

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0101

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 L, et al. Performance analyses and technical economy of groundwater overdraft control measures in Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 1019-1026. (in Chinese)

# 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

陈飞<sup>1</sup>, 羊艳<sup>1</sup>, 史文龙<sup>1</sup>, 王树谦<sup>2</sup>

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 河北工程大学, 邯郸 056009)

**摘要:**我国在河北开展地下水超采综合治理试点, 为了掌握各项措施的实际压采效果与技术经济性, 采用现场抽水灌溉试验、入户走访调查等手段, 通过治理区地块与非治理区地块治理前后地下水灌溉用水量的对比, 分析总结各项措施的压采效果与实施经验, 并通过治理措施的投入成本与压采效果对比, 研究剖析各项治理措施的技术经济性。研究表明: 治理措施较好地发挥了减少地下水开采的作用, 种植结构调整措施和水源置换措施减少地下水开采量超过 2 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>; 高效节水灌溉措施、水源置换措施实施初期所需建设投资较大, 导致单位压采量所需投资较高, 农业种植结构调整类措施实施初期的投资相对较低, 但后期单位压采量所需投资逐年增加。从压采效果、技术经济性、水源条件与超采类型及程度 4 个方面, 对不同地区选择治理措施给出建议, 为今后地下水超采治理提供参考。

**关键词:**地下水超采治理; 现场抽水灌溉试验; 节水量; 投入成本

中图分类号: TV21 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



我国北方地区地下水超采问题突出<sup>[1-4]</sup>, 为治理地下水超采, 河北省于 2014 年启动了地下水超采综合治理试点工作, 开展大量的超采治理实践和探索, 实施了节水灌溉、水源置换、种植结构调整等多项农业超采治理措施<sup>[5-7]</sup>, 地下水水位持续下降趋势得到有效遏制, 为华北地区乃至全国地下水超采治理提供了经验与借鉴。压采效果和技术经济性是反映治理措施有效性和经济性的重要因素, 直接决定治理措施是否适用。针对地下水超采治理措施及效果, 国内外学者从多个角度开展研究探索, 如: 吴乐等<sup>[8]</sup>、胡振通和王亚华<sup>[9]</sup>通过开展实地调研, 对种植结构调整、冬小麦春灌节水等措施实施效果进行评估; 李静等<sup>[10]</sup>采用 EBM 效率评估模型度量农业项目综合治理效率及主要措施的治理效率及其主要影响因素; 于翔等<sup>[11]</sup>采用信息化手段对地下水超

采治理效果进行过程化评价; Sun 等<sup>[12]</sup>利用长系列的模拟和实测数据, 评估不同灌溉措施对于粮食产量和地下水水位的影响; Barati 等<sup>[13]</sup>采用系统动力学方法对印度地下水治理框架进行评价; Frija 等<sup>[14]</sup>运用 DEA 模型对突尼斯井灌区农业用水效率和投资政策进行测算评估。可以看出已有研究大都集中在压采量、水位、储量等总体治理效果分析上, 或针对某项治理措施的具体效果, 目前缺少针对各项治理措施的实施效果和技术经济性的系统深入研究, 在进一步推广治理措施时造成一定的不便和制约<sup>[15-17]</sup>。针对这一问题, 聚焦河北省地下水超采治理试点区, 在治理措施种类多且治理任务重的邯郸市、邢台市、石家庄市、衡水市、沧州市等治理区, 采取现场抽水灌溉试验、入户走访调查等手段, 通过治理地块与非治理地块治理前后灌溉抽取

收稿日期: 2021-11-21 修回日期: 2022-06-27 网络出版时间: 2022-07-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220715.1509.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406505)

作者简介: 陈飞(1986—), 男, 河北南宫人, 高级工程师, 博士, 主要从事地下水超采治理、水资源管理等工作。E-mail: [chenfei@giwp.org.cn](mailto:chenfei@giwp.org.cn)

地下水量的对比,分析研究各项措施的压采效果,总结实施经验和存在问题,并开展技术经济性分析,研究各项治理措施的单位压采量所需投资,通过资金投入与治理效果对比,分析总结技术经济性及其适用情景。

