

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2023.06.007

# “公司+农户”模式下农产品精准施肥策略与合作机制

丁雪峰, 吴宇

(三峡大学 经济与管理学院, 湖北 宜昌, 443002)

**摘要:** 为了探讨“公司+农户”农产品供应链中的施肥策略选择与生产成本优化问题, 分别构建基于精准施肥技术实施的公司和农户供应链决策模型, 比较了两类分散决策和集中决策下的供应链绩效, 并通过仿真分析参数灵敏度影响以及契约可行性。研究表明, 精准施肥能够降低生产成本, 合理的施肥策略可提高双方经济效益; 在分散式决策情形下, 公司承担精准施肥成本模式(R)的经济效益低于农户承担模式(F), 后者更能发挥精准施肥的“降本增效”作用; 通过采用“利润共享-成本分担”(TR)和“二部制”(TF)契约, 分别实现了公司模式和农户模式供应链的协调。在协调后, 农户的生产成本降低, 供应链各主体的利润得以改善。

**关键词:** 契约农业; 精准施肥策略; 合作机制; 供应链协调

中图分类号: F224.32

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2023)06-0066-09

## A Precision Fertilization Strategy and Cooperation Mechanism of Agricultural Products under the Mode of "Company + Farmer"

DING Xuefeng, WU Yu

(School of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To explore the optimization of fertilization strategy selection and production cost in a "company+farmer" agricultural supply chain, decision models for companies and farmers based on the implementation of precision fertilization technology are established. The performance of supply chains under two types of decentralized and centralized decision-making is compared, while the impact of parameter sensitivity and the feasibility of contracts are analyzed through simulation. Results show that precision fertilization can reduce production cost, and rational fertilization strategies can improve the economic benefits for both parties. With decentralized decision-making, the economic benefits of the company-borne precision fertilization cost model (R) are lower than the farmer-borne model (F), for the latter can better produce the cost-saving and efficiency-enhancing effects of precision fertilization. By adopting "profit-sharing-cost-sharing" (TR) and "two-part tariff" (TF) contracts, the coordination of the company model and farmer model supply chains is achieved, respectively. After coordination, the production cost of farmers decreases, and the profits of the supply chain stakeholders are improved.

**Key words:** contract farming; precise fertilization strategy; cooperation mechanism; supply chain coordination

当前我国农业发展面临生产成本低、集约化耕作率低、农业污染严重等问题。由于科学指导的缺失, 农户在生产过程中不合理使用化学投入, 如农药、化肥、地膜等, 既降低了农作物产量和品质, 又对环境 and 人体健康造成严重危害。精准施肥是解决高农业生产成本及环境污染的关键措施之一, 越来越多国家采用此技术以提高农业效益。因此, 施

肥与农业生产管理问题已成为学者研究的焦点。

《绿色农业发展技术导则》(2018-2030)强调, 精准施肥是绿色农业关键技术。研究显示, 肥料成本占农业生产成本逾40%<sup>[1]</sup>, 精准施肥能有效降低生产成本, 确保农业经济效益。常见精准施肥技术包括表面灌溉、滴灌和微喷施肥<sup>[2]</sup>, 滴灌技术由高价值作物扩展至大田作物, 已在全球范围普及<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2022-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71771139)

作者简介: 丁雪峰(1974—), 男, 湖北省人, 教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理。

相较于传统施肥方法, 精准施肥技术节省劳动力、降低化肥成本及减少环境污染。然而, 精准施肥前期准备工作繁琐, 包括土壤测量、施肥设备和技术维护等<sup>[4-5]</sup>。鉴于中国农户生产规模小, 专业化程度低, 短期内农民可能因为精准施肥初期成本投入过高而“入不敷出”。通过契约农业方式推动精准施肥技术应用, 不仅可降低农户技术门槛, 还可实现规模经济效益<sup>[2]</sup>。实际生产中, 精准施肥技术的主导角色及成本利益分配问题值得探讨。

契约农业作为整合农产品生产与技术管理的常见方法, 对供应链中的参与者具有激励效应<sup>[6]</sup>。在我国农村地区, “公司+农户”模式作为最常见的农业产业化经营模式, 通过签订契约建立供销关系, 并可能发展为紧密合作, 如合资运营、委托生产、技术转让等<sup>[7]</sup>。显然, 施肥技术指导与成本核算已成为利益相关者决策与契约设计的核心内容: 农户寻求与能提高收入的公司结盟, 公司对农户带来的收益影响农户的决策程度<sup>[8]</sup>。例如, 北京傲禾测土肥业连锁有限公司秉承“降低化肥成本、减轻土壤污染、增加农民收益”的经营理念, 将先进信息科技融入农业生产, 助力农户实现“精准施肥最后一公里”<sup>[9]</sup>。如今, 类似公司正逐步在全国范围建立县、镇、村三级销售服务网络体系, 公司提供精准施肥技术以助农户增产增收, 同时通过农产品代理销售获利。然而, 我国精准施肥技术在农业生产中的具体运营模式仍在探索阶段, 技术承担主体在不同场景下尚不明确。在技术推广初期, 受农民文化素养、认知水平等因素制约, 付费使用新技术将增加推广难度; 而公司承担精准施肥成本可能影响实施水平<sup>[10]</sup>。因此, 公司与农户的契约合作方式成为精准施肥推广的关键。实施水平决策及技术成本承担问题亟待解决。目前, 国内外学者已广泛研究“公司+农户”契约合作机制下农产品供应链最优决策与协调问题。例如, Zhong 等<sup>[11]</sup>通过概念框架阐述风险分担、利益分配、契约形式及合作稳定性间关系。刘墨林等<sup>[12]</sup>引入生鲜新鲜度, 考虑供应商保鲜努力与零售商服务水平影响, 探讨双渠道环境下社会企业+农户契约模式、合作机制及定价策略。毛敏等<sup>[13]</sup>构建以公司为主导的“公司+合作社+农户”三级农产品供应链, 并研究了供应链最优的成员构成。但斌等<sup>[14]</sup>、刘鲁浩等<sup>[15]</sup>分别研究了不同驱动因素(保鲜努力、服务水平、品种和土地改良)对供应

