

对既保冬小麦产量又防承压水耗竭的灌溉策略之探讨

李佩, 任理

A study of the irrigation strategy to maintain winter wheat production and prevent confined groundwater depletion

LI Pei and REN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

既地下水采补平衡又冬小麦稳产的探讨

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

张雪靓, 任理 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 190-198

滦河三角洲地区深层地下水化学演化规律及成因分析

Characteristics and causes of hydrochemical evolution of deep groundwater in the Luanhe Delta

牛兆轩, 蒋小伟, 胡云壮 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 27-27

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

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

黑河中游不同灌溉方式下地下水入渗补给特征研究

A study of groundwater recharge under different irrigation conditions in the middle reaches of the Heihe River

崔虎群, 李文鹏, 康卫东, 刘振英, 尹德超, 吴玺, 安永会, 耿红杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 22-28

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204027

李佩, 任理. 对既保冬小麦产量又防承压水耗竭的灌溉策略之探讨[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 207-214.
LI Pei, REN Li. A study of the irrigation strategy to maintain winter wheat production and prevent confined groundwater depletion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 207-214.

对既保冬小麦产量又防承压水耗竭的 灌溉策略之探讨

李佩¹, 任理²

(1. 长安大学水利与环境学院环境工程系, 陕西 西安 710054;
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: 我国深层地下水超采最严重的区域当属华北平原的河北省黑龙港地区, 该区域的深层承压含水层面临枯竭的安全风险。然而, 黑龙港地区作为我国优质冬小麦的重要产区 and 河北省冬小麦的主产区, 肩负着河北省确保冬小麦这一重要口粮稳产的责任。因此, 冬小麦生育期的灌溉策略必须在区域尺度上兼顾深层地下水的禁采和冬小麦产量的稳定, 这也是当前黑龙港地区这个“华北平原地下水超采综合治理行动方案”重点实施区域的有关部门所亟需的。本文基于分布式农业水文模型的模拟研究及进一步的估算, 表明: 就黑龙港地区整体而言, 在现状灌溉情形下冬小麦生育期多年平均所用的深层地下水开采量和其他用途的深层地下水开采量分别约为 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $12.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。考虑到该区域生活和工业所用的深层地下水开采量目前大多已被南水北调中线工程的引水所置换, 我们建议: 进一步增加“南水北调东线一期工程北延应急供水工程”和“引黄入冀补淀工程”置换黑龙港地区冬小麦井灌所用深层地下水的量, 以满足外调引水 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 用于冬小麦生育期进行渠灌的需求, 如此才能既确保该地区冬小麦稳产又遏制深层地下水的超采态势。若外调引水量只可以分别满足在冬小麦生育期灌水3次、2次和1次的灌溉定额, 则每年在冬小麦生育期所需的外调引水量分别约为 $8.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。然而, 与现状灌溉情形相比, 冬小麦总产将分别减少约8%、34%和56%。总之, 本研究可为相关部门就兼顾禁采深层地下水与稳定冬小麦产量而规划外调引水方案提供一定的参考。

关键词: 深层地下水; 禁采; 冬小麦; 稳产; 引水工程; 渠灌

中图分类号: S512.11; S274

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0207-08

A study of the irrigation strategy to maintain winter wheat production and prevent confined groundwater depletion

LI Pei¹, REN Li²

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The most serious area with groundwater over-exploitation of deep aquifers in China is the Heilonggang region of Hebei Province in the North China Plain (NCP), where deep confined aquifers are facing the risk of depletion. However, as an important producer of high-quality winter wheat in China and the main producer in Hebei Province, this region shoulders the important responsibility of ensuring edible grain security in Hebei

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-06-08

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002252); 国家公益性行业(农业)科研专项/农业部行业计划项目(201303133)

第一作者: 李佩(1991-), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水土资源与环境管理的模拟研究。E-mail: lipei2022@chd.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

