

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

目录

附录 I 理论模型 ..... 1

附录 II 数据聚合规则 ..... 6

附录 III 个体飞手的介绍 ..... 7

附录 IV 成本收益核算 ..... 8

附录 V 附表及附图 ..... 9

参考文献 ..... 18

## 附录 I 理论模型

不完全合约的理论文献指出，在缺乏正式合同执行的情况下，交易双方可以依靠非正式机制来保证合同履行（Macchiavello, 2022）。在这些机制中，基于信任或声誉的长期关系是研究最广泛的理论机制之一（Baker et al., 2002; Levin, 2003）。Baker 等（2002）将其总结为“关系合约”机制，关系合约是由未来“关系价值”维持的非正式协议，虽无法通过第三方（如法院）强制执行，但可通过自我执行的方式实现，即当继续合作的收益总和大于违约的收益总和时，服务提供商会放弃机会主义行为，提供高质量服务。Levin（2003）进一步指出，关系合约的激励强度受到一个根本性的限制：可信的奖惩力度不能超过这段关系所能产生的未来总剩余的折现值。

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。模型的核心概念“资产专用性”是经济学领域的一个经典议题。以往的研究对此有深入探讨，例如，Joskow（1988）在研究煤电厂选址时详细论述了地点专用性。他指出，发电厂一旦为利用特定煤矿而建于其旁，极高的搬迁成本便构成了空间上的物理锁定。另一类是人力资本专用性，如 Acemoglu and Pischke（1999）与 Baker et al.（2002）所讨论的企业培训投资。这类投资体现于人本身，不仅会随时间折旧，还存在因员工离职而流失的风险。

然而，本研究关注的自动驾驶服务所需的高精度地图资产，其专用性展现出与传统资产截然不同的新特性。首先，作为一种数字资产，其边际复用成本近乎为零，且无需计算传统意义上的资产折旧。其次，它表现出一种极端的地点专用性：高精度地图是完全针对特定地块（精度可达厘米级）生成的，对其他地块毫无价值，因此也无需考虑转卖或改变用途的问题。这些新特性为我们运用和发展关系合约理论提供了独特的研究视角。本文将约束（例如激励相容、动态执行）整合为一个或几个核心约束，然后在一个总盈余最大化的框架下求解。

### （一）模型的基本设定

本文模型的具体设定如下，首先模型的参与人包括风险中性的委托人（农户）与风险中性的代理人（飞手）。博弈开始时，飞手选择一项专用性投资水平  $I \geq 0$ 。这项投资可以理解为飞手为实现自动化作业而投入的时间、精力与技术成本，如为特定地块绘制数字地图等。该投资为一次性沉没成本，其成本函数为  $\psi(I)$ 。在后续的无限期合作中，飞手在每一期都需要选择一个服务努力水平  $e_t \geq 0$ 。这项努力可以理解为在手动操作模式下，飞手为保证土地喷洒均匀、覆盖完全所需付出的心力与体力。其成本函数为  $c(e)$ 。

双方的合作关系以一个共同的贴现因子  $\delta \in [0, 1]$  进行贴现。 $\delta$  的核心经济学含义是合约稳定性。在农业生产这一充满不确定性的环境中， $\delta$  值越高，代表双方的合作关系越稳固，能够稳定持续到下一期的概率越大。飞手的综合投入（专用性资产投资  $I$  和服务努力水平  $e$ ）共同决定了服务质量，并最终体现为一个可观测的、但带有噪音的产出信号  $y$ （例如，作物长势、产量等）。为简化分析，我们假设最终的服务质量，即产生“好”结果的概率为  $P(I, e)$ ，由投资和努力共同决定。在关系合约下，双方通过一个自执行的协议进行支付分配。

### （二）农户的收益与飞手的报酬

基于以上设定，当服务质量为“好”时，概率为  $P(I, e)$ ，农户的收益为  $V_H$ ，当服务质量为“坏”时，概率为  $V_L$ ，本文假设  $V_H > V_L > 0$ ，农户的期望毛收益为  $P(I, e) * V_H + (1 - P(I, e)) * V_L$ ；飞手的报酬由一个固定的基础工资  $w$  和一个浮动的绩效奖金  $b$  构成，当服务质量为“好”时，飞手的报酬为  $W_H = w + b_H$ ，当服务质量为“坏”时，飞手的报酬为  $W_L = w + b_L$ ，本文假设  $b_H > b_L$  来提供激励，激励的强度可由奖金差距  $\Delta b = b_H - b_L$  来衡量。

### （三）构建总盈余与约束

总盈余  $S(I, e)$  为每期期望的总产出减去每期期望成本和年金化的一次性投资成本：

$$S(I, e) = P(I, e) * V_H + (1 - P(I, e)) * V_L - c(e) - (1 - \delta) * \psi(I) \quad (I.1)$$

飞手的激励相容约束为选择努力  $e$  来最大化其当期的期望报酬净值：

$$\text{Max}_e [P(I, e) * W_H + (1 - P(I, e)) * W_L] - c(e) \quad (\text{I.2})$$

依据 Levin(2003)，关系合约的动态执行约束规定了报酬的浮动范围  $\sup W - \inf W$  必须是可信的，在本文的设定中这个浮动范围为  $W_H - W_L = \Delta W$ ，由于可信的奖惩力度不能超过这段关系所能产生的未来总剩余的折现值，用方程式表达出来即为：

$$\Delta W \leq \delta / (1 - \delta) * (S - \bar{S}) \quad (\text{I.3})$$

其中， $S$  为方程式 A1 定义的总盈余， $\bar{S}$  为常数，即为双方不合作时获得的外部总收益。

#### （四）建立求解最优化问题

本文的目标是最大化总盈余  $S$ ，同时受到激励相容和动态执行约束

$$\begin{aligned} \text{Max}_{I, e} S(I, e) &= P(I, e) * V_H + (1 - P(I, e)) * V_L - c(e) - (1 - \delta) * \psi(I) \\ \text{s.t. } e &\in \arg\max_e [P(I, e) * W_H + (1 - P(I, e)) * W_L] - c(e) \\ \Delta W &\leq \delta / (1 - \delta) * (S - \bar{S}) \end{aligned} \quad (\text{I.4})$$

由于这是一个复杂的、约束条件中包含目标函数本身的优化问题，完全解出上述函数的解析解非常繁琐，此处本文通过分析约束的性质来推导假说的方向。为获得清晰的解析解，并揭示核心经济机制，本文进一步将模型中的关键函数设定为具体形式，这些设定在劳动经济学和合约理论的文献中被广泛采用。

假说 H1：更稳定的合约能带来更高的服务质量。

当合约稳定性  $\delta$  提高时， $\Delta W \leq \delta / (1 - \delta) * (S - \bar{S})$  式子右边的  $\delta / (1 - \delta)$  增加，表明农户可以用来激励飞手的资源提高，更高的激励资源使得飞手可以提供更优的  $(I, e)$  组合，从而得到更高的服务质量  $P(I, e)$ ，即  $\partial P^* / \partial \delta > 0$ 。

