

关宝珠, 孙天合, 王金霞, 等. 地下水漏斗区农业灌溉水源置换工程实施成效评价: 以河北省为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 147-159.

GUAN Baozhu, SUN Tianhe, WANG Jinxia, et al. Evaluation of the implementation effectiveness of agricultural irrigation water substitution projects in groundwater funnel areas: A case study of hebei province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10): 147-159.

# 地下水漏斗区农业灌溉水源置换工程实施 成效评价: 以河北省为例

关宝珠<sup>1</sup>, 孙天合<sup>2</sup>, 王金霞<sup>3</sup>, 严婷婷<sup>4</sup>, 黄开兴<sup>3</sup>

(1. 北京大学 国家发展研究院, 北京 100871; 2. 河北经贸大学 京津冀协同发展河北省协同创新中心, 河北 石家庄 050061; 3. 北京大学 现代农学院 中国农业政策研究中心, 北京 100871; 4. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

**摘要:**【目的】海河流域农业生产严重依赖地下水灌溉, 导致地下水严重超采, 形成了面积最大的地下水漏斗区。农业灌溉水源置换工程是遏制地下水超采态势的重要措施, 然而, 目前对该工程的定量研究相对较少。【方法】基于历史统计资料和实地调查数据, 全面评价了农业灌溉水源置换工程的实施现状, 采用多期双重差分方法(DID), 深入分析了该工程对压采地下水和农业产出的影响, 系统提出了该工程面临的挑战。【结果】结果表明: (1)2014—2022年间, 河北省陆续完成了适宜区域的工程建设, 通过将纯井灌区改造成渠灌区或井渠双灌区 75.87 万  $\text{hm}^2$ , 直接减少了地下水开采量 12.68 亿  $\text{m}^3$ 。(2)工程降低了项目区农业灌溉成本和劳动力投入, 提高了种粮积极性, 使县级层面的粮食总产量增加了 1.70 万 t, 农业增加值增加 1.09 亿元, 第一产业增加值增加 1.59 亿元; (3)尽管农业灌溉水源置换工程在压采地下水和促进农业产出方面具有显著成效, 但其可持续性面临多方面挑战, 突出表现为地表水源短缺、配套设施不完善以及地表水水价机制不健全等问题。【结论】下一步需完善工程及其配套设施建设、加大监管力度以及建立健全地表水水价制度, 逐步提升工程的运行效果和可持续性。

**关键词:** 地下水超采; 灌溉水源置换; 调查研究; 政策评价; 双重差分方法(DID)

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.10.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV93; TV9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2023)10-0147-13



与作者互动  
听读清 | 聊科研

## Evaluation of the implementation effectiveness of agricultural irrigation water substitution projects in groundwater funnel areas: A case study of Hebei Province

GUAN Baozhu<sup>1</sup>, SUN Tianhe<sup>2</sup>, WANG Jinxia<sup>3</sup>, YAN Tingting<sup>4</sup>, HUANG Kaixing<sup>3</sup>

收稿日期: 2023-03-26; 修回日期: 2023-07-21; 录用日期: 2023-07-24; 网络出版日期: 2023-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874007); 国家自然科学基金重大国际合作项目(41861124006); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200500); 教育部人文社会科学研究项目(19YJC790118); 河北省高等学校人文社会科学研究项目-青年拔尖项目(BJ2020075)

作者简介: 关宝珠(1991—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水资源管理制度与政策研究。E-mail: guanbaozhu@pku.edu.cn

通信作者: 王金霞(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事水资源管理制度与政策研究。E-mail: jxwang\_ccap@pku.edu.cn

严婷婷(1984—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事水利政策研究。E-mail: yanttt@waterinfo.com.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

(1. National School of Development, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Hebei Coordinated Innovation Center for BTH Coordinated Development, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. School of Advanced Agricultural Sciences, China Center for Agricultural Policy, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Development Research Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

**Abstract:** [Objective] Agricultural production in Haihe River Basin heavily relies on groundwater irrigation, resulting in severe groundwater overexploitation and forming the largest groundwater funnel area. Agricultural Irrigation Water Substitution Project (AIWSP) is an important measure to curb groundwater overexploitation. However, there are relatively few quantitative studies. [Methods] Based on historical statistical data and field survey data, this study comprehensively evaluates the status of AIWSP, profoundly analyzes its impact on groundwater extraction and agricultural output by adopting the multi-period Difference-in-Difference (DID) method, and systematically presents the challenges of AIWSP. [Results] The results show that: (1) Between 2014 and 2022, the suitable region of AIWSP has been successively constructed in Hebei Province. By renovating 758 700 hm<sup>2</sup> of pure well-irrigated areas into canal-irrigated or dual-irrigation areas, AIWSP has directly reduced groundwater extraction by 1.268 billion m<sup>3</sup>. (2) The project reduces irrigation costs and labor input in the project areas, boosts the enthusiasm for growing crops, and significantly increases the total grain output by 17 000 t, agricultural added value by 109 million CNY, and the primary industry added value by 159 million CNY. (3) Although AIWSP has significantly reduced groundwater extraction and increased agricultural output, its sustainability faces various challenges, such as shortage of surface water, inadequate supporting facilities, and vacant surface water pricing mechanisms. [Conclusion] Therefore, in the future, it is necessary to improve the construction of the projects and their supporting facilities, strengthen regulatory efforts, and establish a sound surface water pricing mechanism, aiming to improve the operational effectiveness and sustainability of the project.

**Keywords:** groundwater overexploitation; irrigation water substitution; survey research; policy evaluation; difference-in-difference (DID) method

## 0 引言

农业灌溉水源置换工程是治理地下水超采的关键举措。海河流域是我国重要粮食生产基地之一,流域内农作物的地下水灌溉面积占比超过70%<sup>[1]</sup>,导致地下水严重超采。21世纪初海河流域每年超采浅层地下水约16亿m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>,形成全国乃至世界上面积最大的地下水漏斗区,引发了地面沉降、地面塌陷、海水入侵等一系列生态环境问题<sup>[3]</sup>。为此,在海河流域启动了地下水超采综合治理项目,并将河北省选为首个试点,计划在2035年实现地下水完全采补平衡,其中三分之二的压采量由农村完成<sup>[4]</sup>。地下水超采治理的核心思想是“一增、一减”,其中,“一增”即充分利用当地和外调地表水置换城镇和农村的地下水开采;“一减”指通过改变作物种植结构、采用高效节水技术及实施水价水权等方式减少灌溉用水量。农业灌溉水源置换工程是“一增”中的关键措施<sup>[4-5]</sup>,通过将纯井灌区改造为渠灌区或井渠双灌区,从而减少地下水开采量,该措施的实施效果受到政策制定者的高度关注。

然而,目前关于农业灌溉水源置换工程的研究偏向于定性分析政策背景、具体做法和预期节水效果,

缺乏对实施成效的定量分析。首先,现有研究主要是将农业灌溉水源置换工程作为综述的一部分加以讨论。例如, YU等<sup>[6]</sup>和陈飞等<sup>[7]</sup>综述了河北省地下水超采综合治理措施,介绍了该工程的政策背景、具体做法、预期节水效果和投资情况。其次,地下水超采治理措施中,季节性休耕等种植结构调整措施研究相对较多<sup>[8-9]</sup>,针对农业灌溉水源置换工程的研究较为缺乏,且研究区域较小。王术礼等<sup>[10]</sup>分析了该工程的方案设计,定性讨论了节水效果,然而研究区域仅是河北省馆陶县。最后,尽管已有研究分析了水坝、南水北调等水利工程的经济效益,但尚未有研究分析农业灌溉水源置换工程的经济效益。陈海山等<sup>[11]</sup>发现三峡水利工程显著提高了易洪涝地区的经济发展水平; STROBL等<sup>[12]</sup>发现大坝对下游区的农业生产有显著的正向影响,但对紧邻区没有显著影响。杨云彦<sup>[13]</sup>和 ROGERS等<sup>[14]</sup>基于文献综述指出,南水北调工程有利于缓解水资源时空分配不均的局面,有可能推动城市化进程和促进区域协调发展。鉴于农业灌溉水源置换工程和南水北调等水利工程既有共性也有差异,有必要加强对前者的经济效益研究。