## 1 研究方法

河北省试点区实施的治理措施主要包括管灌、喷灌、微灌等节水灌溉类措施,旱作雨养、季节性休耕、非农作物替代农作物等种植结构调整类措施,地表水替换地下水灌溉等水源置换类措施,以及河湖地下水回补等措施<sup>[18-20]</sup>。其中:节水灌溉类措施主要通过减少单次灌溉用水量实现压采效果<sup>[21-22]</sup>;种植结构调整类措施主要通过改变种植模式和灌溉习惯,减少灌溉次数或依靠雨养实现压采效果<sup>[23]</sup>;水源置换类措施利用地表水水源全部或部分置换地下水灌溉<sup>[24]</sup>。为准确掌握各项治理措施的压采效果,在不同地市选择典型治理区及其邻近的非治理区,连续多年在作物实际灌溉期间监测和记录实际灌溉用水量、灌溉次数等数据,对比分析不同治理措施的节水压采能力。根据治理措施分布情况,选择灌溉试验分别在邯郸市的馆陶县和成安县、邢台市的临西县和任县、石家庄市的高邑县和藁城区,以及衡水市的冀州、桃城区和故城县,沧州市的泊头市、南皮县和东光县开展。对于实施期减少或者停止灌溉的种植结构调整类措施,采取入户走访调查的方式了解实际节水效果。对于大田作物,以冬小麦-夏玉米为主<sup>[25]</sup>,使用超声波流量计测定灌溉期每次灌溉亩均灌水量;对于大棚蔬菜,安装计量水表进行全生育期灌溉持续观测,得到亩均灌水量。研究期间共先后进行244次灌溉试验,其中:大田作物传统灌溉64次,节水灌溉70次;大棚蔬菜传统灌溉55次,节水灌溉55次,具体见表1。

表1 灌溉试验统计  
Tab. 1 Times of irrigation tests

试验区	大田作物/次			大棚蔬菜/次		合计
	传统灌溉	高标准管灌	喷灌	畦灌	滴灌	
邯郸市	18	10	8	30	30	96
邢台市	16	13	3	6	6	44
沧州市	10	6	8	8	8	40
石家庄市	6	4	4	4	4	22
衡水市	14	10	4	7	7	42
合计	64	43	27	55	55	244

每次灌溉试验均记录灌溉方式、作物种类、灌溉面积、灌水流量、灌溉时间、用电量、机井类型等数据,分析不同作物、不同区域、不同灌溉方式的平均亩均灌水量。现场试验及计量设施见图1。

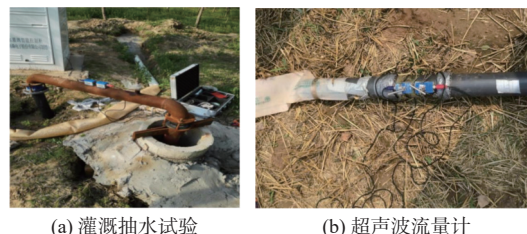


图1 现场灌溉试验

Fig. 1 Photos of field tests

## 2 压采效果分析

### 2.1 节水灌溉类措施

本文节水灌溉类措施按照大田作物喷灌、大棚作物滴灌、大田作物高标准管灌、水肥一体化4种措施进行压采效果分析。

#### 2.1.1 大田作物喷灌

实施方式。该措施受地形和土壤的影响较小,适用于家庭农场、农业合作社等规模化种植地块,具有缩短灌溉时间、减少人力投入等优点,并适合在地形复杂、陡坡、土层薄等地块实施。

节水效果。根据灌溉对比试验结果,在正常降水年份:种植小麦和玉米两季平均需喷灌灌水5次,年灌溉用水量为2700~3000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;传统漫灌平均需灌水4次,年灌溉用水量为3300~4200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。年灌溉节水量为600~1200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

#### 2.1.2 大棚作物滴灌

实施方式。滴灌措施利用安装在末级管道上的灌水器,将水分直接均匀输送到作物根部附近土壤,尤其适用于蔬菜类高耗水作物。但由于滴灌带持续使用性较差,在一定程度上影响了大规模推广和使用。

节水效果。根据灌溉对比试验结果,滴灌措施节水效果明显,以大棚西红柿、黄瓜为例:实施前采用畦灌方式平均次灌水量330 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,实施滴灌后平均次灌水量为240 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,次灌水节水量90 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;年灌水30次,灌溉用水量由9900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>降至7200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>左右,平均年节水量可达2700 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

