

熊航,何煦,吴恩喆,等.我国智能水肥一体化系统发展面临的挑战及其对策:基于博弈论的分析[J].华中农业大学学报,2023,42(3):18-28.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.003

# 我国智能水肥一体化系统发展面临的挑战及其对策: 基于博弈论的分析

熊航<sup>1</sup>,何煦<sup>2</sup>,吴恩喆<sup>1</sup>,易红梅<sup>2</sup>

1. 华中农业大学经济管理学院/宏观农业研究院,武汉 430070; 2. 北京大学现代农业学院,北京 100871

**摘要** 为探索解决我国目前智能水肥一体化系统存在的质量不过硬、设备不智能以及平台不兼容等问题的措施,基于利益相关者理论构建博弈论模型,从供给的角度揭示造成目前我国智能水肥一体化系统发展困境的行为和制度根源,并讨论解决这些问题的可能措施。研究表明:在当前我国智能水肥一体化系统发展水平和市场格局下,面对智能水肥一体化系统相关农机装备的同档定额补贴政策,采取低性能低价格的市场策略成为市场竞争力相对较弱的国内企业在短期内的最优选择,使得国产智能水肥一体化系统整体质量不高;产学研合作中科研人员难以获得充分激励,从而导致对水肥一体化系统智能化研发的投入不足;垄断竞争市场的现状决定了个体企业转换到标准化平台的成本大于潜在收益,导致难以形成水肥一体化系统的统一生产标准。针对上述问题与原因,本研究提出,政府应该优化补贴制度,强化对高性能水肥一体化农机的识别和补贴;完善科研机构考核机制,提升高等院校科研成果转化部门的服务动力;对企业更换产品生产标准给予补贴,引导统一市场标准的建立。

**关键词** 智慧农业;智能农机装备;补贴政策;产学研合作;平台兼容;博弈论;激励相容

**中图分类号** S222.3; F273 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)03-0018-11

智慧农业是以数据、知识和智能装备为核心要素,通过将现代信息技术与农业深度融合,实现农业生产全过程的数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理的全新农业生产方式<sup>[1]</sup>,是农业发展的新形态<sup>[2]</sup>。在生产经营中,智慧农业包括智能感知监测、智能分析决策以及智能控制3个领域<sup>[3]</sup>,集中体现在智能农机装备的运用。智能农机装备的本质特征是具有智能化的功能,即智能感知作业环境、作业对象和装备状态,利用大数据模型驱动智能决策,实现田间精准作业,以及利用算法和云平台实现多机协作调度的智能管控。发展智慧农业特别是智能农机是实现我国农业高质量发展的迫切需要<sup>[4]</sup>。

我国农业生产面临水资源日益紧张、面源污染日趋严重等压力,水肥一体化为提升资源利用效率、转变农业生产方式、促进农业绿色发展提供了可行路径。在水资源匮乏的日本和以色列,水肥一体化应用占有灌溉耕地的比例高达90%,水肥一体化

系统的应用将水资源的利用率提高40%~60%,肥料利用率提高30%~50%。但是,第3次全国农业普查数据显示,2016年我国总灌溉耕地面积为6 189万hm<sup>2</sup>,水肥一体化系统推广面积为600万hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,仅占全国总灌溉耕地面积的9.69%。而且,这些水肥一体化系统极少具备数据分析和智能决策功能,难以为农户调整水肥方案提供决策支持。

造成我国目前智能水肥一体化系统整体实力较弱的因素有很多,现有文献一般从有效需求不足、政策制度不完善、农业数据汇集难度高、研发水平低以及行业标准不成熟等方面进行分析。从产品需求来看,“大国小农”的国情决定了我国智能水肥一体化系统投入的边际效益较低,经营主体采用积极性不高,有效需求不足,进而导致企业市场化研发和生产激励不足<sup>[6-7]</sup>。从产品研发来看,我国目前有关农业智能控制的关键技术和核心零部件的精度、稳定性、可靠性与国外差距巨大,尚未形成自主可控的技术

收稿日期:2022-12-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(72173050;72273003);内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0046)

熊航, E-mail: hxiong@hzau.edu.cn

通信作者:易红梅, E-mail: hmyi.ccap@pku.edu.cn

产品<sup>[6,8-9]</sup>。从政府政策来看,虽然政府对智能农机产业发展高度重视,但相应的财政支持仍然非常有限<sup>[10]</sup>。从制度和基础设施建设来看,我国农业系统数据获得能力不强,数据共享机制不健全,对依赖数据驱动的智能水肥一体化系统发展形成了制约<sup>[11-13]</sup>;同时由于尚未建立智能水肥一体化系统产品标准体系和检验检测认证平台,导致我国智能水肥一体化系统质量参差不齐<sup>[14]</sup>。

虽然上述文献从不同角度分析了造成我国智能水肥管理一体化系统发展困境的可能原因,但是对根植于这些原因背后的不同主体之间的利益考量和权衡博弈未进行深入分析。本文的目标是从供给的角度揭示造成目前我国智能水肥一体化系统发展面临困境的个体激励与行为机制及其相关的制度根源,探究解决这些问题的有效措施。智能水肥一体化系统的发展是农业经营主体、农机企业、政府和研究机构等多类主体共同作用的结果,他们之间的互动关系具有竞争与对抗的特征,博弈论模型能够较为准确充分地刻画在不同约束条件下对局中策略的选择和可能的最优策略。

本文通过案例分析、企业访谈和文献梳理指出目前智能水肥一体化发展存在的典型问题,并根据利益相关者理论识别这些问题所涉及的关键行为主

体;运用博弈论分析方法分析相关主体的行为策略,揭示导致问题的行为约束与制度障碍;以多主体激励相容理论为指导,指出破解问题的政策发力点和可能采取的措施。

## 1 我国智能水肥一体化发展所面临的突出问题

智能水肥一体化系统也称数字水肥一体化系统,是作物生长环境感知技术、自动控制技术和作物生长模型与传统的机械水肥一体化设备集合而成,能够实现根据作物不同生长时期水分和养分需求以及作物生长的水土环境变化来精准控制作物生长地块的灌溉和施肥管理。目前智能水肥一体化在国内主要用于北方大规模旱地大田作物种植、园艺蔬菜等高价农产品的温室种植、经济林的栽培等。该技术由硬件和软件两部分组成,硬件除了传统的机械水肥一体化设备(主要包括水肥一体机、过滤器等配套设备、灌溉管道等)外,还包括土壤墒情仪、田间气象站等环境监测设备,以及电磁阀、阀控器等自动控制设备;软件主要是根据环境数据和模型算法提供水肥施用方案的应用程序(例如手机APP)以及控制设备的系统平台。典型的智能水肥一体化系统如图1所示。