本研究的目标是全面深入分析农业灌溉水源置换工程的实施进展、取得的成效和存在的挑战,重点关

注工程在地下水压采方面的成效及其对农业产出的影响。本文首次对农业灌溉水源置换工程的实施进展、成效和挑战开展全面深入分析, 采用因果识别方法分析工程对农业产出的影响, 以期为河北省进一步改进和推广该工程提供有价值的参考和指导, 也为其它干旱半干旱地区治理地下水超采提供借鉴经验。

## 1 工程概况

### 1.1 工程基本情况

农业灌溉水源置换工程是河北省最早采取的地下水超采治理措施之一, 旨在通过新建或改善水利设施, 使得具备地表水灌溉条件的地区能够充分利用地表水资源, 从而实现压减地下水开采量的目标。该工程资金主要来源于中央政府和省级政府, 一般由县级水利部门牵头实施, 委托水利水电勘测设计研究院进行工程设计, 设计方案经市级和省级政府审批通过后, 以公开招标的方式择优选取有资质的企业进行施工建设, 工期通常为一年以上, 建成后多交由村集体运营维护。

在地下水超采治理试点阶段(2014—2016年), 该工程资金来源以中央投资为主、地方自筹为辅, 省级以上资金占比达95%以上, 地方自筹则多为农户投工投劳、以劳折资的形式, 农户投劳时主要负责一些基本的开挖回填工作。进入常规治理期后(2017年至今), 虽然该工程仍主要依赖于省级以上财政资金的支持, 但地方自筹的力度正在逐渐加大, 市、县两级拓宽了融资渠道, 不断探索市场化、多元化的投入模式, 包括用水户自筹、市场融资以及吸引民间资本等。

在技术层面, 该工程的选址和设计通常优先考虑以下因素, 如靠近地表水源、有一定地表水灌溉设施基础、地下水超采严重或地下水水质下降、耕地成方连片、工程不占或较少占用耕地以及当地民众的参与积极性和接受程度较高等。该工程主要通过实施河渠清

淤疏浚、渠系建筑物改造、坑塘建设等, 充分利用南水北调工程通水后城市返还农业的水量及引黄、引卫等外来水量, 将纯井灌区改造成渠灌区或井渠双灌区。

### 1.2 工程实施进展

在地下水超采治理试点阶段(2014—2016年), 该工程得到了大力推进, 随着进入常规治理期(2017年至今), 该工程的建设和投资规模逐渐减少(见表1), 河北省自2014年开始实施该工程, 当年河渠清淤3446 km, 建设坑塘1164座, 新增蓄水能力合计2.79亿 $m^3$ , 引水量6.73亿 $m^3$ , 总投资37.29亿元。此后, 工程的建设规模开始下降, 2015和2016年的河渠清淤整治长度与上一年相比分别下降了13%和32%, 建设坑塘数量分别下降了78%和33%, 引水量分别下降了50%和34%; 工程投资规模出现波动, 2015年略有上升, 2016年则下降了17%。进入常规治理期后, 该工程的建设和投资规模开始进一步下降, 与2016年相比, 2017年河道清淤整治长度下降了27%, 坑塘数量、引水量和投资规模均下降了45%以上。2018—2020年, 虽然该工程仍在持续实施, 但新增河渠清淤整治长度和坑塘数量均低于试点阶段。值得注意的是, 自2021年起, 虽然政府部门未公开该工程建设和投资的相关数据, 但可以通过该工程的改造灌溉面积和新增压采能力推测出, 近两年该工程的建设和投资有所增加。

从地级市尺度来看, 该工程主要在超采最严重的衡水、沧州、邯郸和邢台4个地级市实施。4地市的各项工程指标占全省的比例超过了85%, 其中, 衡水和沧州两地市占比超过一半, 如图1所示。在工程建设方面, 4地市的河渠整治长度占全省的比例为87%, 其中, 沧州和衡水占比分别为33%和25%; 4地市的坑塘数量占全省96%, 其中, 衡水和沧州占比分别为48%和34%。在工程引水量方面, 4地市占全省的比例为87%, 其中, 衡水和沧州占比分别为31%和28%。在工程投资规模方面, 4地市占全

表1 河北省2014—2020年农业灌溉水源置换工程实施情况  
Table 1 Implementation of AIWSP in Hebei Province of 2014—2020

年份	渠系整治		小型蓄引提		引水量/ 亿 $m^3$	投资/亿元
	河渠清淤整治长度/km	河渠蓄水能力/亿 $m^3$	坑塘数量/座	坑塘蓄水能力/亿 $m^3$		
2014	3 446	0.87	1164	1.92	6.73	37.29
2015	3 003	0.71	258	0.48	3.39	42.79
2016	2 048	—	172	0.31	2.25	35.53
2017	1 495	—	90	—	1.19	18.99
2018	338	—	53	—	0.85	8.32
2019	742	—	12	0.07	1.34	—
2020	307	—	—	—	—	—

注: 根据各年度《河北省地下水超采综合治理实施计划》整理, 下同。

省的比例高达 92%, 衡水和沧州占比分别为 32% 和 27%。

## 2 工程实施成效评估

河北省已基本完成适宜区域农业灌溉水源置换工程的建设工作。基于历史统计资料和农户调查数据, 本文进一步分析了该工程对地下水压采和农业产出的影响, 发现该工程不仅在压采地下水方面取得了显著成效, 而且还有助于提升实施区域的农业产出。

### 2.1 研究区域、数据和方法

#### 2.1.1 研究区域概况

河北省是中国重要的粮食产区。然而, 由于降水量少且时空分布不均, 该省的农业生产依赖于地下水灌溉, 导致地下水严重超采, 已形成多个地下水漏斗区。河北省是小麦和玉米主产区, 其中小麦的播种面积约占全国的 9.5%, 产量约占全国的 10.7%, 玉米的播种面积约占全国的 8.0%, 产量约占全国的 7.6%<sup>[15-16]</sup>。河北省降水量多年平均值为 520.8 mm, 比全国平均水平低约 20%。降水量时空分布不均, 分布总趋势是由太行山、燕山迎风坡多雨区分别向西北和东南两侧减少; 降水集中在 6—8 月, 灌溉期间降水量多年平均值为 105.9 mm, 仅占总量的 20%<sup>[17-18]</sup>。因此, 河北省 70% 以上的耕地依赖超采地下水进行灌溉<sup>[19]</sup>。该省在 2014 年前平均每年超采 60~70 亿 m<sup>3</sup> 的地下水, 地下水超采区面积占平原区面积的 91% 以上<sup>[20]</sup>。超采严重的地区地下水位年均下降速度多达 1 m, 深层地下水位年均下降速度甚至达到 1.5 m<sup>[21]</sup>, 形成的地下水漏斗区面积高达 5 233 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。

#### 2.1.2 数据

考虑到农业灌溉水源置换工程主要在河北省沧州、邯郸、衡水、邢台等地级市实施, 石家庄、唐山

和保定也有一些工程, 本文选取这七个地级市的所有县作为样本。数据来源包括历史统计资料和实地调查数据。其中, 历史统计资料主要包括两个方面的内容: (1) 2014—2022 年《河北省地下水超采综合治理实施方案》, 关注各县农业灌溉水源置换工程的实施情况; (2) 2010—2019 年《中国县域统计年鉴》, 主要关注各县的基本社会经济特征、农业生产与投入情况等。

此外, 采用分层随机抽样的方法, 在河北省沧州、衡水、邯郸、邢台以及石家庄选择 10 个县开展实地调查, 调研区域覆盖了浅层地下水一般超采区和严重超采区、深层地下水一般超采区和严重超采区。在与河北省农业农村厅、水利厅和各县农业农村局、水利局的地下水超采治理负责人进行座谈, 了解农业灌溉水源置换工程的政策背景和实施现状, 在每个县选择 2 个有代表性的村, 每个村随机选 5 户农户, 共选出 20 个村和 100 个农户, 与村干部和农户进行深度访谈, 了解基层干部和农户对农业灌溉水源置换工程的认知情况。

#### 2.1.3 方法

本文采用描述性统计和计量经济学模型分析农业灌溉水源置换工程的实施成效。基于县级层面的统计资料, 通过描述性统计方法, 分析工程与压采地下水和农业产出的相关关系; 构建计量模型, 就工程对农业产出的影响进行因果识别分析。

