

既地下水采补平衡又冬小麦稳产的探讨

张雪靓, 任 理

A study of achieving groundwater equilibrium and stable winter wheat yield simultaneously

ZHANG Xueliang and REN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2020105003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究

An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei Plain

顾南, 张建云, 刘翠善, 王振龙, 王国庆 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 15-24

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59

漳滏平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

张希雨, 张光辉, 严明疆 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 72-81

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30

白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake

李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48-54

郑州地下水均衡试验场的改建工程——试验介质的选择与试验土柱建造

Reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou: selection of test media and construction of test soil columns

宋高举, 王帅, 李俊亭, 黄继超, 张公, 王继华, 王琳 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 19-25



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2020105003

既地下水采补平衡又冬小麦稳产的探讨

张雪靓¹, 任 理²

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院土地资源管理系, 北京 100193; 2. 中国农业大学
资源与环境学院土壤和水科学系, 北京 100193)

摘要: 河北省太行山山前平原浅层地下水位持续下降, 问题十分突出, 然而, 该区域又是我国优质冬小麦的重要产区。能否实现在浅层地下水采补平衡的同时做到冬小麦稳产, 是该区域水资源保护和农业生产管理工作中亟待回答的重要问题。基于分布式水文模型的模拟结果表明: 在该区域若要实现地下水位止降回升这一压采目标, 仅利用浅层地下水进行灌溉, 冬小麦的产量会减少 40% 以上。考虑到南水北调中线工程的引水线路自南向北贯穿河北省太行山山前平原, 建议在冬小麦关键需水期的灌溉中采用“一水用浅层地下水另一水用南水北调水”的“修改的春浇两水”模式。基于模拟结果的估算表明: 在这种限水灌溉模式下有望实现浅层地下水采补基本平衡且冬小麦基本稳产。值得注意的是, 这种“修改的春浇两水”模式, 需要南水北调中线引水工程每年提供的灌溉水量大约为 $8.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 灌溉成本较纯井灌至少增加 562.5 ~ 1282.5 元/hm²。本研究可为我国最典型的浅层地下水超采区——河北省太行山山前平原探索保产量与节水并举的新路径提供定量化的参考。

关键词: 浅层地下水; 采补平衡; 冬小麦; 稳产; 限水灌溉; 南水北调

中图分类号: P641.1; S274

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0190-09

A study of achieving groundwater equilibrium and stable winter wheat yield simultaneously

ZHANG Xueliang¹, REN Li²

(1. Department of Land Resources Management, College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Department of Soil and Water Sciences, College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The piedmont plain of Taihang Mountains in Hebei Province is the most severe shallow groundwater depletion region in China, as well as an important growing area of winter wheat with high quality. How to achieve the goals of shallow groundwater equilibrium and stable winter wheat yield simultaneously has become a key issue for the water management and agricultural production of this well-irrigated plain. The simulated results based on a distributed hydrological model showed that to satisfy the constraint of stopping shallow groundwater drawdown, the average minimal reduction in winter wheat yield would be over 40%. It was difficult to maintain the current winter wheat production only rely on the shallow groundwater resource carrying capacity. The middle route of South-to-North Water Diversion (SNWD) project that goes through the piedmont plain of Taihang Mountains in Hebei Province provides a potential source of irrigation water to this region. In this context, we proposed a limited irrigation scheme by applying two rounds of irrigation – one round using shallow groundwater and one round

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807183); 国家公益性行业(农业)科研专项/农业部行业计划(201303133)

第一作者: 张雪靓(1991-), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水土资源可持续利用的模拟研究。E-mail: zhangxueliang@cau.edu.cn

通讯作者: 任理(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理学与农业水文学的研究。E-mail: renli@cau.edu.cn

using SNWD water –for the winter wheat. The estimated results showed that under this limited irrigation scheme, it would be expected to basically realize shallow groundwater equilibrium as well as maintain the winter wheat yield stable. It should be noted that approximately $8.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ of SNWD water would be required every year as the irrigation source, and the irrigation cost would increase by 562.5 ~ 1282.5 yuan/hm² at least. This alternative limited irrigation scheme could serve as a quantitative reference for this shallow groundwater overexploited region to explore the trade-off between crop production and water saving.

Keywords: shallow groundwater; groundwater equilibrium; winter wheat; stable yield; limited irrigation scheme; South-to-North Water Diversion project

1 既要压采浅层地下水又要做到冬小麦稳产的重要性

在我国, 华北平原是地下水超采情势最为严重的区域^[1-3], 其中尤以京津以南的河北省平原区为甚^[4]。2014 年以来, 为保障华北地区的水安全和生态安全, 国家出台了一系列以“压采”地下水为核心的文件^[5-18], 其中, 河北省始终是相关政策贯彻与落实的重要靶区(图 1)。实现地下水采补平衡、地下水位止降回升是地下水超采综合治理工作的重要目标, 而在各种方案所涉及的具体压采举措中, 推进节水农业一直被列为重点。据统计, 河北省作为粮食生产大省, 地下水开采量中的 70% 以上都用于农田灌溉^[19], 井灌早已成为