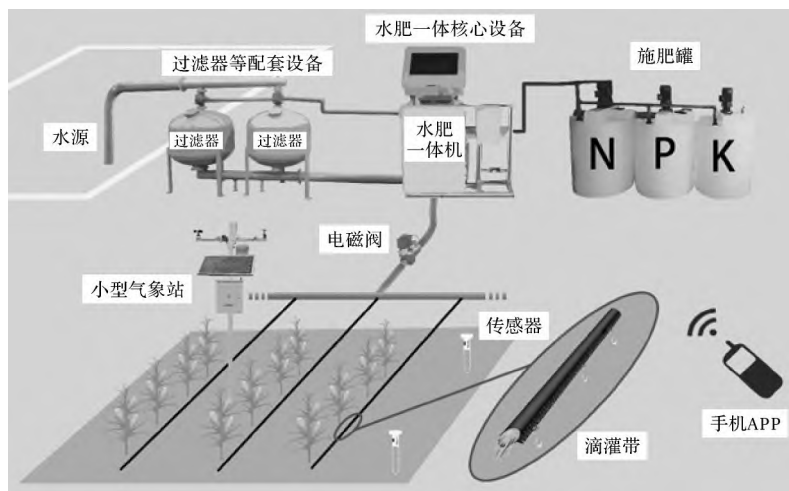


图1 智能水肥一体化设备简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of smart water-fertilizer integrated equipment

智能水肥一体化系统企业是供应机械水肥一体化设备、环境监测设备、自动控制设备和模型算法软件4类产品或服务的企业。他们供给产品或服务的方式包括只提供硬件设备(及其配套的软件,如有)、只提供决策支持系统软件、或者提供硬件设备和决策支持系统软件整体产品。从来源看,我国智能水

肥一体化系统的供给者既有国内企业,也有国外企业,但两者目标市场差异较大。国外企业以服务质优价高的高档市场为主,而国内企业一般定位于低端市场,即对水肥一体化系统有需求但是作物对水肥调控的精准度要求不高的应用场景。国内企业与国外企业在技术水平上存在明显差距,相当一部分

国内企业的技术来源于对国外企业产品的模仿,具备自主研发能力和开展自主研发的国内企业较少。国内企业的技术研发一般依赖于国内的农业高校、研究所等科研机构,而国外企业的技术研发一般在其母国进行,依靠母国的技术力量。

为了从供给的角度深入考察智能水肥一体化技术的应用现状及存在问题,我们与国内外近10个智能水肥一体化系统产品和服务供应商进行了结构性访谈。访谈结果表明,我国生产的水肥一体化系统的精准化、数字化和智能化水平与国际先进水平存在明显差距。国内的水肥一体化系统生产企业与以色列耐特菲姆公司等技术先进企业的技术实力悬殊,处于模仿追赶先进水平的阶段。在国内水肥一体化市场上,我国企业主要通过提供技术含量较低的产品获得低端市场,而耐特菲姆公司等国外企业则占据技术含量较高的高端市场。在这样的发展条件和市场环境下,我国的智能水肥一体化系统发展面临以下突出问题。

1) 智能水肥一体化系统性能差且不稳定。例如,西北地区灌溉水含泥沙量较大,农户在使用过程中经常遇到因过滤器的过滤能力达不到水肥自动灌溉的需要造成后端管道堵塞的问题。施肥罐和施肥机的容量均过小,满足不了多灌区自动轮灌作业和大流量下自动化施肥的要求。土壤墒情仪等传感设备的探测灵敏度低,不能准确监测出相似土壤在水分和养分含量上较细微的差异,甚至检测结果明显失准。

2) 智能水肥一体化系统智能化水平不高。水肥一体化系统的智能性主要体现在对水肥施用方案的决策支持,即对于作物生长中灌溉时期、灌水量以及施肥时期、施肥量和肥料种类提供解决方案。目前实现这一智能决策支持主要有2种途径:专家系统和机器学习技术。第1种途径由于依赖于专家个人的专业知识和经验,其所能提供的方案能够服务的范围有限,而且“从点到面”进行推广时方案的科学性、准确性和稳定性都难以保证;第2种途径依赖于作物生长模型和海量数据,所提供的方案服务范围更广,而且随着模型的更新迭代,方案的准确性不断提高。国内现有水肥一体化系统一般都不能提供智能化的水肥决策支持,少数能够提供决策支持的系统主要是在示范区域内通过专家系统来实现,能够依靠模型给出水肥决策支持方案的企业凤毛麟角,而且模型还有待田间试验检验完善。

3) 智能水肥一体化系统各元件之间的兼容性低。由于墒情仪等传感设备、水肥一体化设备、自动控制设备一般都是不同生产企业各自独立开发的,都有各自独立的后台管理系统。组成智能水肥一体化系统的不同硬件设备往往难以在操作系统的统一调度下顺畅稳定地发挥各自的性能、实现根据传感设备的信息自动化地生成水肥管理方案,并根据水肥管理方案自动化地实施灌溉和施肥。这些设备之间的联合作业(例如当水分含量达到一定水平时即开始灌溉)需要开发第三方的操作系统,而这些设备的管理系统所采用的数据传输协议各不相同,这使得开发统一操作系统的协调成本很高,而数据传输的不顺畅也导致统一操作的稳定性难以保证。

## 2 问题的制度原因与对策分析

利益相关者这一概念于20世纪60年代前后提出,起初主要指的是与企业生存休戚相关的行为主体,后来被宽泛地定义为可以影响组织目标的实现,或被组织实现其目标这一过程所影响的个体或群体<sup>[15]</sup>。利益相关者所包含的主体根据具体研究而定。在智能水肥一体化系统的案例中,农机企业是智能水肥一体化系统产品的供给主体,其供给行为涉及与农户、政府及科研机构等其他主体的互动(图2)。我国智能水肥一体化系统的供给者数量众多,生产的产品功能相近但质量不同,总体上属于垄断竞争市场。在产品质量档次上,呈现低端市场主要由数量较多的本土企业组成、高端市场由少数国外企业占据的基本格局。前者常将自己的客户群体聚焦在现代化农业示范项目等有财政补贴的项目,后者则将自己的客户定位在中高端农产品市场。农户是农机企业所提供的智能水肥一体化系统的主要需求者,在产品处于政府推广阶段时,政府部门会因开展示范推广的需要而向企业采购农机设备。政府为农机企业的生产和研发提供政策保障。此外,科研机构是企业开展产品研发的重要合作者,为企业提供科技支持。