首先, 本文基于多期双重差分 (DID) 法设计, 采用双向固定效应模型估计农业灌溉水源置换工程对农业产出的处理效应<sup>[22]</sup>。模型的设定公式如下

$$Y_{it} = \alpha + \beta X_{i,t-2} + \theta Z_{it} + \gamma_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中,  $i$  为县序号;  $t$  为年份 (2010—2019 年);  $Y_{it}$  为结果变量;  $X_{i,t-2}$  为工程变量;  $Z_{it}$  为控制变量;  $\gamma_i$  为个体固定效应;  $\delta_t$  为时间固定效应;  $\varepsilon_{it}$  为稳健标准误;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  均为待估计参数。

其中, 结果变量 ( $Y_{it}$ ) 为粮食总产量、农业增加值或第一产业增加值。考虑到工程建设期在 1 a 以上, 因此将工程变量 ( $X_{i,t-2}$ ) 滞后两期。用两种方式来衡量工程变量: (1) 通过虚拟变量, 其中,  $X_{i,t-2} = 1$  表示县  $i$  在  $t-2$  年实施了农业灌溉水源置换工程,  $X_{i,t-2} = 0$  表示县  $i$  在  $t-2$  年未实施该工程; (2) 通过农业灌溉水源置换工程累计改造的灌溉面积。除农业灌溉水源置换工程外, 可

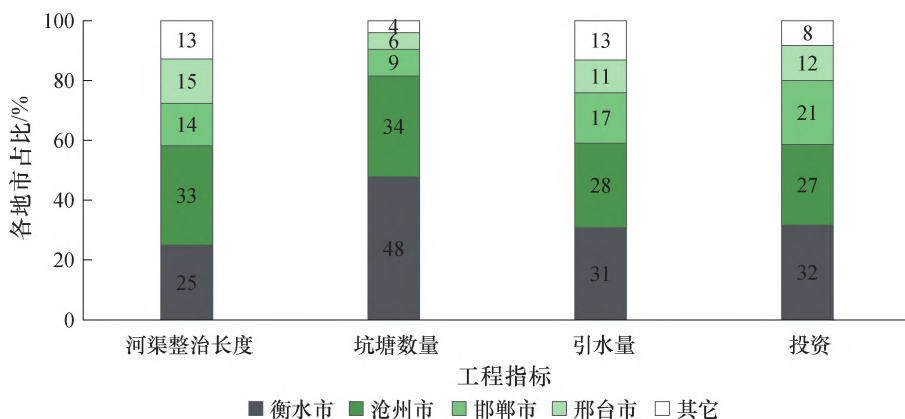


图 1 河北省各地级市农业灌溉水源置换工程实施情况

Fig. 1 Implementation of AIWSP in prefecture-level cities in Hebei Province

能存在其它影响农业产出的因素, 本文将这些因素作为控制变量 ( $Z_{it}$ )。控制变量由三个层次的变量组成: 第一层是县域基本特征, 包括人均地区生产总值、行政区域土地面积等; 第二层是农业生产的投入情况, 包括农林牧渔业从业人员、有效灌溉面积、农业机械投入、化肥使用量等; 第三层是其它地下水压采水利设施的实施情况, 包括地下水高效节水工程。此外, 模型还控制了县级层面的个体固定效应  $\gamma_i$  和年份层面的时间固定效应  $\delta_t$ , 以控制随县改变但不随年份变化的不可观测因素和随年份变化但不随县变化的不可观测因素。 $\beta$  为核心解释变量的系数, 如果  $\beta$  显著大于 0, 则表明实施农业灌溉水源置换工程提升了粮食产量、农业增加值或第一产业增加值, 对农业产出有促进作用。

其次, 本文采用事件研究法来验证 DID 模型的平衡趋势假设<sup>[22]</sup>。模型的设定如下

$$Y_{it} = \alpha + \sum \beta_m E_{it, m} + \theta Z_{it} + \gamma_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中,  $E_{it, m}$  为一组事件窗口虚拟变量, 如  $E_{it, -1} = 1$  表示工程开始实施前一期; 如果模型中  $m \leq 0$  时  $\beta_m$  均不显著, 则认为满足平衡趋势假设。

最后, 通过分析农业灌溉水源置换工程对粮食播种面积和粮食单产的影响, 进一步分析该工程对粮食总产量的影响机制。粮食总产量等于粮食播种面积和粮食单产的乘积, 计算公式如下

$$Y(x) = A(x) \times P(x) \quad (3)$$

式中,  $x$  为工程变量;  $Y(x)$  为粮食总产量;  $A(x)$  为粮食播种面积;  $P(x)$  为粮食单产。

对公式(3)取对数可得到下式, 即工程对粮食总

产量变化的影响等于对粮食播种面积变化的影响加上对粮食单产变化的影响

$$\ln[Y(x)] = \ln[A(x)] + \ln[P(x)] \quad (4)$$

为此, 在进行机制分析时, 本文对粮食总产量、粮食播种面积和粮食单产进行对数化处理, 基于公式(1)开展分析。当工程变量为改造灌溉面积时, 核心解释变量  $\beta$  为半弹性, 表示  $X_{i, t-2}$  变化 1 单位条件下,  $Y_{it}$  变化  $100 \times [\exp(\beta) - 1]\%$ ; 当工程变量为改造灌溉面积的对数时, 核心解释变量  $\beta$  为弹性, 表示  $X_{i, t-2}$  变化 1% 单位,  $Y_{it}$  变化  $\beta\%$ <sup>[23]</sup>。其它变量的含义不变。计量模型中的结果变量、工程变量和控制变量的描述性统计结果如表 2 所列。

### 2.2 对地下水压采的影响

农业灌溉水源置换工程通过增加地表水灌溉面积, 实现地表水置换地下水, 直接减少了地下水的开采量, 并会对地下水有回补效应。2014—2022 年农业灌溉水源置换工程改造灌溉面积和新增压采情况如图 2 所示。2014—2022 年, 工程累计改造灌溉面积 75.87 万  $\text{hm}^2$ , 压采地下水 12.68 亿  $\text{m}^3$ 。2014 年, 该工程改造灌溉面积 16.39 万  $\text{hm}^2$ , 压采地下水 3.34 亿  $\text{m}^3$ ; 此后, 随着新增建设和投资规模的逐渐下降, 该工程改造灌溉面积和新增压采能力也呈下降趋势, 至 2020 年, 河北省改造灌溉面积下降到 1.59 万  $\text{hm}^2$ , 新增压采能力下降到 0.27 亿  $\text{m}^3$ ; 然而, 自 2021 年起, 水利部门加大引水工程的引水力度和对本地地表水的统筹利用, 使得改造灌溉面积和新增压采能力开始明显增加。2021 年, 通过利用南水北调东线北延应急工程及引黄、引滦工程成功压减地下水

表 2 计量模型变量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics table of variables in econometric model

变量名	均值	标准差	最小值	最大值
粮食总产量/万 t	29.89	15.734	3.73	88.46
农业增加值/亿元	15.46	11.436	2.09	67.77
第一产业增加值/亿元	22.18	14.996	2.66	93.92
粮食播种面积/万 $\text{hm}^2$	4.83	2.263	0.87	12.96
粮食单产/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	6.09	1.080	1.91	8.85
是否有农业灌溉水源置换工程/1=是, 0=否	0.28	0.447	0.00	1.00
农业灌溉水源置换工程累计改造灌溉面积/万 $\text{hm}^2$	0.19	0.441	0.00	3.41
人均地区生产总值/万元 $\cdot$ 人 <sup>-1</sup>	3.35	2.576	0.60	21.84
行政区域土地面积/ $\text{km}^2$	884.27	491.002	222.00	2 648.00
农林牧渔业从业人员数/万人	9.47	4.913	2.21	29.36
有效灌溉面积/万 $\text{hm}^2$	3.40	1.737	0.00	8.57
农业机械总动力/万 kW	74.11	47.830	8.00	260.00
化肥使用量(折纯量)/万 t	2.47	1.592	0.00	9.10
是否有地下水高效节水工程/1=是, 0=否	0.42	0.494	0.00	1.00
地下水高效节水工程/万 $\text{hm}^2$	0.25	0.537	0.00	5.30