#### 2.1.3 大田作物高标准管灌

实施方式。该项措施在输水管道上每隔一定距离设置一个出水口,可直接接入田间渠道送水入田,

也可在出水口处连接软管输水入田。大田作物高标准管溉可节省灌溉时间,减少劳动量,尤其适合目前普遍存在的“一家一户”分散种植模式地块。在加强田间精细化管理的情况下,根据土质状况设置合理畦长、畦宽,可进一步提高节水效果。

**节水效果。**根据灌溉对比试验结果,高标准管灌溉节水效果较为明显,不同区域土壤类型不同,灌溉模式与用水量不同,节水效果亦不同。在正常降水年份,种植小麦和玉米等大田作物高标准管灌年灌溉用水量为 $2\ 700\sim 3\ 000\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ,年灌溉节水量为 $600\sim 1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

#### 2.1.4 水肥一体化

**实施方式。**水肥一体化措施主要包括小麦玉米水肥一体化和蔬菜膜下滴灌水肥一体化两种类型,可将水肥直接输送到作物根部附近的土壤,提高水肥利用率,达到节水、节肥、节药、省工、省时等目的。该措施对使用技术及肥料的溶水性要求较高,因此在此项目实施中需安排技术人员对使用者进行培训,适合在农场等规模化种植地块实施。

**节水效果。**小麦玉米水肥一体化主要采用管灌方式,在加强田间管理情况下,其节水效果与高标准管灌相似,在正常降水年份,年灌溉节水量可达 $600\sim 1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。蔬菜膜下滴灌水肥一体化节水效果与大棚滴灌相似,西红柿、黄瓜等平均年灌溉节水量可达 $2\ 700\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

## 2.2 种植结构调整类措施

### 2.2.1 季节性休耕

**实施方式。**该项措施在无地表水替代的深层地下水超采区,改冬小麦、夏玉米一年两熟制,为种植玉米、棉花、花生等农作物一年一熟制,减少地下水开采量。实施后政府按照每年 $7\ 500\ \text{元}/\text{hm}^2$ 的标准给予农民减产补贴。该项措施减少冬小麦种植,节水效果好,农民实施积极性高,但可持续性较差,需靠政府持续补贴维持运行生效。

**节水效果。**该项措施节水效果显著,是直接减少地下水开采量最有效的节水方式之一。根据灌溉试验与入户调查结果,节水量即为种植小麦时的灌溉用水量,在正常降水年份:邯郸市、邢台市平均为 $3\ 150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ;石家庄市平均为 $2\ 925\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ;衡水市、沧州市平均为 $2\ 700\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ,平均年节水量可达 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

### 2.2.2 旱作雨养

**实施方式。**该项措施在地下水严重超采且无地

表水源地区,适度退减地下水灌溉面积,变灌溉农业为旱作农业,压减地下水开采量。实施后由政府按照每年 $12\ 000\sim 15\ 000\ \text{元}/\text{hm}^2$ 的标准补贴农民。项目实施压采效果较好,但同样受政府资金补贴影响,可持续性较差。

**节水效果。**该项措施节水效果显著,是直接减少地下水开采量最有效的措施之一。根据灌溉试验与入户调查结果,节水量为项目区种植小麦、玉米时的灌溉用水量,在正常降水年份,邯郸市、邢台市平均为 $4\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ,石家庄市平均为 $3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ,衡水市、沧州市平均为 $3\ 300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。平均年节水量可达 $3\ 720\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

### 2.2.3 非农作物替代农作物

**实施方式。**在地下水严重超采区,实施非农作物替代农作物,改种小麦为节水抗旱树种,实现耕地、河湖休养生息。该项措施节水效果较好,项目区生态环境也可得到改善,实施中应配备专门的技术人员指导栽种树苗,以保证实施效果。但可持续性较差,同样需靠政府补贴维持运行生效。

**节水效果。**根据灌溉试验与入户调查结果,林地年灌水 $1\sim 2$ 次,相对原来种植小麦玉米减少 $2\sim 3$ 次灌水,该项目平均灌溉节水量达到 $2\ 400\sim 2\ 700\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