博弈论是分析利益相关者之间关系的一项有力工具。本研究将采用利益相关者之间的合作博弈来分析智能装备存在质量不过硬、设备不智能以及平台不兼容等问题产生的原因。基本的合作博弈模型由博弈参与主体(局中人)、策略和收益函数3个基本要件组成。



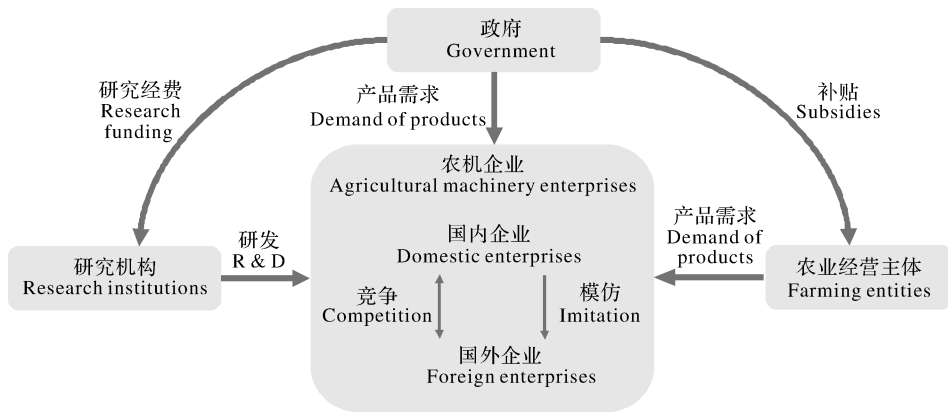


图2 智能水肥一体化系统主体关系图

Fig. 2 Entities relationship diagram of smart water-fertilizer integrated system

2.1 补贴政策下的智能水肥一体化系统性能定位

1) 农机购置补贴政策。农机购置补贴是我国政府推动农业机械化的主要财政支持手段,水肥机等智能水肥一体化系统产品逐步被纳入农机购置补贴范围。相关部门按照“自主购机、定额补贴、先购后补、县级结算、直补到卡(户)”的方式对从事农业生产活动的个人或农业生产经营组织购置农机进行补贴。自2004年农机购置补贴政策开始实施以来,补贴惠及范围不断拓宽,支持强度逐渐加大。中央财政农机购置补贴实行定额补贴,补贴额由各省农业农村厅按照相关规定进行测算确定。对于同一档次的农机无论其性能如何按照同一标准予以补贴,补贴标准依据同档产品上年市场销售均价测算确定各档次的补贴额上限。例如,《2021—2023年农机购置补贴实施指导意见》要求,依据不超过同档产品上年市场销售均价30%的比例测算确定各档次补贴额。

某一类农机的档次一般根据1个容易量化的指标来确定,例如犁、耙等整地机械和玉米、花生、薯类收获机等收获机械均以机械单独或者作业的宽幅为划分档次的唯一指标;再如各类拖拉机和诸多加工运输设备一般以动力的功率为指标。然而,同一档次的农机在耐用性、稳定性、数字化和智能性程度等方面的性能仍可能存在较大的差异,显然,性能更好的产品其成本更高、价格也更高<sup>[16]</sup>。在定额补贴方式下,除了用来区分产品档次之外的其他性能高的智能水肥一体化设备与性能低的产品将获得相同的补贴金额。尽管农机购置补贴是直接针对消费者的,但由于农机一般存在较高的供给价格弹性,补贴收益将最终在消费者和生产者之间分享。企业生产低性能智能水肥一体化设备的成本相对于生产高性能产品而言更低,低性能农机需求足够大的情况下,

企业提供前者所获得的总收益更高。

2) 智能水肥一体化系统企业的价格与性能策略选择。在农机购置补贴政策下智能水肥一体化系统产品企业和用户的供求决策可以通过价格博弈模型来分析。在该价格博弈中,主体是消费者(农户)和生产者(智能水肥一体化系统的生产商),两者都是理性经济人,分别以效用最大化和利润最大化为行为目标。农户可以选择接受或不接受智能水肥一体化设备的高价格。企业则需要对智能水肥一体化系统的性能与定价进行决策,企业理论上存在高性能高价格、高性能低价格、低性能高价格、低性能低价格4种策略。

当企业选择高性能低价格策略时,企业付出了较高的研发成本,但由于价格较低,总利润较少,企业得不偿失,该策略在实际上是不可行的。如果企业提供低性能高价格智能水肥一体化系统产品,那么对性能较为敏感的农户优先购买高性能高价格产品,对价格较为敏感的农户将选择购买低性能低价格产品,企业就会面临无市场需求的状态,该策略在实际中也不会被企业采用。综上,企业实际上只在高性能高价格、低性能低价格2种策略中进行选择。

基于我们对企业访谈得到的信息,本文对智能水肥一体化系统产品购置价格博弈模型提出以下假设:(1)农户使用高性能智能水肥一体化设备获得的单位效用大于使用低性能设备所获得的单位效用,即 $U_H > U_L$ ,其中 $U$ 表示农户的效用,下标H和L分别表示高性能智能水肥一体化设备和低性能设备。(2)相较于生产低性能的智能水肥一体化设备,生产高性能的设备需要额外付出成本 $C$ 用于研发或模仿。(3)农机企业和农户共同完整地分享政府提供的农机

补贴,即  $T = T_E + T_F$ ,其中  $T$  表示政府对单位农机补贴的金额,  $T_E$  和  $T_F$  分别表示企业和农户分享的金额。

为探究智能农机市场中农户的价格接受行为与企业的生产与定价行为,本文根据以上假设,构造了现行农机购置补贴下的农机供求两方的收益矩阵

表1 现行农机购置补贴政策下的农机供求两方的收益矩阵

Table 1 The payoff matrix of machinery suppliers and consumers under the current machinery purchase subsidy policy

主体 Entities	农机企业 Machinery supplier	
	策略 Strategies	高性能高价格 High performance high price Low performance low price
农户 Farmer	接受高价 Accepting high price	$U_H - P_H + T_F,$ $(P_H + T_E)Q_H - C$
	不接受高价 Not accepting high price	$0, -C$ $U_L - P_L + T_F,$ $(P_L + T_E)Q_L$