Province. Thus, banning deep groundwater exploitation and stabilizing winter wheat yield must be taken into account at the regional scale when proposing irrigation strategy for winter wheat. This is urgently needed by the relevant departments in this key implementation area of the comprehensive treatment action plan for groundwater over-exploitation in the NCP. Simulation using the distributed agro-hydrological model and further estimation show that the average amounts of deep groundwater exploitation for winter wheat irrigation under the current irrigation schedule and for other purposes are approximately $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $12.47 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively, in the whole region. Considering that deep groundwater exploitation for domestic and industrial use has been mostly replaced by water diversion from the middle route of the South-to-North Water Diversion (SNWD) project in this region, we propose to further increase the water supplies from the northern extension emergency project of the eastward route of SNWD and from the Yellow River to the Baiyangdian Lake of Hebei Province diversion project to replace the deep groundwater used for winter wheat well irrigation. If the water supplies from these external water diversion projects can meet the demand of $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ for winter wheat canal irrigation, not only can stable winter wheat production be ensured, but deep groundwater over-exploitation can also be curbed. Water amounts of approximately $8.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, $5.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ from external water diversion projects are required to only meet the demand for irrigation three times, twice and once, respectively, during the winter wheat season, while the total winter wheat yield will be reduced by approximately 8%, 34% and 56%, respectively, compared with the current irrigation schedule. In summary, this study can provide a reference for the relevant departments to plan external water diversion schemes considering the banning of deep groundwater exploitation and the stabilization of winter wheat production.

Keywords: deep groundwater; banning exploitation; winter wheat; stabilizing yield; water diversion project; canal irrigation

1 问题的提出

位于京津以南的河北省黑龙港地区总面积约为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 包含 53 个县(市), 是华北平原中地表水资源匮乏且浅层又广泛分布微咸水或咸水的区域^[1-3], 但同时又是河北省优质冬小麦的重要产区^[4-6]。由于该区域冬小麦的灌溉不得不在一定程度上依赖于开采深层地下水^[7-11], 因而导致了在区域尺度上深层地下水的水位(头)持续下降, 再与该区域生活供水与工业生产用水对深层地下水的超采相叠加, 便形成了在我国甚至全球都具有典型性的深层地下水(头)漏斗区^[12]。2019 年 1 月, 水利部、财政部、国家发展改革委和农业农村部颁布了《华北地区地下水超采综合治理行动方案》, 黑龙港地区作为华北平原深层地下水的严重超采区, 被列为这一方案中最重要的区域^[13]。然而, 黑龙港地区作为河北省冬小麦的主产区之一, 所承担的口粮生产任务又不容许该区域以牺牲冬小麦的产量来换取深层地下水的压采(禁采或限采), 换言之, 尽管黑龙港地区压采冬小麦井灌所用深层地下水既十分重要又刻不容缓, 但维持该地区的冬小麦产能(这里特指冬小麦的播种面积与单产水平)同样重

要甚至更加重要! 显然, 解决的途径只可能是采用外调地表水置换深层地下水用于现状情形下的冬小麦灌溉, 如此才能既确保冬小麦稳产又禁采深层地下水。于是, 就产生了如下亟待探讨的科学问题: 在现状灌溉情形下的冬小麦生育期, 井灌所用深层地下水被禁采的前提下, 确保冬小麦稳产所需的外调引水量是多少? 进一步地, 若外调引水量目前不能满足现状灌溉而只能满足冬小麦生育期的限水灌溉, 冬小麦的产量又会有怎样的变化? 定量探讨这两个问题有助于为河北省黑龙港地区更好地贯彻国家水安全、粮食安全与可持续发展的战略目标提供一定的科学支撑。

2 确保冬小麦产量稳定所需的外调引水量

多年来, 我们针对黑龙港地区, 就冬小麦-夏玉米一年两熟制, 在冬小麦的现状灌溉情形和限水灌溉情景下开展了细致的农业水文模拟研究^[10-11, 14]。运用基于多源与多尺度数据进行参数率定与模型验证后的 SWAP-WOFOST(Soil Water Atmosphere Plant-WORLD FOod STudy)模型, 针对现状灌溉情形, 获得了黑龙港地区 53 个县(市)冬小麦单产的模拟结果及冬小麦井

灌所用深层地下水开采量的估算结果^[11,14]。由此可知:在县(市)域尺度上,若将现状灌溉情形中冬小麦井灌所用深层地下水的开采量替换成外调地表水对冬小麦渠灌的引用量,则此“以渠水换井水”的方案既可满足“保冬小麦产量”这个口粮安全的“刚性约束”,又可实现“防承压水耗竭”这个生态安全的“底线目标”。

在现状灌溉情形下,对黑龙港地区各县(市)在模拟时段(1993—2012年)内多年平均的冬小麦生育期灌溉所用的深层地下水开采量的估算结果见图1。估算步骤如下:

(1)基于农民对冬小麦的灌溉习惯而概化的现状灌溉制度^[11,14]可知县(市)在冬小麦生育期不同的降水频率(亦即特定的降水水平)下的灌溉定额,进而可计算模拟时段内多年平均的冬小麦生育期的灌溉定额(mm)。

(2)将计算的灌溉定额乘以可以收集到的县(市)在1994—2012年平均的冬小麦播种面积(hm²)^[15],即可得到模拟时段内多年平均的冬小麦生育期的灌溉量(10⁴m³)。

(3)将此灌溉量乘以县(市)农业灌溉用水量中深层地下水所占比例,即可得到模拟时段内多年平均的冬小麦生育期灌溉所用的深层地下水开采量

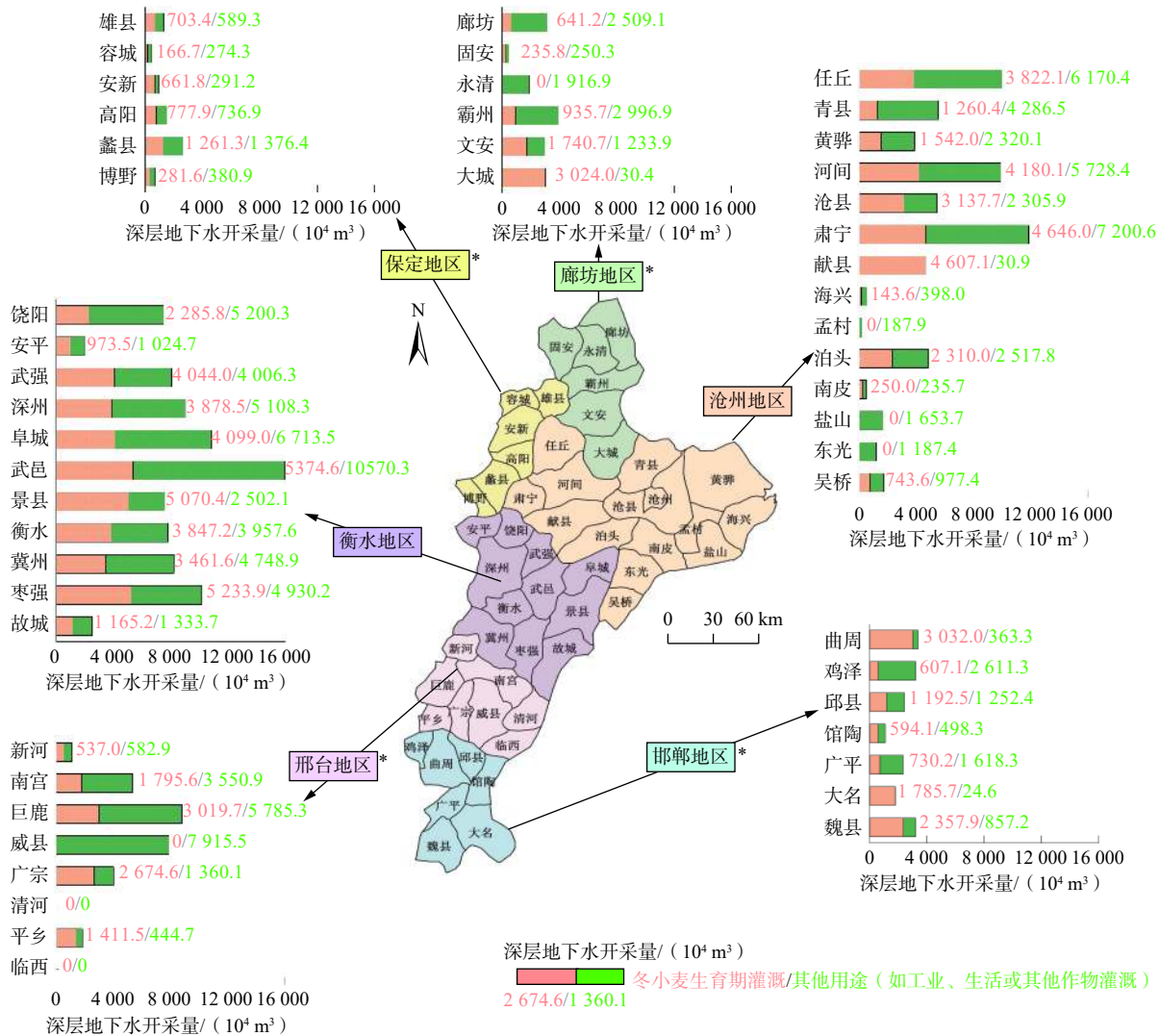


图1 现状灌溉情形下黑龙港地区各县(市)在模拟时段内多年平均的冬小麦生育期灌溉所用的深层地下水开采量和其他用途的深层地下水开采量

Fig. 1 Average exploitation amount of deep groundwater for winter wheat irrigation during the simulation period under the current irrigation schedule and the exploitation amount of deep groundwater for other purposes in each county of the Heilonggang region

注:①在本文计算过程所用的冬小麦播种面积的统计数据中,沧州的有关数据是与沧县归并在一起的,故不得不将沧州和沧县合并为一个县(市)进行统计。

②*表示的这些地区为各自包含在黑龙港地区内的区域。

(10^4 m^3), 此比例的概化过程详见文献 [11]。

各县(市)的深层地下水开采量引自“新一轮全国地下水资源评价”附表^[16], 其他用途(如工业、生活或其他作物灌溉)的深层地下水开采量为收集的深层地下水开采量^[16]与估算的模拟时段内多年平均的冬小麦生育期灌溉所用的深层地下水开采量之差。

由图 1 可见: 在黑龙港地区这个华北平原典型的深层地下水严重超采区, 各县(市)深层地下水的开采量存在较大差异, 对其中的衡水地区和沧州地区而言, 在冬小麦生育期的井灌是深层地下水在区域尺度上呈现超采情势的重要原因。图 1 间接地反映出在各县(市)冬小麦生育期的井灌对深层地下水超采态势的贡献程度, 可为确保冬小麦稳产而规划所需的地表水外调引水量和引水工程的空间配置提供定量化的参考, 这对于该地区深层地下水的超采治理具有一定的实际意义。