链需求和利润的影响, 并设计“成本分担, 利润共享”契约使供应链决策达到最优。

上述学者大多研究了公司和农户在供应链末端的合作行为。然而, 农业供应链领域关于生产成本优化与技术合作方式的研究较少。精准施肥作为现代农业核心技术, 对推进农业现代化及乡村振兴具有重要意义。本文在农产品市场需求受价格影响、精准施肥覆盖水平影响农产品成本情形下, 探讨“公司+农户”模式中施肥技术成本承担主体选择与利益协调问题。本研究为不同精准施肥模式设计有效协调契约, 实现供应链协调, 并分析不同合作模式对供应链节点双方最优决策的影响, 以期为乡村振兴背景下农业发展以及农户和相关企业组成的农产品供应链提供管理启示。

## 1 问题描述

在精准施肥技术背景下, 传统的个体农户可以通过转让农产品销售权的方式与公司结盟, 即农户在农产品成熟时将作物批发转让给公司进行销售, 公司为农户提供农业技术支持, 在公司的帮助下, 农户采用精准施肥措施来控制生产成本, 提高收入。

考虑一个公司与农户基于精准施肥技术组成的二级农产品供应链, 农户将农产品批发给公司, 公司再将农产品出售给消费者。农户以批发价  $w$  向公司提供生产成本为  $c$  的某一种农产品, 该农产品通过公司渠道进行销售, 公司销售农产品的价格为  $p$ 。与传统的农业供应链不同, 在物联网时代下, 为了保障农产品的产量和销售利润, 农户可以借助公司的农业技术进行生产, 在公司的帮助下采取精准施肥措施来培育农产品。

假设未采取精准施肥措施的农产品单位生产成本为  $c$ , 采取精准施肥后农产品单位成本为  $c_f$  ( $c_f < c$ ), 令  $\Delta = c - c_f$ , 表示采用精准施肥技术带来降本效益。采用精准施肥技术的技术服务覆盖水平为  $s$  ( $0 < s < 1$ ), 当  $s = 0$  表示没有普及, 当  $s = 1$  表示全面普及精准施肥技术。精准施肥的普及成本  $c_s$  和普及水平  $s$  的关系为  $c_s = \frac{ks^2}{2}$ , 其中,  $k$  ( $k > 0$ ) 表示精准施肥的成本影响系数。采取精准施肥措施后农产品的平均成本为<sup>[16]</sup>

$$A = c(1-s) + c_f s = c - (c - c_f)s = c - \Delta s。$$

在该农产品供应链中可以通过决策精准施肥技术的覆盖水平  $s$  来优化农作物的生产成本, 考虑到精准施肥技术的成本效益, 覆盖水平并非越高越好。

本文主要研究精准施肥的应用水平对于农户和合作公司利润的影响, 故而在本文中假设农产品的市场需求只受到销售价格的影响, 且与销售价格成反比, 设农产品的需求函数为

$$D = 1 - p. \quad (1)$$

为了保证农产品保本经营的条件下市场需求大于 0, 即  $D = 1 - c > 0$ , 所以假设  $c < 1$ 。

在本文中,  $\Pi_F$  为农户的利润;  $\Pi_R$  为公司的利润;  $\Pi_{RF}$  为分散情况下公司和农户的利润; 下标 R、F 和 RF 分别表示公司、农户和“农户+公司”; 上标 C、R、F、TR、TF 分别表示集中式决策情形、公司承担精准施肥成本的分散式决策情形、农户承担精准施肥成本的分散决策情形、R 模式的协调契约情形以及 F 模式的协调契约情形; 上标“\*”表示最优解。

## 2 基本模型

首先分析集中决策下采取精准施肥措施的农产品供应链的最优决策, 然后分析由公司承担精准施肥成本 (模型 R) 和农户承担精准施肥成本 (模型 F) 时的最优农产品精准施肥技术服务覆盖水平、最优售价以及最优利润。其次将两种决策模式与集中系统进行对比分析, 找出供应链失调的原因, 对两类模式分别提出一类协调供应链的策略。

### 2.1 集中式决策模型 (模型 C)

在集中决策情况下, 整个农产品供应链作为一个决策主体, 农产品供应链的利润函数为

$$\Pi^C = (p - c + \Delta s)(1 - p) - \frac{ks^2}{2}. \quad (2)$$

**命题 1** 采取精准施肥措施后, 集中模式农产品供应链的最优决策与最优利润为

$$s^{C*} = \frac{\Delta(1-c)}{2k-\Delta^2};$$

$$p^{C*} = \frac{k+ck+\Delta^2}{2k-\Delta^2};$$

$$\Pi^{C*} = \frac{k(1-c)^2}{4k-2\Delta^2}.$$

**证明** 通过  $\Pi^C$  求关于  $p$  和  $s$  的 Hessian 矩阵:

$$\mathbf{H}(\Pi^C) = \begin{bmatrix} -2 & -\Delta \\ -\Delta & -k \end{bmatrix}.$$

可得矩阵  $\mathbf{H}(\Pi^C)$  的一阶顺序主子式  $\mathbf{H}(\Pi^C)_{11} = -2$ , 二阶顺序主子式  $\mathbf{H}(\Pi^C)_{22} = 2k - \Delta^2$ 。要使  $\Pi^C$  在  $p$ 、 $s$  上是联合凹函数, 需要同时满足  $\mathbf{H}(\Pi^C)_{11} < 0$ ,  $\mathbf{H}(\Pi^C)_{22} > 0$ , 因此本文进一步假设  $2k - \Delta^2 > 0$ ,  $\Pi^C$  是关于  $p$  和  $s$  的联合凹函数, 故农产品供应链总利润函数存在最大唯一值。求  $\frac{\partial \Pi^C}{\partial s} = \Delta(1-p) - k = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi^C}{\partial p} = 1 - \Delta s + c - 2p = 0$ , 联立方程求解得到  $s^{C*}$ 、 $p^{C*}$ , 再将  $s^{C*}$ 、 $p^{C*}$  代回目标函数中得到  $\Pi^{C*}$ 。