其中,  $P$  为实施补贴前智能水肥一体化系统的市场均衡价格,  $Q$  为需求量。当农户不接受高价格的智能水肥一体化系统产品时,若企业选择高性能高价格策略,企业会损失  $C$  单位的研发或模仿成本;若企业选择低性能低价格策略,企业可以获得  $(P_L + T_E)Q_L$  的利润,农户获得  $U_L - P_L + T_F$  的单位效用。相比之下,企业会选择生产低性能低价格的智能水肥一体化系统产品。当农户愿意接受高价格的智能水肥一体化系统产品时,企业的策略取决于销售收益与研发成本的大小。若  $(P_H + T_E)Q_H > C$ ,则企业的利润为正,其策略为生产高性能高价格智能水肥一体化系统产品。在以上条件成立的情况下,双方的博弈存在2个纳什均衡,分别为(不接受高价,低性能低价格)和(接受高价,高性能高价格)。

尽管双方的博弈存在2种均衡,但根据我们对农机企业负责人的访谈得知,我国目前的智能水肥一体化高端产品市场规模比较小,绝大部分农户的生产措施、配套技术和销售渠道等无法及时跟上,农户使用高性能智能水肥一体化系统支付较高的价格,但对于产量提升并没有很高的正面影响。这是农户不太愿意接受高价智能水肥一体化系统的原因之一。同时,我国的农业科技起步较晚,智能水肥一体化系统作为农业科技的前沿产品,研发成本较高,若企业想要生产高性能智能水肥一体化系统,则需要采购国外高端零部件或是依赖国外先进技术,由此带来的成本会非常高。这一系列的问题导致国内企业更愿意选择低性能低价格策略。相比于我国,以色列、荷兰等农业强国较早实施农业数字化战略,技术方面具备绝对优势,企业研发高性能智能水肥一体化设备的成本较低。这样一来,国外企业能够选

(表1),用以展示相关主体在相应行动策略下的收益,并基于此求解双方博弈的纯策略纳什均衡。在收益矩阵中,逗号前的表达式代表行参与者(农户)的收益,逗号后的表达式代表列参与者(企业)的收益。

择高性能高价格策略。

只有同时满足  $U_H - U_L > P_H - P_L$  和  $P_H Q_H - C > T_E(Q_L - Q_H) + P_L Q_L$  时,即农户使用高性能智能水肥一体化设备相比于使用低性能设备带来的效用提升大于购买高性能设备和低性能设备的售价之差,企业销售高性能智能水肥一体化设备的净利润大于通过降价套取的补贴额与销售低性能设备的净利润之和时,农户接受高价设备和企业生产高性能设备是双方的严格占优策略。

3) 对策分析。从上文的分析可知,尽管我国现行的农机购置补贴政策能够提高农户购买智能水肥一体化系统的意愿,但对企业生产高性能智能水肥一体化系统没有激励作用,导致市场中以低端智能水肥一体化设备为主,甚至出现了虚标档次、降低性能等行为。为引导农户购买和企业生产高性能高价格的智能水肥一体化设备,本文重新设计了补贴机制,从博弈论的角度优化资源配置,寻求可能的对策。补贴的具体措施为:保留我国现有的农机购置补贴政策,对购买高性能农机的农户增加性能补贴,即政府对高性能农机的补贴总额为  $\alpha T$  ( $\alpha > 1$ )。双方博弈的收益矩阵见表2。

性能补贴提升农户购买高性能农机的单位效用水平  $\alpha T_F$ ,促使农户购买高性能农机,减少对低性能农机的需求。对于企业而言,在性能补贴政策实施后,削弱了“通过降价套取购置补贴”  $T_E(Q'_L - \alpha Q'_H)$  对企业的吸引力,提高了高性能农机的销售总额  $P_H Q'_H$ ,且获得了  $\alpha T_E Q'_H$  的性能补贴。因此,在满足不等式(1)的前提条件下,双方博弈存在唯一的纳什均衡,即农户选择接受高价策略,企业选择高性能高价格策略。

表2 农机性能补贴政策下的农机供求两方的收益矩阵  
**Table 2 The payoff matrix of machinery supplier and consumer under the policy subsidizing the quality of agricultural machinery**

主体 Entities	农机企业 Machinery supplier	
	策略 Strategies	高性能高价格 High performance high price 低性能低价格 Low performance low price
农户 Farmer	接受高价 Accepting high price	$U_H - P_H + \alpha T_F,$ $(P_H + \alpha T_E)Q'_H - C$
	不接受高价 Not accepting high price	$0, -C$ $U_L - P_L + T_F,$ $(P_L + T_E)Q'_L$

$$\begin{cases} U_H - U_L + (\alpha - 1)T_F > P_H - P_L \\ P_H Q'_H - C > T_E(Q'_L - \alpha Q'_H) + P_L Q'_L \end{cases} \quad (1)$$

在农机补贴政策制定中,能否实现按照多项性能的补贴关键在于有效区分不同的农机产品性能的成本是否足够低。

### 2.2 产学研合作下的智能性功能研发

1)智能水肥一体化系统产学研合作现状与机制。我国智能水肥一体化系统生产企业由于自主研发能力不足,智能化系统的研发主要依赖于产学研合作。水肥一体化系统的智能化程度取决于系统智能决策的算法模型,其中包括农业生物模型、农业环境模型、农业技术模型、农业经济模型。发达国家的智能水肥一体化公司往往从种子和农艺公司发展而来,他们从20世纪50年代开始就已经投入到农业模型的基础科学研究中,已经有能力依靠自身研发智能化水平较高的水肥一体化系统。而目前我国智能水肥一体化生产企业多数从互联网平台的应用起步,没有农艺技术、数据以及农业模型的知识积累,需要依赖研究所或高校进行产学研合作来开发水肥一体化系统的智能模块。而且,由于企业本身研发能力较弱,高校在研发合作中占据主导地位。水肥一体化系统智能化的技术研发效果很大程度上取决于高校的研发投入。因此,如何在产学研合作中通过机制设计督促高校投入充足的精力开发智能化系统是水肥一体化系统智能化水平提高的关键。

相关调查显示,技术创新是目前我国产学研合作的主要目标之一<sup>[17]</sup>。目前我国的水肥一体化企业普遍不具备独立研发的能力,与高校、科研院所等科研机构的产学研合作是这些企业突破技术瓶颈的重要可能途径。然而,与水肥一体化企业的访谈显示,他们与科研机构合作的积极性并不高。主要原因是企业发现科研机构缺乏足够激励,导致所交付的研发成果往往难以达到企业预期的使用效果。科研机构的研究产出与企业的需求存在差距的原因有:首