注: 农业增加值有 2013—2017 年的数据, 有 509 个观测值, 其余变量有 2010—2019 年的数据, 有 1 020 个观测值。

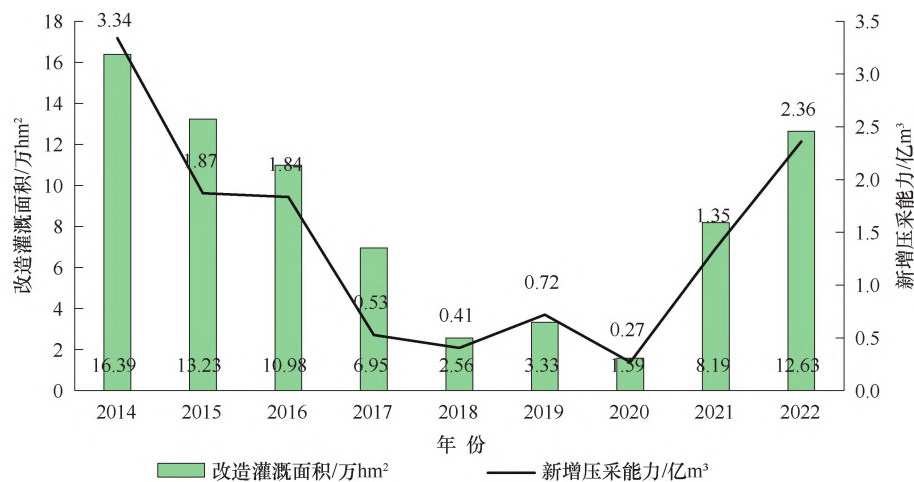


图2 河北省2014—2022年农业灌溉水源置换工程改造灌溉面积和新增压采能力  
Fig. 2 Modified irrigation area and groundwater saving capacity of AIWSP in Hebei Province of 2014—2022

超采量 1.35 亿 m<sup>3</sup>。2022 年, 通过统筹调度岗黄、王快、岳城、东武仕等水库的地表水来置换冀中南地区农业灌溉取用的地下水, 改造灌溉面积达到了 12.63 万 hm<sup>2</sup>, 基本回到了 2015 年的水平, 并压减地下水 2.36 亿 m<sup>3</sup>, 高于 2015 年的水平。此外, 由于地表水和地下水是统一的整体, 地表水还会对地下水有回补效果。

农业灌溉水源置换工程主要做法是将纯井灌区改造为渠灌区或井渠双灌区, 以改造为井渠双灌区为主, 并且改造灌溉面积主要分布在沧州、衡水、邯郸和邢台。各地级市改造灌溉面积情况如表 3 所列。自 2015—2018 年, 河北省累计将 4.62 万 hm<sup>2</sup> 纯井灌区改造为渠灌区, 将 20.8 万 hm<sup>2</sup> 纯井灌区改造为井渠双灌区, 改造为井渠双灌区的比例高达 82%。其中, 沧州、邯郸、衡水、邢台四地市的纯井灌区改渠灌区

表 3 各地级市纯井灌区改渠灌区或井渠双灌区情况

Table 3 Implementation of converting pure well irrigation area into canal irrigation area or double irrigation area in prefecture-level city

	纯井灌区改渠灌区		纯井灌区改井渠双灌区		纯井灌区改井渠双灌区占改造面积的比例/%
	面积 / 万 hm <sup>2</sup>	占全省的比例/%	面积 / 万 hm <sup>2</sup>	占全省的比例/%	
沧州市	1.87	40	7.74	37	81
邯郸市	1.17	25	6.33	30	84
邢台市	0.27	6	2.78	13	91
衡水市	1.31	28	2.39	12	65
其它	0.01	0	1.55	7	100
合计	4.62		20.80		82

注: 数据统计年份为 2015—2018 年, 其余年份政府未公开相关数据。

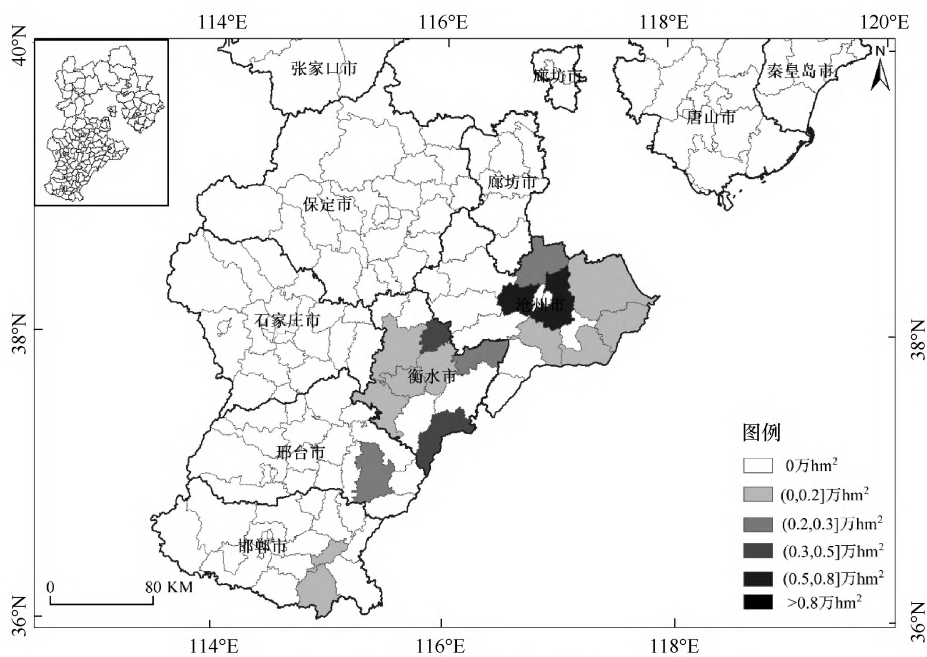
面积占全省的比例基本为 100%, 将纯井灌区改为井渠双灌区的面积占全省的 93%, 各个地级市也以纯井灌区改为井渠双灌区为主, 其中邢台的比例最高, 达到 91%。河北省纯井灌区改渠灌区或井渠双灌区面积空间分布如图 3 所示, 纯井灌区改造为渠灌区和井渠双灌区主要在河北省东南部平原区实施, 该区域地下水超采尤为严重。

## 2.3 对农业产出的影响

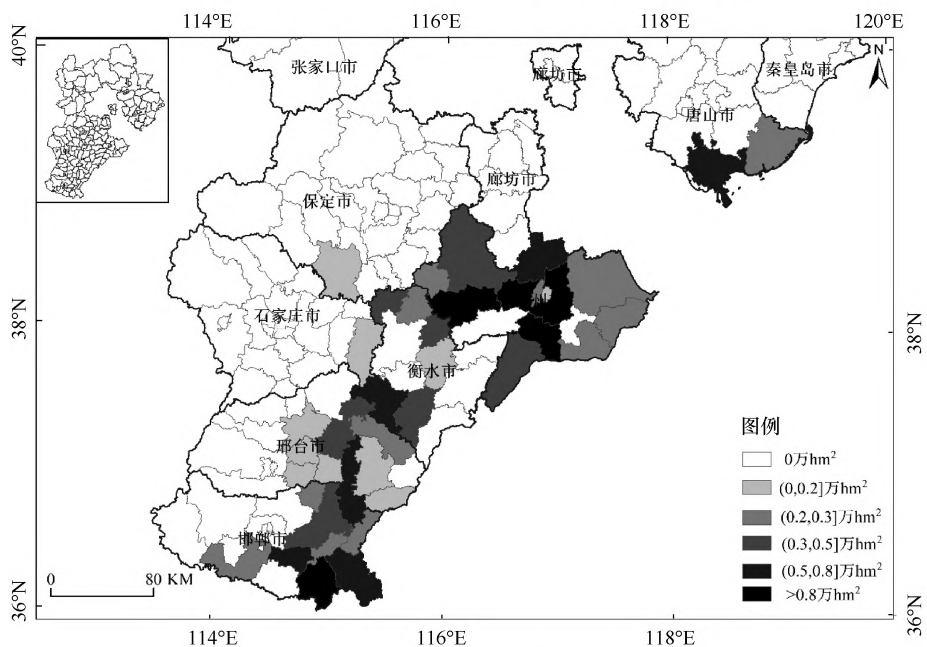
### 2.3.1 描述性统计分析结果

通过比较干预组和控制组的农业产出变化趋势, 可以看出农业灌溉水源置换工程对干预组的粮食总产量、农业增加值和第一产业增加值有提升效应。样本县中 53% 的县实施了农业灌溉水源置换工程, 作为干预组; 47% 的县未实施该工程, 作为控制组。