### 2.2 公司承担精准施肥成本的决策模型 (R)

在实际情况下, 农户会与公司通过签订批发价契约的方式将农产品转让给公司进行销售, 以此获得精准施肥技术服务, 在公司承担精准施肥成本的分散式决策情形下, 公司为主导方, 农户与公司以各自利润最大化为目标进行决策。

此时, 公司利润函数为

$$\Pi_R^R = (p - w)(1 - p) - \frac{ks^2}{2}. \quad (3)$$

农户利润函数为

$$\Pi_F^R = (w - c + \Delta s)(1 - p). \quad (4)$$

**命题 2** 1) 农产品供应链中最优的农产品批发价格、精准施肥技术服务覆盖水平以及农产品销售价格分别为

$$w^{R*} = \frac{(1+3c)k-\Delta^2}{4k-\Delta^2};$$

$$s^{R*} = \frac{\Delta(1-c)}{4k-\Delta^2};$$

$$p^{R*} = \frac{(3+c)k-\Delta^2}{4k-\Delta^2}.$$

2) 公司和农户最优利润分别为

$$\Pi_R^{R*} = \frac{k(1-c)^2}{8k-2\Delta^2};$$

$$\Pi_F^{R*} = \frac{k^2(1-c)^2}{(4k-\Delta^2)^2}.$$

**证明** 设  $m$  为公司销售单位农产品的边际收益。首先将  $p = m + w$  代入农户利润函数  $\Pi_F^R = (w - c + \Delta s)(1 - p)$  中, 求  $\Pi_F^R$  关于  $w$  的二阶条件, 得到  $\frac{\partial^2 \Pi_F^R}{\partial w^2} = -2 < 0$ , 所以农户关于  $w$  存在最优利润。求

$\frac{\partial \Pi_R^R}{\partial w} = 1 - \Delta s + c - m - 2w = 0$ , 可得  $w = \frac{1}{2} - \frac{\Delta s}{2} + \frac{c}{2} - \frac{m}{2}$ , 将  $w$  的值和  $p = m + w$  代入式 (3) 中, 得到公司关于  $m$  和  $s$  的利润函数关系式, 同命题 1 证明, 判断出  $\Pi_F^R$  关于  $m$  和  $s$  的 Hessian 矩阵,  $\Pi_F^R$  是关于  $p$  和  $s$  的联合凹函数。求  $\frac{\partial \Pi_F^R}{\partial s} = \frac{1}{2} - m + \frac{\Delta s}{2} - \frac{c}{2} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_F^R}{\partial p} = \frac{m\Delta}{2} - ks = 0$ , 联立方程求解得到  $s^{R^*}$ 、 $m^{R^*}$ , 再将  $s^{R^*}$ 、 $m^{R^*}$  代入  $w = \frac{1}{2} - \frac{\Delta s}{2} + \frac{c}{2} - \frac{m}{2}$  中, 得到  $w^{R^*}$ , 由  $m^{R^*}$ 、 $w^{R^*}$  可得  $p^{R^*}$ , 将  $s^{R^*}$ 、 $p^{R^*}$ 、 $w^{R^*}$  代入利润函数中, 得到  $\Pi_R^{R^*}$  和  $\Pi_F^{R^*}$ 。

### 2.3 农户承担精准施肥成本的决策模型 (F)

考虑精准施肥成本在模型 R 中由公司承担, 虽然公司在供应链的销售环节中也获得部分利润, 但公司并未在精准施肥措施中直接获得利润, 相较于农户, 没有足够的动力提高精准施肥技术服务覆盖水平。农户作为精准施肥的既得利益者, 不考虑风险因素情形下应该自主承担的这部分成本。基于此, 本文考虑农户承担精准施肥成本的决策情形, 此时需要研究的问题是在这种模式下, 整体系统的精准施肥覆盖水平是否有提高, 以及这种模式相较于模式 R 是否有改进。

此时, 公司利润函数为

$$\Pi_R^F = (p - w)(1 - p); \quad (5)$$

农户利润函数为

$$\Pi_F^F = (w - c + \Delta s)(1 - p) - \frac{ks^2}{2}. \quad (6)$$

**命题 3** 1) 农产品供应链中最优的批发价格、精准施肥技术服务覆盖水平以及农产品的销售价格分别为

$$w^{F^*} = \frac{(3c + 1)k - (c + 1)\Delta^2}{4k - 2\Delta^2};$$

$$s^{F^*} = \frac{(1 - c)\Delta}{4k - 2\Delta^2};$$

$$p^{F^*} = \frac{(3 + c)k - 2\Delta^2}{4k - 2\Delta^2}.$$

2) 公司和农户的最优利润分别为

$$\Pi_R^{F^*} = \frac{(1 - c)^2 k}{8k - 4\Delta^2};$$

$$\Pi_F^{F^*} = \frac{(1 - c)^2 k}{16k - 8\Delta^2}.$$

**证明** 命题 3 证明方法同命题 2。

### 2.4 策略对比

上文分别计算出集中系统下的最优决策 (C)、公司承担精准施肥成本的最优决策 (R) 和农户承担精准成本的最优决策 (F), 本节将进一步对比不同策略。分析命题 1~3 得到命题 4。

**命题 4** 1)  $s^{R^*} < s^{F^*} < s^{C^*}$ ;  $p^{C^*} < p^{F^*} < p^{R^*}$ ;  $w^{F^*} < w^{R^*}$ 。2)  $\Pi_R^{R^*} < \Pi_R^{F^*}$ ;  $\Pi_F^{R^*} < \Pi_F^{F^*}$ ;  $\Pi_{RF}^{R^*} < \Pi_{RF}^{F^*} < \Pi^{C^*}$ 。