在实施上述3类种植结构调整类措施过程中,为便于项目管理和实施,一般采用集中连片大规模实施的形式,由于实施前地块作物类型具有随机性,因此其平均单位压采效果会较理论分析结果有所降低,具体应根据近年平均种植结构、复种指数等进行进一步测算。

## 2.3 灌溉水源置换

**实施方式。**地表水置换地下水灌溉是解决地下水超采的一项有效措施,可直接减少使用地下水。实施此项治理措施,应充分考虑区域水资源条件、来水时间、调蓄工程规模、输水损失等因素,避免出现地表水置换地下水工程的使用率低的情况,在一定程度上影响压采效果。

**节水效果。**该项措施的节水压采量为置换面积原灌溉取用的地下水量,如果地表水量充足,可完全置换地下水开采,在正常降水年份,邯郸市、邢台市平均为 $4\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ,石家庄市平均为 $3\ 900\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ,衡水市、沧州市平均为 $3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。若当地地表水量不足,应考虑地表水、外调水来水情况、置换灌水次数等因素,对置换水量进行一定比例折减。

从分析结果可以看出:种植结构调整措施是直接减少地下水开采量最有效的方式之一,尤其是旱作雨养措施可实现地下水零开采,季节性休耕、非农作物替代农作物措施可减少地下水灌溉次数 2~3 次,在集中连片大规模实施过程中,总体压采效果会由于地块种植作物类型甚至间隔闲置情况等因素而有所降低;水源置换也是可直接减少地下水开采的有力措施,在地表水源充足的情况下,可完

全置换开采地下水,但在地表水源来水量不足或来水时机不匹配时,压采效果将会随之折减;高效节水灌溉措施可以降低灌水定额,在一定程度上减少地下水开采量,且具有节省灌溉时间、减少灌溉人力劳动等特点,适用于浅层地下水超采区,但对于深层承压水超采区,可在一定程度上减少开采量,但不能完全解决超采问题。各类措施节水压采效果见表 2。

表 2 各类措施节水压采效果对比

Tab. 2 Comparison of water-saving and pressure mining effects of various measures

单位:  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 

分类	措施	实施前年灌溉用水量	实施后年灌溉用水量	节水压采量
节水灌溉类	大田作物喷灌	3 300~4 200	2 700~3 000	600~1 200
	大棚作物滴灌	9 900	7 200	2 700
	大田作物高标准管灌	3 300~4 200	2 700~3 000	600~1 200
	大田作物水肥一体化	3 300~4 200	2 700~3 000	600~1 200
	大棚作物水肥一体化	9 900	7 200	2 700
种植结构调整类	季节性休耕	3 300~4 200	600~1 050	2 700~3 150
	旱作雨养	3 300~4 200	0	3 300~4 200
	非农作物替代农作物	3 300~4 200	900~1 500	2 400~2 700
水源置换类	灌溉水源置换	3 300~4 200		3 300~4 200

### 3 技术经济性分析

各类治理措施具有明显不同的资金投入模式:对于地表水水源置换、节水灌溉等措施,所需投入为一次性工程建设投资,工程建成后可以持续稳定发挥压采作用;对于种植结构调整类措施,具有压采效果见效快但持续性差的特点,需每年持续给予农民补贴,以维持地下水压采效果。为掌握各项治理措施资金投入与压采效果对比关系,便于在今后实施中优化调整治理模式,对各项治理措施开展技术经济分析。

根据地下水超采治理试点工作中各项治理措施

的单位投资,见表 3,结合表 2 中各项措施的压采效果,计算各项治理措施的单位压采量所需投资,计算结果见图 2。由图 2 可以看出,考虑各项措施实施 5 年情况下,实施期内单位压采量所需投资由高到低分别为非农作物替代农作物、大田作物喷灌和大田作物水肥一体化、旱作雨养、大棚作物滴灌和大棚作物水肥一体化、大田作物高标准管灌、管溉水源置换。单位压采量所需投资最高的治理措施是非农作物替代农作物,实施期内单位压采量所需投资平均为  $26.5 \text{ 元}/\text{m}^3$ ;单位压采量所需投资最低的治理措施是灌溉水源置换,实施期内单位压采量所需投资平均为  $6.7 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