干预组和控制组的农业产出变化趋势如图 4 所示。首先, 工程实施前, 干预组的粮食总产量高于控制组, 在工程实施后, 两者之间的差距有进一步扩大的趋势, 如果平衡趋势假设成立, 这意味着农业灌溉水源置换工程能促进干预组粮食总产量的提升。如图 4(a) 所示, 在工程实施前(2013 年及之前), 干预组和控制组的粮食总产量差值基本保持平稳, 在工程实施初期(2014 年和 2015 年), 由于工程尚在建设未正式投入使用, 干预组和控制组的差值也处于相对平稳状态, 但从工程实施第三年(2016 年)开始, 干预组和控制组的粮食总产量差距有扩大的趋势, 干预组的粮食总产量略有波动上升的趋势, 控制组的粮食总产量略有波动下降的趋势。其次, 工程实施前, 干预组的农业增加值、第一产业增加值均低于控制组, 在工程实施后, 两者之间的差距有缩小的趋势, 如果平衡趋势假设成立, 这意味着农业灌溉水源置换工程能促进农业增加值和第一产业增加值的增长。如图 4(b) 所示, 2013—2016 年干预组的农业增加值始终低于控制组, 但从工程实施的第三年(2016 年)开始, 干预组和控制组的农业增加值差距在缩小, 2017 年虽然干预组和控制组的农业增加值均下降, 但干预组的下降幅度远小于控制组, 导致干预组的农业增加值反超控制组。类似地, 如图 4(c) 所示, 虽然干预组的第一产业增加值始终低于控制组, 但从政策实施的第四



(a) 2015—2018年河北省纯井灌区改渠灌区面积空间分布



(b) 2015—2018年河北省纯井灌区改井渠双灌区面积空间分布

图3 2015—2018年河北省纯井灌区改渠灌区或井渠双灌区面积空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the conversion from pure well irrigation area to canal-irrigated or dual-irrigation areas in Hebei Province from 2015 to 2018

年(2017年)起,两者之间的差距明显缩小。

通过比较干预组和控制组在工程实施前后的差异,进一步证明农业灌溉水源置换工程可能有助于促进粮食总产量、农业增加值以及第一产业增加值的增长。干预组和控制组在工程实施前后的农业产出如表4所列。干预组在参加工程后,粮食总产量、农业增加值和第一产业增加值分别增加了0.06万t、0.31

亿元和2.51亿元,然而,控制组在此期间,粮食总产量和农业增加值分别下降了1.5万t和0.46亿元,第一产业增加值虽然上升2.21亿元,但上升的幅度小于干预组。如果满足平衡趋势假设,则说明农业灌溉水源置换工程使粮食产量增加值、农业增加值和第一产业增加值均上升。此外,通过分别在工程实施前后对干预组和控制组进行T检验可知,在工程实施

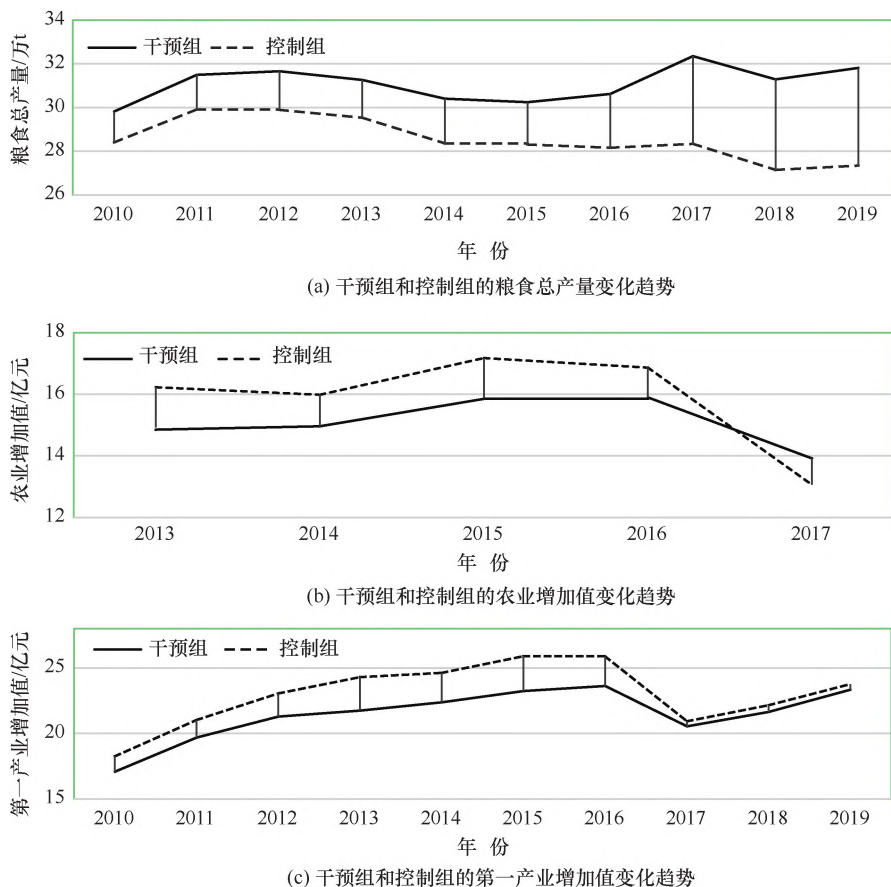


图4 干预组和控制组的农业产出变化趋势

Fig. 4 the trend of agricultural output between treatment and control group

前, 干预组和控制组的农业产出各项指标在统计上没有显著差异, 在工程实施后, 干预组的粮食总产量显著高于控制组, 但干预组和控制组的农业增加值以及第一产业增加值的差异不显著。据此可以预测, 在表示农业产出的三种指标中, 农业灌溉水源置换工程对粮食总产量的影响可能最明显。

### 2.3.2 计量模型估计结果

(1)处理效应。研究发现, 农业灌溉水源置换工程能够显著提高粮食总产量、农业增加值以及第一产业增加值, 并且由于建设期通常在1 a以上, 该工程对农业产出的影响滞后2~3 a。首先, 计量模型回归结果如表5所列, 双向固定效应模型的估计结果表明, 在控制其它变量的情况下, 实施农业灌溉水源置换工程使县级层面的粮食总产量显著增加了1.70万t [第(1)列], 并且该工程累计改造灌溉面积每增加1万hm<sup>2</sup>, 粮食总产量显著增加2.59万t [第(2)列]; 该工程使县级层面的农业增加值显著增加了1.09亿元 [第(3)列], 累计改造灌溉面积每增加1万hm<sup>2</sup>, 农业增加值显著增加1.61亿元 [第(4)列]; 该工程使县级层面的第一产业增加值显著增加了1.59亿元

[第(5)列], 累计改造灌溉面积每增加1万hm<sup>2</sup>, 第一产业增加值显著增加1.47亿元 [第(6)列]。其次, 农业灌溉水源置换工程对第一产业增加值的影响更为滞后。当工程变量滞后两期时, 对粮食总产量和农业增加值的估计系数就显著 [第(1)列—第(4)列], 然而, 直到工程变量滞后三期时, 对第一产业增加值的估计系数才显著 [第(5)列和第(6)列]。这可能是因为该工程主要通过影响粮食总产量来影响第一产业增加值, 随着工程对粮食总产量的影响逐渐增大, 对第一产业增加值的影响才变得显著。

双向固定效应模型的估计结果无偏且稳健。平衡趋势的检验结果如图5所示, 事件研究法的估计结果表明, 政策实施前的估计系数均不显著, 说明多期DID模型满足平衡趋势假设, 双向固定模型的结果具有可信性。另一方面, 双向固定效应模型中无论是否加入控制变量, 工程变量的估计系数的符号始终为正且显著, 说明估计结果具有稳健性。受篇幅所限, 正文只介绍包含控制变量的估计结果。

除农业灌溉水源置换工程外, 农业产出还受到县域基本特征、农业生产投入等因素的影响。以粮食总



表 4 干预组和控制组工程实施前后的农业产出比较

Table 4 The comparison of agricultural output before and after AIWSP between treatment and control group