**证明** 将集中模式 C、模式 R 与模式 F 中的最优解进行作差对比, 可以分析出不同模式下各自决策变量的大小关系。

$s^{R^*} - s^{F^*} = -\frac{\Delta^3(1 - c)}{2(4k - \Delta^2)(2k - \Delta^2)} < 0$ , 即  $s^{R^*} < s^{F^*}$ ;  $s^{F^*} - s^{C^*} = -\frac{\Delta(1 - c)}{4k_s - 2\Delta^2} < 0$ , 即  $s^{F^*} < s^{C^*}$ 。所以  $s^{R^*} < s^{F^*} < s^{C^*}$ ; 同理可证  $p^{C^*} < p^{F^*} < p^{R^*}$ ,  $w^{F^*} < w^{R^*}$ ,  $\Pi_R^{R^*} < \Pi_R^{F^*}$ ,  $\Pi_F^{R^*} < \Pi_F^{F^*}$ ,  $\Pi_{RF}^{R^*} < \Pi_{RF}^{F^*} < \Pi^{C^*}$ 。命题 4 得证。

命题 4 表明, 决策模式 R 和模式 F 都不能使整个供应链达到实现最优利润, 相较于 R 模式, F 模式下公司和农户都可以获得更多的利润, 但这并不能说明 R 模式没有实施的意义。

模式 R 的精准施肥技术覆盖水平最低, 产品的售价最高。在该模式下, 公司承担精准施肥成本, 但没有直接从精准施肥中获取利润。由市场的需求函数  $D = 1 - p$  可知, 这部分成本并不能随意通过提高售价的方式转移给消费者。为保障自身的利润, 公司会提供较低的精准施肥技术覆盖水平, 以及适当提升农产品的销售价格。R 模式适用于精准施肥推行初期, 通过公司承担精准施肥成本的方式, 可以鼓励农户在生产中使用精准施肥技术, 解决精准施肥技术在未普及地区的推广问题。

F 模式下精准施肥成本由农户承担, 农户作为普及精准施肥技术的既得利益者, 有充分理由提高精准施肥的覆盖水平, 故此模式下农产品的平均生产成本较 R 模式更低, 因此农户会给公司更低的农产品批发价, 公司也相应会制定更低的销售价格, 采取“薄利多销”的销售方式。尽管从公司和农户的利益角度来看 F 模式更具备优势, 但事实上这一模式成立还存在风险和信任问题, 只有农户相信实施精准施肥带来收益大于承担精准施肥成本的风险时, 才会同意采取 F 模式。虽然 F 模式收益更高, 但是在精准施肥概念尚未普及阶段, 比 R 模式更难在农户中推行。

### 3 协调契约

从供应链整体来看,无论是 R 模式还是 F 模式,只要公司和农户从自身利润最大的角度进行决策最终都会产生双重边际效应,导致整体供应链利润难以实现最优。基于此问题,下文针对 R 模式和 F 模式的特性,分别设计出一类协调契约,可以使该农产品供应链实现完美协调。

#### 3.1 “利润共享-成本分担”契约 (TR)

公司为了鼓励农户进行农产品的合作,为农户提供精准施肥技术,并承担精准施肥的成本。这部分成本投入的效用一方面体现在农户生产农产品成本的降低,另一方面精准施肥的作用通过间接影响销售价格调整市场需求。在合作的情形下,采取精准施肥技术是一个双赢措施。因此农户有动机通过为公司分担精准施肥的成本来鼓励公司提高精准施肥技术服务覆盖水平。当农户生产成本降低后,批发价和售价也会相应降低,即适当提高精准施肥覆盖水平可以间接地增加农产品的边际利润。此种边际利润可以表现为农户和公司利润的增加,或者消费者剩余增大。综上所述,本文提出“利润共享-成本分担”的契约  $T(\lambda, \alpha, w)$ , 首先,农户分担  $\lambda(0 < \lambda < 1)$  比例的精准施肥成本,且此时农户对精准施肥水平进行决策,在销售季节之初公司向农户收取一个较低的批发价  $w$ , 作为回报,销售结束后公司分享给农户  $\alpha(0 < \alpha < 1)$  比例的销售利润。

此时公司和农户的利润函数分别为

$$\Pi_R^{\text{TR}} = [(1-\alpha)p-w](1-p) - (1-\lambda)\frac{ks^2}{2}; \quad (7)$$

$$\Pi_F^{\text{TR}} = (\alpha p + w - c + \Delta s)(1-p) - \lambda\frac{ks^2}{2}. \quad (8)$$

为实现供应链的协调,在该契约下的最优决策  $p^{\text{TR}^*}$ 、 $s^{\text{TR}^*}$  应该与集中决策的最优决策  $p^{\text{C}^*}$ 、 $s^{\text{C}^*}$  一致,由此可得命题 5。

**命题 5** 1) 在“收益共享-双向成本分担”契约

下,当协调参数  $(\lambda, \alpha, w)$  设置为  $w = \frac{(1-\alpha)(2ck-\Delta^2)}{2k-\Delta^2}$ ,

$\lambda = 1$  时,  $s^{\text{TR}^*} = s^{\text{C}^*}$ ,  $p^{\text{TR}^*} = p^{\text{C}^*}$ ,  $\Pi_{\text{RF}}^{\text{TR}^*} = \Pi^{\text{C}^*}$ ,  $\Pi_{\text{RF}}^{\text{TR}^*} - \Pi_{\text{RF}}^{\text{R}^*} = \frac{2k^3(1-c)^2}{(2k-\Delta^2)(4k-\Delta^2)^2}$ 。

2) 存在范围  $(0 < \alpha_1 < \alpha_2 < 1)$ , 当契约参数  $\alpha \in (\alpha_1, \alpha_2)$  时,  $\Pi_R^{\text{TR}^*} > \Pi_R^{\text{R}^*}$ ,  $\Pi_F^{\text{TR}^*} > \Pi_F^{\text{R}^*}$ , 即契约参数在该范围内,农产品供应链实现完美协调,且公司和农户均

实现帕累托改进。其中,  $\alpha_1 = \frac{8k^2\Delta^2 + 8k^3\Delta^6 - 6k\Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)^2}$ ,  $\alpha_2 = \frac{2k\Delta^2 + 4k^2 - \Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)}$ 。