先,由于研发成果转化为实际效益的周期较长,科研人员往往只能在研发阶段获得一定的报酬,产品研发成功获得收益往往难以索取。其次,国内高校目前对于科研人员的绩效考核一般以发表论文和申报科研基金为导向,对服务企业研发的认可度不高。第三,突破智能水肥一体化系统的技术瓶颈是一项系统工程,很少有国内企业能够负担和保障大量的持续的研发投入。

2)智能水肥一体化系统企业与科研人员的博弈。在产学研合作博弈中,博弈双方分别为企业和科研人员,企业为委托方,科研人员为受托方。一般情况下,企业与科研人员签订固定报酬的委托合同,并在具体的合同中约定科研人员需要用于产品研发的投入,包括时间成本、金钱成本以及人力成本等。

企业和科研人员均以自身利益最大化为目标,在博弈过程中,他们都面临2种策略选择。企业可以选择是否监督科研人员的研发过程,如果选择监督,企业会产生一定的监督成本。科研人员则可以选择是否充分投入研发水肥一体化的智能系统。当科研人员不充分投入与企业的合作研发时,他们会将节省下来的成本用于自己的科研,从而获得额外的科研成果。此外,如果企业发现科研人员在研发过程中存在“不充分投入”的问题,科研人员会面临3种可能的利益损失:一是企业会在尾款中扣除一部分报酬;二是丧失未来继续合作的机会;三是科研人员在行业中的口碑会受损。在此背景下,本文对博弈模型做出如下的假设:(1)科研人员充分投入从而研发出来的水肥一体化系统智能化水平要高于不充分投入时研发的产品。(2)如果科研人员的不充分投入行为被企业监管到,那么企业不予支付剩余的研发报酬或从科研人员处获得的赔偿要大于企业的监管成本。

表3为企业与科研人员的收益矩阵,列举了不同策略选择组合情况下企业和科研人员的收益情况。其中



表3 智能水肥一体化系统产学研合作的收益矩阵(1)  
Table 3 The payoff matrix of suppliers and researchers in the cooperation of developing smart water-fertilizer integrated system (1)

主体 Entities	企业 Enterprise		
	策略 Strategies	监管 Supervision	不监管 No supervision
科研人员 Researcher	充分投入 Fully devoted	$K - \bar{C},$ $Y_H - K - M$	$K - \bar{C},$ $Y_H - K$
	不充分投入 Not fully devoted	$K - \bar{C} - F_1 + U_s,$ $Y_L - K - M + F_2$	$K - \bar{C} + U_s,$ $Y_L - K$

$K$ 代表约定的固定委托报酬,  $Y_H$ 代表科研人员充分投入研发时研发的水肥一体化系统智能化水平,  $Y_L$ 代表科研人员不充分投入研发时研发的水肥一体化系统的智能化水平,  $\bar{C}$ 是企业与科研人员约定的总研发投入,  $F_1$ 是科研人员面临的总惩罚损失,  $F_2$ 是企业未支付的研发报酬或从科研人员处获得的赔偿,  $M$ 是监管成本,  $U_s$ 是科研人员将剩余精力用于自身科研时所获得的科研成果回报。

基于上述产学研博弈的收益矩阵,我们发现是否存在纳什均衡取决于  $U_s$  是否大于  $F_1$ , 即科研人员将剩余精力投入自身科研所获得的回报是否会大于因监管而产生的损失金额。如果前者大于后者,那么这个博弈存在唯一的纳什均衡为(不充分投入, 监

表4 智能水肥一体化系统产学研合作的收益矩阵(2)

Table 4 The payoff matrix of enterprise and researcher under the cooperation of developing smart water-fertilizer integrated system (2)

主体 Entities	企业 Enterprise		
	策略 Strategies	监管 Supervision	不监管 No supervision
科研人员 Researcher	充分投入 Fully devoted	$K - \bar{C} + \mu Y_H, Y_H - K - M$	$K - \bar{C} + \mu Y_H, Y_H - K$
	不充分投入 Not fully devoted	$K - \bar{C} - F_1 + U_s + \mu Y_L, Y_L - K - M + F_2$	$K - \bar{C} + U_s + \mu Y_L, Y_L - K$

表4显示,当  $\mu(Y_H - Y_L) > U_s$  时,科研人员与企业之间的博弈形成了唯一均衡点:(充分投入,不监管)。当产学研成果纳入高校绩效考核体系后,如果科研人员因产学研成果获得来自高校的边际绩效收益高于自身科研产生的边际收益,那么即使企业不进行监督的情况下,科研人员也会全力投入研发。相反,如果来自高校的边际绩效收益低于自身研究所带来的边际收益,博弈则形成与表3博弈矩阵类似的困境,即要么双方无法形成均衡,要么均衡点为(不充分投入,监管)。

此外,产学研合作机制本身的优化也能够使双方达成激励相容,得到最优均衡。如果将原有模型1中固定报酬合约  $K$  改为按比例分成合约  $\beta Y$ , 其

管):即使当企业选择监管,科研人员依然会选择不充分投入研发;当科研人员在研发上不充分投入时,企业会选择进行监督。虽然这样的博弈存在上述均衡点,但是此状态会导致智能水肥一体化系统的研发投入一直处于较低的状态,挫伤企业参与产学研合作的积极性。相反,如果自身科研回报小于惩罚金额时,整个博弈过程无法形成纳什均衡,即企业选择监管时,科研人员会充分投入研发;科研人员充分投入研发的话,企业会选择不监管;企业不监管时,科研人员会选择不充分投入。综上,无论上述哪种情况出现,产学研合作模式都无法激励科研人员全力投入研发。

3)对策分析。本文分别从高校绩效考核机制和产学研利益分成机制着手,探讨引导博弈双方达到(充分投入,不监管)的最优均衡状态所需要具备的条件。首先,保持上述博弈设定不变,如果我国高校通过制度改革将服务企业研发的成果纳入到高校研究人员的绩效考核、职称评定中,那么上述博弈中科研人员会因为进行产学研合作获得来自高校的额外绩效收益,此类收益基于研发成果的市场价值进行折算,由  $\mu Y$  表示,其中  $\mu$  是绩效换算标准。在这种情况下,双方博弈的收益矩阵见表4。

表5 智能水肥一体化系统产学研合作的收益矩阵(3)

Table 5 The payoff matrix of enterprise and researcher under the cooperation of developing smart water-fertilizer integrated system (3)