表 3 各项治理措施投资

Tab. 3 Investment demand for the measures

单位:  $\text{元}/\text{hm}^2$ 

分类	措施	一次性工程建设投资	持续性每年补贴经费
节水灌溉类	大田作物喷灌	15 000	0
	大棚作物滴灌	24 000	0
	大田作物高标准管灌	7 500	0
	大田作物水肥一体化	15 000	0
	大棚作物水肥一体化	24 000	0
种植结构调整类	季节性休耕	0	37 500
	旱作雨养	0	75 000
	非农作物替代农作物	0	67 500
水源置换类	灌溉水源置换	24 000	0

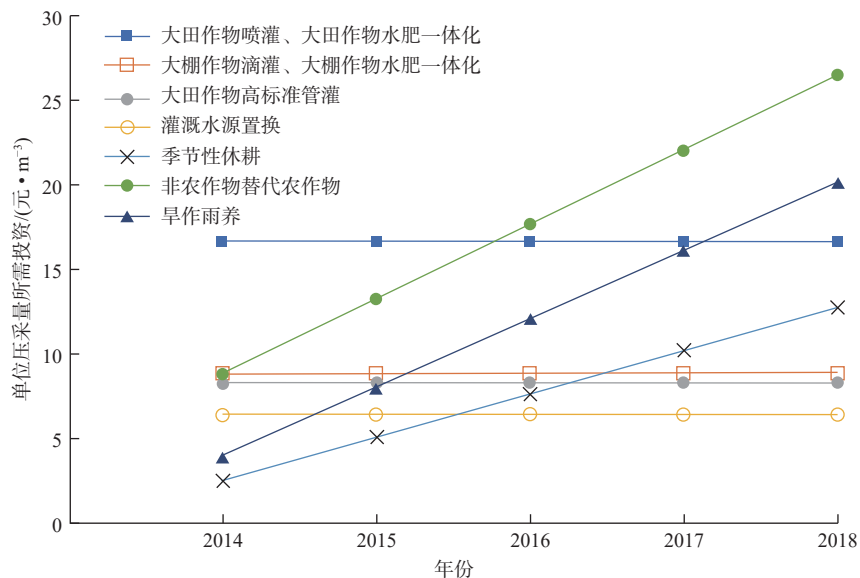


图2 各类治理措施单位压采量所需投资变化趋势

Fig. 2 Variation trend of the investment demand of groundwater overdraft control measures

对于节水灌溉、水源置换等措施,前期所需建设投入较大,实施初期的单位压采量所需投资相对较大,尤其是大田作物喷灌和大田作物水肥一体化,第1年的单位压采量所需投资平均为16.7元/m<sup>3</sup>,远高于其他措施第1年的单位压采量所需投资。对于农业种植结构调整类措施,实施初期的单位压采量所需投资相对较小,非农作物替代农作物、旱作雨养、季节性休耕措施第1年的单位压采量所需投资分别为8.8、4.2、2.6元/m<sup>3</sup>;但随着补贴经费逐年累计增加,农业种植结构调整类措施单位压采量所需投资逐年增加,第5年单位压采量所需投资分别为26.5、20.8、12.8元/m<sup>3</sup>,超过了节水灌溉、水源置换等措施。若继续维持压采效果,单位压采量所需投资仍将继续增加。若继续考虑休耕、雨养等种植结构调整措施对粮食减产的影响,其投入-产出效益将进一步降低。

因此,从地下水压采的角度出发,结合各项措施的技术经济性特点,可以归纳出各个措施的适用情景和优先次序。在具备地表水源且骨干引调水工程基本建成的情况下,优先采用水源置换措施,实现压采与保粮双目标;在不具备地表水源、超采程度不严重、节水有较大潜力的浅层地下水超采地区,首先考虑采用喷灌、滴灌、管灌等高效节水灌溉方式,进一步减少地下水开采量,其中对于集中连片规模化种植的地块优先采用喷灌、滴灌等方式,对于分散种植地块更适合管灌;在超采程度严重、节水潜力较小、无替代水源的深层承压水超采地区,地下水超采已经或即将引发严重的生态与地质环境问题,需采取种植结构调整措施,强化水资源刚