**证明** 根据逆向归纳法,联立式 (7) 与式 (8), 得到协调契约下的最优产品销售价格  $p^{\text{TR}^*}$  和精准施肥水平  $s^{\text{TR}^*}$ 。为实现供应链的协调,在该契约下的最优决策  $p^{\text{TR}^*}$ 、 $s^{\text{TR}^*}$  应该与集中决策的最优决策  $p^{\text{C}^*}$ 、 $s^{\text{C}^*}$  一致,联立求解得到  $w = \frac{(1-\alpha)(2ck-\Delta^2)}{2k-\Delta^2}$ ,  $\lambda = 1$ 。命题 5 第 1) 得证。

为了使双方均接受契约,需要满足参与者的参与条件,即  $\Pi_R^{\text{TR}^*} > \Pi_R^{\text{R}^*}$ ,  $\Pi_F^{\text{TR}^*} > \Pi_F^{\text{R}^*}$ 。

公司和农户在协调模式 T 和模式 R 的利润分别作差,当差值都大于 0 时得到两个  $\alpha$  的范围。为了使双方均满足帕累托改进,取这两个  $\alpha$  范围的交集,由于

$$\frac{2k\Delta^2 + 4k^2 - \Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)} - \frac{8k^2\Delta^2 + 8k^3\Delta^6 - 6k\Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)^2} > 0,$$

所以

$$\alpha_1 = \frac{8k^2\Delta^2 + 8k^3\Delta^6 - 6k\Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)^2},$$

$$\alpha_2 = \frac{2k\Delta^2 + 4k^2 - \Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)},$$

$$\alpha \in \left( \frac{8k^2\Delta^2 + 8k^3\Delta^6 - 6k\Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)^2}, \frac{2k\Delta^2 + 4k^2 - \Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)} \right)$$

时,  $\Pi_R^{\text{TR}^*} > \Pi_R^{\text{R}^*}$ ,  $\Pi_F^{\text{TR}^*} > \Pi_F^{\text{R}^*}$ 。命题 6 第 1) 得证。

命题 5 表明,模型 R 中的农产品供应链在“收益共享-成本分担”契约下可以实现完美协调。且相较于模型 R,整条供应链的利润增加  $\frac{2k^3(1-c)^2}{(2k-\Delta^2)(4k-\Delta^2)^2}$ 。

1) 当协调参数满足命题 5 中条件,供应链可以实现完美协调。2) 当协调参数满足  $\alpha \in (\alpha_1, \alpha_2)$  时,分散式农产品供应链中农户和公司都可以实现帕累托改进,即两者都会接受该契约,公司和农户从契约合作中获得的具体利润取决于双方讨价还价的能力。

当  $\alpha = \frac{2k\Delta^2 + 4k^2 - \Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)}$  时,公司的收益与模型 R 中

相比不变,农户获得契约下整条供应链增加的利润;  $\alpha = \frac{8k^2\Delta^2 + 8k^3\Delta^6 - 6k\Delta^4}{2k(4k-\Delta^2)^2}$  时,农户的收益与模型

R 中相比不变,公司获得契约下整条供应链增加的利润。

### 3.2 二部制契约 (TF)

由命题4对F模式的分析可知,农户接受F模式的前提是农户可获得的额外收益大于精准施肥的成本投入。公司可以通过与农户签订“对赌协议”的方式消除农户的风险,即农户接受F模式,并承诺给公司一个优惠的批发价,作为回报,公司会给农户一定的收益补贴 $K$ ,保障农户接受该契约后可以实现利润优化。假设农户给公司的优惠批发价格 $w = \frac{2ck - \Delta^2}{2k - \Delta^2}$ ,依据F模式的利润函数,将批发价 $w$ 代入公司和农户的利润函数中,再将公司和农户的利润函数分别减去和加上补贴值 $K$ 。

此时,公司和农户的利润函数分别为

$$\Pi_R^{TF} = \left( p - \frac{2ck - \Delta^2}{2k - \Delta^2} \right) (1-p) - K; \quad (9)$$

$$\Pi_F^{TF} = \left( \frac{2ck - \Delta^2}{2k - \Delta^2} - c + \Delta s \right) (1-p) - \frac{ks^2}{2} + K. \quad (10)$$

公司和农户分别求式(9)和(10)中精准施肥水平 $s$ 和销售价格 $p$ 的一阶边际函数,即联立求解 $\frac{\partial \Pi_R^{TF}}{\partial p} = 1 - 2p + \frac{2ck - \Delta^2}{2k - \Delta^2} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_F^{TF}}{\partial s} = \Delta(1-p) - ks = 0$ ,得到 $p^{TF*} = \frac{k + ck - \Delta^2}{2k - \Delta^2}$ ;  $s^{TF*} = \frac{\Delta(1-c)}{2k - \Delta^2}$ 。从 $p^{TF*}$ 和 $s^{TF*}$ 的解可以看出,二部制契约下公司的最优销售价格和农户的精准施肥水平分别等于集中最优决策,该农产品供应链的系统利润 $\Pi_{RF}^{TF*}$ 等于集中决策下的最优利润 $\Pi^C$ ,从而实现供应链的完美协调。将 $p^{TF*}$ 、 $s^{TF*}$ 的解代入式(9)、式(10)中,此时公司和农户通过公司的补贴价格 $K$ 来分配利润,协调后公司和农户的最优利润分别为

$$\Pi_R^{TF*} = \frac{k^2(1-c)^2}{(2k - \Delta^2)^2} - K;$$

$$\Pi_F^{TF*} = K - \frac{k\Delta^2(1-c)^2}{2(2k - \Delta^2)^2}.$$

为保证契约的有效性,实现协调后双方决策目标的帕累托改进,必须满足个人理性约束条件:

$$\Pi_R^{TF*} - \Pi_R^{F*} \geq 0; \quad \Pi_F^{TF*} - \Pi_F^{F*} \geq 0.$$

通过求解上述两个不等式,得到二部制契约补贴参数 $K$ 的有效取值区间为

$$\frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2} \leq K \leq \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2}.$$