保障作物产量的重要支撑。河北省太行山东侧的山前平原是该省粮食的主产区之一^[20], 也是全国浅层地下水超采最严峻的区域^[4]。该井灌区因浅层地下水的水质良好, 其含水层早已成为主要的开采层^[21]。1990 年以来, 因连续超采, 该区域浅层地下水位平均下降速度高达 1 m/a 以上^[22-23]。浅层地下水由于能够接受降水等补给, 属于可更新资源, 具备实现“地下水位止降回升、地下水采补平衡”这一压采目标的潜力。探讨如何科学地压减该区域内用于井灌的浅层地下水开采量、实现采补平衡, 不仅是目前地下水资源可持续利用领域的热点科学问题, 也是当前相关管理部门在政策制定与方案比选时的重要考虑。

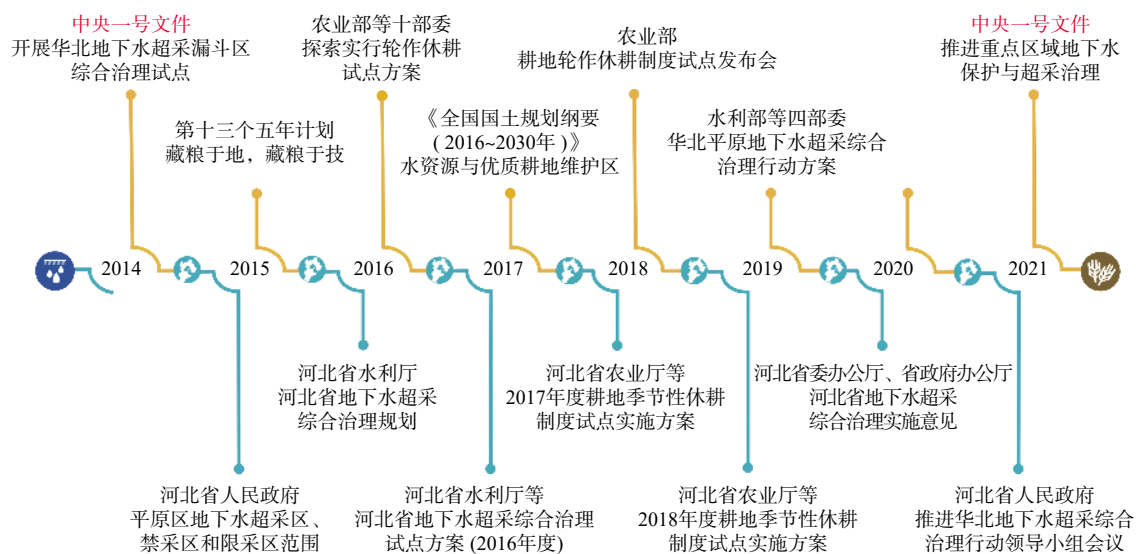


图 1 2014—2021 年中央与国家有关部委和河北省人民政府及其相关管理部门有关地下水超采综合治理重要文件发布的时间顺序

Fig. 1 The policies about comprehensive treatment on groundwater overexploitation released by Chinese government, related ministries, and Hebei Province during 2014—2021

河北省太行山山前平原^[23-26]共涉及保定、石家庄、邢台和邯郸 4 个地区的 48 个县(市), 总面积近 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中耕地占比在 80% 以上, 以冬小麦-夏

玉米一年两熟制作为最主要的种植模式^[20]。由于冬小麦在其生育期内的降水量与需水量高度不匹配, 多年平均缺水 300 mm 以上^[27], 所以, 灌溉特别是井灌成

为近几十年来该区域冬小麦生产的重要保障^[28]。显然,压减地下水开采量势必会在很大程度上影响冬小麦产量。河北省太行山山前平原,作为优质强筋小麦的优势产区,在河北省小麦生产中占据着不可替代的地位^[29-30]。2021 年中央一号文件特别强调了粮食安全保障作为国家安全战略的重要性^[17],当前河北省冬小麦的播种面积和单产水平保持稳定是必须的。综上,农业水文学的应用研究需要回答:在浅层地下水超采与优质冬小麦生产的矛盾相当突出的河北省太行山山前平原,能否在地下水采补平衡的同时做到冬小麦稳产?