假说 H2：合约稳定性通过强化对事前投资回报的保障的机制，显著促进飞手投资高精地图资产并使用自动驾驶技术。

当合约稳定性  $\delta$  提高时，由于  $\Delta W$  增加，未来飞手得到高回报的方案会更加可信，飞手在期初会预见到这一点，知道自己期初的高投资可以在未来得到回报，因此，其更愿意投入较高的期初投资  $I^*$ ，即  $\partial I^* / \partial \delta > 0$ 。

为获得清晰的解析解，并揭示核心经济机制，我们将模型中的关键函数设定以下具体形式。这些设定在劳动经济学和合约理论的文献中被广泛采用。

**成本函数：**我们假设投资成本与努力成本均为标准的二次形式，体现了边际成本递增的特征。事前投资成本： $\psi(I) = \frac{\gamma}{2} I^2$ 。其中， $\gamma > 0$  是投资的成本系数，代表了进行专用性投资的难度或成本。 $\gamma$  越大，投资越“昂贵”。事后努力成本： $c(e) = \frac{k}{2} e^2$ 。其中， $k > 0$  是努力的成本系数，代表了服务过程中付出努力的辛苦程度。 $k$  越大，努力越“辛苦”。

**服务质量的生产函数：**我们假设事前投资与事后努力在决定最终服务质量时，存在一定的互补性和替代性。我们采用一个类似柯布一道格拉斯生产函数的形式来刻画服务质量（以达成“好”结果的概率  $P$  来衡量）：

$$P(I, e) = \sqrt{I \cdot e} \quad (\text{I.5})$$

本文借鉴 Levin (2003) 对自执行关系合约的分析框架，其核心结论是，最优合约通常可以采取一种平稳 (Stationary) 形式，即每一期都采用相同的激励方案。模型的求解分为两步：首先，在给定一个服务质量目标  $P_0$  的前提下，求解飞手如何最小化其成本；其次，也是更关键的一步，是分析这个服务质量目标  $P_0$  如何由双方的激励约束所内生决定。

#### （五）给定合约时飞手的静态优化问题

飞手的总成本 (Total Cost, TC) 由两部分构成：第一阶段发生的一次性投资成本  $\psi(I)$ ，以及第二阶段无限期合作中，每一期努力成本  $c(e)$  的现值之和。其表达式为：

$$TC(I, e) = \psi(I) + \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t c(e) = \frac{\gamma}{2} I^2 + \frac{1}{1 - \delta} \cdot \frac{k}{2} e^2 \quad (\text{I.6})$$

因此，飞手的优化问题可以形式化地表述为：

$$\begin{aligned} \min_{I \geq 0, e \geq 0} \quad & TC(I, e) = \frac{\gamma}{2} I^2 + \frac{k}{2(1-\delta)} e^2 \\ \text{s.t.} \quad & \sqrt{I \cdot e} = P_0 \end{aligned} \quad (\text{I.7})$$

这是一个标准的约束最优化问题。我们首先从约束条件  $\sqrt{I \cdot e} = P_0$  出发，可以解出事后努力  $e$  与事前投资  $I$  之间的关系： $e = \frac{P_0^2}{I}$ 。将其代入总成本函数，消去变量  $e$ ，从而将问题转化为一个仅关于投资  $I$  的无约束优化问题：

$$TC(I) = \frac{\gamma}{2} I^2 + \frac{k}{2(1-\delta)} \left( \frac{P_0^2}{I} \right)^2 = \frac{\gamma}{2} I^2 + \frac{kP_0^4}{2(1-\delta)} I^{-2} \quad (\text{I.8})$$

为了求得最小化总成本的最优投资水平  $I^*$ ，我们对  $TC(I)$  求关于  $I$  的一阶导数，并令其等于零：

$$\frac{dTC}{dI} = \gamma I - 2 \cdot \frac{kP_0^4}{2(1-\delta)} I^{-3} = \gamma I - \frac{kP_0^4}{(1-\delta)} I^{-3} = 0 \quad (\text{I.9})$$

由此，我们求解出均衡状态下的最优事前投资水平  $I^*$ ：

$$I^*(P_0, \delta) = P_0 \left( \frac{k}{\gamma(1-\delta)} \right)^{1/4} \quad (\text{I.10})$$

将求得的  $I^*$  代回到约束关系  $e = P_0^2/I$  中，我们便可得到与之对应的最优事后努力水平  $e^*$ ：

$$e^*(P_0, \delta) = P_0 \left( \frac{\gamma(1-\delta)}{k} \right)^{1/4} \quad (\text{I.11})$$

#### （六）合约安排的激励相容条件

虽然我们在静态优化问题中求解了飞手在给定服务质量目标  $P_0$  下的成本最小化投入组合。然而，这个目标服务质量  $P_0$  本身并非外生给定，它内生于双方的合作关系之中，并受到激励约束的限制。参照 Levin（2003）的理论，在机会主义行为环境下，最优合约通常会复杂的绩效信息压缩为简单的支付结构。我们据此设定支付合约：农户（委托人）向飞手（代理人）支付一笔固定的基础报酬  $w$ 。如果最终产出结果为“好”（发生概率为  $P_0$ ），农户额外支付一笔奖金  $b$ 。

为了让这个合约能够自执行，它必须同时满足两个核心约束：飞手的激励相容约束和农户的动态执行约束。在完成投资  $I^*$  后，飞手在每一期都会选择事后努力  $e$  来最大化其当期期望效用： $w + P(I^*, e) \cdot b - \frac{k}{2} e^2$ 。为了激励飞手选择最优努力水平  $e^*$ ，该水平必须满足最大化上式的一阶条件：

$$\frac{\partial P(I^*, e^*)}{\partial e} \cdot b - k e^* = 0 \quad (\text{I.12})$$

我们将服务质量生产函数的偏导数  $\frac{\partial P}{\partial e} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{I^*}{e^*}}$  代入，得到激励奖金  $b$  必须满足：

$$b_{\text{req}} = 2k e^* \sqrt{\frac{e^*}{I^*}} \quad (\text{I.13})$$

公式（I.13）明确了为激励飞手付出特定努力  $e^*$  所必需的最小奖金  $b$  的额度。将前面求出的最优解  $I^* = P_0 \left( \frac{k}{\gamma(1-\delta)} \right)^{1/4}$  和  $e^* = P_0 \left( \frac{\gamma(1-\delta)}{k} \right)^{1/4}$  代入上式进行化简，由于  $\frac{e^*}{I^*} = \left( \frac{\gamma(1-\delta)}{k} \right)^{1/2}$ ，可得：

$$b_{\text{req}} = 2k \cdot P_0 \left( \frac{\gamma(1-\delta)}{k} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{\gamma(1-\delta)}{k} \right)^{1/4} = 2P_0 \sqrt{k\gamma(1-\delta)} \quad (\text{I.14})$$