通过上述分析得到命题6。

**命题6** 1) 在二部制契约下,主要参数 $w^{TF*} = \frac{2ck - \Delta^2}{2k - \Delta^2}$ ,  $\frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2} \leq K \leq \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2}$ 能够实现该农产品供应链的协调,协调后公司和农户的利润满足激励相容,并且系统总利润等于集中决策利润。

2) 二部制契约协调后整体供应链相较F模式增加 $\frac{(1-c)^2k}{16k_s - 8\Delta^2}$ 利润,其中, $K = \frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2}$ 时,公司在 $\Pi_R^{F*}$ 的基础上,获得供应链完美协调后增加的全部利润; $K = \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2}$ 时,农户在 $\Pi_F^{F*}$ 的基础上,获得供应链完美协调后增加的全部利润。

**证明**  $\Pi_R^{TF*} - \Pi_R^{F*} = \frac{k^2(1-c)^2}{(2k - \Delta^2)^2} - K - \frac{(1-c)^2k}{8k - 4\Delta^2} = \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2} - K \geq 0$ , 即  $K \leq \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2}$ 。

同理,  $\Pi_F^{TF*} - \Pi_F^{F*} = K - \frac{k\Delta^2(1-c)^2}{2(2k - \Delta^2)^2} - \frac{(1-c)^2k}{16k - 8\Delta^2} = K - \frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2} \geq 0$ , 即  $K \geq \frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2}$ 。又因为 $\frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2} \geq \frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2}$ , 所以 $\frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2} \leq K \leq \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2}$ , 命题6第1)得证。

$\Pi_{RF}^{TF*} - \Pi_{RF}^{F*} = \frac{k(c-1)^2}{4k - 2\Delta^2} - \frac{3(1-c)^2k}{16k - 8\Delta^2} = \frac{(1-c)^2k}{16k - 8\Delta^2}$ ,  $\frac{k(1-c)^2(3\Delta^2 + 2k)}{8(2k - \Delta^2)^2}$ 时,  $\Pi_F^{TF*} = \Pi_F^{F*}$ ,  $\Pi_R^{TF*} = \Pi_R^{F*} + \frac{(1-c)^2k}{16k - 8\Delta^2}$ 。同理,  $K = \frac{k(c-1)^2(\Delta^2 + 2k)}{4(2k - \Delta^2)^2}$ 时,  $\Pi_R^{TF*} = \Pi_R^{F*}$ ,  $\Pi_F^{TF*} = \Pi_F^{F*} + \frac{(1-c)^2k}{16k - 8\Delta^2}$ , 命题6第2)得证。

## 4 算例分析

为了进一步验证精准施肥成本节约效用对农产品供应链中精准施肥实施水平、产品销售价格以及供应链双方利润的影响,参照文献[12],以模型假设为依据进行相关参数设定。假定 $c=0.4$ ,  $k=0.2$ 。为了保证分析具有经济意义,参数假设需满足 $2k - \Delta^2 > 0$ ,因为单位成本假定为0.4,故而实施精准施肥技术单位可节约成本应满足 $0 < \Delta < c$ ,得到 $\Delta$ 的变化范围

为 (0,0.4)。本文首先检验精准施肥成本节约效用对最优决策的影响,再检验精准施肥成本节约效用对不同模式下公司和农户利润的影响,最后对协调契约进行模拟仿真分析。

#### 4.1 精准施肥成本节约效用对最优决策的影响

由图 1 可知,农产品生产时精准施肥覆盖水平  $s$  随着  $\Delta$  的增大而增大,精准施肥可以节约的成本越多,其覆盖水平相应也越高。此外,随着精准施肥成本节约效用的提高,农户决策模式 (F) 比公司决策模式 (R) 有更高的精准施肥覆盖水平。集中情形下,当成本节约效用  $\Delta = c = 0.4$  时,整体系统会完全普及精准施肥,但是这是一种理想情形,因为精准施肥技术无法将生产成本降低为 0。

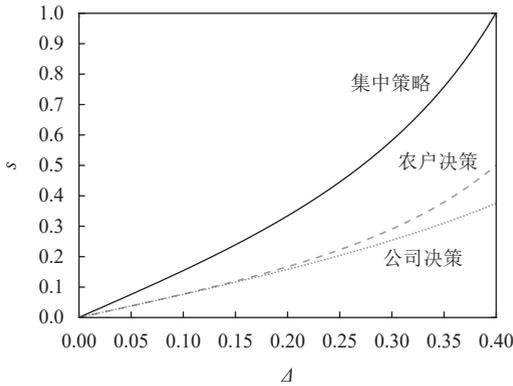


图 1 施肥效用与最优施肥水平的关系

Figure 1 The relationship between fertilization effectiveness and the optimal fertilization level

由图 2 可知,精准施肥的成本节约效用越高,农产品的销售价格越低。农户决策情形下产品的销售价格低于公司决策情形,但是两种模式的销售价格都显著高于集中情形的产品售价。综合图 1、图 2 可知,从消费者福利的角度出发,当公司和农户没有进行合作时,应推行农户决策精准施肥的模式。公司和农户加强合作可以提高精准施肥覆盖水平,一方面可以提高主体双方的利润,另一方面消费者也会因为产品价格的下降获得更多的实惠。

#### 4.2 精准施肥成本节约效用对不同模式下公司和农户利润的影响

由图 3 可知,农户决策精准施肥模式下,农户和公司的利润都比公司决策情形下更高。当  $\Delta$  较小的时,无论是 F 模式还是 R 模式,农户获得的利润并未有明显的提升。但是对于公司来说,当  $\Delta > 0.2$  时, F 模式下公司可以获得的利润显著高于 R 模式,且随着  $\Delta$  的增大呈边际递增。结合图 1 可知,

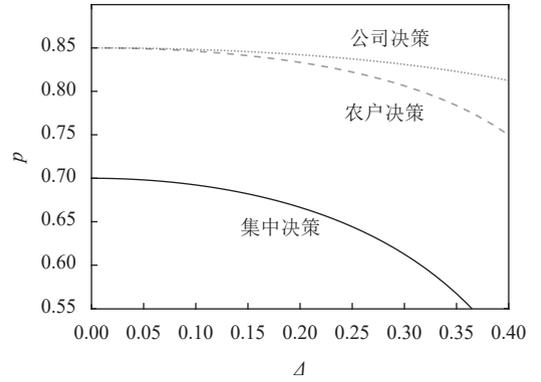


图 2 施肥效用与农产品最优销售价格的关系

Figure 2 The relationship between fertilization utility and the optimal selling price of agricultural products