2 既要压采浅层地下水又要做到冬小麦稳产的艰巨性

在考虑土壤质地、土地利用类型、气象要素、作物品种、播种和收获时段、灌溉制度的分区等空间信息的基础上,构建了能够模拟河北省太行山山前平原农田水文循环的分布式的土壤和水评估工具(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)模型^[23, 26]。针对 SWAT 模型原始版本不能直接模拟和输出地下水位的问题,Zhang 等^[23]、任理等^[26]在其地下水模块中增加了浅层含水层给水度等参数(量),并加入了山前侧向补给量这一水均衡项,使之能够更加合理地模拟该井灌区浅层地下水的水量和水位的“双变化”。在此基础上,利用收集整理的 16 口国家级监测井和 148 口区域调查井的浅层地下水埋深观测数据、“新一轮地下水资源评价”结果、遥感解译的蒸散量、冬小麦和夏玉米的产量统计数据等多源信息,对改进后的 SWAT 模型进行了多模块参数的率定与模型验证,为进一步运用该模型开展特定情景下的模拟计算奠定了扎实的基

础^[23, 26]。对冬小麦-夏玉米一年两熟制的现状灌溉情形下的模拟结果表明:若按照研究中概化的 1993—2012 年农民的灌溉习惯来井灌冬小麦(当冬小麦生育期的降水水平为平时灌溉 4 次,当冬小麦生育期的降水水平为枯水和特枯水时灌溉 5~6 次),从 2012 年开始,再有 80 年的时间,河北省太行山山前平原井灌区的浅层含水层将被疏干^[23, 26]。

河北省人民政府及其相关行政管理部门的有关政策文件^[5-8, 10-11, 15-18]和研究者们已开展的田间试验^[31-34]表明:实施冬小麦生育期的限水灌溉模式(减少冬小麦的灌水次数和灌溉定额)将是河北省太行山山前平原最主要的农业节水压采措施。为了权衡井灌开采量与冬小麦产量,基于模拟试验,Zhang 等^[24]、任理等^[26]设计了冬小麦生育期“春浇两水”(在拔节期和抽穗期分别灌水一次)、“春浇一水”(只在拔节期灌水一次)和“雨养”三种限水灌溉方案作为模拟情景进行定量研究。结果表明:在“春浇两水”和“春浇一水”的情景下,尽管该井灌区浅层地下水位的多年平均下降速度可分别减缓为现状情形下的 2/3 左右和 1/4 左右,但浅层地下水的超采情势在整体上仍难以得到控制(表 1)。在“雨养”情景下,该井灌区浅层地下水位实现了“止降回升”,但雨养方案使冬小麦的平均减产率超过了 50%(表 1)。针对上述两种限水灌溉情景下的浅层地下水位继续下降而一种限水灌溉情景下的浅层地下水位能够回升的模拟结果,进一步以浅层地下水的采补平衡为约束条件、以冬小麦单产的减产率最小为目标函数,获得了研究区内所涉及的各子流域和各县(市)域优化的限水灌溉模式。优化结果表明:若要实现浅层地下水的采补平衡,冬小麦最少也要减产约 42%(表 1),且在冬小麦生育期的降水水平为平

表 1 现状灌溉和限水灌溉及休耕模式下研究区内浅层地下水位动态与冬小麦产量变化

Table 1 The variations in shallow groundwater table and winter wheat yield under the current situation, the limited irrigation schemes, and the fallow scheme patterns

模拟情景	浅层地下水位变化速度/(m·a ⁻¹)	冬小麦减产率
现状种植制度与灌溉制度的情形	-1.10	0
冬小麦生育期“春浇两水”的限水灌溉方案的情形	-0.70	13%
冬小麦生育期“春浇一水”的限水灌溉方案的情形	-0.28	28%
冬小麦生育期“雨养”的限水灌溉方案的情形	0.22	54%
“以浅层地下水采补平衡为约束”优化的冬小麦生育期限水灌溉方案的情形	0.02	42%
“以冬小麦减产不超过30%为约束”优化的冬小麦生育期限水灌溉方案的情形	-0.26	30%
“以冬小麦减产不超过20%为约束”优化的冬小麦生育期限水灌溉方案的情形	-0.52	20%
“以浅层地下水采补平衡为约束”优化的冬小麦季隔年休耕模式的情形	0.01	55%

注:冬小麦减产率=[(现状种植与灌溉情形下的冬小麦单产-限水灌溉情形下或隔年休耕情形下的冬小麦单产)/现状种植与灌溉情形下的冬小麦单产]×100%。

水时大部分区域都需要实施雨养方案^[24, 26]。与此同时,还将“以水为约束”换为“以粮为约束”,在冬小麦单产特定减幅的约束条件下、以浅层地下水位下降速度最小为目标函数,再次进行优化后得到了应采用的限水灌溉模式。结果表明:若希望冬小麦减产幅度不超过 20%~30%,河北省太行山山前平原井灌所用浅层地下水每年仍超采 $3.7 \times 10^8 \sim 7.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[24, 26],浅层地下水位持续下降的情势将难以得到控制(表 1)。

