

水资源稀缺性、灌溉技术采用与节水效应^{*}

徐依婷 穆月英 (中国农业大学经济管理学院 北京 100083)
侯玲玲 (北京大学现代农学院 北京 100871)

摘要: 水资源及其有效利用,关系到粮食安全和农业可持续发展。本文基于粮食主产区农户调查数据,构建反事实分析框架考察灌溉技术采用的节水效应,在此基础上,从水资源稀缺性视角检验节水效应的异质性,并进一步对灌溉水回弹效应展开讨论。结果表明:水资源短缺、技术认知充分、家庭资本充裕以及参与合作社将提高农户灌溉技术采用的概率;从节水效应来看,高效灌溉技术可实现单位面积粮食生产节水 22%~62%,但是灌溉面积扩张与种植结构变动会导致灌溉水的回弹效应,若不加以限制,节水效应将被新增用水完全抵消;此外,不同水资源禀赋水平下,灌溉技术采用对粮食生产用水的影响存在明显异质性,在水资源短缺尚未严重制约农业发展的阶段,预先推广高效灌溉技术的节水效果更优。据此,本文从政府、地区和农户 3 个层面提出粮食生产节水利用的对策和政策建议。

关键词: 灌溉技术;水资源禀赋;节水效应;内生转换模型;回弹效应

一、引言

日渐凸显的水资源供需矛盾已成为制约农业可持续发展的瓶颈,关系到国家粮食安全,而加快发展节水农业是破解农业发展困局、推进现代农业建设的关键。节水灌溉作为节水农业的重要措施,为实现水资源消耗总量和强度双控目标被寄予厚望。近年来,政府大力支持农田水利建设,明确指出积极推广喷灌、微灌、集雨补灌等高效节水技术强化农业节水^①。进入本世纪以来,中国农田水利设施建设快速推进,有效灌溉面积由 2000 年的 5382 万公顷持续增加至 2019 年的 6760 万公顷,增长幅度达 25.6%^②。尽管每年全社会投入节水农业的资金高达 50 亿元以上,但是农业部门的节水成果与预期仍有较大差距,农业用水量的降幅仅为 2.9%^③。在此背景下,评估以节水灌溉技术为代表的农田水利设施的节水效果,具有重要的现实意义。

截至目前,关于节水灌溉技术的研究主要集中在灌溉技术采用行为、意愿及其影响因素等方面。大量文献表明,技术认知、灌溉模式、风险态度、政府补贴是影响灌溉技术采用的主要因素(Suárez-Varela 等 2015;李丰 2015;徐涛等 2018),还有学者提出社会网络可以通过影响推广服务效果促进节水技术采用(乔丹等 2017)。此外,水资源稀缺性会诱致节水技术采用从而提高灌溉效率,基于智利中部农场的研究表明,相对丰富的水资源反而会阻碍农户的灌溉技术采用行为(Jordán 等 2020)。

与此同时,灌溉技术采用的节水效应逐渐引起学者们的关注。在工程学、农学等自然学科领域,

^{*} 项目来源:国家社会科学基金重大项目“我国粮食生产的水资源时空匹配及优化路径研究”(编号:18ZDA074)。穆月英为本文通讯作者

① 资料来源:“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案.水利部,2016

② 数据来源:国家统计局网站,http://www.stats.gov.cn

③ 数据来源:农业部关于推进节水农业发展的意见.农业农村部,2012;中国水资源公报.水利部,2019

关于节水效应的研究较为丰富。明晰节水效应的内涵是深入探讨灌溉技术节水潜力的前提。在不同的空间尺度上,节水效应的定义亦有所不同(Clemmens 等 2008)。在田间尺度上,工程型灌溉技术采用的节水效应通常定义为灌溉取水口的“毛节水量”,包括回归水等可回收水量的减少(雷波等,2011);在灌区、流域等更大尺度上,学者们较多的关注灌溉工程的“真实节水量”,认为田间尺度无法利用的回归水最终也可通过水循环的方式实现重复利用(宋健峰等,2017),且不应作为节水效应的一部分。

由于研究尺度和测度方法的不同,学术界关于灌溉技术采用对农业用水量的影响方向尚无定论。在田间、作物等小尺度上,既有文献多采用田间试验的方式探讨不同水分盈亏条件下作物的需水规律(冯诚等,2017;魏永霞等,2018),以及滴灌、喷灌、沟灌等不同灌溉方式下作物耗水特征(Cetin等,2002;Hanson等,1997)。在流域等大尺度范围上,既有研究多采用水文经济模型,结合水文、气象、农艺、经济、政策制度等多维度展开情景模拟。其中,Ward等(2008)的研究表明,采用滴灌等高效灌溉技术虽能有效提高水生产率和粮食安全,但会导致下游回归水的减少并且阻碍地下水补给,在流域规模下未必能实现真实节水;Fishman等(2015)基于印度水文气候和农业数据的研究表明,高效灌溉技术采用的节水效果与灌溉面积存在高度敏感性,若考虑灌溉面积的扩张,既有的节水成果将损失近半。

综上所述,既有研究为本文提供了经验参考和启示,但在以下3个方面仍有待深入探讨:其一,尽管有不少文献对灌溉技术的节水效应展开了研究,但大多着眼于灌区、流域等空间尺度,或是关注灌溉技术在作物层面的耗水规律,从微观经济学角度将农户灌溉行为纳入考虑范畴的尚不多见;其二,既有以农户为研究对象的文献又大多聚焦于农户灌溉技术采用的决策及其影响因素,鲜有涉及灌溉技术采用对农业用水量的影响评估;其三,已有评价灌溉技术节水效果的文献,忽略了不同水资源禀赋条件下节水效应的异质性,不利于因地制宜地开展节水技术推广。

在当前“大国小农”的基本国情下,农户仍是最主要的农业生产经营主体(罗必良,2020),其水资源管理方式和生产行为将对灌溉技术的采用效果产生重要影响。因此,在经济学框架下从微观农户视角讨论灌溉技术的节水效果十分必要。节水农业的关键环节在田间,抓住农田节水就抓住了节水农业的根本^①。那么,在农田基本单元上,农户灌溉技术的采用是否发挥了节水作用?其节水效果是否会因水资源禀赋的差异而产生异质性?围绕以上问题,本文基于冀鲁豫三省粮食种植户的实地调研数据,利用内生转换模型实证分析农户灌溉技术采用对农业生产用水的影响效应和作用机制,在此基础上,从水资源稀缺性视角进一步检验节水效应的异质性,对可能存在的回弹效应展开讨论,并提出相应的对策建议。

二、理论基础与模型构建

(一) 理论基础

根据“理性经济人”假定,农户会在利润最大化驱动下采取可实现最高净收益的要素投入策略。本文选取以地下水为主要灌溉水源的农户,借鉴Wang等(2015)提出的理论模型,构建如下水资源利用的利润最大化方程:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x_w} \pi &= \text{Max}_{x_l, x_f, x_m, x_w} PY(x_l, x_f, x_m, x_w, \delta) - \sum_i c_i x_i - c_w x_w(\delta) - c_\delta(\delta) \delta \\ \text{s. t.} &\begin{cases} x_i \geq 0 & i=l, f, m \\ x_w \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