这是由于 F 模式下随着  $\Delta$  的增大,农户有更高的意愿提高精准施肥覆盖水平,使成本降低,对公司来说体现在批发成本降低和销量增加上。为了提高精准施肥覆盖水平,公司可以通过契约的形式与农户进行合作,下文对 F 模式和 R 模式的契约合作进行算例仿真分析。

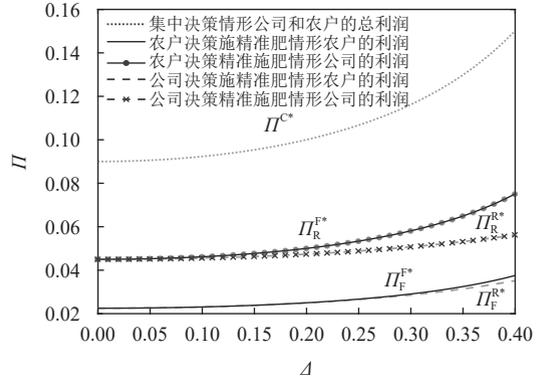


图 3 施肥效用与最优利润的关系

Figure 3 The relationship between fertilization utility and the optimal profit

#### 4.3 协调契约对供应链主体利润水平的影响

为了验证“利润共享-成本分担”(TR)、二部制契约 (TF) 的有效性,本文检验在实施协调契约后,农户和公司的利润变化情况。令  $\Delta\Pi_i^{TR}(\alpha)$ 、 $\Delta\Pi_i^{TF}(K)$  分别表示在实施 TR、TF 契约后,公司和农户的利润变化量,其中,  $\Delta\Pi_i^{TR}(\alpha) = \Pi_i^{TR*} - \Pi_i^{R*}$ ,  $\Delta\Pi_i^{TF}(K) = \Pi_i^{TF*} - \Pi_i^{F*}$ ,  $i = R, F$ 。参照文献 [2], 设置  $\Delta = 0.2$ , 绘制协调契约对公司和农户利润水平的影响,如图 4 和图 5 所示。

观察图 4 可以发现,在实施 TR 契约后,随着收益共享比例  $\alpha$  的增大,公司的利润随之单调递减,而农户的利润随之单调递增。因此,当  $\alpha$  处于

一定水平时, 即  $\alpha \in (\alpha_1, \alpha_2)$  时, 其中,  $\alpha_1 = 0.324$ ,  $\alpha_2 = 0.574$ 。农户和公司的利润变化均为正增量, 此时, 不仅农产品供应链主体双方的利润实现帕累托改进, 整条供应链也实现完美协调。结合命题 5, 在 TF 契约中农产品的批发价满足  $w = \frac{(1-\alpha)(2ck - \Delta^2)}{2k - \Delta^2}$ , 随着产品共享比例的增大, 农户会制定更低的农产品批发价格。

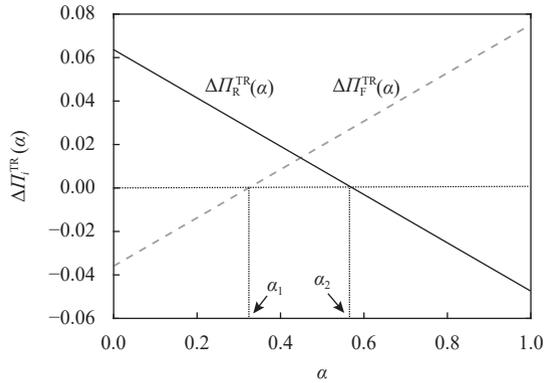


图 4 TR 协调契约对供应链主体利润的影响

Figure 4 The influence of TR coordination contract on the profit of the supply chain subject

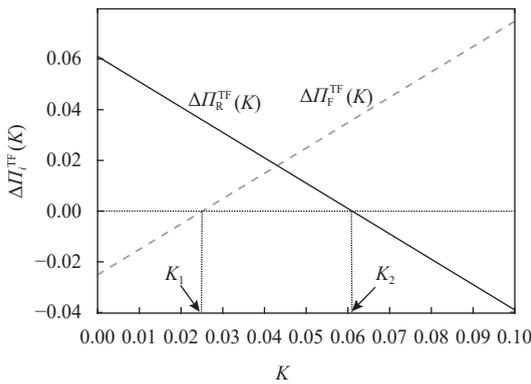


图 5 TF 协调契约对供应链主体利润的影响

Figure 5 The impact of TF coordination contract on the profit of the supply chain subject

同理, 在实施 TF 契约后, 随着公司支付给农户的转移支付量  $K$  的增大, 公司的利润随之单调递减, 而农户的利润随之单调递增。 $K \in (K_1, K_2)$  时, TF 契约完美协调供应链, 且公司和农户均实现帕累托改进, 其中,  $K_1 = 0.036$ ,  $K_2 = 0.061$ 。

### 5 结论与启示

本文将精准施肥技术在农业生产领域的效益和农业供应链的利益协调相结合, 针对一个公司和一

个农户共同组成的农产品供应链, 农户借助公司提供的技术, 通过精准施肥实现成本优化, 公司作为技术提供者和销售方在供应链中处于“主导”地位。研究基于精准施肥技术下的“公司+农户”契约农业合作模式, 突出精准施肥在农业生产中“降本增效”的作用, 并进一步对比分析公司和农户之间不同契约合作模式的利弊。在分散情形下, 模型 R 和模型 F 中公司和农户只是在业务上达成交易关系, 整体系统仍然处于分散状态, 精准施肥的覆盖水平越高, 农作物的生产成本越低, 但是由于实施精准施肥的成本与精准施肥的覆盖水平呈边际递增, 无论精准施肥水平是由公司决定还是农户决定, 都不能使精准施肥水平达到最优。因此, 本文就 R 模式和 F 模式分别设计“利润共享-双向成本分担”契约 (TR) 和二部制契约 (TF): TR 协调契约考虑供应链双方共同的利润和成本; TF 协调契约分别考虑农户的批发价和公司的补贴。这两个契约都能使该农产品供应链实现完美协调。