季节性休耕或许会成为河北省太行山山前平原在对冬小麦实施限水灌溉之外又一种压采井灌量的潜在策略^[9, 12-14]。河北省目前开展的耕地季节性休耕试点(将冬小麦-夏玉米一年两熟制改为只种植一季雨热同期作物的一年一熟制)是在深层地下水严重超采的黑龙港地区。考虑到太行山山前平原是河北省冬小麦的优质高产区且井灌地下水主要来自于浅层含水层,在将连年休耕模式转变为隔年休耕(将现状的冬小麦-夏玉米一年两熟制变为休耕-夏玉米→冬小麦-夏玉米的两年三熟制)模式下,Zhang 等^[25]、任理等^[26]开展了情景模拟、评估与优化。结果表明:为实现浅层地下水的采补平衡,在隔年休耕的模式下,还需要在河北省太行山山前平原大约 90% 的井灌耕地上实施冬小麦非休耕季的“春浇两水”或“春浇一水”的限水灌溉方案,并在夏玉米生育期只采用“雨养”^[25-26]。这就意味着,优化的休耕模式需要在减少冬小麦种植年限(亦即:“减种”)的同时,还要减少灌水次数(亦即:“减灌”),才能达到浅层地下水位不再继续下降的压采效果。由于冬小麦每隔一年休耕一季的季节性休耕模式在冬小麦非休耕季还需要普遍实施限水灌溉,故其多年平均单产相较于冬小麦连年种植的现状灌溉情形将减少一半以上。优化的休耕模式显示,在浅层地下水采补平衡的约束下,河北省太行山山前平原冬小麦年均单产的最小减产率约为 55%(表 1)。

上述结果表明,无论是种植制度保持不变条件下实施冬小麦限水灌溉(亦即:“减灌不减种”),还是变一年两熟制为两年三熟制的隔年休耕方案(亦即:“减种又减灌”),若要在区域尺度上实现浅层地下水位止降回升这一压采目标,冬小麦要减产大约 42%(限水灌溉模式)或大约 55%(隔年休耕模式)。因此,若将实现浅层地下水的采补平衡作为该区域地下水资源承载力的刚性约束,仅利用浅层地下水进行井灌难以支撑现状情形下冬小麦的产量水平。换言之,河北省太行山山前平原浅层地下水采补平衡的代价是冬小麦至少减产 40% 以上。

3 一水用“浅层地下水”另一水用“南水北调水”基本可做到既采补平衡又稳产

面对国家下达的粮食播种面积和总产量的目标任务,统筹兼顾压采和稳粮,进一步探索“保产量和节水并举”的新路径对于当前河北省农业生产和农田水利工作具有重要意义。由表 1 可知,在冬小麦-夏玉米一年两熟制下实施“春浇两水”的限水灌溉方案,在模拟分析时段的 20 年内,冬小麦减产率在研究区的平均值约为 13%。相关的田间试验结果^[20, 31-34]表明:若再配合一些农艺措施,减产幅度还能得到进一步的降低,这意味着“春浇两水”的限水灌溉方案有望在河北省太行山山前平原实现冬小麦基本稳产或轻度减产。但是,该限水灌溉方案下的浅层地下水超采情势依然不容乐观,水位的平均下降速度大约为 0.7 m/a(表 1),浅层地下水堪忧的安全情势仍未得到扭转。值得注意的是,近年来南水北调工程已经开始向华北平原输水,为了探索河北省人民政府提出的“保产量与节水并举”的新路径,亦即兼顾“保冬小麦产量”与“压地下水开采”,在冬小麦减产幅度相对较小的“春浇两水”的限水灌溉方案的基础上,本文将进一步探讨:在冬小麦关键需水期内的两次灌溉中,除一次仍采用浅层地下水,另一次可否使用南水北调中线工程的引水置换一次浅层地下水?

若能够使用“南水北调水”置换一次井灌的地下水,则不妨将“一水用浅层地下水、另一水用南水北调工程的引水”称之为“修改的春浇两水”模式(以下统一简称为“修改的春浇两水”模式)。在此模式下,浅层地下水的动态在某种程度上近似于原来模拟的井灌冬小麦“春浇一水”的结果。换言之,研究区浅层地下水位平均下降速度可至少减缓为 0.28 m/a(亦即:浅层地下水位的下降速度可减缓为现状情形下的 1/4 左右),井灌超采量可削减 75% 左右,而在都使用浅层地下水作为灌溉水源的“春浇两水”的限水灌溉方案下,平均只能压减约 37% 的井灌超采量。总体来看,在河北省太行山山前平原,采用“修改的春浇两水”模式,在井灌的灌水定额设为 75 mm 的情景下,冬小麦平均减产约 13%,浅层地下水位的降速是现状下的大约 1/4。在 Zhang 等^[24]、任理等^[26]的基础上,又设计了灌水定额不同的井灌冬小麦的“春浇一水”方案,并进行了模拟与优化,结果显示:在保定地区主要实施灌水定额为 50 mm 的井灌一次的方案、在邢台和邯郸地区主要实施灌水定额为 40 mm 的井灌一次的方案、在石家庄

西南地区主要实施灌水定额为 30 mm 的井灌一次的方案, 如此, 可在研究区大约 70% 面积上实现浅层地下水的采补平衡。在冬小麦生育期“春浇两水”的模式下, 若两次灌溉均使用浅层地下水, 则在研究区 90% 左右的区域内, 浅层地下水位仍会以超过 0.5 m/a 的速度继续下降(图 2), 但是, 若一次灌溉仍采用浅层地下水且灌水定额依旧为 75 mm, 而另一次灌溉