性约束,优化调整经济社会发展结构和方式。

#### 4 结论

河北省实施的各项地下水超采综合治理措施,均较好地发挥了减少地下水开采的作用,其中:种植结构调整措施可以直接减少灌溉次数,季节性休耕、旱作雨养、非农作物替代农作物等措施分别可减少地下水开采量2700~3150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、3300~4250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、2400~2700 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;水源置换措施在地表水来水充足情况下可完全置换地下水,可减少地下水开采量3300~4200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;高效节水灌溉措施可以降低灌水定额,在一定程度上减少地下水开采,大田作物喷灌与高标准管灌可减少地下水开采量600~1200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

各类地下水超采综合治理措施具有明显不同的投入-压采产出模式,高效节水灌溉、水源置换等措施前期建设投入较大,农业种植结构调整类措施所需投资随着补贴经费逐年增加,一般在实施期5年单位压采量所需投资超过高效节水灌溉、水源置换措施。在治理实践中,应综合考虑水源条件、种植结构、地下水超采程度、财政投入等因素,确定各项措施的适用区域和地块,在压采、粮食、生态等多要素中实现最大投入-产出效益。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘敏, 聂振龙, 王金哲, 等. 华北平原地下水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 13-18. (LIU M, NIE Z L, WANG J Z, et al. Evaluation of

- groundwater resources carrying capacity in north China plain[J]. *South to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(4): 13-18. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.003](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.003).
- [2] 杜东, 刘宏伟, 周佳慧, 等. 北京市通州区地面沉降特征与影响因素研究[J]. *地质学报*, 2022, 96(2): 712-725. (DU D, LIU H W, ZHOU J H, et al. Study on the characteristics and influencing factors of land subsidence in Tongzhou district of Beijing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 712-725. (in Chinese)) DOI: [10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021279](https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021279).
- [3] 李文鹏, 王龙凤, 郭海朋, 等. 中国地面沉降防治成效与对策建议[J]. *中国水利*, 2021(7): 32-35. (LI W P, WANG L F, GUO H P, et al. Effectiveness and countermeasures of land subsidence control in China[J]. *China Water Resources*, 2021(7): 32-35. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:SLZG.0.2021-07-012](https://doi.org/CNKI:SUN:SLZG.0.2021-07-012).
- [4] 王庆明, 姜珊, 李森, 等. 大清河流域山区径流量衰减影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 669-679. (WANG Q M, JIANG S, LI S, et al. Influencing factors of surface runoff attenuation in mountainous areas of Daqing River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 669-679. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0070](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0070).
- [5] 崔志清. 贯彻新发展理念 坚持综合施策 全力推进河北省地下水超采综合治理[J]. *中国水利*, 2021(7): 40-42. (CUI Z Q. Following new development concept and taking comprehensive measures for groundwater overdraft reduction in Hebei Province[J]. *China Water Resources*, 2021(7): 40-42. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:SLZG.0.2021-07-014](https://doi.org/CNKI:SUN:SLZG.0.2021-07-014).
- [6] 王玉坤, 马素英, 焦艳平. 河北省地下水超采综合治理模式研究[J]. *水科学与工程学报*, 2019(2): 42-45. (WANG Y K, MA S Y, JIAO Y P. Research on comprehensive management model of groundwater over-exploitation in Hebei Province[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2019(2): 42-45. (in Chinese)) DOI: [10.19733/j.cnki.1672-9900.2019.02.13](https://doi.org/10.19733/j.cnki.1672-9900.2019.02.13).
- [7] 陈飞, 丁跃元, 李原园, 等. 华北地区地下水超采治理实践与思考[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 191-198. (CHEN F, DING Y Y, LI Y Y, et al. Practice and consideration of groundwater over-exploitation in north China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2): 191-198. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0042](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0042).
- [8] 吴乐, 孔德帅, 李颖, 等. 地下水超采区农业生态补偿政策节水效果分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(3): 38-44. (WU L, KONG D S, LI Y, et al. Analysis on the water-saving effect of agro-ecology compensation policy in groundwater overdraft areas[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(3): 38-44. (in Chinese)) DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2017.075](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2017.075).
- [9] 胡振通, 王亚华. 华北地下水超采综合治理效果评估: 以冬小麦春灌节水政策为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 101-106. (HU Z T, WANG Y H. Effectiveness assessment on comprehensive governance of groundwater over-exploitation in north China plain: The policy of winter wheat's water-saving by reducing spring irrigation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(5): 101-106. (in Chinese)) DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2019.145](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2019.145).
- [10] 李静, 刘迪, 常媛媛. 地下水超采的农业项目综合治理效率及影响因素: 基于河北省49个试点县区的实证研究[J]. *环境经济研究*, 2021, 6(3): 75-96. (LI J, LIU D, CHANG Y Y. Governance efficiency and influencing factors of agricultural projects for over-exploitation of groundwater: Empirical study of 49 pilot counties in Hebei Province[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2021, 6(3): 75-96. (in Chinese)) DOI: [10.19511/j.cnki.jee.2021.03.005](https://doi.org/10.19511/j.cnki.jee.2021.03.005).
- [11] 于翔, 解建仓, 姜仁贵, 等. 河北省地下水超采治理效果过程化评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(4): 364-371. (YU X, XIE J C, JIANG R G, et al. Process evaluation for governance effect of groundwater over-exploitation in Hebei Province[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(4): 364-371. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1674-8530.20.0145](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.20.0145).
- [12] SUN H Y, ZHANG X Y, WANG E L, et al. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production: A case study in the north China plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 48-56. DOI: [10.1016/j.eja.2015.07.001](https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.07.001).
- [13] BARATI A A, AZADI H, SCHEFFRAN J. A system dynamics model of smart groundwater governance[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 502-518. DOI: [10.1016/j.agwat.2019.03.047](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.047).
- [14] FRIJA A S, CHEBIL A, SPEELMAN S, et al. A critical assessment of groundwater governance in Tunisia[J]. *Water Policy*, 2014, 16(2): 358-373. DOI: [10.2166/wp.2013.038](https://doi.org/10.2166/wp.2013.038).
- [15] 宋全香, 李佳, 苗红昌, 等. 河南省黄河以北地区地下水压采潜力分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(8): 67-72. (SONG Q X, LI J, MIAO H C, et al. Analysis of groundwater exploitation potential in the north region of Yellow River in Henan Province[J]. *Yellow*