^① 资料来源:农业部关于推进节水农业发展的意见. 农业农村部,2012

其中, Y 和 P 分别为粮食产量和价格; x_l 、 x_f 、 x_m 、 x_w 分别表示劳动力、化肥、机械和水资源 4 种要素投入量; 要素 i 的单位成本为 c_i ; δ 表示某类灌溉技术的灌溉效率; c_w 表示单位灌溉水投入的成本。在地下水为主要灌溉水源的地区体现为抽水成本; c_δ 表示投资灌溉技术的成本。水资源投入量 x_w 的大小受灌溉技术 δ 的影响。现实中采用灌溉效率高的节水技术通常需要更高成本, 因此假设 $c_\delta(\delta)$ 是 δ 的增函数。

根据 Amosson 等(2011) 给定抽水扬程下, 不同灌溉技术的抽水成本差异不大, 抽水成本 c_w 的大小主要由抽水扬程决定。

关于水资源投入 x_w 的一阶条件如下:

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_w} = P \frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_l, x_f, x_m, x_w^*(\delta), \delta) - c_w = 0 \quad (1)$$

为考察 δ 对 x_w 的影响(即灌溉技术采用对用水量的影响), 将(1)式两边对 δ 求全微分:

$$P \frac{\partial^2 Y}{\partial x_w^2}(x_l, x_f, x_m, x_w^*(\delta), \delta) \frac{\partial x_w}{\partial \delta} + P \frac{\partial^2 Y}{\partial x_w \partial \delta}(x_l, x_f, x_m, x_w^*(\delta), \delta) = 0 \quad (2)$$

将(2)式变换形式可得:

$$\frac{\partial x_w}{\partial \delta} = -P \frac{\partial^2 Y}{\partial x_w \partial \delta}(x_l, x_f, x_m, x_w^*(\delta), \delta) / P \frac{\partial^2 Y}{\partial x_w^2}(x_l, x_f, x_m, x_w^*(\delta), \delta) \quad (3)$$

由于二阶导小于 0, $\frac{\partial x_w}{\partial \delta}$ 的正负取决于 $\frac{\partial^2 Y}{\partial x_w \partial \delta}$ 。换言之, 若采用更高效的灌溉技术能够提高水资源投入的边际产出, 取值为正; 反之, 则取值为负。

为便于分析, 假设只有两类灌溉技术的情景, 灌溉效率分别为 δ^L 和 δ^H , $\delta^H > \delta^L$ 。存在抽水成本的阈值 \bar{c}_w , 使得高灌溉效率和低灌溉效率水平下的水资源边际产品价值相等*, 可表示为如下(4)式:

$$P \frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_i, \bar{x}_w, \delta^H) = P \frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_i, \bar{x}_w, \delta^L) = \bar{c}_w \quad (4)$$

具体而言, 将高灌溉效率和低灌溉效率水平下的粮食生产函数绘制如图 1 所示, 横坐标为水资源投入。高灌溉效率下的水资源边际产品价值降低至 0 时, 水资源投入达到最大值 x_w^{Hmax} 。在阈值 \bar{c}_w 下, 高灌溉效率和低灌溉效率水平下的最优水资源投入相等, 即 $\bar{x}_w = x_w^*(\delta^H, c_w, P) = x_w^*(\delta^L, c_w, P)$, 此时曲线 $Y(x_i, x_w^H(\delta^H), \delta^H)$ 和 $Y(x_i, x_w^L(\delta^L), \delta^L)$ 在 $x_w = \bar{x}_w$ 处的斜率相等。

当抽水成本高于阈值 ($c_w = C_w^1 > \bar{c}_w$) 时, $\frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_i, x_w^{H*}, \delta^H) = \frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_i, x_w^{L*}, \delta^L) = \frac{C_w^1}{P} > \frac{\bar{C}_w}{P}$, 生产函数在最优水资源投入点的斜率大于阈值点, 高灌溉效率和低灌溉效率水平下的最优水资源投入分别为 x_w^{H*} 和 x_w^{L*} , 且在 $x = x_w^{H*}$ 处, 前者的水资源边际产出高于后者, 存在 $x_w^{L*} < x_w^{H*} < \bar{x}_w$ 。灌溉效率由 δ^L 提升到 δ^H , 水资源投入由 x_w^{L*} 增加到 x_w^{H*} , 此时农户采用高效节水灌溉技术无法减少用水量。

当抽水成本低于阈值 ($c_w = C_w^2 < \bar{c}_w$) 时, $\frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_i, x_w^{H*}, \delta^H) = \frac{\partial Y}{\partial x_w}(x_i, x_w^{L*}, \delta^L) = \frac{C_w^2}{P} < \frac{\bar{C}_w}{P}$, 高灌溉效率和低灌溉效率水平下的最优水资源投入分别为 x_w^{H*} 和 x_w^{L*} , 且在 $x = x_w^{H*}$ 处, 前者的水资源边际产出低于后者, 存在 $x_w^{L*} > x_w^{H*} > \bar{x}_w$ 。灌溉效率由 δ^L 提升到 δ^H , 水资源投入由 x_w^{L*} 减少到 x_w^{H*} , 此时农户采用高效节水灌溉技术能有效减少用水量。

* 可利用中值定理证明得到

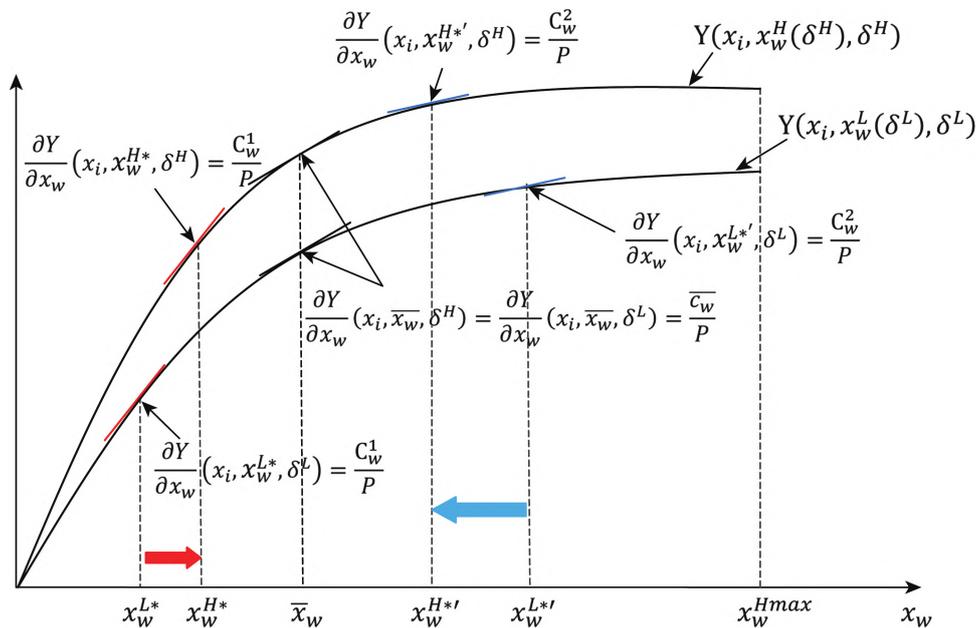


图1 不同灌溉效率水平下灌溉技术对农业用水的影响分析

由此可见,抽水成本的大小关系到高效节水灌溉技术实施的节水效果,在不同的抽水成本下,灌溉技术采用对农业生产水资源投入的影响存在明显的异质性。结合已有研究,地下水水位下降会造成水泵抽水扬程增加,从而导致抽水成本上升(朱文彬等,1994)。那么,在以地下水为主要水源的地区,水资源稀缺性程度直接决定了抽水成本,从而会对灌溉技术的节水效果产生影响。