主体 Entities	企业 Enterprise		
	策略 Strategies	监管 Supervision	不监管 No supervision
科研人员 Researcher	充分投入 Fully devoted	$\beta Y_H - \bar{C},$ $(1 - \beta) Y_H - M$	$\beta Y_H - \bar{C},$ $(1 - \beta) Y_H$
	不充分投入 Not fully devoted	$\beta Y_L - \bar{C} - F_1 + U_s,$ $(1 - \beta) Y_L - M + F_2$	$\beta Y_L - \bar{C} + U_s,$ $(1 - \beta) Y_L$

中,  $\beta$  是科研人员在产品生命周期中的收益分成比例。那么,博弈的收益矩阵会变成矩阵(3)(表5)。

收益矩阵(3)表明,当科研人员充分投入研发时,企业会选择不进行监管。而当企业不监管时,科研人员的选择则取决于 $\beta Y_H - \bar{C}$ 和 $\beta Y_L - \bar{C} + U_s$ 的大小。最终这一博弈均衡形成的条件与模型2的结论相似。只有当 $\beta(Y_H - Y_L) > U_s$ ,即科研人员通过利益分成获得的边际收益超过了将精力投入到自己科研时的边际收益时,他们会选择充分投入研发。此时,博弈过程就形成了一个唯一的纳什均衡,即企业不监督但科研人员充分投入研发。这个结果对于双方来说不仅仅是双赢,也是帕累托最优,智能水肥一体化系统研发的投入能保持较高的水平。综上,只有当科研人员能够从产学研合作成果中获取足够多的剩余价值时,他们才会有足够的动力全力投入智能水肥一体化系统,不管这个剩余价值来自于高校绩效考核还是企业分红。

但是,形成上述最优均衡的一个潜在条件是科研人员对于研发产品的未来市场收益掌握完全的信息,换句话说,科研人员能够准确地预估( $Y_H - Y_L$ )的值。然而,国内的高校或研究机构往往没有足够的力量掌握全面的市场信息。而且,产学研合作中并没有合理的机制激励企业在市场推广和商业化阶段对盈利信息进行公开。所以,即使产学研合作中双方采取了剩余价值分享机制,科研人员也会因为信息不对称而对应得收益产生错误估计,导致其认为分成比例没有超过边际成本收益比例,最终选择不充分投入研发产品。

鉴于此,产学研合作要形成良好的激励机制,使科研人员在没有企业监管的情况下也全力研发智能水肥一体化系统。政府一方面需要制定相关的政策,积极地引导科研人员从高校以及企业合理地分享其研发成果的剩余价值;另一方面,也要帮助科研人员进行制度建设和能力建设,使科研人员能够充分掌握所拥有的知识产权在市场上的价值。我国高校的成果转化机构一般属于校内行政部门,缺乏专业人才,而且在可能承担处置不当风险的同时,并不能享受转化的收益,导致部门内部协助科研人员进行成果转化的积极性难以调动<sup>[18]</sup>。日本的产学研制度设计较为充分地考虑了高校成果转化的激励,强调在评价教师和研究人员的业绩时,高校应考虑知识产权的创造及成果的转化、普及活动。此外,高校需按规定向做出贡献的研究者个人返还许可费,给予适当的补偿和奖励,建立根据知识产权活动业绩分配研究经费等激励机制。而且,日本政府积极帮

助高校和研发单位建立第三方的技术转移机构,主要负责帮助高校科研人员加强与企业间的交流和从事其中的协调工作,使大学、公立研究机构能够及时地掌握企业和社会的需求以及市场信息,促进产学研合作的顺畅进行。

### 2.3 垄断竞争市场下的平台标准化选择

如前所述,目前国内智能水肥一体化系统市场是一个垄断性竞争市场,各企业的生产系统互有替代性,但是也互有差异性。这些垄断性竞争的企业可以利用部分独占市场力量提高售价以获得一定的垄断利润。下面从垄断竞争市场中企业间产品标准选择的博弈出发,论证垄断性竞争是导致目前国内市场上各家智能水肥一体化系统软硬件不兼容、产品标准缺失的重要原因,并探讨如何通过政策引导和机制设计来推动平台标准化的形成。

1)智能水肥一体化系统企业的平台实施标准选择。产品标准选择的博弈双方为智能水肥一体化系统市场中的2个垄断竞争企业A和B。这2个企业的产品功能类似,企业规模类似,但是他们各自建设了自家的智能水肥一体化系统的产品标准:标准A和标准B。在市场标准协商中,双方面临着有且只有2个产品标准的策略选择,即标准A或标准B。当企业使用自家的标准时,这个企业可以利用独占市场优势获得自家平台的特有收益。只有当2家都选择了同一种标准时,市场才能实现平台兼容和产品标准化,这时2家企业都能享受到平台兼容的网络外部性收益,即产品或服务的价值会随着市场规模扩张而增加。此外,在2家企业形成标准化平台的过程中,一家企业一定是标准的接受者,另一家则是标准的制定者。标准的接受者在转换产品标准时需要承受一定的转换成本,主要包括生产设备调整或更换、原有客户维护,以及因原有技术无法达到标准要求而需要增加的研发投入等。

根据上述设定,本文构建了企业A和企业B之间博弈的收益矩阵,如表6所示。

其中, $W$ 代表网络外部性收益, $V$ 代表自家平台的特有收益, $Z$ 是标准接受者承受的转化成本。

表6收益矩阵显示:当智能水肥一体化系统平台的网络外部性收益小于自家平台特有收益与平台转换成本时( $W < V + Z$ ),各自行动策略(标准A,标准B)是唯一均衡。此时,市场标准化无法形成,企业都选择使用自家的平台。而当网络外部性收益大于自家平台特有收益与平台转换成本时,即 $W > V +$



表6 智能水肥一体化系统产品标准选择博弈的收益矩阵

Table 6 The payoff matrix of two enterprises in the product standard selection

主体 Entities	企业B Enterprise B		
	策略 Strategies	标准A Standard A	标准B Standard B
企业A Enterprise A	标准A Standard A	$W + V, W - Z$	$V, V$
	标准B Standard B	$-Z, -Z$	$W - Z, W + V$

Z,企业间的博弈会形成了多重均衡(标准A,标准A)和(标准B,标准B)。无论哪一个均衡,市场都实现了标准化,平台达成了兼容。根据这一结果,我们认为在垄断竞争的市场中,要使企业自发形成标准化的产品平台,需要这个平台具备较强的网络外部性,而且所有企业的平台转化成本要足够小。