黑龙港地区多年平均的冬小麦生育期在现状灌溉情形下所用的深层地下水开采量和其他用途的深层地下水开采量分别约为 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $12.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。这意味着: 若每年能有 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的外调地表水作为该地区冬小麦生育期灌溉用水来替换所用深层地下水, 则可实现该区域深层地下水禁采和冬小麦稳产这一兼顾水安全和口粮安全的双目标。

表 1 估算的黑龙港地区范围内在模拟时段多年平均的深层地下水开采量

Table 1 Estimated average exploitation amount of deep groundwater during the simulation period in the Heilonggang region

区域	模拟时段内多年平均的冬小麦生育期在现状灌溉情形下所用的深层地下水开采量/ (10^4 m^3)	其他用途的深层地下水开采量/ (10^4 m^3)	深层地下水开采量/ (10^6 m^3)
廊坊地区*	6 577	8 937	15 514
保定地区*	3 852	3 649	7 501
沧州地区	26 643	35 201	61 844
衡水地区	39 434	50 096	89 530
邢台地区*	9 438	19 639	29 077
邯郸地区*	10 300	7 225	17 525
黑龙港地区	96 244	124 747	220 991

注: *表示的这些地区为各自包含在黑龙港地区内的区域。

据悉, 目前在黑龙港地区生活和工业所用的深层地下水开采量大多已被“南水北调中线工程”的引水所置换。因此, 若国家相关部门在对黑龙港地区冬小麦稳产的要求下能再进一步增加“南水北调东线一期

工程北延应急供水工程”(刚刚于 2021 年正式通水)和“引黄入冀补淀工程”(已经于 2018 年正式通水)的引水量来置换农业所用深层地下水量, 使得满足外调引水 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 用于黑龙港地区的冬小麦灌溉, 则既可实现这个优质冬小麦重要产区保面积稳产量这一党政同责的管理目标, 又可遏制承压含水层面临枯竭这一岌岌可危的水安全情势的发展。