为了更清晰的阐述水资源稀缺性、灌溉技术采用和节水效应之间的内在作用机理,构建理论框架图,如图2所示。首先,水资源稀缺性变化对节水灌溉技术采用决策的影响体现在:一方面,可诱致节水型农业技术的变革,促进节水灌溉技术的扩散;另一方面,水资源短缺伴随的生产不确定性可能会促使农户采用节水灌溉技术以降低生产风险,规避潜在的风险损失(贺志武等,2018)。其次,节水灌溉技术采用的节水效果不仅影响农户的长期采用决策,还关系到技术推广的有效性,对节水效应的分析是本文的研究重点。具体而言,相较传统的畦灌、沟灌等灌溉技术而言,采用滴(喷、微)灌、地下管道、渠道衬砌等现代节水灌溉技术可优化生产要素配置,提高灌溉水生产率,在不减少产量的前提下降低对灌溉水的投入。结合图1的分析结果,在考察灌溉技术的节水效应时,不应忽视水资源禀赋异

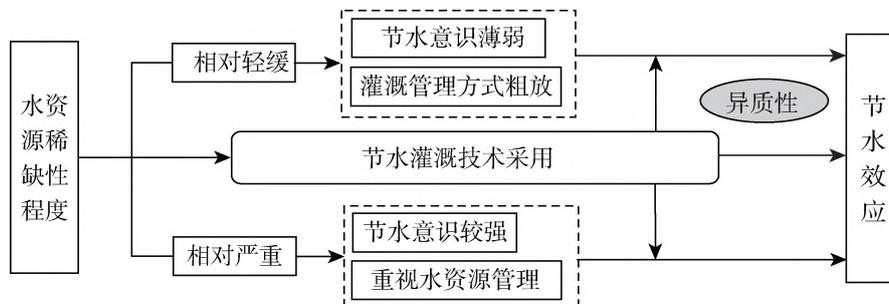


图2 水资源稀缺性、灌溉技术采用和节水效应的内在作用机理

质性造成的节水效果差异。在水资源稀缺程度较为轻缓的地区,农户节水意识普遍薄弱,更倾向于相对粗放的灌溉方式,水资源利用效率低下,在推广高效节水灌溉技术后的节水潜力较大;而在水资源稀缺程度较为严重的地区,农户通常具有较强的节水意识(张益等,2019),在农业生产中重视水资源管理,因此在节水灌溉技术采用后的节水空间比起前者而言可能相对有限。

结合以上理论分析,提出如下假说:

H1: 水资源稀缺性程度与节水灌溉技术采用行为呈正相关关系;

H2: 采用节水灌溉技术能够减少粮食种植户的水资源投入;

H3a: 不同水资源禀赋水平下,灌溉技术采用对粮食生产用水的影响存在异质性;

H3b: 水资源稀缺性程度超过门槛值后,技术采用的节水效果显著下降。

(二) 模型构建

在理论分析基础上,构建如下粮食生产水资源投入影响效应的基本模型:

$$W = X\beta + \alpha_1 tech + \alpha_2 scar + \varepsilon \quad (5)$$

其中, W 表示单位面积粮食生产的用水量; $tech$ 表示是否采用节水灌溉技术; $scar$ 表示水资源稀缺性程度;向量 X 包含农户生产特征(水资源、化肥、劳动力和机械等投入要素价格以及粮食价格)、个人特征、家庭特征、村庄特征等控制变量; ε 为随机扰动项。

考虑到实际中农户是否采用节水灌溉技术这一决策并非随机分配,而是基于预期收益和农户自身特征等因素理性选择的结果,若直接对基本模型进行回归,可能由于“自选择”问题使得估计结果存在偏误。已有文献尝试采用倾向得分匹配法(PSM)和工具变量法(IV),但仍存在遗漏变量或是无法对处理组和对照组进行差别化分析等问题。相较之下,内生转换模型可有效解决由不可观测因素带来的样本选择偏误。因此本文采用内生转换模型,通过反事实分析,差别化评价节水灌溉技术采用对采用组和未采用组农户水资源投入的影响效应,该模型包含如下行为方程和两个结果方程:

节水灌溉技术采用的行为方程:

$$tech = Z\rho + \vartheta scar + \mu \quad (6)$$

其中,向量 Z 表示影响农户是否采用节水灌溉技术的各类解释变量,包含个人特征、家庭特征、村庄特征、地区虚变量; μ 为随机扰动项;为保证内生转换模型的可识别性,引入技术认知作为工具变量,该变量仅对行为选择方程产生影响,对粮食生产用水量不产生直接影响。依据是否采用节水灌溉技术,将农户分为采用组($tech = 1$)和未采用组($tech = 0$),其粮食生产用水量影响方程可由(6)式分别转化为(6a)式和(6b)式:

$$W_T = X_T\beta_T + \theta_T scar + \mu_T \quad \text{if} \quad tech = 1 \quad (6a)$$

$$W_U = X_U\beta_U + \theta_U scar + \mu_U \quad \text{if} \quad tech = 0 \quad (6b)$$

其中, W_T 和 W_U 分别表示采用组和未采用组农户的单位面积粮食生产水资源投入; X_T 和 X_U 可包含基本模型中 X 的不同解释变量; μ_T 和 μ_U 分别表示两组的随机扰动项。受不可观测因素影响,行为选择方程与用水影响方程的残差项可能相关,可通过引入逆米尔斯比率(λ)对模型进行修正。具体步骤为:

首先,采用Probit模型估计技术采用行为选择方程,将计算得到的逆米尔斯比率(λ_T, λ_U)以及协方差 $\sigma_{T\mu} = \text{cov}(\mu, \mu_T)$ 和 $\sigma_{U\mu} = \text{cov}(\mu, \mu_U)$ 分别引入用水影响方程,转化得到如下两个方程:

$$W_T = X_T\beta_T + \theta_T scar + \sigma_{T\mu} \lambda_T + \mu_T \quad \text{if} \quad tech = 1 \quad (6c)$$

$$W_U = X_U\beta_U + \theta_U scar + \sigma_{U\mu} \lambda_U + \mu_U \quad \text{if} \quad tech = 0 \quad (6d)$$

其次,采用完全信息极大似然法(FIML)同时估计行为方程(6)、用水决策方程(6c)和(6d),可得到无偏一致估计量并改进估算效率(冯志坚等,2019)。需要说明的是,若行为方程和用水量影响方程扰动项的相关系数($\rho_{T\mu}, \rho_{U\mu}$)在统计意义上显著,表明节水灌溉技术采用行为与水资源投入相关,

纠正样本选择偏差具有必要性。

基于反事实分析框架,比较真实情境与反事实条件下节水灌溉技术采用组和未采用组农户的用水量期望值,进而估计节水灌溉技术采用对粮食生产用水影响的平均处理效应。

采用组的用水量条件期望值(处理组):

$$E[W_T | tech = 1] = X_T \beta_T + \theta_T scar + \sigma_{T\mu} \lambda_T \quad (7a)$$

未采用组的用水量条件期望值(控制组):

$$E[W_U | tech = 0] = X_U \beta_U + \theta_U scar + \sigma_{U\mu} \lambda_U \quad (7b)$$