使用南水北调中线工程的引水且灌水定额也为 75 mm, 则研究区 90% 左右的区域内的浅层地下水位下降速度可减缓为 0.5 m/a 以内, 但井灌时所采用的灌水定额仍难以实现大部分区域内浅层地下水位止降回升(图 2); 若进一步压减采用浅层地下水进行灌溉的这一水的灌水定额, 则研究区内大部分区域有望实现浅层地下水的采补平衡(图 2)。

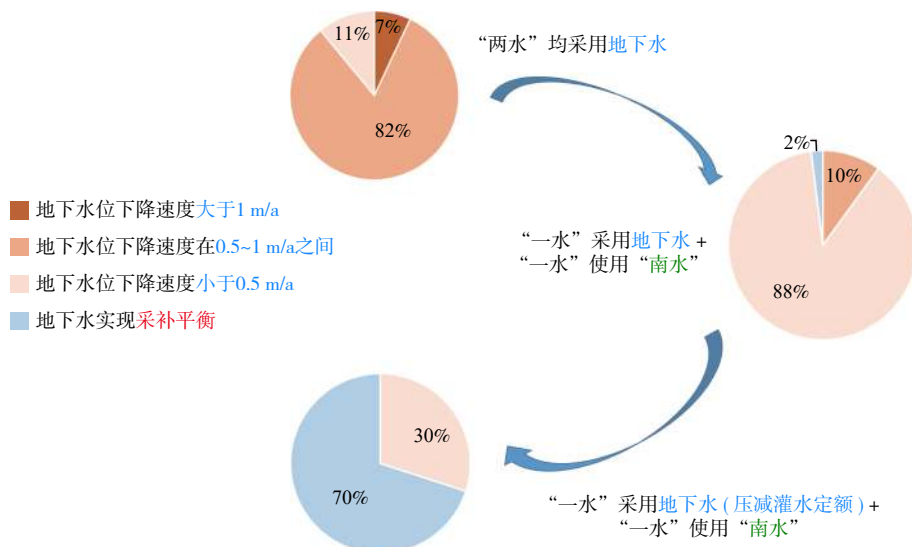


图 2 “春浇两水”和“修改的春浇两水”的限水灌溉情景下研究区内浅层地下水位不同下降速度的井灌耕地面积占井灌耕地总面积的比例
Fig. 2 The percentages of well-irrigated cropland area divided by the different declining degrees of the shallow groundwater table under the limited irrigation schemes with applying two rounds of irrigation for winter wheat

注: 图中的“两水”是指在冬小麦关键需水期进行的两次灌溉; “一水”是指在冬小麦关键需水期进行的一次灌溉; “南水”指南水北调中线工程的引水。

4 使用一次“南水北调水”的引水量及其财政补贴之匡算

上述分析表明, 在本文提出的“修改的春浇两水”模式下, 既可以基本维持冬小麦产量, 也有望实现浅层地下水采补平衡。然而, 这其中涉及到一个关键问题: 南水北调中线工程的引水是否可以提供河北省太行山山前平原灌溉冬小麦所需的水量呢? 根据对《河北水利统计年鉴》中的机电井灌溉面积^[35]的统计计算, 河北省太行山山前平原的井灌耕地面积约为 11 499 km²。在“修改的春浇两水”灌溉模式下, 假定使用南水北调中线引水工程进行灌溉的灌水定额仍为 75 mm, 则河北省太行山山前平原冬小麦的井灌区每年需要南水北调中线工程的引水提供灌溉用水量大约 8.6×10⁸ m³。据了解, 南水北调中线引水分配给河北省的年用水指标约为 30.4×10⁸ m³^[36], 若河北省每年引水中用于工业和生活的水量不到 20×10⁸ m³, 则每年至少还有大约 10×10⁸ m³ 的用水指标可以使用。此外, 南

水北调中线工程在 2018—2020 年每年向河北省的生态补水至少约 10×10⁸ m³^[36-37]。因此, 在河北省太行山山前平原冬麦区若使用南水北调中线工程的引水来置换 1 次井灌抽水, 从水量保障的角度上看似乎是可行的。

另一方面, 若能利用南水北调中线工程的引水对冬小麦灌溉 1 次, 灌水定额为 75 mm, 按照目前南水北调中线引水的用水价格至少 0.97 元/m³^[38] 计算, 对河北省太行山山前平原冬麦区灌溉 1 次所需的灌溉水费至少 8.37 亿元。考虑到南水北调中线工程引水的水价实行“两部制”^[39], 若河北省的引水只有 10×10⁸ m³, 河北省至少需要支付的水费约为 1.93 元/m³。因此, 若将河北省太行山山前平原冬麦区的井灌费用按照文献 [40] 报道的利用浅层地下水进行灌溉的水费约为 0.22 元/m³ 进行计算, 农民若采用南水北调中线的引水置换一次浅层含水层的抽水用于麦田灌溉, 至少分别需要多支付 0.75 元/m³ (按 0.97 元/m³ 计算) 和