3 允许冬小麦特定减产幅度所需的外调引水量

黑龙港地区各县(市)在实施冬小麦生育期井灌所用深层地下水禁采的前提下, 若置换冬小麦灌溉所用深层地下水量的外调地表水量不同时, 则所导致的冬小麦产量的减幅也不同。图 2 展示了黑龙港地区各县(市)外调引水量仅能满足冬小麦生育期的不同限水灌溉方案时, 冬小麦的减产幅度是多少, 这将为黑龙港地区贯彻“华北地区地下水超采综合治理行动方案”而实施深层地下水禁采, 引用外调地表水渠灌冬小麦时因地制宜地考量“以水定产”提供定量参考。

由表 2 可见: 黑龙港地区范围内多年平均的冬小麦生育期在限水 3 次、限水 2 次和限水 1 次的灌溉中所用的深层地下水开采量分别约为 $8.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这意味着: 若每年分别有 $8.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的外调地表水可替换黑龙港地区冬小麦生育期灌溉所用的深层地下水, 则可实现该地区冬小麦限水灌溉中不再开采深层地下水, 因为这种禁采是落实“华北平原地下水超采综合治理行动方案”的刚性要求。然而, 尽管这有助于黑龙港地区因地制宜地实现“以水定产”从而避免承压含水层的枯竭, 但同时会造成该地区多年平均的冬小麦单产量分别减少约 445 kg/hm^2 、 $1 647 \text{ kg/hm}^2$ 和 $2 670 \text{ kg/hm}^2$, 减幅分别约为 9%、35% 和 57%, 总产量分别减少约 $4.53 \times 10^8 \text{ kg}$ 、 $18.69 \times 10^8 \text{ kg}$ 和 $30.59 \times 10^8 \text{ kg}$, 减幅分别约为 8%、34% 和 56%(表 3)。

本文基于已有的研究^[10-11, 14]而计算的结果是根据现状灌溉情形和限水灌溉情景中冬小麦产量的模拟数据及冬小麦井灌所用深层地下水开采量的估算数据得到的。这里特别需要说明的是, 我们在黑龙港地区所开展的区域尺度农业水文模拟研究的时段为 1993—2012 年, 而“南水北调东线工程”和“南水北调中线工程”及“引黄入冀补淀工程”的通水时间分别是