处理组和控制组在反事实条件下的期望值分别为:

$$E[W_U | tech = 1] = X_T \beta_U + \theta_U scar + \sigma_{U\mu} \lambda_T \quad (7c)$$

$$E[W_T | tech = 0] = X_U \beta_T + \theta_T scar + \sigma_{T\mu} \lambda_U \quad (7d)$$

采用组粮食生产用水的平均处理效应,即处理组的平均处理效应(Average Treatment effect on the Treated, ATT),可通过(7a)式与(7c)式之差得到:

$$\begin{aligned} ATT &= E[W_T | tech = 1] - E[W_U | tech = 1] \\ &= X_T(\beta_T - \beta_U) + scar(\theta_T - \theta_U) + \lambda_T(\sigma_{T\mu} - \sigma_{U\mu}) \end{aligned} \quad (8)$$

对应地,未采用组粮食生产用水的平均处理效应,即对照组的平均处理效应(Average Treatment effect on the Untreated, ATU),可表示为(7b)式与(7d)式之差。

$$\begin{aligned} ATU &= E[W_T | tech = 0] - E[W_U | tech = 0] \\ &= X_U(\beta_T - \beta_U) + scar(\theta_T - \theta_U) + \lambda_U(\sigma_{T\mu} - \sigma_{U\mu}) \end{aligned} \quad (9)$$

在此基础上,进一步检验水资源禀赋对灌溉技术采用的节水效果是否具有异质性。换言之,是否存在水资源稀缺程度的门槛值,使得以门槛值为界划分的两个子样本,其节水灌溉技术采用对粮食生产用水量的影响存在显著差异。基于不同水资源稀缺性程度,分别构建节水灌溉技术采用对用水量的影响效应方程,测算并比较子样本处理组和控制组粮食生产用水的平均处理效应,判断假说 H3a 和 H3b 是否成立。

三、数据来源与变量选择

(一) 数据来源

本文使用的数据来自课题组于2019年1—2月在河北、山东和河南三省开展的农户调研。冀鲁豫三省是北方粮食主产区的重要组成部分,其粮食产量之和占全国总产量的24%,其中小麦、玉米产量分别占全国产量的57%和27%,在保障北方粮食供给方面发挥重要作用。但是近年来,受旱灾等农业气象灾害频发的影响,冀鲁豫地区降水和地表径流季节性短缺趋势加剧,引发严重的地下水漏斗等生态环境问题。保障粮食长期有效供给、提高水资源利用效率,是该地区当前农业发展的主要目标。本次调研采用分层抽样方式对冀鲁豫三大粮食主产区的调研县(市)进行了抽取,在此基础上对所调研县(市)下辖的乡镇、村开展入户调查,共覆盖23个县(市)、45个乡镇、69个村。所调查地区均以地下水作为主要灌溉水源,收集得到有效样本505份,其中河北243份、河南169份、山东93份。本次调研内容主要包括粮食种植成本收益情况、节水技术采用情况、水资源利用与认知、农户特征等信息。

(二) 变量定义与描述性统计

被解释变量为单位面积粮食生产用水量,可通过每亩灌溉费用和单位水价计算得到。但实际中“以水量计收水费”的方式尚未大范围普及,对于尚未安装用水计量设施的村庄,灌溉用水难以直接计量。参考已有文献,可采用“以电折水”的方式估算农业灌溉用水量(李娜,2014;沈波等,2017;王

剑永 2017)。核心变量为节水灌溉技术采用和水资源稀缺性程度。其中,对于灌溉技术采用决策,借鉴既有文献,一般采用虚拟变量进行量化(聂英等 2015)。在本文中,若农户采用滴(喷、微)灌、渠道衬砌、地下管道、集雨灌溉中的任意一种或多种节水灌溉技术,则将其纳入节水灌溉技术采用组,对变量赋值为 1;否则纳入未采用组,变量赋值为 0。分组比较可知,采用节水灌溉技术的农户数量为 182 户,占总样本的 36%,表明当前节水灌溉技术的普及率仍有较大提升空间。关于水资源稀缺性程度的衡量,可采用打井深度和农户水资源稀缺性认知表示。在以地下水为主要灌溉水源的地区,打井深度反映了地下水水位的高低,是地区水资源禀赋的客观体现;农户水资源稀缺性认知则是从主观感知的方面度量水资源的稀缺性程度,可作为开展稳健性检验的替代变量。

表 1 变量说明与均值描述统计

	变量名称	变量说明及单位	采用组 均值	未采用组 均值
关键 变量	用水量	单位面积粮食生产用水量(吨/亩)	267.19	314.85
	打井深度	机井的打井深度(米)	61.42	59.72
	水资源稀缺性认知	1=不严重;2=不太严重;3=一般; 4=比较严重;5=非常严重	3.29	2.62
生产 特征	作物价格	粮食作物价格(元/千克)	0.48	0.51
	农业灌溉电价	灌溉用电的价格(元/千瓦时)	0.60	0.71
	化肥价格	化肥投入要素价格(元/千克)	0.74	0.72
	机械投入价格	机械投入要素价格(元/亩)	180.16	205.82
	劳动力价格	当地雇工价格(元/工日)	95.67	113.24
	性别	户主性别:1=男;0=女	0.89	0.85
	受教育程度	户主受教育年限(年)	7.98	8.94
个人 特征	年龄	户主年龄(岁)	53.24	51.50
	种植经验	户主粮食种植年限(年)	29.32	28.43
	风险态度	1=风险规避者;0=风险偏好或中立	0.53	0.45
	节水技术认知	农户对节水灌溉技术的了解程度	0.28	0.17
	灌溉面积占比	灌溉面积占总耕地面积的比重	0.97	0.95
家庭 特征	劳动力人数	家庭劳动力与雇工折算	2.02	2.18
	是否外出打工	1=是;0=否	0.49	0.73
	家中是否有村干部	1=是;0=否	0.05	0.08
	是否加入合作社	1=是;0=否	0.13	0.06
	总收入	家庭年总收入(万元)	4.70	4.53
村庄 特征	降雨量	年平均降雨量(毫米)	628.33	660.40
	是否为节水示范村	1=是;0=否	0.07	0.04
样本量	—	—	182	323

注:关于水资源稀缺性认知,在调研中询问农户:您认为本地区水资源短缺的严重程度如何?1=不严重;2=不太严重;3=一般;4=比较严重;5=非常严重。关于节水技术认知,询问农户对各类节水灌溉技术的了解程度:1=很不了解;2=不太了解;3=一般;4=比较了解;5=非常了解。若平均水平大于 3,则认为该农户对节水灌溉技术具有较高的认知度,对“节水技术认知”这一变量赋值为 1;否则赋值为 0。

表 1 从关键变量、农户生产特征、个人特征、家庭特征、村庄特征等方面对文中涉及的变量进行分类,并比较节水灌溉技术采用组和未采用组各变量的均值差异。具体而言:从直观上看,节水灌溉技术采用组农户的用水量均值明显低于未采用组,但是其中包含了各影响因素的综合作用,灌溉技术采