农户支付奖金的承诺必须是可信的。根据 Levin（2003），这一约束意味着，单期毁约（不支付奖金  $b$ ）的诱惑，不能超过因此而损失的未來合作关系的价值。令  $\Pi_F$  为农户在飞手提供高质量服务时的单期净收益（若提供低质量服务假设收益为 0），则其动态执行约束为：

$$b \leq \frac{\delta}{1-\delta} \Pi_F \quad (\text{I.15})$$

这个不等式是关系合约的核心，它为可信的奖金设定了一个上限  $b_{\text{max}} = \frac{\delta}{1-\delta} \Pi_F$ 。一个服务质量目标  $P_0$  是可持续的，当且仅当激励它所必需的奖金是可信的，即  $b_{\text{req}} \leq b_{\text{max}}$ ：

$$2P_0 \sqrt{k\gamma(1-\delta)} \leq \frac{\delta}{1-\delta} \Pi_F \quad (\text{I.16})$$

由此，我们解得在给定合约稳定性  $\delta$  下，关系合约可以实现的最高服务质量水平  $P_0^{\text{max}}$ ：

$$P_0^{\text{max}}(\delta) = \frac{\delta \Pi_F}{2\sqrt{k\gamma(1-\delta)}^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{I.17})$$

进一步地，回顾公式（I.10），我们将最高服务质量目标  $P_0^{\text{max}}(\delta)$  重新代入投资决策方程中，即可求出在关系合约下，飞手对自动驾驶高精度地图资产的内生最优投资水平  $I^{\text{max}}(\delta)$ ：

$$I^{\text{max}}(\delta) = P_0^{\text{max}}(\delta) \left( \frac{k}{\gamma(1-\delta)} \right)^{\frac{1}{4}} = \frac{\delta \Pi_F}{2\gamma^{\frac{3}{4}} k^{\frac{1}{4}} (1-\delta)^{\frac{7}{4}}} \quad (\text{I.18})$$

### （七）理论假说的数学演绎与证明

基于上述求得的解析解，我们可以通过对核心参数（合约稳定性  $\delta$ ）求比较静态偏导数，为前文提出的假说提供严谨的数学证明。

**证明假说 H1：**更稳定的合约能带来更高的服务质量。对公式（I.17）中服务质量水平  $P_0^{\text{max}}$  关于合约稳定性  $\delta$  求一阶偏导数：

$$\frac{\partial P_0^{\max}}{\partial \delta} = \frac{\Pi_F}{2\sqrt{k\gamma}} \cdot \frac{1 \cdot (1-\delta)^{\frac{3}{2}} - \delta \cdot (-\frac{3}{2})(1-\delta)^{\frac{1}{2}}}{(1-\delta)^3} = \frac{\Pi_F \left(1 + \frac{1}{2}\delta\right)}{2\sqrt{k\gamma}(1-\delta)^{\frac{5}{2}}}$$

由于贴现因子  $\delta \in [0,1)$  以及各项参数均大于 0，因此  $\frac{\partial P_0^{\max}}{\partial \delta} > 0$  严格成立。这表明当合约稳定性提高时，农户从未来长期合作中获得的折现价值增加，其能够承诺的奖金上限随之提高。这使得农户可以可信地激励飞手提供更优的投入组合，从而实现更高的服务质量目标，严格证明了假说 H1。

**证明假说 H2：** 合约稳定性显著促进飞手投资高精地图资产并使用自动驾驶技术。对公式（I .18）中自动驾驶内生最优投资水平  $I^{\max}$  关于合约稳定性  $\delta$  求一阶偏导数：

$$\frac{\partial I^{\max}}{\partial \delta} = \frac{\Pi_F}{2\gamma^{\frac{3}{4}}k^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{1 \cdot (1-\delta)^{\frac{7}{4}} - \delta \cdot (-\frac{7}{4})(1-\delta)^{\frac{3}{4}}}{(1-\delta)^{\frac{7}{2}}} = \frac{\Pi_F \left(1 + \frac{3}{4}\delta\right)}{2\gamma^{\frac{3}{4}}k^{\frac{1}{4}}(1-\delta)^{\frac{11}{4}}}$$

同理可得， $\frac{\partial I^{\max}}{\partial \delta} > 0$  严格成立。这表明自动驾驶专用性资产投资是合约稳定性的严格增函数。合约稳定性的提高放宽了动态执行约束，强化了对事前投资未来高回报的保障机制。飞手在期初会预见自己的高投资在稳固的关系合约中不会遭遇“敲竹杠”，且能够得到长期回报，从而更愿意投入初期的专用性数字资产，在微观机理上严格证明了假说 H2。

## 附录 II 数据聚合规则

数据具体的聚合规则如下：

我们按照“同一天、同一飞手、轨迹中心点落在格点”的标准，将多条原始轨迹聚合成一个观测值。如附图 A10 所示，以飞手 A 在格点 X 的作业为例，在 2020 年 5 月 20 日（第 1 天），该飞手进行了 6 次起降（6 条原始轨迹），但这在我们的回归模型中被聚合成在一个格点的 1 个观测值。