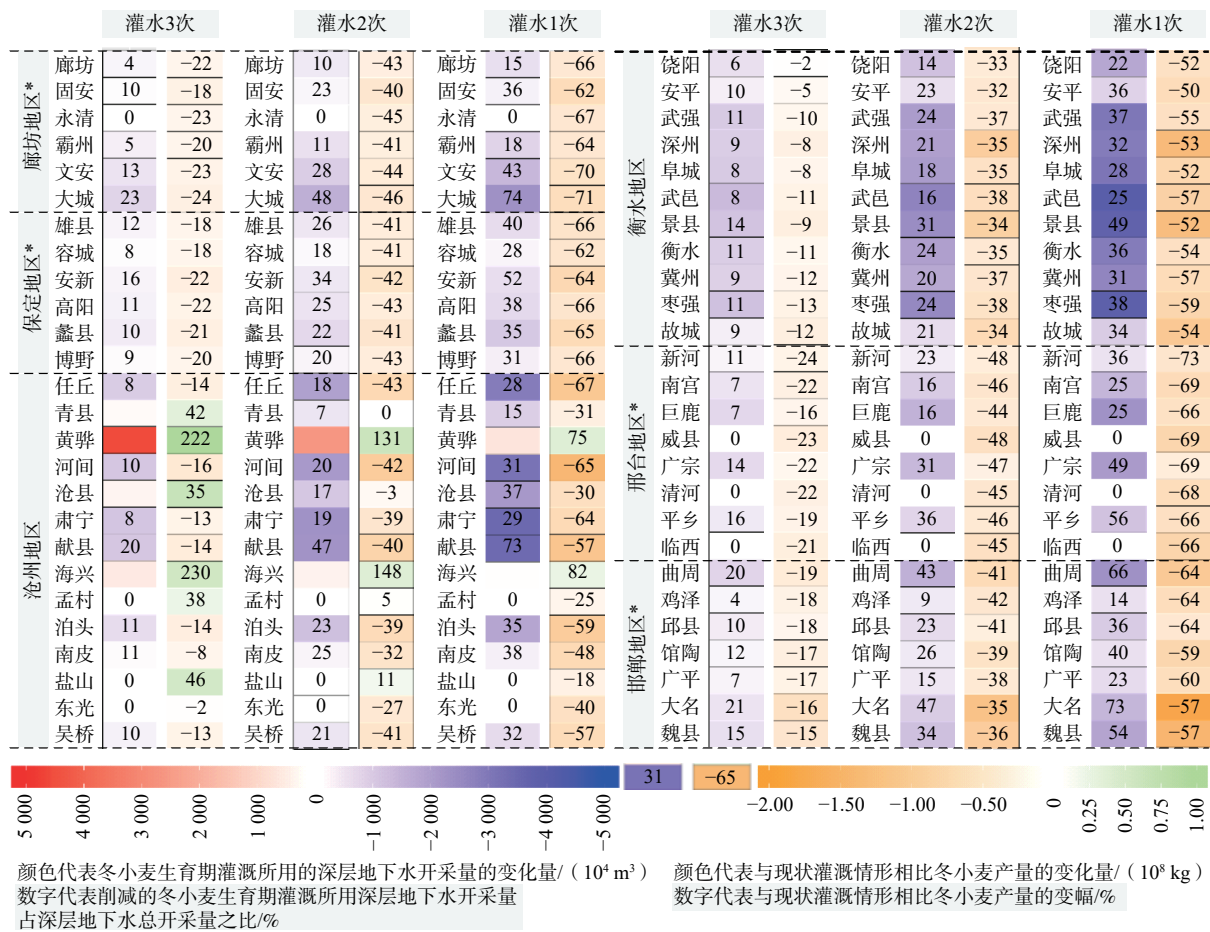


图 2 不同的限水灌溉情景与现状灌溉情形相比黑龙港地区各县(市)在模拟时段内多年平均冬小麦产量的变化量及变幅和冬小麦生育期灌溉所用深层地下水开采量的变化量及其削减量占深层地下水总开采量之比

Fig. 2 Average variation in winter wheat yield under different limited irrigation scenarios compared with the current irrigation schedule during the simulation period and the variation in deep groundwater exploitation for winter wheat irrigation and the proportion of the deep groundwater exploitation reduction to the total deep groundwater exploitation in each county of the Heilonggang region

注: ①在某些县(市)未显示削减的冬小麦生育期灌溉所用深层地下水开采量与深层地下水总开采量之比, 这是由于这些县(市)域的现状灌溉条件较差, 现状灌溉情形下已经是限水灌溉或雨养, 开展农业水文模拟时设定的限水灌溉情景与现状灌溉情形相比冬小麦生育期灌溉所用的深层地下水开采量的变化量为正(亦即增加了深层地下水的开采量)。②*表示的这些地区为各自包含在黑龙港地区内的区域。

表 2 估算的黑龙港地区范围内模拟时段冬小麦生育期在限水灌溉情景下多年平均的井灌所用深层地下水开采量

Table 2 Estimated average deep groundwater exploitation for winter wheat irrigation under the limited irrigation scenarios during the simulation period in the Heilonggang region

区域	模拟时段内多年平均的冬小麦生育期限水灌溉3次所用的深层地下水开采量/(10 ⁴ m ³)	模拟时段内多年平均的冬小麦生育期限水灌溉2次所用的深层地下水开采量/(10 ⁴ m ³)	模拟时段内多年平均的冬小麦生育期限水灌溉1次所用的深层地下水开采量/(10 ⁴ m ³)
廊坊地区*	5 123	3 415	1 708
保定地区*	3 040	2 027	1 013
沧州地区	27 382	18 255	9 127
衡水地区	31 015	20 677	10 338
邢台地区*	7 453	4 968	2 484
邯郸地区*	8 105	5 403	2 702
黑龙港地区	82 118	54 745	27 372

注: *表示的这些地区为各自包含在黑龙港地区内的区域。

2013 年和 2014 年及 2018 年。因此, 在上述计算中并未考虑这些外调引水工程的通水对该区域的影响。

值得注意的是, 南水北调东线一期工程北延应急供水工程于 2022 年 3 月 25 日启动, 入河北省水量 1.45×10⁸ m³[17], 引黄入冀补淀工程于 2017 年 11 月 16 日试通水, 向河北省农业灌溉供水 3.65×10⁸ m³[18]。若这 2 部分引水量均能用于黑龙港地区冬小麦生育期的灌溉, 则每年或许有大约 5.10×10⁸ m³ 的地表水可供灌溉。黑龙港地区在禁采井灌所用深层地下水的前提下, 现状灌溉、限水灌溉 3 次和限水灌溉 2 次情景下所需的外调水量与上述 5.10×10⁸ m³ 的地表引水量相比, 其缺口分别约为 4.52×10⁸ m³、3.11×10⁸ m³ 和 0.37×10⁸ m³。若实施限水灌溉 1 次, 则所需的外调水量与