用的节水效应仍需通过实证模型展开进一步的检验和量化分析;从打井深度和稀缺性认知来看,灌溉技术采用组的水资源稀缺性程度相比未采用组更为严重,可以推测水资源禀赋与灌溉技术采用决策之间存在一定关联。在生产特征方面,包含粮食作物价格和水资源、化肥、劳动力、机械等投入要素的价格*,考虑到农业水价尚处于试点阶段,井灌区主要以电抽取地下水(刘静等,2018),其灌溉用水成本与电力成本密切相关,因此参考Huang等(2017)的研究,采用灌溉电价与打井深度的交乘项作为灌溉水价的代理变量。在农户个人特征方面,相较未采用组,采用组农户的种植经验更为丰富,对节水灌溉技术的了解度相对略高。就家庭特征而言,采用组农户家庭具有较高的收入水平,劳动力投入更节约,兼业程度相对较低且更倾向于加入合作社。此外,选取年平均降雨量和是否为节水灌溉示范村作为村庄层面的控制变量。

四、实证结果分析

在实证检验中,首先构建反事实分析框架,运用内生转换模型探究节水灌溉技术采用对粮食生产水资源投入的影响效应;在此基础上,借鉴门槛回归的思路,进一步检验灌溉技术采用的节水效果是否会因水资源稀缺性差异而存在异质性;然后,以农户水资源稀缺性认知为代理变量开展稳健性检验。

(一) 灌溉技术采用对用水量的影响效应分析

表2展示了节水灌溉技术采用决策方程和用水量影响效应方程的内生转换回归估计结果。从模型适用性检验来看, $\rho_{U_{\mu}}$ 和LR检验结果显示在1%置信水平上显著,表明行为决策方程与影响效应方程之间相互关联,纠正样本选择偏差具有必要性,验证了内生转换模型在本文中的适用性。

从行为方程的回归结果来看,打井深度对灌溉技术采用决策具有显著的正向影响,表明水资源稀缺性程度加剧会刺激农户采用高效节水灌溉技术,验证了假说H1。这与理论上某种资源趋于短缺,节约该资源的技术就越有可能被采用的分析结论一致(刘亚克等,2011)。就控制变量而言,家庭资本充裕、对节水技术了解越充分并加入合作社的男性户主家庭,越倾向于采用节水灌溉技术。原因可能在于,面对一项新技术,对其认知的加强可以缓解农户的避险和畏难情绪(徐涛等,2018),从而促进该技术在生产端的推广。新技术的采用还需要额外成本投入,经济实力较差的农户家庭往往因缺乏资本而对新技术望而却步。此外,受教育程度越高、劳动力人数越多的兼业农户家庭,选择节水灌溉技术的概率较小。

从影响效应的估计结果来看,水资源稀缺性程度对灌溉技术采用组和未采用组的用水量均具有显著的正向影响,可能的原因为:参考既有研究,资源禀赋与资源利用效率存在逆向相关(张力小等,2010),水资源越稀缺的地区往往存在更高的用水效率,但是与此同时资源短缺可能会引发农户的患失心理,在风险最小化驱动下加剧对地下水的开采。从控制变量来看,其对两组农户用水量的作用方向和显著性程度不尽相同,体现了内生转换模型在刻画具有差异特征的样本方面具有优势。生产特征中,化肥和劳动力价格提高会显著降低未采用组的水资源投入,这意味着两种要素与水资源之间均存在互补关系。相比之下,由于农业用水需求缺乏弹性,灌溉水价并未取得显著的节水效果,水价偏低是水资源浪费的重要诱因之一(胡继连等,2018)。家庭特征中,灌溉面积占比的提高有利于减少采用组农户用水量,而增加未采用组用水投入;家庭收入与采用组用水量呈正向关系;加入合作社和外出打工可分别降低采用组和未采用组的粮食生产用水。

* 机械投入要素的价格包含机耕、机播、收割、脱粒的亩均费用

表2 节水灌溉技术采用决策方程与用水量影响方程的估计结果

变量	采用组		未采用组		行为方程	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
打井深度	0.005***	0.002	0.002**	0.001	0.002*	0.001
作物单价	-0.139	0.115	0.147	0.145	—	—
劳动力价格	-0.091	0.197	-0.272**	0.133	—	—
化肥价格	0.165	0.212	-0.339***	0.114	—	—
机械投入价格	-0.204*	0.122	0.012	0.052	—	—
灌溉水价	-0.023	0.105	0.030	0.047	—	—
性别	-0.150	0.106	0.061	0.078	0.305*	0.166
年龄	0.004	0.005	0.003	0.003	0.001	0.007
受教育程度	0.016	0.016	-0.018*	0.011	-0.101***	0.023
种植年限	0.003	0.005	-0.002	0.003	-0.003	0.006
风险态度	0.044	0.072	-0.107*	0.063	0.024	0.127
灌溉面积占比	-1.184***	0.320	1.149***	0.260	-0.183	0.456
劳动力人数	-0.029	0.052	-0.049	0.037	-0.144*	0.084
外出打工	0.108	0.080	-0.191***	0.072	-0.620***	0.139
村干部	0.049	0.143	0.027	0.116	0.072	0.251
合作社	-0.299***	0.103	0.040	0.116	0.671***	0.223
节水示范村	-0.307	0.223	-0.155	0.190	-0.243	0.332
总收入	0.086**	0.040	-0.010	0.042	0.170**	0.080
降雨量	1.062***	0.293	1.091***	0.233	—	—
省份	—	—	—	—	已控制	
节水技术了解度	—	—	—	—	0.253*	0.116
常数项	-0.288	1.677	-0.724	1.235	-1.489	1.030
ρ_T 或 ρ_U	0.291		0.988***			
LR 检验	24.41***					

注:表中用水量、打井深度、价格变量、降雨量和总收入均为对数形式;*、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平上显著。下同

基于反事实分析框架,估计农户灌溉技术采用的节水效应,将结果汇总为表3,为了更具象的描述灌溉技术采用的节水效应,图3展示了两组农户在事实和反事实情境下粮食生产用水量的概率密度分布。对数形式下,节水灌溉技术采用组在实际和反事实条件下的用水量分别为5.451和6.42,即单位面积粮食生产用水量的平均处理效应ATT为-0.969;相似地,未采用组的平均处理效应ATU为-0.25。可见,高效节水灌溉技术的采用可以显著减少粮食生产的水资源投入,且节水潜力可达到22%~62%。假说H2得证。

表3 节水技术采用对用水量处理效应的估计结果

组别	采用节水技术	不采用节水技术	ATT	ATU	节水潜力(%)
采用组	5.451	6.420	-0.969***	—	62.054
未采用组	5.393	5.643	—	-0.250***	22.120