核心指标的计算方式如下：

**作业面积：**该格点内所有原始轨迹作业面积的加总（ $Area_{total} = \sum Area_i$ ）。

**用药量：**该格点内所有原始轨迹消耗药液量的加（ $Water_{total} = \sum Water_i$ ）。

**单位施药量（核心指标）：**等于加总后的总用药量除以总面积（ $Water_{total}/Area_{total}$ ）。

**自动驾驶：**只要该格点内有一条轨迹使用了自动驾驶，该变量即记为 1。

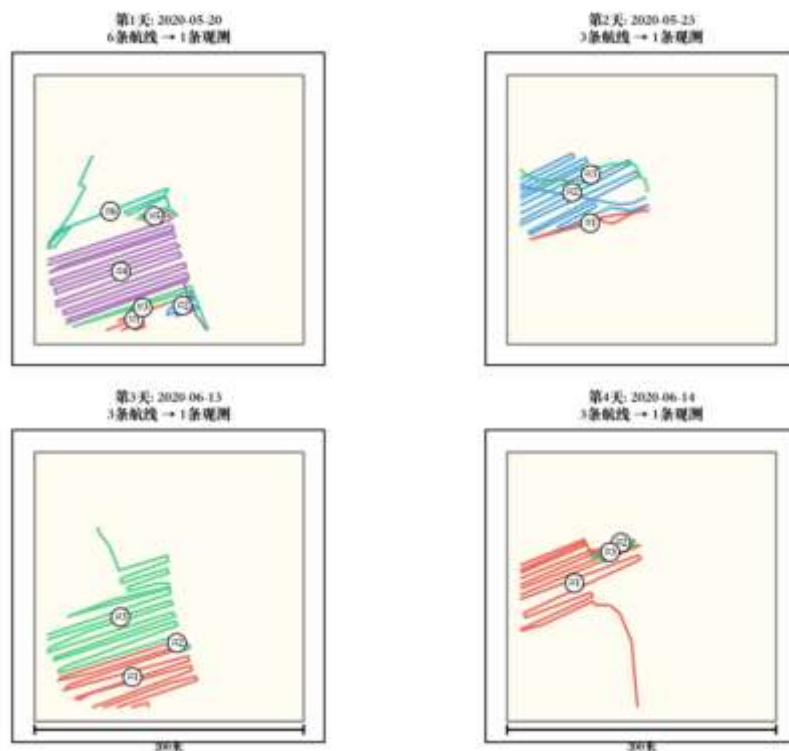


图 II 1 飞手 A 在同一格点 X 四次服务轨迹到格点聚合过程（聚合为四个样本）

### 附录 III 个体飞手的介绍

本研究将“个体飞手”（而非合作社或者公司）确立为核心研究对象。这是因为尽管部分飞手以合作社或农业服务公司形式挂靠，但在实际的植保服务中，95%的飞手或其家庭通常拥有无人机的实际所有权，独立承担作业风险，并享有剩余索取权。在上述模式下，个体飞手才是实质上的决策主体和质量责任人。更重要的是，相比于公司制面临的高昂内部监督成本，“个体飞手”模式实现了劳动者与资产所有者的合一，具有更强的动力维护客户关系。此外，在中国农村熟人社会中，信任与声誉通常嵌入在具体的“人”而非抽象的“公司品牌”之中。因此，个体层面更能精准捕捉服务质量与合约稳定性的逻辑。

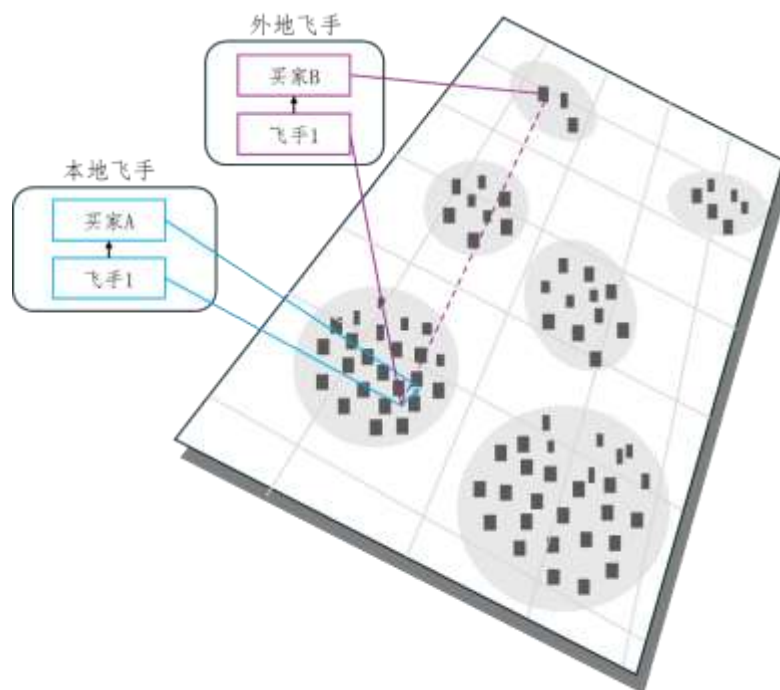


图 III 1 本地和外地飞手示意图

注：灰色阴影代表同一乡镇内，当同一飞手在本地服务时视作本地飞手，前往外地（虚线）时为非本地飞手（紫色）。

## 附录 IV 成本收益核算

综合上述实证估计结果与实地调研的一手资料,本节进一步开展了成本收益核算。首先,针对飞手的投资成本。实地调研数据表明,实施高质量服务所需的专用性资产投资主要是指根据农户地块进行的专用地图测绘,包括时间机会成本与设备损耗两部分,该项一次性测绘成本约为 5 元/亩。若加上常规飞行作业成本,飞手对陌生模地块的首次作业总成本约为 10.5 元/亩。在当地服务市场均价为 10 元/亩的约束下,若缺乏后续合作预期,飞手单次作业将面临 0.5 元/亩的直接亏损。这一数据有力地解释了非本地飞手为何倾向于采取低质量的手动模式,即为了规避专用性资产投资带来的“套牢”风险。

其次,针对农户的成本与收益及综合核算。通过对当地专业人士(经销商 C)的访谈,我们对成本回收周期进行了简单估算(自动驾驶对服务效率的实证分析不在本文的研究范围内)。对于农户而言,自动驾驶虽然导致施药量增加(即农户的药液成本上升),但带来了更显著的服务质量提升。基于单位时间服务质量提升 20%的假设,以作业均值 1.5 升/亩及农户感知的药液价值 5 元/升为基准,自动驾驶带来的服务增量( $0.3 \text{ 升/亩} = 20\% \times 1.5 \text{ 升/亩}$ ),这 0.3 升药带来了约 3 元的挽回损失或增产价值,扣除药液成本后,仍可转化为每亩 1.5 元( $3 - 0.3 \text{ 升/亩} \times 5 \text{ 元/升}$ )的净边际收益(此收益通常通过长期合作中的溢价或业务量稳定性在飞手与农户间分配)。

最后,将上述收益与每亩约 5 元的打点固定成本进行比较可知,需在该地块进行至少 3.33 ( $5/1.5 \approx 1.33$ ) 次作业服务,前期测绘投入即可被服务质量溢价所覆盖。这从成本收益的视角,直观且有力地证实了本文的核心观点:只有在“本地化”所蕴含的长期合约预期下,技术进步带来的质量溢价才能有效覆盖专用性投资的成本,进而实现服务质量的帕累托改进。