	干预组			控制组		
	工程前	工程后	变化	工程前	工程后	变化
粮食总产量/万 t	31.06	31.12*	0.06	29.44	27.94	-1.50
农业增加值/亿元	14.85	15.16	0.31	16.23	15.77	-0.46
第一产业增加值/亿元	19.95	22.46	2.51	21.66	23.87	2.21

注: 1. 干预组为实施过农业灌溉水源置换工程的县, 控制组为未实施过农业灌溉水源置换工程的县; 2. 2013 年及之前为政策前, 2013 年之后为政策后; 3. 分别进行政策前后干预组和控制组的 T 检验, 如果有显著差异, 仅在干预组上标注, \*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$ 。

表 5 农业灌溉水源置换工程对粮食总产量、农业增加值以及第一产业增加值的影响

Table 5 Impacts of AIWSP on total grain yield, agricultural added value and added value of primary industry

结果变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	粮食总产量/万 t	粮食总产量/万 t	农业增加值/亿元	农业增加值/亿元	第一产业增加值/亿元	第一产业增加值/亿元
是否有农业灌溉水源置换工程(滞后两期)/1=是, 0=否	1.702** (0.679)		1.090** (0.523)			
农业灌溉水源置换工程改造灌溉面积(滞后两期)/万 $hm^2$		2.590*** (0.932)		1.609*** (0.608)		
是否有农业灌溉水源置换工程(滞后三期)/1=是, 0=否					1.585* (0.850)	
农业灌溉水源置换工程改造灌溉面积(滞后三期)/万 $hm^2$						1.474** (0.570)
人均地区生产总值/万元·人 <sup>-1</sup>	0.683** (0.313)	0.634** (0.292)	0.133 (0.526)	0.153 (0.514)	0.228 (0.515)	0.316 (0.509)
行政区域土地面积/ $km^2$	0.023** (0.010)	0.021** (0.010)	0.007 (0.015)	0.005 (0.015)	0.025*** (0.007)	0.023*** (0.007)
农林牧渔业从业人员/万人	0.418* (0.212)	0.424* (0.227)	1.557* (0.820)	1.648* (0.852)	-0.557*** (0.211)	-0.538** (0.211)
有效灌溉面积/万 $hm^2$	-0.460 (0.421)	-0.251 (0.432)	-2.581* (1.448)	-2.447* (1.463)	-1.710* (0.940)	-1.521 (0.991)
农业机械总动力/万 kW	0.018 (0.016)	0.019 (0.016)	0.045*** (0.012)	0.047*** (0.012)	0.057*** (0.020)	0.058*** (0.020)
化肥使用量(折纯量)/万 t	0.927* (0.547)	0.603 (0.594)	3.613** (1.674)	3.409** (1.703)	2.421** (1.037)	2.199* (1.116)
是否有地下水高效节水工程/1=是, 0=否	-0.487 (0.398)		-0.291 (0.450)		0.615 (0.573)	
地下水高效节水工程累计面积/万 $hm^2$		0.072 (0.344)		-0.516 (0.398)		-0.496 (0.459)
常数项	2.406 (9.440)	3.456 (9.148)	-9.897 (14.412)	-9.650 (14.594)	0.389 (7.259)	0.966 (7.543)
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
样本量	816	816	509	509	714	714

注: \*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$ 。

产量为例(见表 5), 在控制其它因素不变的情况下, 首先, 人均地区生产总值和行政区域土地面积对粮食总产量有显著的正向影响; 其次, 农业生产投入方面, 农林牧渔业从业人员和化肥使用量对粮食总产量有显著的正向影响, 但有效灌溉面积和农业机械总动力对粮食总产量的影响不显著; 最后, 地下水高效节

水工程对粮食总产量的影响不显著。

(2) 机制分析。机制分析结果表明, 农业灌溉水源置换工程通过增加粮食播种面积使粮食总产量显著增加。机制分析的回归结果如表 6 所列, 农业灌溉水源置换工程累计改造灌溉面积每增加 1 万  $hm^2$  使县级层面粮食总产量增加约 12.43%[第(1)列], 其中,

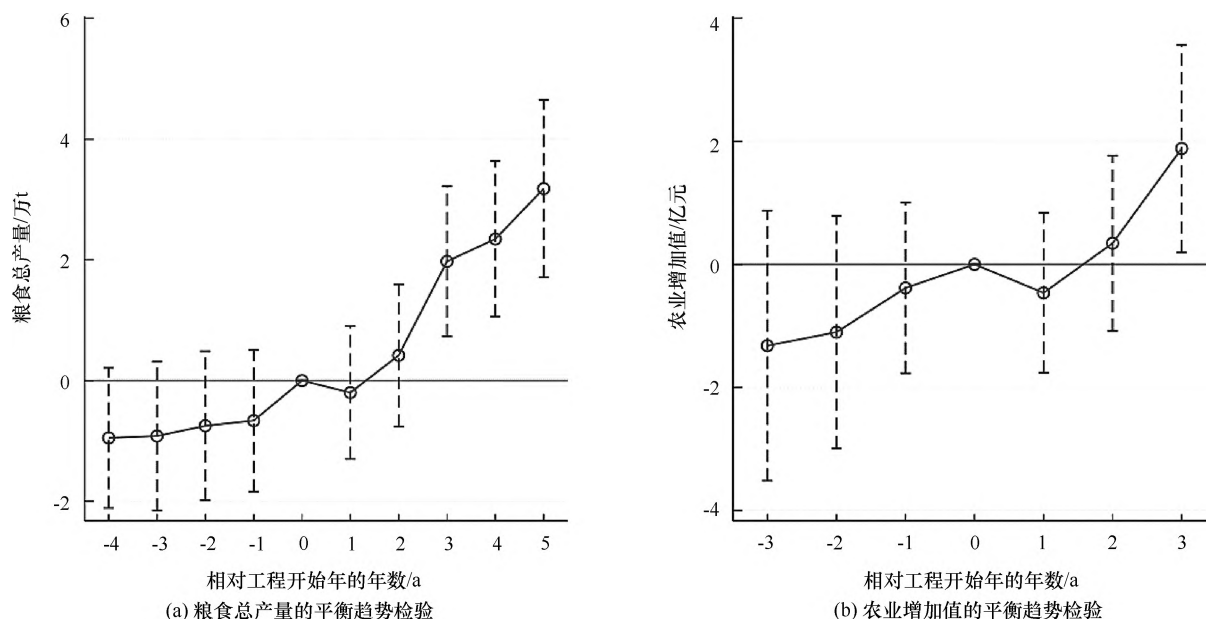


图5 基于事件研究法的平衡趋势检验结果

Fig. 5 Parallel trend test based on event study approach

表6 农业灌溉水源置换工程对粮食总产量影响的机制分析

Table 6 Mechanism analysis of the impact of AIWSP on total grain yield

结果变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	ln(粮食总产量)	ln(粮食播种面积)	ln(粮食单产)	ln(粮食总产量)	ln(粮食播种面积)	ln(粮食单产)
农业灌溉水源置换工程改造灌溉面积(滞后两期)/万 hm <sup>2</sup>	0.117 2*** (0.037 0)	0.113 9*** (0.036 0)	0.003 3 (0.007 5)			
ln(农业灌溉水源置换工程改造灌溉面积)(滞后两期)/万 hm <sup>2</sup>				0.214 5*** (0.057 9)	0.208 6*** (0.058 6)	0.005 9 (0.014 0)
人均地区生产总值/万元·人 <sup>-1</sup>	0.033 8** (0.014 5)	0.027 3** (0.011 6)	0.006 4 (0.006 2)	0.031 8** (0.014 4)	0.025 5** (0.011 5)	0.006 2 (0.006 2)
行政区域土地面积/km <sup>2</sup>	0.000 6* (0.000 3)	0.000 7* (0.000 3)	-0.000 1 (0.000 0)	0.000 6* (0.000 3)	0.000 7* (0.000 3)	-0.000 1 (0.000 0)
农林牧渔业从业人员/万人	0.009 2 (0.006 6)	0.010 6* (0.005 6)	-0.001 4 (0.003 6)	0.009 0 (0.006 6)	0.010 4* (0.005 7)	-0.001 4 (0.003 6)
有效灌溉面积/万 hm <sup>2</sup>	0.013 5 (0.015 6)	0.018 4 (0.014 9)	-0.005 0 (0.006 2)	0.011 2 (0.015 1)	0.016 3 (0.014 6)	-0.005 1 (0.006 1)
农业机械总动力/万 kW	0.000 4 (0.000 5)	0.000 4 (0.000 5)	-0.000 0 (0.000 1)	0.000 3 (0.000 5)	0.000 3 (0.000 4)	-0.000 0 (0.000 1)
化肥使用量(折纯量)/万 t	-0.003 9 (0.018 4)	-0.015 4 (0.017 4)	0.011 5 (0.007 1)	-0.000 1 (0.017 7)	-0.011 6 (0.016 7)	0.011 5 (0.007 1)
地下水高效节水工程累计面积)/万 hm <sup>2</sup>	0.020 7 (0.015 4)	0.008 5 (0.013 9)	0.012 2*** (0.004 6)			
ln(地下水高效节水工程累计面积)/万 hm <sup>2</sup>				0.041 4 (0.036 9)	0.016 7 (0.033 8)	0.024 7** (0.011 6)
常数项	2.496 2*** (0.320 1)	0.625 6* (0.324 9)	1.870 6*** (0.035 0)	2.491 6*** (0.333 0)	0.622 4* (0.338 0)	1.869 2*** (0.034 8)
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
样本量	816	816	816	816	816	816