注:表中处理效应估计值均为取自然对数后的结果

(二) 基于水资源稀缺性的节水效应异质性分析

根据上文的实证结果发现,节水灌溉技术采用显著降低了单位面积粮食生产用水量,但是理论分

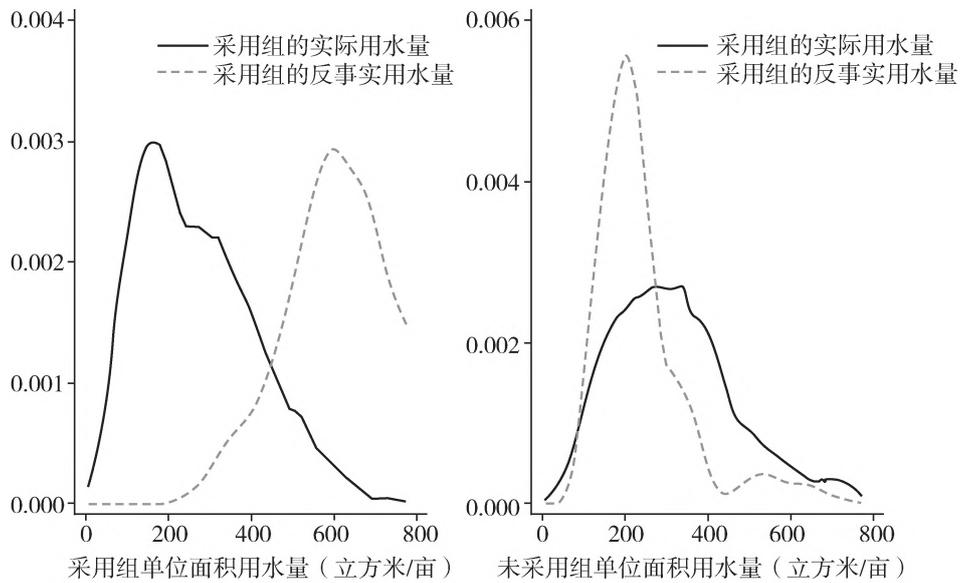


图3 灌溉技术采用与未采用组的粮食生产用水量概率密度

析表明,水资源禀赋优劣会导致节水效应产生区域差异,即水资源稀缺性可能存在门槛值,使得灌溉技术采用对粮食生产水资源投入的影响存在异质性。为检验这一假说,本文借鉴 Hansen 提出的门槛回归模型的基本原理,探究水资源稀缺性是否存在门槛值。

具体来说,门槛值检验可分为门槛值的显著性检验和真实性检验(刘双双等,2017),分别对应以下两个原假设:(1)不存在门槛值;(2)门槛值估计结果与真实值一致。利用“自举法”(Bootstrap)重复抽样500次对假设进行检验,结果如表4所示。根据表4,一方面,LM值通过1%显著性水平上的统计检验,说明拒绝原假设(1),即水资源稀缺性存在门槛值;另一方面,以打井深度表征水资源稀缺性程度,构建门槛值的置信区间,可以发现估计所得门槛值(打井深度=46.4米)处在95%置信区间内,表明无法拒绝原假设(2),佐证了门槛值的真实性。由此可见,水资源稀缺性程度会对灌溉技术采用的节水效应产生异质性,假说H3a得证。

表4 水资源稀缺性的门槛值检验

原假设	LM 值	迭代次数	门槛估计值	95%置信区间	假设检验结果
不存在门槛值	129.111***	500	—	—	拒绝
门槛估计值等于其真实值	—	500	46.4	[40, 46.4]	不拒绝

为进一步比较灌溉技术采用在水资源相对紧缺和丰沛条件下的节水效果,依照门槛值将样本划分为水资源相对紧缺组(打井深度在46.4米以上)和水资源相对丰沛组(打井深度不超过(含)46.4米),分别测算两个子样本农户灌溉技术采用对用水量影响的处理效应,估计结果整理如表5所示。根据表5,在水资源相对丰沛的子样本中,采用节水灌溉技术的农户占比为27%,ATT和ATU分别为-0.786和-0.236,且均通过1%水平上的显著性检验;在水资源相对紧缺的子样本中,采用组农户占总农户的43%,ATT和ATU则分别为-0.240和-0.134。对比两个子样本可以发现,节水灌溉技术采用均具有显著减少用水量的作用,但是相较水资源相对稀缺的情形,在水资源尚未严重制约农业生产时,实施节水灌溉技术具有更好的节水效果。可见,在北方粮食主产区推广高效节水灌溉技术的同

时,有必要结合地区水资源禀赋,防范于未然,实施因地制宜的推广策略,从而达到最优的政策效果,假说 H3b 得证。

表 5 灌溉技术采用的分样本处理效应估计结果

子样本	组别	采用节水技术	未采用节水技术	ATT(ATU)	采用组占比 (%)
水资源相对丰沛	采用组	5.388	6.174	-0.786***	27.0
	未采用组	5.411	5.647	-0.236***	
水资源相对紧缺	采用组	5.488	5.728	-0.240***	43.4
	未采用组	5.483	5.617	-0.134***	

注:表中处理效应估计值均为取自然对数后的结果

(三) 稳健性检验

对水资源稀缺性程度的刻画可以从地下水位和农户对水资源禀赋的感知两方面体现,为验证上述实证回归结果是否稳健,采用农户水资源稀缺认知替换打井深度作为水资源稀缺性程度的代理变量。根据农户感知水资源短缺的严重程度,将总样本划分为子样本 1 和子样本 2,分别估计总样本和分样本中灌溉技术采用的节水效应。此外,为检验灌溉水价指标选取的稳健性,分别以灌溉电价与打井深度的交乘项、农户的水价认知(1=很低;2=比较低;3=一般;4=比较高;5=很高)作为灌溉水价的代理变量,开展回归(1)和回归(2),将结果整理为表 6。表 6 的估计结果表明:总样本下,回归(1)和回归(2)的 ATT 和 ATU 估计结果与表 3 相近,验证了灌溉技术采用具有显著的节水效应;分样本来看,子样本 1 中 ATT 和 ATU 平均值的绝对值均大于子样本 2,这表明若农户认为本地区水资源尚且充裕,其对农业生产中的水资源管理往往缺乏足够重视,在推广和采用节水灌溉技术后,可有效减少低效用水行为,从而达到更优的节水效果,进一步验证了上文研究结论的稳健性。

表 6 灌溉技术采用的处理效应估计结果(以农户稀缺性认知划分样本)

样本	水价变量 组别	回归(1) 灌溉电价×打井深度			回归(2) 灌溉水价认知		
		采用	不采用	ATT(ATU)	采用	不采用	ATT(ATU)
总样本	采用组	5.452	6.463	-1.011***	5.452	6.395	-0.943***
	未采用组	5.268	5.640	-0.372***	5.381	5.637	-0.256***
子样本 1 (水资源稀缺性认知≤3)	采用组	5.396	5.769	-0.373***	5.338	5.818	-0.480***
	未采用组	5.180	5.643	-0.462***	5.205	5.617	-0.412***
子样本 2 (水资源稀缺性认知>3)	采用组	5.510	5.322	0.188***	5.491	6.085	-0.594***
	未采用组	5.404	5.632	-0.228***	5.458	5.659	-0.201***

五、讨 论

本文实证结果表明,在农田基本单元上,节水灌溉技术的采用能够有效减少粮食生产水资源投入。那么,如果考虑农户生产行为的动态变化,其节水效果是否将发生改变,即是否存在灌溉用水的回弹效应?联合国环境规划署(UNEP)在 2012 年的报告中提出这一灌溉用水悖论(Mcglade 等, 2012),为各国节水政策的制定和实施提供了新思路,在学术界也引起了广泛的探讨。Pfeiffer 等

(2014) 提出高效灌溉技术在提高单位水“有效性”的同时,农户可能会在利润最大化驱动下,在作物选择、轮作方式、灌溉面积等方面做出行为调整。Fang 等(2020)对灌溉技术提高产生的回弹效应进行估算,结果发现超 2/3 的节水效应被增加的农业用水所抵消。王哲等(2020)对河北省的研究发现技术进步促进了农业节水,但多数年份普遍存在回弹效应。在既有文献基础上,结合本文的实证分析结果,从农户行为的动态视角对灌溉用水的回弹效应展开进一步的讨论和分析。