基于结论, 给出如下管理启示。

1) 相关农业公司应该完善精准施肥技术。精准施肥技术对农业生产成本的优化效用越高, 越能带动我国现代化农业的推广, 相应地公司和农户的收入也就越高, 形成农业生产的良性循环。

2) 鼓励和引导农户积极尝试现代化农业生产技术。精准农业在国内外已有较多应用, 传统的小农生产模式最终会向着农业精准化和农业规模化方向发展, 精准施肥技术不仅可以实现农业生产“降本增效”, 还有助于解决“三农”问题。

3) 加强公司和农户的合作。针对不同的生产情况制定合适的契约, 引导和加强农企之间的互利合作, 降低农产品成本, 提高生产效用, 同时为消费者创造更多的社会福利。

本文目前仅从成本改进角度研究公司和农户不同的合作模式对于整条供应链各节点方利润的改进问题。与大多数文献相似, 本文考虑的是产品需求确定情形下的研究。在需求不确定情形下, 讨论合作机制的设计以及技术服务应用如何给农产品供应链决策带来影响, 是一个值得思考和进一步研究的问题。

#### 参考文献:

[1] 陈桂芬, 马丽, 陈航. 精准施肥技术的研究现状与发展趋势 [J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(3): 253-259.

- CHEN Guifen, MA Li, CHEN Hang. Research status and development trend of precision[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2013, 35(3): 253-259.
- [2] 自由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2116-2125.
- BAI Youlu. The situation and prospect of research on efficient fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2116-2125.
- [3] DONG Y, FU Z, PENG Y, et al. Precision fertilization method of field crops based on the wavelet-BP neural network in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 118735.1-118735.13.
- [4] 李红, 汤攀, 陈超, 等. 中国水肥一体化施肥设备研究现状与发展趋势[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(2): 200-209.
- LI Hong, TANG Pan, CHEN Chao, et al. Research status and development trend of fertilization equipment used in fertigation in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(2): 200-209.
- [5] FAN J, LU X, GU S, et al. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241(1): 106352.
- [6] ZAINOL M A, ABAS Z, ARIFFIN A S. Performance of fresh-water fish contract farming in Malaysia innovative supply chain integration outlook[J]. *International Journal of Supply Chain Management*, 2019, 8(2): 999-1003.
- [7] 高阔, 甘筱青. “公司+农户”模式: 一个文献综述(1986-2011)[J]. *经济问题探索*, 2012, 355(2): 109-115.
- GAO Kuo, GAN Xiaqing. "Company + farmer" mode: a literature review (1986-2011)[J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2012, 355(2): 109-115.
- [8] HUO B, ZHAO X, LAI F. Supply chain quality integration: antecedents and consequences[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2014, 61(1): 38-51.
- [9] 韩洪云, 杨增旭. 农户测土配方施肥技术采纳行为研究——基于山东省枣庄市薛城区农户调研数据[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(23): 4962-4970.
- HAN Hongyun, YANG Zengxu. Analysis on farmers' adoptive behavior of soil testing for formulated fertilization: empirical evidence from the Xuecheng district of Zaozhuang city in Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(23): 4962-4970.
- [10] 张复宏, 宋晓丽, 霍明. 果农对过量施肥的认知与测土配方施肥技术采纳行为的影响因素分析——基于山东省 9 个县(区、市)苹果种植户的调查[J]. *中国农村观察*, 2017(3): 117-130.
- ZHANG Fuhong, SONG Xiaoli, HUO Ming. Excess fertilizer application and growers' adoption behavior for soil testing for fertilizer formulation and their determinants: an empirical analysis based on survey data from apple growers in 9 counties of Shandong Province[J]. *China Rural Survey*, 2017(3): 117-130.
- [11] ZHONG Z, JIA F, LONG W, et al. Risk sharing, benefit distribution and cooperation longevity: sustainable development of dairy farmer cooperatives in China[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2022, 20(5): 982-997.
- [12] 刘墨林, 但斌, 马崧萱. 考虑保鲜努力与增值服务的生鲜电商供应链最优决策与协调[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(8): 76-88.
- LIU Molin, DAN Bin, MA Songxuan. Optimal strategies and coordination of fresh e-commerce supply chain considering freshness-keeping effort and value-added service[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(8): 76-88.
- [13] 毛敏, 贾乐林, 鲍震天. “公司+合作社+农户”型供应链竞争与结构研究[J]. *系统科学学报*, 2022, 30(2): 59-64.
- MAO Min, JIA Lelin, BAO Zhentian. Research on the competition and structure of "Company & Farmer" supply chain[J]. *Chinese Journal of Systems Science*, 2022, 30(2): 59-64.
- [14] 但斌, 马崧萱, 刘墨林, 等. 考虑 3PL 保鲜努力的生鲜农产品供应链信息共享研究[J/OL]. *中国管理科学*, (2023-03-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.g3.20220304.1735.002.html>.
- DAN Bin, MA Songxuan, LIU Molin, et al. Information sharing in the fresh produce supply chain with 3PL's fresh-keeping effort[J/OL]. *Chinese Journal of Management Science*, (2023-03-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.g3.20220304.1735.002.html>.
- [15] 刘鲁浩, 谢家平, 梁玲, 等. 基于品种和土地改良的“社会企业+农户”契约农业合作机制及定价决策研究[J]. *管理评论*, 2021, 33(8): 29-40.
- LIU Luhao, XIE Jiaping, LIANG Ling, et al. Cooperation mechanisms and pricing decision for "Social Enterprise + Farmers" contract mode based on variety and land improvement[J]. *Management Review*, 2021, 33(8): 29-40.
- [16] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASSENHOVE L N. Closed-Loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.

(责任编辑: 郑穗华)