注: \* p<0.10, \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.01。

粮食播种面积显著增加 12.06%[第(2)列],对粮食单产没有显著的影响[第(3)列]。类似地,第(4)~(6)列的结果表明,农业灌溉水源置换工程累计改造面积对粮食总产量和粮食播种面积的弹性分别为 0.22 和 0.21,即农业灌溉水源置换工程累计改造灌溉面积变化 1%,县级层面粮食总产量变化 0.22%,其中,粮食播种面积变化 0.21%,对粮食单产的影响不显著。因此,农业灌溉水源置换工程主要通过增加粮食播种面积来使粮食总产量增加。

### 2.3.3 结果讨论

研究发现,农业灌溉水源置换工程通过显著提高粮食作物播种面积,显著提高了粮食总产量、农业增加值以及第一产业增加值。结合计量模型估计结果和农户调查数据,本文进一步分析该工程提高粮食播种面积的原因。首先,由于地表水灌溉成本低,且节省劳动力,该工程提高了实施区域农户的种粮积极性。一方面,由于工程引水的水费由政府承担、农户仅需支付提水灌溉的电费和管理费,地表水灌溉成本远低于地下水灌溉,地表水灌溉成本在每次 300~600 元/hm<sup>2</sup> 不等,约占地下水灌溉成本的 1/3~2/3。另一方面,由于地表水的来水量大,地表水灌溉能节省灌溉时间;完善的渠系使得地表水可以直达田间地头,减少了灌溉管理的劳动力投入。其次,该工程的供水方式激励实施区域农户种植冬小麦和夏玉米等粮食作物。由于地表水资源有限,工程通常采用按照冬小麦和夏玉米的灌溉需求季节性供水的方式,即分别在小麦播种期、返青期和拔节期各供一次地表水,在夏玉米播种期供一次地表水。为了充分利用地表水,实施区域农户倾向于种植冬小麦和夏玉米。综上,农业灌溉水源置换工程会增加粮食作物的播种面积,农户调查数据表明,样本户中 95% 以上的项目区农户种植冬小麦和夏玉米。

此外,农业灌溉水源置换工程使实施区域粮食单产不降低,粮食播种面积的增加和单产不降低使得粮食总产量增加。具体地,该工程使部分地下水水质差的地区粮食单产增加,根据农户调查数据,约 10% 的农户表示,由于当地地下水水质差,该工程提供的地表水水质好,工程的实施使小麦和玉米的单产增加了约 750 kg/hm<sup>2</sup>。由于这部分农户占比低,计量模型的估计系数虽然为正,但是不显著,这说明该工程对粮食单产没有明显负面影响。最后,灌溉成本的下降和劳动力投入的减少使得生产成本下降,在其它因素不变的情况下,粮食总产量增加、生产成本降低,使得农业增加值和第一产业增加值显著提升。

## 3 面临的主要挑战

尽管农业灌溉水源置换工程能够直接减少地下水的开采量,提高农业总产出,然而其成效的可持续性面临如下三方面挑战。

(1) 由于地表水源短缺,农业灌溉水源置换工程可增加的地表水灌溉面积有限,这制约了该工程在地下水压采方面的成效。地表水源短缺是制约该工程实施和推广的首要因素。一方面,河北省河网径流量较少,属于资源性缺水地区,加上降水集中时间与小麦灌溉时间错季,因此可供灌溉的本地地表水资源相对有限;另一方面,尽管引黄工程和引江东线工程水源可以增加外调灌溉水源,但其覆盖区域主要集中于东南部县区,工程覆盖面积相对较小。由于地表水来水时间和来水量存在不确定性,该工程所覆盖的县区大部分是由纯井灌区改为井渠双灌区,农户仅将地表水视为补充水源,仍然依赖地下水灌溉。在该工程无法覆盖的地下水超采严重县区,农户只能被迫调整种植结构,扩大季节性休耕和旱作雨养面积。

(2) 农业灌溉水源置换工程的配套设施建设不到位、重建轻管的问题仍然存在。部分实施区域为了扩大规模、抢进度,配套措施建设并不完善,主要表现为渠系的清淤修整工作不到位,泵站与地下管道系统压力不匹配,从水源到田间管道的跑冒滴漏问题较为严重。另外,该工程的管护资金和机制不到位,普遍存在“重建轻管”现象。目前,该工程主要由政府投资建设,建成后工程产权转交给村集体,并颁发产权证书,由村集体或村用水者协会管理。虽然明确了管理主体,但却没有落实管护资金,细化管护机制,不利于工程的可持续运营。

(3) 农业灌溉水源置换工程实施区域尚未建立健全地表水水价机制,导致地表水灌溉成本低,用水量增加,农户节水投资激励不足。目前,项目区的县级财政部门以约 0.15~0.20 元/m<sup>3</sup> 的价格从灌区买水,农户仅承担扬水站提水灌溉的费用(主要是电费,少数村附加田间管道和水泵维养费、管水员工资),也没有“超用加价”机制,因此地表水灌溉水价远低于水资源价值。此外,尽管该工程通常配套了计量设施,但为了降低执行成本,仍然采用按面积收费的方式。偏低的地表水灌溉成本和按亩收费的方式使农户没有主动降低灌溉强度的激励,可能导致地表水灌溉用水量的增加,也会降低农户采取节水技术的积极性,不利于地表水资源的可持续利用。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1) 农业灌溉水源置换工程是遏制农村区域地下水超采的关键举措。河北省已基本完成适宜区域的工程建设工作,2014—2019年,河北省累计完成渠系整治 11 072 km,建设坑塘数量 1749 座,工程引水量达到 15.75 亿 m<sup>3</sup>。

(2) 农业灌溉水源置换工程通过将纯井灌区改造成渠灌区或井渠双灌区,实现地表水置换地下水,从而直接减少了地下水的开采量。2014—2022年,该工程累计改造灌溉面积 75.87 万 hm<sup>2</sup>,压采地下水 12.68 亿 m<sup>3</sup>。

(3) 农业灌溉水源置换工程显著提高粮食总产量、农业增加值以及第一产业增加值。在控制其它变量不变的条件下,该工程使县级层面的粮食总产量增加了 1.70 万 t,农业增加值增加 1.09 亿元,第一产业增加值增加 1.59 亿元。这是由于该工程能够降低灌溉成本、节省劳动力,提高了实施区域农户的种粮积极性。此外,该工程采用季节性的供水方式,促进了实施区域农民种植冬小麦和夏玉米等粮食作物。

(4) 农业灌溉水源置换工程的可持续性面临三方面的挑战:第一,由于地表水源短缺,该工程可增加的地表水灌溉面积有限。第二,该工程配套设施建设不到位、重建轻管的问题仍然存在。第三,实施区域尚未建立健全地表水水价机制,导致地表水灌溉成本低,用水量增加,农户节水投资激励不足。