智能水肥一体化系统平台虽然具有一定的网络外部性,但是由于目前国内企业处于垄断竞争的阶段,企业数量多但规模小,在此阶段的企业两两间的产品标准化形成的平台规模依然十分有限,因此给双方带来的网络外部性收益也相对较小。与之相对应的是,转换产品标准带来的成本却相对较高。智能水肥一体化系统企业不仅仅要提供软件产品,也要生产硬件设备部分,产品标准的转换往往会伴随着生产设备的更新、已有客户的后期维护以及为了达到新的标准要求而进一步投入研发等一系列问题,这些问题都会给智能水肥一体化系统产品的标准化带来更大的成本。我们认为在目前的阶段,转换产品标准对垄断竞争市场中的企业来说,转换成本都大于网络外部性所能带来的收益。

2) 对策分析。在垄断竞争市场中的产品标准协商前期,网络外部性收益提升空间有限,那么如何降低平台标准转换成本是智能水肥一体化系统平台能否达成兼容的关键问题。一个值得借鉴的做法是,由政府牵头选择目前市场中份额占比较大企业的产品标准,进行修改使得其他企业转换过来的成本不会过大,最后将修改后的标准设定为市场标准。这种情况对于博弈双方来说,虽然都存在一定的平台转换成本,但是成本要远小于直接换到其他企业的产品标准。所以,这种做法可以大大提高产品标准化形成的可能性。当年欧盟第二代移动通讯标准GSM的制定过程就采用了类似策略。GSM标准制定是一个十分漫长的谈判过程,欧盟需要在各个国

家的不同公司提出的标准中选出一个标准作为第二代移动通讯标准。其中需要解决的最关键的问题是技术标准中包含的知识产权问题。最终欧盟选择了Ericsson公司的提案,其中最大的原因就是Ericsson公司不拥有这个技术标准专利。而且欧盟为了解决因知识专利而产生的转化成本问题,促进相关公司结成战略联盟,对各自的专利许可证进行限量互换,实现技术共享,从而使得不同公司都能以较低的转化成本融入到新建立的移动通讯标准中<sup>[19]</sup>。

### 3 结论与对策建议

本文分析了当前我国智能水肥一体化系统发展存在的突出问题,基于农户调研和企业访谈所获信息的分析,得出当前我国智能水肥一体化系统主要存在设备性能不过硬且不稳定、系统的智能化程度较低、不同企业的软硬平台兼容性差3个方面的突出问题。

根据利益相关者理论构建的博弈论模型分析了产生这些问题的行为和制度原因,发现:(1)继续实施以定额补贴方式执行的农机购置补贴不利于我国智能水肥一体化系统的“智能”水平提升。当前政策主要是根据易于量化的单一指标(例如作业宽度、动力大小)确定农机购置补贴档次;同一档次内,是否智能化、作业性能是否稳定等对农业购置补贴额度没有影响,因此企业缺乏提高产品性能的动机。此外,由于国内企业和国外企业在研发的起点水平和边际成本上差距巨大,定额补贴措施还间接导致我国智能水肥一体化系统市场上呈现国产产品低质低价、进口产品高质高价的局面,不利于我国智能水肥一体化系统智能化地稳健推进。(2)产学研合作机制不健全导致高校和企业缺乏合作研发高性能产品的激励。当前的产学研合作模式下,产学研合作中科研人员不能充分实现其科研成果所带来的回报,因此研发投入低于最优水平,产出达不到企业预期。如此循环使得国内智能水肥一体化系统企业难以通过借助外部科研力量来提升产品的技术含量,从而形成市场竞争力。(3)智能水肥一体化系统企业是否采用统一的装备和平台开发标准取决于采用统一标准所获得网络外部性收益是否大于自设标准所带来的收益。当前我国智能水肥一体化系统市场的垄断竞争市场结构这一现状决定了对个体企业而言,从自身独有的平台标准转为采用其他企业制定的标准的成本往往大于转换可能获得的收益。因此,在没

有外界干预的情况下智能水肥一体化系统市场将难以形成平台兼容的统一标准。

基于激励相容原则和国内外实践经验探索了解决问题的可能政策着力点,对破解我国智能水肥一体化系统发展困境提出以下政策建议:

第一,优化农机购置补贴机制设计,激励高性能智能水肥一体化系统的采用和研发。当前的农机购置的补贴标准应该进一步细化,将当前用于区分档次的指标之外的更多指标,特别是反映智能化程度的指标纳入考虑。参照国际标准,对智能水肥一体化系统的核心零部件的性能提出更为详细的要求,或可从整机补贴转向零部件补贴,对设备的智能性功能部分给予更高的补贴比例。

第二,提升智能水肥一体化系统产学研合作的水平,有效帮助国内智能水肥一体化系统企业突破技术瓶颈。完善科研机构对科研人员绩效的考核体系,提高其对服务产业发展所做出的贡献的认可度。此外,增强对科研成果转化为现实生产力的“最后一公里”的服务,政府引导,打通产学研协同攻关的各个环节,探索智能水肥一体化系统行业和企业与科研人员建立长期合作关系的机制。

第三,按照“政府引导、行业主导、企业参与”的方式推动智能水肥一体化系统产品行业标准的建立。政府和行业协会可以对于不同类型的产品选择市场上占有率高的少数产品作为行业标准,评估采用相关标准对其他企业的收益和成本。政府部门据此成本收益分析建立补贴机制,激励行业内企业广泛采用该标准,最终实现产品标准的统一。