## 附录 V 附表及附图



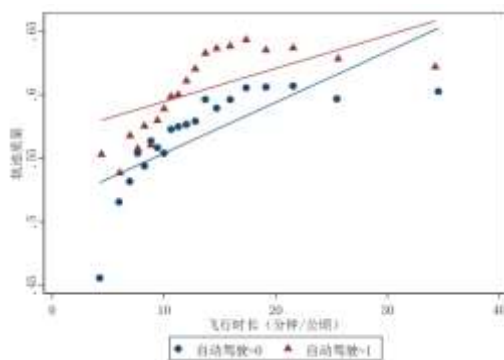
图(a) 农户正在观看飞手的遥控机



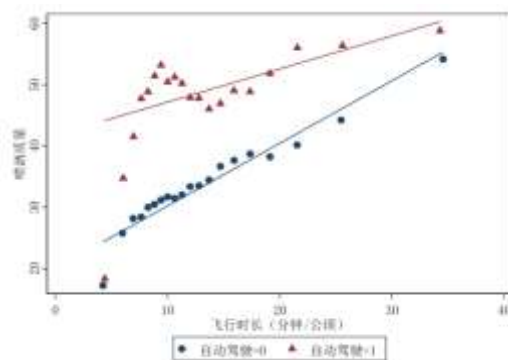
图(b) 遥控器实时显示飞行轨迹与质量信息

图 A1 传感器和数字技术改进了服务质量的可监督性

注：数据来源为作者调研实地拍摄。



(a) 不同作业模式下飞行时间与轨迹质量的关系



(b) 不同作业模式下飞行时间与喷洒质量的关系

图 A2 自动驾驶和手动驾驶的单位飞行时长的服务质量对比

注：数据来源为本文轨迹数据集，图片采用 STATA 中 binscatter 包进行绘制。

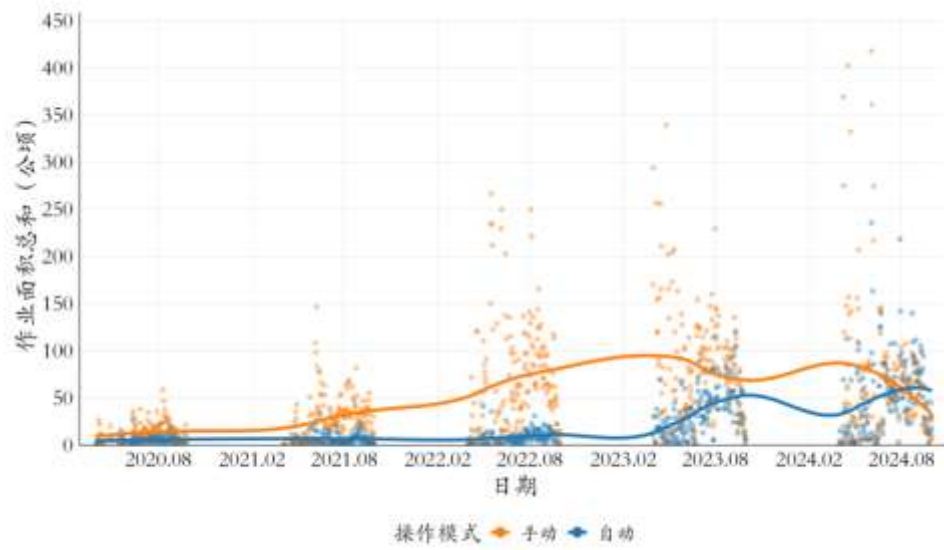
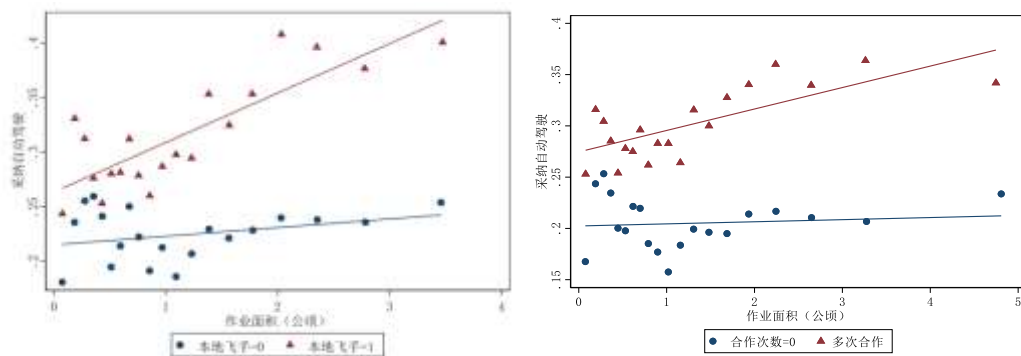