据此,本文提出如下建议:首先,因地制宜采用小农户明渠提灌和村泵站加管道系统,在地表水源量有保证的情况下,尽最大可能扩大工程覆盖面积。其次,结合作物生长关键时期和上游水源地来水情况,相机引水、储水。县区引水部门主动掌握水源地供水动态,及时沟通信息,保证关键灌溉时期的供水,同时适当修缮、新建坑塘,收集水库汛期弃水、雨水及中水。再次,通过明晰产权、配套管理资金等手段,继续完善该工程的配套设施建设,既要减少从水源到田间的管道跑冒滴漏问题,也要在田间推动节水技术的采用。最后,尽快建立健全灌溉实施区域的地表水水价机制,划定水权,引入按用水量收费模式,并探索水费全覆盖工程维养经费的可持续水价机制。

### 4.2 展望

作为解决农村地区地下水超采的关键措施,农业灌溉水源置换工程不仅在保护地下水及其相关的生态环境质量方面可发挥一定效果,而且在促进当地农业

经济发展方面也具有显著成效,该措施的重要性必然会得到决策者和学术界越来越多的关注。尽管生态经济效益显著,但这一措施面临的挑战也不容忽视。为此,决策者需要出台更有效的配套支持政策;学术界也需要开展进一步深入的定量研究,从而为决策者提供重要的科学依据。

目前,农业灌溉水源置换工程的研究尚处于起步阶段。本文是该领域的初步探索,系统分析了工程实施进展,定量分析了工程在压采地下水和促进农业产出方面的成效,并探讨了工程可能面临的挑战。然而,由于数据和篇幅所限,本文存在一定局限:第一,仅基于描述性统计方法分析了该工程在地下水压采方面的成效;第二,主要分析了该工程对农业产出的影响,而未考虑其它经济影响;第三,重点关注受水区的情况,未考虑工程对供水区以及整个流域的影响。

因此,随着农业灌溉水源置换工程实施时间的推进、数据的完善以及跨学科合作的深入,可以在方法上进行改进以及拓展相关的研究内容:第一,构建区域水文经济模型,定量分析该工程对地下水位的影 响;第二,进一步分析该工程对就业、收入以及区域经济发展水平的影响;第三,研究该工程对供水区以及整个流域的水资源和经济发展的影响。

### 参考文献 (References):

- [1] DENG H, GUAN B, WANG J, et al. Seasonal land fallowing policy in response to groundwater overdraft in the north China plain [J]. 2021, 14(2): 371-394.
- [2] 贾绍凤,李媛媛,吕爱锋,等.海河流域平原区浅层地下水超采量估算[J].南水北调与水利科技,2016,14(4):1-7.  
JIAN S, LI Y, LYU A, et al. Estimation of excess pumping of shallow groundwater aquifer in Haihe Plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 1-7.
- [3] CHANGMING L, JINGJIE Y, KENDY E. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain [J]. Water International, 2001, 26(2): 265-272.
- [4] 河北省人民政府办公厅.河北省地下水超采治理五年实施规划(2018—2022年)[Z].河北:河北省人民政府办公厅,2018.  
General Office of Hebei Provincial People's Government. Five-year implementation plan of groundwater overexploitation control in Hebei Province (2018—2022) [Z]. Hebei: General Office of Hebei Provincial People's Government, 2018.
- [5] 水利部,财政部,国家发展和改革委员会,等.华北地区地下水超采治理行动方案[Z].北京:水利部,财政部,国家发展和改革委员会,2019.  
Ministry of Water Resources, Ministry of Finance, National Development and Reform Commission, et al. Action plan of groundwater over-

- exploitation treatment in North China [Z]. Beijing: Ministry of Water Resources, Ministry of Finance, National Development and Reform Commission, 2019.
- [6] YU Y, MINHUA L, FEI C, et al. Practices of groundwater over-exploitation control in Hebei Province [J]. *Water Policy*, 2020, 22(4): 591-601.
- [7] 陈飞, 羊艳, 史文龙, 等. 河北省地下水超采综合治理农业措施压采效果与技术经济性分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 1019-1026.  
CHEN F, YANG Y, SHI W, et al. Performance analyses and technical economy of groundwater overdraft control measures in Hebei Provinces. [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(5): 1019-1026.
- [8] 谢花林, 程玲娟. 地下水漏斗区农户冬小麦休耕意愿的影响因素及其生态补偿标准研究: 以河北衡水为例[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2012-2022.  
XIE H, CHENG L. Influence factors and ecological compensation standard of winter wheat-fallow in the groundwater funnel area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2012-2022.
- [9] 钟华平. 地下水管理若干问题思考[J]. *水利发展研究*, 2022, 22(3): 7-10.  
ZHONG Huaping. Reflections on several issues of groundwater management [J]. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(3): 7-10.
- [10] 王术礼, 王小军, 蒋卓. 地下水超采综合治理水利工程措施分析: 以馆陶县为例[J]. *中国农村水利水电*, 2016(4): 8-10.  
WANG S, WANG X, CAI Z. Research on water conservancy project measures for over-exploitation groundwater control and management. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(4): 8-10.
- [11] 陈海山, 汪阳. 超大型水利设施防洪与区域经济发展: 以三峡工程为例[J]. *世界经济*, 2022, 45(5): 137-161.  
CHEN H, WANG Y. Flood control in super large water conservancy facilities and regional economic development: A case study of three gorges project [J]. *The Journal of World Economy*, 2022, 45(5): 137-161.
- [12] STROBL E, STROBL R O. The distributional impact of large dams: Evidence from cropland productivity in Africa [J]. *Journal of Development Economics*, 2011, 96(2): 432-450.
- [13] 杨云彦. 南水北调工程与中部地区经济社会协调发展[J]. *中南财经政法大学学报*, 2007(3): 3-9.  
YANG Y. A study on China's South-to-North Water Transfers and harmonious socio-economic development in central region [J]. *Journal of Zhongnan University of Economics and Law*, 2007(3): 3-9.
- [14] ROGERS S, CHEN D, JIANG H, et al. An integrated assessment of China's South: North Water Transfer Project [J]. *Geographical Research*, 2020, 58(1): 49-63.
- [15] 河北省统计局. 河北统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.  
Statistical Bureau of Hebei Province. *Hebei statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [16] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [17] 河北省水利厅. 2021年河北省水资源公报 [EB/OL]. [2023-01-04]. <http://slt.hebei.gov.cn/a/2022/07/22/71C85953B7344BC5AC238CC2FB445065.html>.  
Hebei Province Department of Water Resources. *Water Resources Bulletin of Hebei Province in 2021* [EB/OL]. [2023-01-04]. <http://slt.hebei.gov.cn/a/2022/07/22/71C85953B7344BC5AC238CC2FB445065.html>.
- [18] 水利部. 2021年中国水资源公报 [EB/OL]. [2023-01-04]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202206/t20220615\\_1579315.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202206/t20220615_1579315.html).  
Ministry of Water Resources. 2021 China water resources [EB/OL]. [2023-01-04]. [HTTP://http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202206/t20220615\\_1579315.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202206/t20220615_1579315.html).
- [19] HUANG Q, WANG J, ROZELLE S, et al. The effects of well management and the nature of the aquifer on groundwater resources [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2013, 95(1): 94-116.
- [20] 河北省人民政府. 河北省人民政府关于公布地下水超采区、禁止开采区和限制开采区范围的通知 [EB/OL] [2023-01-04]. <http://www.hebei.gov.cn/hbszfxgk/6806024/6807473/6807180/6808600/6810251/6814168/index.html>.  
People's Government of Hebei Province. Notice of Hebei Provincial People's Government on promulgation of groundwater over-exploitation zones, prohibited exploitation zones and restricted exploitation zones [EB/OL] [2023-01-04]. <http://www.hebei.gov.cn/hbszfxgk/6806024/6807473/6807180/6808600/6810251/6814168/index.html>.
- [21] 王金霞, 李玉敏. 地下水埋深变动对农业生产影响的实证研究 [J]. *人民黄河*, 2014, 36(2): 71-74.  
WANG J, LI Y. Empirical study on impacts of groundwater depth change on agricultural production [J]. *Yellow River*, 2014, 36(2): 71-74.
- [22] ANGRIST J D, PISCHKE J S. *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 2009.
- [23] WOOLDRIDGE J M. *Introductory econometrics: A modern approach* [M]. Boston: Cengage Learning, 2015.

(责任编辑 王璐)