(一) 考虑灌溉面积扩张

定义 AWU_{t_0} 和 AWU_{t_1} 分别为农户在 t_0 期和 t_1 期粮食生产的灌溉水总投入,农户在 t_0 期未采用节水灌溉技术,在 t_1 期已采用。那么,灌溉技术采用的实际节水量 (S_a) 可表示为以下形式:

$$S_a = AWU_{t_0} - AWU_{t_1} = A_{t_0} \times W_{t_0} - A_{t_1} \times W_{t_1} \\ = A_{t_0} \times W_{t_0} - (1 + \omega) A_{t_0} \times (1 - \gamma) W_{t_0} = (\gamma - \omega + \omega\gamma) A_{t_0} \times W_{t_0} \quad (10)$$

其中, A 和 W 分别表示灌溉面积与单位灌溉面积的水资源投入; ω 表示 t_1 期相比 t_0 期灌溉面积变化的百分比; γ 表示灌溉技术采用的预期节水百分比,即本文通过内生转换模型估计所得的节水潜力,预期节水量 S_e 可表示为 $\gamma A_{t_0} \times W_{t_0}$ 。

参考能源回弹效应(宋健峰等,2017),可将灌溉水回弹效应 (R) 定义为如下形式:

$$R = \frac{S_e - S_a}{S_e} = \frac{\omega - \omega\gamma}{\gamma} \quad (11)$$

其中, $(S_e - S_a)$ 表示灌溉技术采用后的预期节水量与实际节水量的差值,即灌溉用水的回弹量。考虑农户节水技术采用后对灌溉面积的调整行为,可将回弹效应分为表 7 中的 4 种情景。

表 7 灌溉水回弹效应情景分析

回弹类型	R	ω 取值范围	含义
回火	$R > 1$	$\omega > \gamma / (1 - \gamma)$	新增用水超过预期节水量,总用水量增加
完全回弹	$R = 1$	$\omega = \gamma / (1 - \gamma)$	节水潜力被新增用水完全抵消
部分回弹	$0 < R < 1$	$0 < \omega < \gamma / (1 - \gamma)$	部分节水潜力被新增用水抵消
无回弹	$R = 0$	$\omega = 0$	达到预期节水目标

根据表 7,灌溉技术采用的节水效应取决于灌溉面积调整比例 ω 与节水潜力 γ 之间的关系。结合表 3 节水潜力的估算结果,采用组和未采用组农户在灌溉技术采用后的节水潜力分别为 62.05% 和 22.12%,那么 $\gamma / (1 - \gamma)$ 的取值分别为 1.64 和 0.28。也就是说,两组农户均采用高效灌溉技术后,若将灌溉面积分别扩张 164% 和 28%,灌溉技术采用的节水潜力将被新增用水完全抵消,此时回弹效应为 100%,节水效应为 0。

(二) 考虑种植结构变动

由于作物需水规律的差异,种植结构变动也会对农业灌溉用水量产生影响。相较粮食作物,经济作物具有更高的种植收益,能有效提高农民收入,但通常其对灌溉水投入也提出了更高要求。在利润最大化驱动下,农户可能在作物选择方面做出由粮食作物向经济作物调整的行为变动。可见,若由粮食种植向蔬菜等高耗水作物转变将产生明显的回弹效应,并且,由种植结构改变所导致的用水增加幅度远远高于滴灌等现代灌溉技术可实现的节水潜力。

综上所述,虽然节水灌溉技术采用对压减农业用水、提高用水效率具有积极作用,如果大幅扩张灌溉面积或是增加水资源密集型作物种植,节水成效将大打折扣,甚至与预期节水目标背道而驰。因

此,政府在节水政策的实施和推广中应当对可能发生的灌溉水回弹效应予以重视,并采取相应措施加以限制,避免陷入节水困境。

六、结论与对策建议

本文基于粮食主产区种植户的实地调研数据,通过构建反事实分析框架,采用内生转换模型实证分析了灌溉技术采用对灌溉用水的影响效应;在此基础上,基于门槛回归原理,从水资源稀缺性视角检验了节水效应的异质性,并进一步对可能存在的回弹效应展开了讨论,主要研究结论如下。

第一,农户节水技术采用与否受到水资源禀赋和个体特征等多因素影响。其中,水资源稀缺性程度对农户节水灌溉技术采用决策具有显著的正向影响。加入合作社,家庭收入水平越充裕,对节水技术了解越充分,均有助于提高节水灌溉技术采用的概率。第二,节水灌溉技术的采用可以显著减少粮食生产的水资源投入,且节水潜力可达到22%~62%,而提高灌溉水价的节水效果并不显著。与此同时,在水资源稀缺性程度的门槛值,使得不同水资源禀赋下的节水效应具有显著异质性,表现为在水资源短缺尚未严重制约农业生产的地区,预先推广高效灌溉技术的节水效果更优。第三,灌溉面积扩张与种植结构需水化变动将导致灌溉用水回弹。其中,在提高灌溉效率后,当灌溉技术采用组、未采用组的农户的灌溉面积分别扩张164%和28%,其节水潜力将会被新增用水完全抵消。同时,种植结构由粮食作物向蔬菜等高耗水作物转变所导致的灌溉水增加幅度远高于滴灌等现代节水灌溉技术可实现的节水潜力。

基于上述研究结论,提出粮食生产节水利用的对策和政策建议如下。其一,在政府和政策层面,将“藏粮于水”纳入农业支持政策的调整和完善框架之中。本文研究显示,农业水资源管理政策对粮食生产节水效果具有实质性影响,其中农业水价的影响尚不显著,灌溉面积和种植结构则会直接影响节水效果。因此,应当采取水价政策和限额管理协同推进的方式,开展基于水资源的粮食生产规划,一方面,加快农业水价改革,健全灌溉水价形成机制,完善农业用水计量设施,将水费计量单元细化到户或细化到井,发挥价格的杠杆作用;另一方面,核定和落实农业用水限额,限制灌溉面积扩张幅度和种植结构高耗水化的发展趋势,避免节水成果被新增用水抵消。其二,在地区和社区层面,强化农业用水监督和管理,提供农田水利设施管护。本文研究发现,水资源禀赋异质性会引起农业生产用水方式和节水效果的地区差异。因此,需要对地区水资源短缺风险进行综合评估和预判,特别是对于水资源短缺高风险地区,由于更容易出现水资源挤兑和由此引发的生态环境问题,应当加强对这类地区的农业用水监督和管理。同时,村集体应当对滴(喷、微)灌、渠道衬砌、地下管道等社区型节水灌溉设施提供定期维护,配套节水宣传和节水技术示范工作,打造节水型村庄。其三,在农户层面,加强节水教育和技术培训,引导农户积极采用节水灌溉技术。本文研究表明,采用节水灌溉技术对减少粮食生产用水具有显著影响,生产者的节水意识也会关系到粮食生产节水效果。因此,一方面,应当根据作物需水规律提供专业的灌溉技术指导,对实际中容易发生的系统故障、设施老化等问题提供及时的解决方案,促进生产者持续采用节水灌溉技术;另一方面,应当将水资源管理作为农业生产培训的重要内容,强化农户节水意识,避免对水资源的过度使用和浪费,提高用水效率。