1.71 元/m³(按 1.93 元/m³ 计算)。如此,在河北省太行山山前平原冬小麦生育期内采用本文所建议的“修改的春浇两水”的限水灌溉模式,由于将井灌水源置换为使用一次南水北调中线工程的引水而分别需要多花费 6.47 亿~14.75 亿元,这相当于农民在每公顷井灌耕地上要多花费 562.5~1282.5 元。基于河北省太行山山前平原浅层地下水超采情势的严峻性和治理的迫切性,当使用南水北调中线工程的引水部分置换浅层含水层的抽水用于冬小麦的灌溉时,将使用引水进行灌溉与采用地下水进行灌溉的水费之差额,由政府财政补贴给河北省太行山山前平原的种麦农民,对于贯彻落实口粮安全立足国内且维护农民种麦的积极性是十分重要的。

5 结语

地下水超采治理与稳定粮食生产对于河北省推进高质量发展都是极为重要的政府管理目标。在采补平衡作为河北省太行山山前平原浅层地下水资源承载力的刚性约束下,无论是实施限水灌溉方案还是实行季节性休耕模式,在区域尺度上都难以做到冬小麦稳产。

为了降低冬小麦的减产幅度且减小浅层地下水位下降速度,若能够使用南水北调中线引水工程的地表水部分置换浅层地下水用于冬小麦的灌溉,即采用“一水仍用浅层地下水而另一水使用南水北调水”的“修改的春浇两水”的冬小麦生育期限水灌溉模式,可以在这一典型的浅层地下水超采区 70% 的面积上实现采补平衡(亦即浅层地下水位基本稳定),且冬小麦也有望基本稳产。

当然,就本文提出的“修改的春浇两水”模式在该区域的推广而言,目前只是粗略地考虑引水指标及其相应的财政补贴。今后,可以进一步细化利用南水北调中线引水配额中除工业、生活用水以外的盈余指标和生态补水指标用于研究区内的冬小麦灌溉,并进一步细化从供水价格的角度给予种麦农民一定的补贴额度。如何做到既实现该区域浅层地下水采补平衡的压采治理目标又不损害农民的种粮利益是值得今后深入研究的。总之,本文的探讨对河北省太行山山前平原的浅层地下水超采治理工作具有一定的参考意义。

致谢:感谢中国地质环境监测院提供位于河北省太行山山前平原的国家级地下水监测井的地下水位监测数据和地下水统测井的地下水位调查数据;感谢

河北省水利科学研究院郭永晨教授级高级工程师及河北省水文水资源勘测局陈胜锁教授级高级工程师提供河北水利统计年鉴中的相关数据;感谢水利部南水北调规划设计管理局法规处处长姚建文教授级高级工程师就有关南水北调中线工程的引水量与用水价格问题所给予的指教;感谢河北省水利科学研究院水资源水环境与河长制研究所所长潘增辉教授级高级工程师就有关南水北调中线工程引水的两部制水价问题所给予的指教;感谢河北省农业农村厅前总农艺师、前副厅长、一级巡视员段玲玲就河北省冬小麦生产现状所给予的指教;感谢中国农业大学资源与环境学院博士后李佩对相关数据的核算。

参考文献 (References) :

- [1] 中国地质调查局. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2009. [China Geological Survey. Investigation and assessment of groundwater sustainable utilization in the North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [2] FENG W, ZHONG M, LEMOINE J M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2110–2118.
- [3] HUANG Z Y, PAN Y, GONG H L, et al. Subregional-scale groundwater depletion detected by GRACE for both shallow and deep aquifers in North China Plain[J]. *Geophysical research letters*, 2015, 42(6): 1791–1799.
- [4] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源(河北卷)[M]. 北京:中国地图出版社, 2005. [ZHANG Zonghu, LI Lierong. Groundwater resources of China-Hebei volume[M]. Beijing: Sinomaps Press, 2005. (in Chinese)]
- [5] 中国共产党中央委员会办公厅, 国务院. 关于全面深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见[EB/OL]. 2014(2014-01-20). [General Office of the CPC Central Committee, the State Council of the People's Republic of China. No. 1 central document: Opinions on deepening rural reforms and accelerating agricultural modernization[EB/OL]. 2014(2014-01-20). (in Chinese)] http://www.moa.gov.cn/ztl/yhwj2014/zywj/201401/t20140120_3742567.htm.
- [6] 河北省人民政府. 河北省人民政府关于公布平原区地下水超采区、禁采区和限采区范围的通知[EB/OL]. 2014(2014-06-12). [The General Office of the Hebei People's Government. The notification of groundwater overexploited, pumping-limited, and pumping-prohibited