图 A3 自动驾驶的采纳趋势

注：数据来源为本文轨迹数据集，每个散点代表一个作业日。



(a) 不同主体作业面积与自动驾驶采纳的关系      (b) 不同合作模式作业面积与自动驾驶采纳的关系

图 A4 自动驾驶采纳与合约稳定性

注：数据来源为本文轨迹数据集，图片采用 STATA 中 binscatter 包进行绘制。

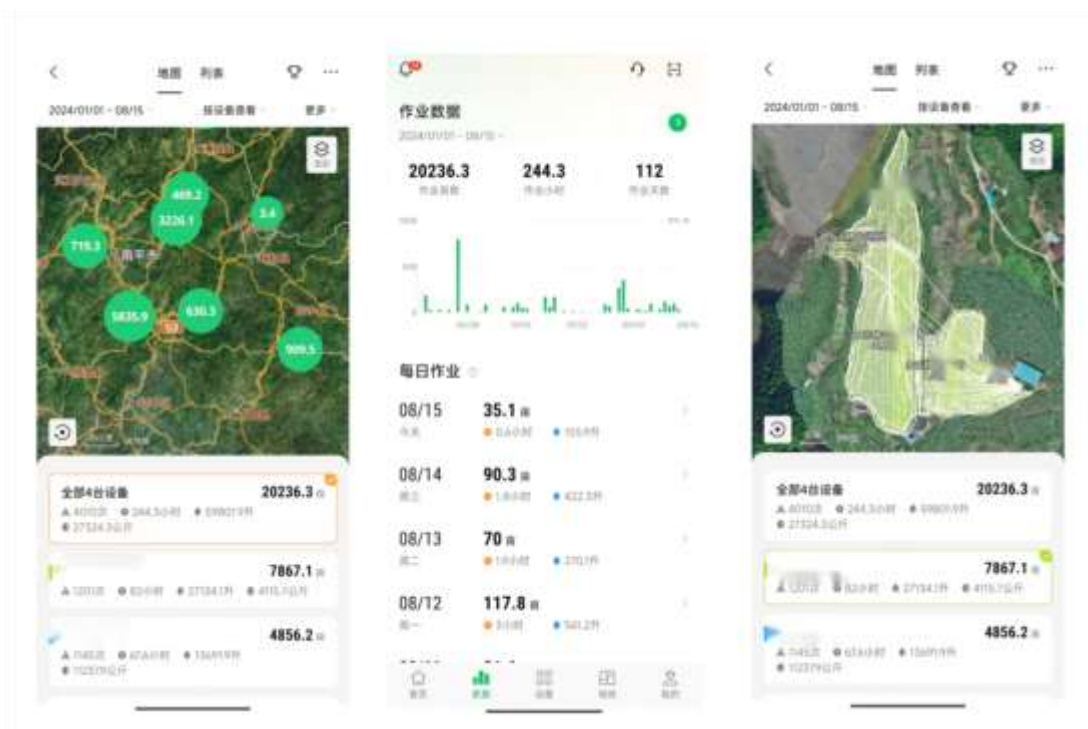


图 A5 无人机操作系统界面截图

注：数据来源某飞手大疆农服，受访者授权截图。

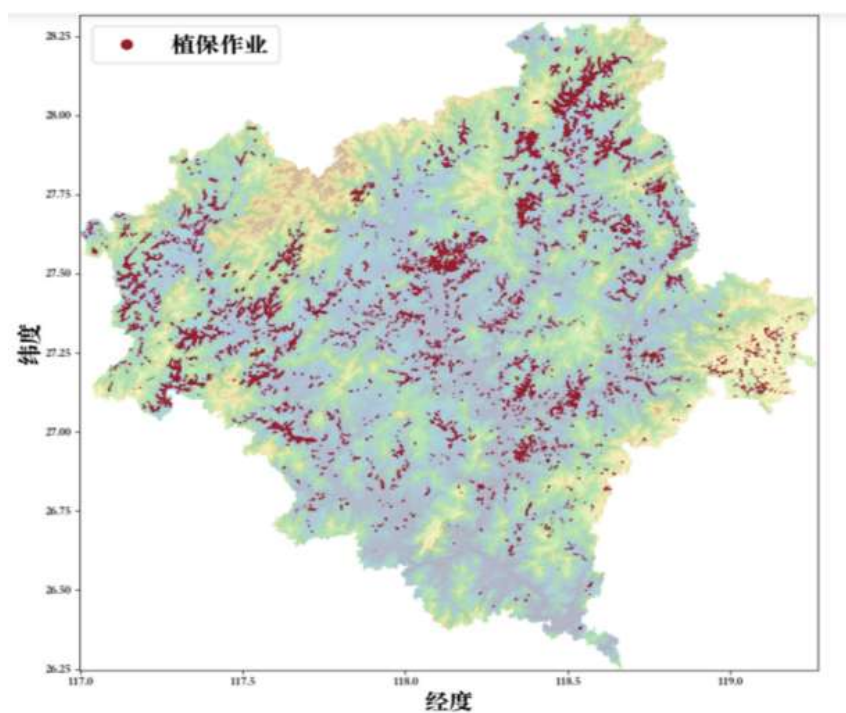


图 A6 样本轨迹的空间分布

注：红色区域为无人机轨迹途径。底图为 A 市的坡度地形图。

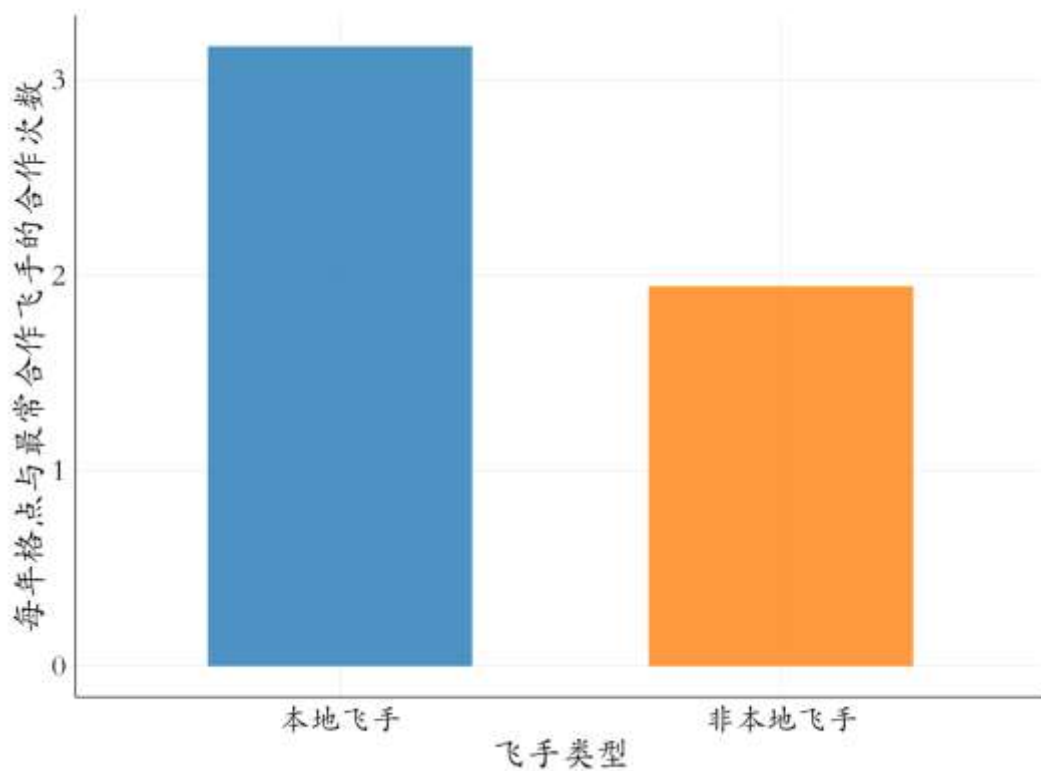


图 A7 格点匹配的飞手类型和合作次数的关系

注：本地飞手指该格点该年存在至少一次由本地飞手服务的经历。在存在本地飞手服务的格点中，每年与最常合作的机手合作次数为 3.2 次，而不存在本地飞手的格点中，每年与最常合作的飞手合作次数仅为 1.9 次。这种高频的重复博弈意味着交易双方的合约具有更强的自我执行力。对于飞手而言，本地化带来的稳定合作预期降低了专用性资产（如针对特定地块的测绘数据）的投资风险，从而激励其通过提升服务质量来维持长期的合作剩余。

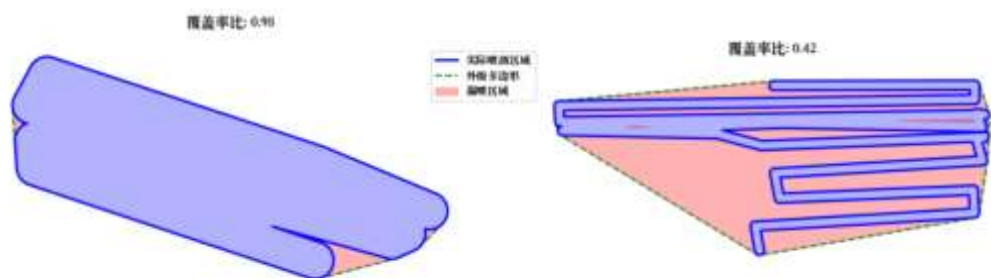


图 A8 不同作业轨迹的覆盖率可视化图

注：数据来源为本文轨迹数据集。无人机存在有效喷幅，若行距宽于有效喷幅，则沉积质量下降。如图所示，正常作业轨迹（如 R8554365635）的覆盖率接近 98%，表明飞行路径高度规范且有效；而问题轨迹（如 R0000020111）的覆盖率仅为 42%，说明存在大量未覆盖区域。

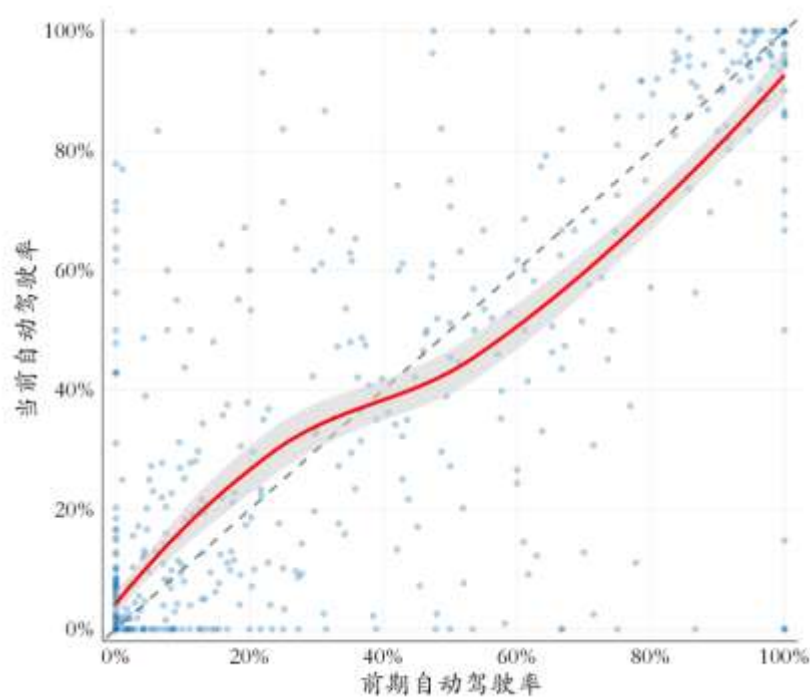


图 A9 自动驾驶采纳的时序相关性分析

注：数据来源 NPDS 轨迹数据，作者计算并绘制。红实线为格点前一期自动驾驶采纳率（x）轴与当前自动驾驶采纳率的拟合线，虚线为 45 度线，红线在 45 度线附近说明自动驾驶的资产投资具有较好的可复用性。