- River, 2020, 42(8): 67-72. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.08.014.
- [16] 王京晶, 徐宗学, 李鹏, 等. 济南市区地下水埋深动态变化及其成因[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19(5): 883-893. (WANG J J, XU Z X, LI P, et al. Characteristics and attribution of groundwater depth changes in Jinan City[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(5): 883-893. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0092.
- [17] 吴彬, 杜明亮, 穆振侠, 等. 1956—2016年新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2021, 32(5): 659-669. (WU B, DU M L, MU Z X, et al. Analysis on the variation of groundwater resources and influencing factors in Xinjiang plain area from 1956 to 2016[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 659-669. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.05.002.
- [18] 冯战洪, 张封. 关于对河北省地下水超采综合治理试点工作的几点思考[J]. *水利规划与设计*, 2017(3): 17-19. (FENG Z H, ZHANG F. A few thoughts on the pilot work of comprehensive management of groundwater overdraft in Hebei Province[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2017(3): 17-19. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2017.03.009.
- [19] 陈飞, 丁跃元, 唐世南, 等. 华北地区河湖生态补水与地下水回补的实践及效果分析[J]. *中国水利*, 2021(7): 36-39. (CHEN F, DING Y Y, TANG S N, et al. Practice and effect analysis of river-lake ecological water supplement and groundwater recharge in the north China region[J]. *China Water Resources*, 2021(7): 36-39. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SLZG.0.2021-07-013.
- [20] 宋浩楠, 陈文婧, 田晓华, 等. 华北中部平原地表水入渗试验:以南宫滦河为例[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19(6): 1157-1166. (SONG H N, CHEN W J, TIAN X H, et al. Surface water infiltration test in the central plain of north China: A case study of Suolu River, Nangong[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(6): 1157-1166. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0118.
- [21] 孙天合, 关宝珠, 邓洪波, 等. 地下水超采区“一提一补”农业水价政策模式与推广困境反思[J]. *水利经济*, 2020, 38(4): 68-73. (SUN T H, GUAN B Z, DENG H B, et al. Introspection of policy mode and promotion dilemma of raise-refund mechanism of agricultural water price in groundwater overdraft areas[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(4): 68-73. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2020.04.012.
- [22] 秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19(1): 36-42. (QIN C H, ZHAO Y, LI H H, et al. Assessment of regional water saving potential[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 36-42. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0003.
- [23] 胡振通, 王亚华. 地下水超采综合治理的农户评价、原因分析与改进建议[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 160-168. (HU Z T, WANG Y H. Farmers' evaluation, cause analysis and improvement suggestions on groundwater over-exploited comprehensive governance[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(10): 160-168. (in Chinese)) DOI: 10.12062/cpre.20180702.
- [24] 张雪靓, 任理. 既地下水采补平衡又冬小麦稳产的探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 190-198. (ZHANG X L, REN L. A study of achieving groundwater equilibrium and stable winter wheat yield simultaneously[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2021, 48(4): 190-198. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2020105003.
- [25] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in north China plain over three decades[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097-1104. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.02.003.