- areas in the plain region of Hebei Province[EB/OL]. 2014(2014-06-12). (in Chinese)] <http://info.hebei.gov.cn/eportal/ui?pageId=1962757&articleKey=6272943&columnId=329982>.
- [7] 中国共产党中央委员会办公厅. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议[EB/OL]. 2015(2015-11-03). [General Office of the CPC Central Committee. CPC Central committee recommendations for the 13th Five-Year plan for economic and social development[EB/OL]. 2015(2015-11-03). (in Chinese)] http://www.gov.cn/xinwen/2015-11/03/content_5004093.htm.
- [8] 于丽丽, 李云玲, 郭东阳. 河北省地下水超采综合治理规划[C]//水利水电工程勘测设计新技术应用. 北京: 中国水利水电勘测设计协会, 2018: 6. [YU Lili, LI Yunling, GUO Dongyang. The plan of comprehensive treatment on groundwater overexploitation in Hebei Province[C]//Application of new technology in survey and design of water resources and hydropower engineering. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Investigation and Design Association, 2018: 6. (in Chinese)]
- [9] 中华人民共和国农业部, 中央农村工作领导小组, 国家发展和改革委员会, 等. 关于印发探索实行耕地轮作休耕制度试点方案的通知[EB/OL]. 2016(2016-06-29). [The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, the Leading Group for Rural Affairs of the CPC Central Committee, the National Development and Reform Commission, et al. The notification of implementing the pilot project of crop rotation and fallow system[EB/OL]. 2016(2016-06-29). in Chinese)] http://www.moa.gov.cn/nybgb/2016/diqiqi/201711/t20171128_5921712.htm.
- [10] 河北省水利厅. 河北省地下水超采综合治理试点方案(2016年度)[R]. 2016. [The Department of Water Resources of Hebei Province. Pilot project of comprehensive treatment on groundwater over-exploitation in Hebei Province in 2016[R]. 2016. (in Chinese)]
- [11] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发全国国土规划纲要(2016—2030年)的通知[EB/OL]. 2017(2017-02-04). [The State Council of the People's Republic of China. The State Council's notice on of national land planning outline (2016—2030)[EB/OL]. 2017(2017-02-04). (in Chinese)] http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/04/content_5165309.htm.
- [12] 河北省农业厅, 河北省财政厅, 河北省委省政府农村工作办公室. 关于印发《河北省2017年度耕地季节性休耕制度试点实施方案》的通知[Z]. 2017. [The Department of Agriculture of Hebei Province, the Department of Finance of Hebei Province, the Rural Affairs Office of Hebei Provincial Party Committee and Government. The notification of the implementation plan of pilot project of the seasonal fallow system in Hebei Province in 2017[Z]. 2017. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国农业部. 农业部就耕地轮作休耕制度试点情况举行发布会[EB/OL]. 2018(2018-02-23). [The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The conference of the pilot project of crop rotation and fallow system[EB/OL]. 2018(2018-02-23). (in Chinese)] http://www.moa.gov.cn/hd/zbft_news/jsgd/lxqk/.
- [14] 河北省农业厅, 河北省财政厅, 河北省委省政府农村工作办公室. 关于印发《河北省2018年度耕地季节性休耕制度试点实施方案》的通知[EB/OL]. 2018(2018-09-25). [The Department of Agriculture of Hebei Province, the Department of Finance of Hebei Province, the Rural Affairs Office of Hebei Provincial Party Committee and Government. The notification of the implementation plan of pilot project of the seasonal fallow system in Hebei Province in 2018[EB/OL]. 2018(2018-09-25). (in Chinese)] <http://nync.hebei.gov.cn/article/tzgg/201809/2018-09-25>.
- [15] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国财政部, 国家发展和改革委员会, 等. 华北地区地下水超采综合治理行动方案[EB/OL]. 2019(2019-03-13). [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, The Ministry of Finance of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, et al. The notification of comprehensive treatment on groundwater overexploitation in the North China Plain[EB/OL]. 2019(2019-03-13). (in Chinese)] http://szy.mwr.gov.cn/zcfg/fg/202008/t20200819_1433310.html.
- [16] 河北出台关于地下水超采综合治理实施意见[N/OL]. 河北日报, 2019-04-18. [Hebei Province has released guidelines on the comprehensive treatment of groundwater overexploitation[N/OL]. The Hebei Daily, 2019-04-18. . (in Chinese)] <http://www.heb.chinanews.com.cn/hbzy/20190418394479.shtm>.
- [17] 中国共产党中央委员会办公厅, 国务院. 关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见[EB/OL]. 2021(2021-02-24). [General Office of the CPC Central Committee, the State Council of the People's Republic of China. No. 1 central document: Opinions on comprehensively pushing forward rural vitalization and