表 A1 合约稳定性如何直接影响飞手在专用性资产投资决策

| 访谈对象                    | 核心观点引述                                                | 内部访谈编号     |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|------------|
| 飞手 A<br>（一线服务提供者）       | “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。”                | INT-FS-01  |
| 经销商 B<br>（市场观察者）        | “给本地服务的飞手质量会更好一些，自动驾驶使用率会更高一些，更好的质量也是他们和非本地飞手的竞争手段。”  | INT-JXS-12 |
| 经销商 C<br>（市场退出者）        | “本来我在城里面有植保队的，但是他们本地飞手更有时间做地图质量更好，我卷不过他们现在就专心做销售和维修。” | INT-JXS-06 |
| 经销商 C<br>（当地较早从事植保业务的人） | “早年（2020 年之前）农户缺乏植保知识时，交易双方对服务质量缺乏统一认知。但近年来农户学会了看遥控器  | INT-JXS-07 |

|      |                                                        |           |
|------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 飞手 C | 参数，所以植保服务质量的<br>信息较为透明。”                               | INT-FS-04 |
|      | “我给很多客户服务的时候，<br>客户经常不在场，只要求我<br>事后把遥控器数据截屏给客<br>户即可。” |           |

注：访谈为作者团队 2023 年-2025 年在 A 市实地调研的一手资料整理，旨在揭示合约稳定性如何直接影响飞手在专用性资产（高精度地图）上的投资决策，并进而决定其市场竞争策略与最终结局。

表 A2 水稻田不同自动驾驶地图打点方式的操作方法与场景

| 打点方式     | 操作方法   | 操作时间(分钟/亩) | 时间成本(元/亩) | 地图精准度 |
|----------|--------|------------|-----------|-------|
| 卫星十字准星打点 | 拖动地图标定 | 2 分钟       | 5         | 差     |
| 飞行器测绘打点  | 飞行标定   | 3 分钟       | 7.5       | 中     |
| 手持打点     | 现场走点标定 | 6 分钟       | 15        | 好     |

注：数据来源为大疆无人机使用说明书和作者实地调研估算。折合时间由作者下乡采访飞手估算。时间成本按照每小时作业机会成本 150 元计算。假设单次作业电池损耗成本为 3 元/亩，容易计算得出，在 10 元每亩的服务单价下，仅单次作业情况下采用自动驾驶技术无法覆盖作业成本。基于案例调研，自动驾驶能使得单位时间服务质量提升 20%，假设每升水农户认为价值 5 元，均值为 1.5L，自动驾驶提升 0.3L 价值 1.5 元。每亩成本约为 5 元左右。经简单计算，飞行器打点需要至少 3.33 次服务回本。

表 A3 NPDS 轨迹数据变量定义表

| 变量名称         | 变量定义和单位                          | 数据来源        |
|--------------|----------------------------------|-------------|
| <b>被解释变量</b> |                                  |             |
| 轨迹占凸包面积比例    | 航迹缓冲有效行距后面积占凸包 <sup>1</sup> 面积比例 | NPDS APP 轨迹 |
| 施药液量         | 施药液量（升/公顷） <sup>2</sup>          | NPDS APP 轨迹 |
| 自动驾驶         | 是否采纳自动驾驶技术                       | NPDS APP 轨迹 |
| 作业行距         | 自动驾驶模式下相邻航线之间的距离（米）              | NPDS APP 轨迹 |
| <b>关注变量</b>  |                                  |             |
| 本地飞手         | 是否是本地即同乡镇飞手（是=1，否=0）             | NPDS APP 轨迹 |
| <b>控制变量</b>  |                                  |             |
| 作业面积         | 格点中飞行轨迹总面积取对数                    | NPDS APP 轨迹 |
| 飞手教育年限       | 飞手受教育年限（年）                       | NPDS 飞手     |
| 飞手非农就业       | 飞手是否有过非农就业经历（是=1，否=0）            | NPDS 飞手     |
| 服务价格         | 水稻的单位面积服务收费（元/公顷） <sup>3</sup>   | NPDS 飞手     |
| 温度           | 作业服务当天平均气温（摄氏度）                  | ERA5-Land   |
| 降水           | 作业服务作业当天累积降水量（毫米）                | ERA5-Land   |
| <b>工具变量</b>  |                                  |             |

1 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。具体可见附录 1 附图 3。  
2 药液指农药和水不同比例的混合物。  
3 从飞手开始从事服务当年开始询问至 2024 年,每年每个飞手一个观测值。

|        |                                |        |
|--------|--------------------------------|--------|
| 降雨预报错误 | 格点次日天气预报降雨但实际为晴天<br>(是=1, 否=0) | 历史预报数据 |
|--------|--------------------------------|--------|

表 A4 稳健性检验：将合约稳定性测度替换为本县飞手

| 被解释变量   | 轨迹占凸包面积的比例           |                      | Log(施药液量)            |                      |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         | (1)                  | (2)                  | (3)                  | (4)                  |
| 本县飞手    | 0.076***<br>(0.003)  | 0.062***<br>(0.005)  | 0.117***<br>(0.010)  | 0.127***<br>(0.013)  |
| 作业面积    | -0.013***<br>(0.001) | -0.005***<br>(0.001) | -0.116***<br>(0.004) | -0.100***<br>(0.003) |
| 飞手受教育年限 | -0.005***<br>(0.001) | -0.004***<br>(0.001) | -0.017***<br>(0.002) | 0.002<br>(0.002)     |
| 飞手非农就业  | -0.005**<br>(0.003)  | -0.004<br>(0.004)    | 0.014<br>(0.010)     | -0.034***<br>(0.011) |
| 服务价格    | 0.000<br>(0.000)     | 0.000<br>(0.000)     | 0.001***<br>(0.000)  | 0.001***<br>(0.000)  |
| 温度      | 0.004***<br>(0.000)  | 0.001**<br>(0.000)   | 0.027***<br>(0.001)  | 0.006***<br>(0.001)  |
| 降水      | 0.000***<br>(0.000)  | 0.000**<br>(0.000)   | 0.001*<br>(0.000)    | 0.001*<br>(0.000)    |
| 格点固定效应  | No                   | Yes                  | No                   | Yes                  |
| 时间固定效应  | No                   | Yes                  | No                   | Yes                  |
| 机型固定效应  | Yes                  | Yes                  | Yes                  | Yes                  |
| 观测值数量   | 46,874               | 44,054               | 46,874               | 44,054               |
| R2      | 0.134                | 0.388                | 0.453                | 0.731                |