参 考 文 献

1. Suárez-Varela M, Martínez-Espiñeira R, González-Gómez F. An Analysis of the Price Escalation of Non-Linear Water Tariffs for Domestic Uses in Spain. *Utilities Policy* 2015 34: 82~93
2. Jordán C, Speelman S. On-Farm Adoption of Irrigation Technologies in Two Irrigated Valleys in Central Chile: The Effect of Relative Abundance of Water Resources. *Agricultural Water Management* 2020 236: 106147
3. Clemmens A, J, Allen R, G. ,Burt C, M. Technical Concepts Related to Conservation of Irrigation and Rainwater in Agricultural Sys-

- tems. *Water Resources Research* 2008 44 (7)
4. Hansona B. R. ,Schwankl L. J. ,Schulbach K. F. ,Pettygrove G. S. A Comparison of Furrow Surface Drip and Subsurface Drip Irrigation on Lettuce Yield and Applied Water. *Agricultural Water Management* ,1997 33 (2) : 139~157
 5. Cetin O. ,Bilgel J. Effects of Different Irrigation Methods on Shedding and Yield of Cotton. *Agricultural Water Manage* 2002 54 (1) : 1~15
 6. Ward F. A. ,Pulido-Velazquez M. Water Conservation in Irrigation Can Increase Water Use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2008 105 (47) : 18215~18220
 7. Fishman R. ,Devineni N. ,Raman S. Can Improved Agricultural Water Use Efficiency Save India's Groundwater? *Environmental Research Letters* 2015 10 (8) : 84022
 8. Wang T. ,Park S. C. ,Jin H. Will Farmers Save Water? A Theoretical Analysis of Groundwater Conservation Policies. *Water Resources and Economics* 2015 12: 27~39
 9. Amosson S. ,Almas L. ,Girase J. ,Kenny N. ,Guerrero B. ,Vimlesh K. ,Marek T. Economics of Irrigation Systems. *Texas A&M AgriLife Extension Service* 2011 B-6113
 10. Huang Q. ,Wang J. ,Li Y. Do Water Saving Technologies Save Water? Empirical Evidence from North China. *Journal of Environmental Economics and Management* 2017. 82: 1~16
 11. McGlade J. ,Farrell C. ,Edens B. Measuring Water Use in a Green Economy a Report of the Working Group on Water Efficiency to the International Resource Panel. *United Nations Environment Programme* 2012
 12. Pfeiffer L. ,Lin C. Does Efficient Irrigation Technology Lead to Reduced Groundwater Extraction? Empirical Evidence. *Journal of Environmental Economics and Management* 2014 67 (2) : 189~208
 13. Fang L. ,Wu F. ,Yu Y. ,Zhang L. Irrigation Technology and Water Rebound in China's Agricultural Sector. *Journal of Industrial Ecology* 2020
 14. 李丰. 稻农节水灌溉技术采用行为分析——以干湿交替灌溉技术(Awd) 为例. *农业技术经济* 2015(11) : 53~61
 15. 徐涛,赵敏娟,李二辉,乔丹. 技术认知、补贴政策对农户不同节水技术采用阶段的影响分析. *资源科学* 2018(4) : 809~817
 16. 乔丹,陆迁,徐涛. 社会网络、推广服务与农户节水灌溉技术采用——以甘肃省民勤县为例. *资源科学* 2017(3) : 441~450
 17. 雷波,刘钰,许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法. *农业工程学报* 2011(1) : 10~14
 18. 宋健峰,王玉宝,吴普特. 灌溉用水反弹效应研究综述. *水科学进展* 2017(3) : 452~461
 19. 冯诚,代俊峰,方小宇,张友贤. 不同水分处理条件下小麦需水规律研究. *节水灌溉* 2017(3) : 18~20
 20. 魏永霞,马瑛瑛,刘慧,张雨凤,杨军明,张奕. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应. *农业机械学报* , 2018(3) : 252~260
 21. 罗必良. 小农经营、功能转换与策略选择——兼论小农户与现代农业融合发展的“第三条道路”. *农业经济问题* 2020(1) : 29~47
 22. 朱文彬,闰瑞玲. 地下水资源开采的经济分析法研究. *地下水* ,1994(2) : 38~42
 23. 贺志武,胡伦,陆迁. 农户风险偏好、风险认知对节水灌溉技术采用意愿的影响. *资源科学* 2018(4) : 797~808
 24. 张哲晰,穆月英,侯玲玲,杨鑫. 环渤海地区滴灌的资源与经济效应——政府与农户目标一致性检验. *资源科学* 2019 (8) : 1400~1415
 25. 张益,孙小龙,韩一军. 社会网络、节水意识对小麦生产节水技术采用的影响——基于冀鲁豫的农户调查数据. *农业技术经济* 2019(11) : 127~136
 26. 冯志坚,莫旋. 养老保险对城乡流动人口劳动供给的影响——基于内生转换回归模型的分析. *人口与经济* 2019(4) : 14~29
 27. 王剑永. “以电折水”方法研究与应用. *中国水利* 2017(11) : 34~35
 28. 李娜. 关于农业灌溉用水量计量方法的探讨. *水科学与工程学报* 2014(6) : 69~71
 29. 沈波,吉庆丰,张玉建,刘美华,许赤. 农业灌溉用水量计量方法研究. *江苏水利* 2017(4) : 13~17
 30. 聂英,董娜,孔祥露. 基于 Logistic 模型的农户节水技术选择行为研究. *统计与决策* 2015(10) : 92~95
 31. 刘静,陆秋臻,罗良国. “一提一补”水价改革节水效果研究. *农业技术经济* 2018(4) : 126~135
 32. 刘亚克,王金霞,李玉敏,张丽娟. 农业节水技术的采用及影响因素. *自然资源学报* 2011(6) : 932~942

33. 张力小,梁 竞. 区域资源禀赋对资源利用效率影响研究. 自然资源学报,2010(8): 1237~1247
34. 胡继连,王秀鹃. 农业“节水成本定价”假说与水价改革政策建议. 农业经济问题,2018(1): 120~126
35. 刘双双,韩凤鸣,蔡安宁,张 可,金 巍. 区域差异下农业用水效率对农业用水量的影响. 长江流域资源与环境,2017(12): 2099~2110
36. 王 哲,陈 煜. 技术进步一定会带来一个区域农业用水总量下降吗——基于河北省面板数据实证分析. 农业技术经济,2020(6): 81~89

Water Scarcity , Adoption of Irrigation Technologies and Water Conservation

XU Yiting , MU Yueying , HOU Lingling

Abstract: Water resources and their effective utilization are related to food security and sustainable agricultural development. Based on the survey data of farmers in the main grain-producing area , build a counterfactual analysis framework to analyze water conservation of irrigation technology. On this basis , test heterogeneity of water-saving effect from the perspective of water scarcity and discuss rebound effect. The results show that: water shortage , technical awareness , family capital , and cooperatives will increase the probability of irrigation technology adoption; High-efficiency irrigation technology can achieve 22%~62% of water conservation per unit area of the grain. However , the expansion of the irrigation area and changes in the planting structure will cause a rebound effect. If not restricted , the water-saving effect will be completely offset by the newly added water; In addition , under different water resource endowment levels , the effect of irrigation technology on water consumption is different. In the stage when water shortages have not seriously restricted agricultural development , it is better to promote high-efficiency irrigation technology in advance to save water. Therefore , propose the policy implications about water-saving and utilization of grain production from the three levels of government , region , and farmers.

Keywords: Irrigation technology; Water endowment; Water-conservation effect; Endogenous switching regression model; Rebound effect

责任编辑: 段艳艳