## Performance analyses and technical economy of groundwater overdraft control measures in Hebei Province

CHEN Fei<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>, SHI Wenlong<sup>1</sup>, WANG Shuqian<sup>2</sup>

(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China;

2. Hebei University of Engineering, Handan 056009, China)

**Abstract:** A comprehensive groundwater overdraft control pilot project was launched in Hebei Province, China due to severe groundwater overexploitation problems, and many control measures were implemented including highly

efficient irrigation, water source replacement, planting structure adjustment, etc. The performance, implementation difficulty, and investment of different measures vary drastically. To further upscale and promote the pilot project, the comprehensive evaluation of each measure became increasingly important. Many existing studies focus on the evaluation of the overall effect of the project, such as reduced pumping rate, water level change, storage change, etc., but failed to answer the question of the performance and economic efficiency of specific measures. Different research methods had been used synergistically including irrigation on-site tests, household visits, surveys, technical and economic analysis. Comparative experiments on the same crop with different irrigation methods were conducted yearly throughout the whole duration of the project within the pilot and non-pilot areas in Shijiazhuang, Cangzhou, Hengshui, Xingtai and Handan. The water-saving capacity was attained by analyzing the water consumption of traditional irrigation methods, and water-saving irrigation methods. The performance of different control measures for the whole pilot area was calculated based on the groundwater abstraction rate change analysis before and after the comprehensive governance. The input-output ratio of different groundwater overdraft control measures was estimated by calculating the investment per unit of reduced groundwater extraction. The investment equaled the initial investment and the additional cost for the following years. The reduced groundwater extraction could be deduced using the groundwater abstraction rate change from the performance evaluation. The results show that adopted measures played an essential role in alleviating groundwater overdrafts. Taking the wheat-maize planting pattern as an example, the annual saved water per hectare of sprinkling irrigation, rainfed farming, pipe irrigation, integration of water into fertilizer, following, and replacing with non-agriculture crops reached  $600-1\ 200\ \text{m}^3$ ,  $2\ 700\ \text{m}^3$ ,  $600-1\ 200\ \text{m}^3$ ,  $2\ 700-4\ 200\ \text{m}^3$ ,  $2\ 400-2\ 700\ \text{m}^3$ , respectively, compared to traditional irrigation. The drip irrigation to vegetables could save water up to  $2\ 700\ \text{m}^3$  per hectare, and  $3\ 900\ \text{m}^3$  of water per hectare could be saved by water source replacement. The initial annual investment for water-saving irrigation and water source replacement was  $16.7\ \text{yuan}/\text{m}^3$ , while the annual initial investment for replacing the non-agricultural crop, rain-fed farming, and the following was only  $8.8$ ,  $4.2$ , and  $2.6\ \text{yuan}/\text{m}^3$ , respectively. But the annual investment for the latter three methods in the last year reached  $26.5$ ,  $20.8$ , and  $12.8\ \text{yuan}/\text{m}^3$ . This concluded that planting structure adjustment and water source replacement have posed an obvious effect on reducing groundwater extraction. The high-efficiency water-saving irrigation and water source replacement methods require relatively high construction investment at the initial stage, making the cost of a single unit higher. The initial investment in planting structure adjustment is relatively small, but the investment of a single unit could reduce extraction increased linearly year by year. By combining the results of the performance evaluation and the input-output ratio of different control measures, the applicable scenarios and priorities could be deduced, which could work as a reference for the management of groundwater overdraft control in the future.

**Key words:** groundwater overdraft control; field irrigation test; amount of water-saving; invested cost