注：括号内为聚类至格点的稳健标准误。\*, \*\*, \*\*\*分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平。

表 A5 稳健性检验：更换格点大小至 100m 或 300m

| 被解释变量 | 100m 格点             |                     | 300m 格点             |                     |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|       | 轨迹占凸包               | Log(施药液             | 轨迹占凸包               | Log(施药液量)           |
|       | 面积的比例               | 量)                  | 面积的比例               |                     |
|       | (1)                 | (2)                 | (3)                 | (4)                 |
| 本地飞手  | 0.049***<br>(0.003) | 0.106***<br>(0.008) | 0.046***<br>(0.005) | 0.128***<br>(0.016) |

|                |                      |                      |                      |                      |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 作业面积           | -0.003**<br>(0.001)  | -0.100***<br>(0.003) | -0.004**<br>(0.002)  | -0.102***<br>(0.005) |
| 飞手受教育年限        | -0.003***<br>(0.001) | 0.004***<br>(0.002)  | -0.002***<br>(0.001) | 0.006*<br>(0.003)    |
| 飞手非农就业         | 0.008***<br>(0.003)  | -0.001<br>(0.008)    | 0.018***<br>(0.005)  | -0.020<br>(0.018)    |
| 服务价格           | -0.000**<br>(0.000)  | 0.001***<br>(0.000)  | -0.000<br>(0.000)    | 0.000<br>(0.000)     |
| 温度             | 0.001***<br>(0.000)  | 0.006***<br>(0.001)  | 0.002***<br>(0.001)  | 0.005***<br>(0.001)  |
| 降水             | 0.000**<br>(0.000)   | 0.001***<br>(0.000)  | 0.000<br>(0.000)     | -0.001*<br>(0.000)   |
| 格点固定效应         | Yes                  | Yes                  | Yes                  | Yes                  |
| 时间固定效应         | Yes                  | Yes                  | Yes                  | Yes                  |
| 机型固定效应         | Yes                  | Yes                  | Yes                  | Yes                  |
| 观测值数量          | 64,054               | 64,054               | 19,590               | 19,590               |
| R <sup>2</sup> | 0.411                | 0.763                | 0.366                | 0.711                |

注：括号内为聚类至格点的稳健标准误。\*, \*\*, \*\*\* 分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平。

表 A6 稳健性检验：将服务质量测度更换为孔洞率

| 被解释变量   | 孔洞率                  |                      |                      |                      |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         | (1)                  | (2)                  | (3)                  | (4)                  |
| 本地飞手    | -0.016***<br>(0.001) | -0.011***<br>(0.001) | -0.013***<br>(0.001) | -0.011***<br>(0.002) |
| 作业面积    |                      | 0.010***<br>(0.000)  | 0.009***<br>(0.000)  | 0.008***<br>(0.000)  |
| 飞手受教育年限 |                      | 0.001***<br>(0.000)  | 0.001***<br>(0.000)  | 0.001***<br>(0.000)  |
| 飞手非农就业  |                      | 0.003***<br>(0.001)  | 0.006***<br>(0.001)  | 0.003**<br>(0.002)   |
| 服务价格    |                      | -0.000***<br>(0.000) | -0.000**<br>(0.000)  | 0.000<br>(0.000)     |
| 温度      |                      | -0.001***<br>(0.000) | -0.001***<br>(0.000) | 0.001***<br>(0.000)  |
| 降水      |                      | -0.000               | -0.000               | 0.000                |

|                |        |         |         |         |
|----------------|--------|---------|---------|---------|
|                |        | (0.000) | (0.000) | (0.000) |
| 格点固定效应         | No     | No      | No      | Yes     |
| 时间固定效应         | No     | No      | No      | Yes     |
| 机型固定效应         | No     | No      | Yes     | Yes     |
| 观测值            | 46,874 | 46,874  | 46,874  | 44,054  |
| R <sup>2</sup> | 0.011  | 0.033   | 0.064   | 0.327   |

注：括号内为聚类至格点的稳健标准误。\*,\*\*,\*\*\*分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平。

表 A7 稳健性检验：将月度固定效应换为日度

| 被解释变量          | 轨迹占凸包面积的比例          |                     | Log(施药液量)           |                     |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                | (1)                 | (2)                 | (3)                 | (4)                 |
| 本地飞手           | 0.048***<br>(0.004) | 0.045***<br>(0.004) | 0.120***<br>(0.010) | 0.110***<br>(0.010) |
| 控制变量           | No                  | Yes                 | No                  | Yes                 |
| 格点固定效应         | Yes                 | Yes                 | Yes                 | Yes                 |
| 日度固定效应         | Yes                 | Yes                 | Yes                 | Yes                 |
| 机型固定效应         | Yes                 | Yes                 | Yes                 | Yes                 |
| 观测值            | 44,035              | 44,035              | 44,035              | 44,035              |
| R <sup>2</sup> | 0.411               | 0.412               | 0.739               | 0.755               |

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。第（1）-（4）列样本减少的原因为加入格点高维固定效应，只出现一次服务的格点将被删除，下同。

表 A8 稳健性检验：将飞手喷施服务质量替换为水平值

| 被解释变量          | 施药液量水平值             |                     |                     |                     |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                | (1)                 | (2)                 | (3)                 | (4)                 |
| 本地飞手           | 8.024***<br>(0.514) | 4.753***<br>(0.477) | 2.775***<br>(0.351) | 4.718***<br>(0.424) |
| 控制变量           | No                  | Yes                 | Yes                 | Yes                 |
| 格点固定效应         | No                  | No                  | No                  | Yes                 |
| 时间固定效应         | No                  | No                  | No                  | Yes                 |
| 机型固定效应         | No                  | No                  | Yes                 | Yes                 |
| 观测值            | 46,874              | 46,874              | 46,874              | 44,054              |
| R <sup>2</sup> | 0.031               | 0.130               | 0.391               | 0.701               |

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。

## 参考文献

- [1] Acemoglu, D., and Pischke, J. S, “The structure of wages and investment in general training”, *Journal of Political Economy*, 1999, 107(3), 539-572.
- [2] 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.
- [3] Joskow, P. L, “Asset specificity and the structure of vertical relationships: empirical evidence”, *The Journal of Law, Economics, and Organization*, 1988, 4(1), 95-117.
- [4] Levin, J., “Relational Incentive Contracts”, *American Economic Review*, 2003, 93(4), 835-857.
- [5] Macchiavello, R., “Relational Contracts and Development”, *Annual Review of Economics*, 2022, 14(1), 337-362.

注：该附录是期刊所发表论文的组成部分，同样视为作者公开发表的内容。如研究中使用该附录中的内容，请务必在研究成果上注明附录下载出处。