- accelerating the modernization of agriculture and rural areas[EB/OL]. 2021(2021-02-24). (in Chinese)] http://www.moa.gov.cn/ztzl/yhwj2014/zywj/201401/t20140120_3742567.htm.
- [18] 许勤主持召开河北省推进华北地下水超采综合治理行动领导小组会议[N/OL]. 河北日报, 2021-04-12. [A leading group meeting to promote the comprehensive treatment on groundwater overexploitation in the North China Plain was held in Hebei Province [N/OL]. The Hebei Daily, 2021-04-12. (in Chinese)] <http://www.heb.chinanews.com.cn/hbzy/20190418394479.shtml>.
- [19] “新一轮全国地下水资源评价”项目办公室. “新一轮全国地下水资源评价”附表[R]. 2004. [National Groundwater Resources Assessment Project Office. Attached tables of national groundwater resources assessment[R]. 2004. (in Chinese)]
- [20] 王慧军. 河北省种植业高效用水技术路线图[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. [WANG Huijun. The technology roadmap of high-efficiency water use for crop production in Hebei Province[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2011. (in Chinese)]
- [21] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999. [CHEN Wanghe. Groundwater in Hebei Province[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)]
- [22] 张兆吉, 费宇红. 华北平原地下水可持续利用图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2009. [ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong. Atlas of groundwater sustainable utilization in North China Plain[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2009. (in Chinese)]
- [23] ZHANG X L, REN L, KONG X B. Estimating spatiotemporal variability and sustainability of shallow groundwater in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using SWAT model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 1221 – 1240.
- [24] ZHANG X L, REN L, WAN L. Assessing the trade-off between shallow groundwater conservation and crop production under limited exploitation in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using the SWAT model[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 253 – 266.
- [25] ZHANG X L, REN L. Simulating and assessing the effects of seasonal fallow schemes on the water-food-energy nexus in a shallow groundwater-fed plain of the Haihe River basin of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 125992.
- [26] 任理, 张雪靓. 海河流域井灌区在现状和限水灌溉及休耕模式下浅层地下水动态与粮食产量变化的模拟研究—以河北省太行山前平原为例[M]. 北京: 科学出版社, 2020. [REN Li, ZHANG Xueliang. Simulation of the variations in shallow groundwater and crop yield under the current situation, limited irrigation schemes, and fallow scheme patterns in the well-irrigated region of the Haihe River basin – a case study of the piedmont plain of Mount Taihang in Hebei Province[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)]
- [27] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993. [Collaborative Group for Water Demand Contour Map of Major Crop in China. Contour map of major crop water demand in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)]
- [28] 郑连生. 广义水资源与适水发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. [ZHENG Liansheng. Generalized water resources and the development of suitable water[M]. Beijing: Water Resources and Electricity Press, 2009. (in Chinese)]
- [29] 李月华, 杨利华. 河北省冬小麦高产节水节肥栽培技术(简明图表读本)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. [LI Yuehua, YANG Lihua. Winter wheat cultivation techniques of realizing high yielding, water saving and fertilizer saving in Hebei Province[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2017. (in Chinese)]
- [30] 王慧军. 河北省粮食综合生产能力研究[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2010. [WANG Huijun. Research of comprehensive grain production capability in Hebei Province[M]. Shijiazhuang: Science and Technology Press of Hebei Province, 2010. (in Chinese)]
- [31] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454 – 1464. [ZHANG Xiying. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454 – 1464. (in Chinese with English abstract)]
- [32] ZHANG X Y, QIN W L, CHEN S Y, et al. Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades: A case study in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 47 – 54.
- [33] ZHANG X Y, PEI D, HU C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 2003, 21(4): 159 – 166.
- [34] 刘晓敏, 张喜英, 王慧军. 太行山前平原区小麦玉米农艺节水技术集成模式综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 421 – 428. [LIU Xiaomin, ZHANG Xiying, WANG Huijun. A comprehensive evaluation of

- wheat/maize agronomic water-saving modes in the piedmont plain region of the Mount Taihang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 421 – 428. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 河北省水利厅. 河北水利统计年鉴[R]. 1990–2012. [Hebei Provincial Department of Water Resources. Hebei water statistical yearbook[R]. 1990 –2012. (in Chinese)]
- [36] 我省中线引江水量逾60亿立方米[N/OL]. 河北日报, 2020-01-10. [The amount of water diverted from the middle route of South-to-North Water Diversion project in Hebei Province exceeded $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ [N/OL]. The Hebei Daily, 2020-01-10. (in Chinese)] http://yzdsb.hebnews.cn/pc/paper/c/202001/10/content_23093.html.
- [37] 南水北调为河北省经济社会可持续发展提供可靠水资源保障[N/OL]. 河北日报, 2020-12-12. [The South-to-North Water Diversion project provides reliable water resources for the sustainable development in Hebei Province [N/OL]. The Hebei Daily, 2020-12-12. (in Chinese)] http://m.hebnews.cn/hebei/2020-12/12/content_8255174_2.htm.
- [38] 国家发展和改革委员会. 关于南水北调中线一期主体工程运行初期供水价格政策的通知(发改价格[2014]2959号)[EB/OL]. 2014(2014-12-26). [National Development and Reform Commission. The notification of water price policy at the initial stage of the main project of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project[EB/OL]. 2014(2014-12-26). (in Chinese)] http://www.nsbddx.com/single_detail/299.html.
- [39] “南水”实行两部制水价[N/OL]. 经济日报, 2015-01-07. [The two-part water tariff of South-to-North Water Diversion Project[N/OL]. The Economic Daily, 2015-01-07. (in Chinese)] http://paper.ce.cn/jjrb/html/2015-01/07/content_227847.htm.
- [40] FANG Q, ZHANG X Y, SHAO L W, et al. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 196: 133 – 143.

编辑: 张若琳