能技术应用所需专用性投资的长期合约治理框架。本研究揭示的合约稳定性对专用性资产投资的激励作用,具有超越农业领域的一般性意义。无论是农业植保服务中的高精地图测绘,还是智能制造中定制化

生产线改造,抑或物流运输、医疗健康等领域的专用算法开发,均可能面临因合约不稳定导致的投资不足困境。建议从制度层面完善长期合约的法律保障机制,明确合约双方在专用性投资中的权利义务关系,建立违约惩戒与履约激励相容的信用体系。同时,鼓励行业协会、平台企业等中介组织推动形成标准化的长期合约范本,降低合约缔结与履行的交易成本,为人工智能技术在各领域的深度应用创造制度条件。

此外,本文也存在一定局限性,有待未来进一步拓展。受限于数据的可得性,本文主要基于单一地市的人工智能自动驾驶植保无人机轨迹大数据展开实证。未来研究可融合轨迹大数据与农户微观调查数据的优势,进一步探讨人工智能技术进步背景下合约治理模式的动态演变。

参考文献

- [1] Allen, D. W., and D. Lueck, "The Nature of the Farm", *The Journal of Law and Economics*, 1998, 41(2), 343-386.
- [2] Angrist, J. D., and J.-S. Pischke, *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- [3] Baker, G., R. Gibbons, and K. J. Murphy, "Relational Contracts and the Theory of the Firm", *Quarterly Journal of Economics*, 2002, 117(1), 39-84.
- [4] Berg, T., V. Burg, A. Gombović, and M. Puri, "On the Rise of Fintechs: Credit Scoring Using Digital Footprints", *The Review of Financial Studies*, 2020, 33(7), 2845-2897.
- [5] Chen, J., and J. Roth, "Logs with Zeros? Some Problems and Solutions", *The Quarterly Journal of Economics*, 2024, 139(2), 891-936.
- [6] Coval, J. D., and T. J. Moskowitz, "The Geography of Investment: Informed Trading and Asset Prices", *Journal of Political Economy*, 2001, 109(4), 811-841.
- [7] Cramer, J., and A. B. Krueger, "Disruptive Change in the Taxi Business: The Case of Uber", *American Economic Review*, 2016, 106(5), 177-182.
- [8] Foster, A. D., and M. R. Rosenzweig, "Are There Too Many Farms in the World? Labor Market Transaction Costs, Machine Capacities, and Optimal Farm Size", *Journal of Political Economy*, 2022, 130(3), 636-680.
- [9] Goldfarb, A., and C. Tucker, "Digital Economics", *Journal of Economic Literature*, 2019, 57(1), 3-43.
- [10] 黄季焜, "农业新质生产力:内涵与外延、潜力与挑战和发展思路",《中国农村观察》,2024年第5期,第19—34页。
- [11] Levin, J., "Relational Incentive Contracts", *American Economic Review*, 2003, 93(4), 835-857.
- [12] 李佩、罗必良, "农机作业服务市场的'本地化'及其'价格悖论'",《华中农业大学学报(社会科学版)》,2022年第3期,第47—57页。
- [13] 刘守英、王瑞民, "农业工业化与服务规模化:理论与经验",《国际经济评论》,2019年第6期,第9—23页。

- [14] 马九杰、赵将、吴本健、诸怀成,“提供社会化服务还是流转土地自营:对农机合作社发展转型的案例研究”,《中国软科学》,2019年第7期,第35—46页。
- [15] Macchiavello, R., “Relational Contracts and Development”, *Annual Review of Economics*, 2022, 14(1), 337-362.
- [16] Qiu, B., “Spatial-temporal Distribution Dataset of Rice in Fujian, Jiangxi, Hunan and Hubei Provinces with 10m Resolution (2018-2021)”, National Earth System Science Data Center, 2023, DOI: 10.12041/geodata.76460845139096.ver1.db.
- [17] 仇童伟、章丹、罗必良,“中国农机服务市场的转型机理及其政策选择”,《管理世界》,2024年第10期,第85—105页。
- [18] Rosenzweig, M. R., and C. R. Udry, “Assessing the Benefits of Long-run Weather Forecasting for the Rural Poor: Farmer Investments and Worker Migration in a Dynamic Equilibrium Model”, NBER Working Paper, No. 25627, 2019.
- [19] 孙顶强、M. Asmelash、卢宇桐、刘明轩,“作业质量监督、风险偏好与农户生产外包服务需求的环节异质性”,《农业技术经济》,2019年第4期,第4—15页。
- [20] Xiao, L., G. Wang, E. Wang, S. Liu, J. Chang, P. Zhang, ...and Z. Luo, “Spatiotemporal Co-optimization of Agricultural Management Practices towards Climate-smart Crop Production”, *Nature Food*, 2024, 5(1), 59-71.
- [21] Xiao, Q., R. Du, L. Yang, et al., “Comparison of Droplet Deposition Control Efficacy on *Phytophthora capsica* and Aphids in the Processing Pepper Field of the Unmanned Aerial Vehicle and Knapsack Sprayer”, *Agronomy*, 2020, 10(2), 215-229.
- [22] 杨志海,“生产环节外包改善了农户福利吗?——来自长江流域水稻种植农户的证据”,《中国农村经济》,2019年第4期,第73—91页。
- [23] 曾文、邓继忠、高启超、贾瑞昌等,“用P20型植保无人机减量施药防治稻纵卷叶螟”,《农业工程学报》,2021年第15期,第53—59页。
- [24] Zhang, H., Y. Song, Y. Wang, and J. Huang, “Refining Pesticide Use to Reduce Yield Loss: How Drone Plant Protection Transforms Smallholder Pest Management”, *Food Policy*, 2026, 139, 103035.

Contract Stability Promotes Specific Investment to Enhance Agricultural Machinery Service Quality: Empirical Evidence from Trajectory Big Data of AI-Driven Crop Protection UAVs

ZHANG Hangyu

(Fujian Agriculture and Forestry University)

YUAN Lingran LIU Xinyu* HUANG Jikun

(Peking University)

Abstract: This study investigates how contract stability enhances agricultural service quality in the era of artificial intelligence. Although AI reduces monitoring costs, it has not diminished the quality advantages of local providers. Utilizing a unique dataset of centimeter-level drone flight trajectories from City A (2020-2024), the research finds that stable contractual relationships significantly improve performance, increasing trajectory coverage by 4.9 percentage points and pesticide application volume by 13.0 percent. The mechanism analysis reveals that contract stability encourages investment in specific assets, which in turn boosts the adoption of automated piloting systems. Consequently, this paper demonstrates that stable contracts are essential for maximizing the effectiveness of AI. These findings offer important theoretical and practical insights for enhancing AI applications in agriculture and other sectors characterized by asset specificity, fostering both innovation and service optimization.

Keywords: artificial intelligence; socialized agricultural machinery services; contract stability

JEL Classification: O13, D86, Q16

* Corresponding Author: LIU Xinyu, School of Economics, Peking University, No. 5 Yiheyuan Road, Haidian District, Beijing 100871, China; Tel: 86-13730694668; E-mail: xyliu2018@nsd.pku.edu.cn.