## 参考文献 References

- [1] 赵春江.智慧农业发展现状及战略目标研究[J].智慧农业,2019(1):1-7.ZHAO C J.State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J].Smart agriculture,2019(1):1-7(in Chinese with English abstract).
- [2] 熊航.智慧农业概论[M].北京:中国农业出版社,2021.XIONG H.Introduction to smart agriculture[M].Beijing:China Agriculture Press,2021(in Chinese).
- [3] WOLFERT S,GE L,VERDOUW C,et al.Big data in smart farming:a review[J].Agricultural systems,2017,153:69-80.
- [4] 黄季焜,胡瑞法,易红梅,等.面向2050年我国农业发展愿景与对策研究[J].中国工程科学,2022,24(1):11-19.HUANG J K,HU R F,YI H M,et al.Development visions and policies of China's agriculture by 2050[J].Strategic study of CAE,2022,24(1):11-19(in Chinese with English abstract).
- [5] 对十二届全国人大五次会议第3920号建议的答复[EB/OL].  
[http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201709/t20170906\\_5808201.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201709/t20170906_5808201.htm). [2022-12-12]. Reply to recommendation no. 3920 of the fifth session of the 12th national people's congress [EB/OL]. [2022-12-12]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201709/t20170906\\_5808201.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201709/t20170906_5808201.htm). 2022-11-19 (in Chinese).
- [6] 赵春江.智慧农业的发展现状与未来展望[J].华南农业大学学报,2021,42(6):1-7.ZHAO C J.Current situations and prospects of smart agriculture[J].Journal of South China Agricultural University,2021,42(6):1-7(in Chinese with English abstract).
- [7] 陈雪,毛世平,马红坤.小农生产的智能转型:契机、挑战与路径[J].农业经济,2021(10):3-5.CHEN X,MAO S P,MA H K.Intelligent transformation of small-scale peasant production: opportunity, challenge and path [J]. Agricultural economy, 2021 (10):3-5(in Chinese with English abstract).
- [8] 熊航.智慧农业转型过程中的挑战及对策[J].人民论坛·学术前沿,2020(24):90-95.XIONG H.Challenges to the smart agriculture transformation and responses [J].Frontiers,2020(24):90-95(in Chinese with English abstract).
- [9] 钟文晶,罗必良,谢琳.数字农业发展的国际经验及其启示[J].改革,2021(5):64-75.ZHONG W J,LUO B L,XIE L.International experience and enlightenment of digital agriculture development [J].Reform,2021(5):64-75(in Chinese with English abstract).
- [10] 殷浩栋,霍鹏,肖荣美,等.智慧农业发展的底层逻辑、现实约束与突破路径[J].改革,2021(11):95-103.YIN H D,HUO P,XIAO R M,et al.The underlying logic,practical constraints and breakthrough path of the development of smart agriculture [J].Reform,2021(11):95-103(in Chinese with English abstract).
- [11] 宋洪远.智慧农业发展的状况、面临的问题及对策建议[J].人民论坛·学术前沿,2020(24):62-69.SONG H Y.The status and problems of smart agriculture development and responses [J].Frontiers,2020(24):62-69(in Chinese with English abstract).
- [12] 龙江,靳永辉.我国智慧农业发展态势、问题与战略对策[J].经济体制改革,2018(3):74-78.LONG J,JIN Y H.Development situation,problems and strategic countermeasures of China's wisdom agriculture [J].Reform of economic system,2018(3):74-78(in Chinese with English abstract).
- [13] 孙九林,李灯华,许世卫,等.农业大数据与信息化基础设施发展战略研究[J].中国工程科学,2021,23(4):10-18.SUN J L,LI D H,XU S W,et al.Development strategy of agricultural big data and information infrastructure [J].Strategic study of CAE,2021,23(4)10-18(in Chinese with English abstract).
- [14] 欧阳安,崔涛,林立.智能农机装备产业现状及发展建议[J].科技导报,2022,40(11):55-66.OUYANG A,CUI T,LIN L.Development status and countermeasures of intelligent agricultural machinery equipment industry [J].Science & technology review,2022,40(11):55-66(in Chinese with English abstract).
- [15] FREEMAN R E.A stakeholder approach[M].Cambridge:Cambridge University Press,2010.

- [16] 薛洲, 耿献辉, 曹光乔, 等. 定额补贴模式能够促进农机装备制造企业创新吗: 以拖拉机制造行业为例[J]. 农业经济问题, 2021(2): 98-106. XUE Z, GENG X H, CAO G Q, et al. Can the fixed subsidy model promote the innovation of agricultural machinery and equipment manufacturing enterprises: taking tractor manufacturing industry as an example [J]. Issues in agricultural economy, 2021(2): 98-106 (in Chinese with English abstract).
- [17] 仲伟俊, 梅姝娥, 谢园园. 产学研合作技术创新模式分析[J]. 中国软科学, 2009(8): 174-181. ZHONG W J, MEI S E, XIE Y Y. Analysis of technological innovation modes for the industry-university-institute cooperation [J]. China soft science, 2009 (8): 174-181 (in Chinese with English abstract).
- [18] 赵雨菡, 魏江, 吴伟. 高校科技成果转化的制度困境与规避思路[J]. 清华大学教育研究, 2017, 38(4): 108-112, 116. ZHAO Y H, WEI J, WU W. System dilemma and implications of the current technological transformation at universities [J]. Tsinghua journal of education, 2017, 38(4): 108-112, 116 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李再扬, 杨少华. GSM: 技术标准化联盟的成功案例[J]. 中国工业经济, 2003(7): 89-95. LI Z Y, YANG S H. GSM: a successful case of strategic standardization alliance [J]. China industrial economy, 2003(7): 89-95 (in Chinese with English abstract).

## Challenges and countermeasures for development of intelligent water-fertilizer integrated systems in China: analyses based on game theory

XIONG Hang<sup>1</sup>, HE Xu<sup>2</sup>, WU Enzhe<sup>1</sup>, YI Hongmei<sup>2</sup>

1. College of Economics & Management/Institute of Macro Agriculture Research, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. School of Advanced Agriculture Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** The intelligent water-fertilizer integrated system is the integration of advanced information technology and traditional water-fertilizer integrated technology. It serves as a vital platform to enhance the utilization efficiency of water-fertilizer through the application of advanced information technology. However, the development of intelligent water-fertilizer integrated systems in China is still in its early stages. The intelligence and quality of products on the market are low in general. The standard of product is needed to be established. This article uses game theory to study the behavioral and institutional factors behind the failure of market and propose potential solutions. The results showed that the subsidy policy failed to identify products with high quality, leading firms to produce intelligent water-fertilizer integrated systems with low quality. The collaboration between industries and universities or institutes in China did not provide enough reward to researchers, resulting in a decline of the research effort. Standard negotiation in a monopolistic competitive market caused the cost of transition higher than the potential benefits. In response to the issues and reasons mentioned above, the suggestions are put forward as followings: the government should optimize the subsidy system to strengthen the identification and subsidy of the intelligent agricultural machinery equipment with high-performance. The assessment mechanism of scientific institutions should be improved to enhance the service power of the transformation department of scientific research achievements in higher education institutions. Subsidies should be given to enterprises for changing the production standards of product, guiding the establishment of unified market standards.

**Keywords** smart agriculture; smart agricultural machinery equipment; subsidy policy; collaboration between industries and universities or institutes; compatible platform; game theory; incentive-compatible

(责任编辑: 张志钰)