表 3 估算的黑龙港地区范围内模拟时段冬小麦生育期在限水灌溉情景下多年平均的冬小麦产量及其与现状灌溉情形相比的变幅
Table 3 Estimated average winter wheat yield and the variation under the limited irrigation scenarios during the simulation period compared with the current irrigation schedule in the Heilonggang region

限水灌溉情景	区域	单产量			总产量		
		产量/(kg·hm ⁻²)	变幅/%	变化量/(kg·hm ⁻²)	产量/(10 ⁸ kg)	变幅/%	变化量/(10 ⁸ kg)
灌水3次	廊坊地区*	3 354	-22	-920	2.99	-21	-0.81
	保定地区*	3 678	-20	-932	3.37	-20	-0.86
	沧州地区	4 720	12	507	17.06	10	1.55
	衡水地区	5 064	-9	-508	13.67	-9	-1.39
	邢台地区*	3 362	-21	-899	4.77	-21	-1.28
	邯郸地区*	4 365	-17	-907	8.66	-17	-1.74
	黑龙港地区	4 258	-9	-445	50.52	-8	-4.53
灌水2次	廊坊地区*	2 429	-43	-1845	2.16	-43	-1.63
	保定地区*	2 682	-42	-1928	2.46	-42	-1.76
	沧州地区	3 393	-19	-820	12.19	-21	-3.32
	衡水地区	3 612	-35	-1960	9.77	-35	-5.29
	邢台地区*	2 299	-46	-1962	3.27	-46	-2.78
	邯郸地区*	3 235	-39	-2037	6.49	-38	-3.91
	黑龙港地区	3 056	-35	-1 647	36.34	-34	-18.69
灌水1次	廊坊地区*	1 429	-67	-2 845	1.27	-67	-2.53
	保定地区*	1 623	-65	-2 987	1.49	-65	-2.74
	沧州地区	2 410	-43	-1 803	8.59	-45	-6.92
	衡水地区	2 565	-54	-3 007	6.95	-54	-8.11
	邢台地区*	1 359	-68	-2 902	1.94	-68	-4.11
	邯郸地区*	2 082	-61	-3 189	4.22	-59	-6.18
	黑龙港地区	2033	-57	-2 670	24.46	-56	-30.59

注: *表示的这些地区为各自包含在黑龙港地区内的区域。

$5.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的地表引水量相比,尚有 $2.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的盈余。此外,黑龙港地区微咸水和咸水的可开采资源量约为 $9.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[16],河北省多年平均的微咸水利用量约为 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19],尚有一定的利用潜力。因此,若现阶段的引水量能得到保障,则缺水量可以考虑进一步利用浅层微咸水和半咸水及坑塘蓄水,如此,便有望实现置换井灌冬小麦所用深层地下水 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的目标。

需要提及的是,本文所提出的引用外调水进行渠灌及水利部门目前开展的“河道生态补水”有使黑龙港地区内的某些农田产生次生盐渍化的潜在风险,而规避这种风险的农田水利工程(排水明沟或暗管)应该未雨绸缪。

4 结语

(1)在河北省黑龙港地区,探讨兼顾禁采井灌所用深层地下水与确保冬小麦产量稳定的灌溉策略是水安全和口粮安全的管理决策所需的科学研究。

(2)在河北省黑龙港地区,对冬小麦若能采用外调地表水的渠灌来替代深层地下水的井灌,且每年能

外调引水量约 $9.62 \times 10^8 \text{ m}^3$,则本文提出的“以渠水换井水”的方案既可满足政府对“保产量”这一口粮须绝对安全的“刚性要求”,又可实现“防耗竭”这一承压水需生态安全的“刚性目标”。

(3)在河北省黑龙港地区,若每年的外调引水量只能分别达到约 $8.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时,则对冬小麦禁采井灌所用深层地下水将不得不付出单产减幅分别约为 9%、35% 和 57% 的代价。

本文紧密结合当前国家对水安全和口粮安全的战略需求,基于我们近 10 年来在华北平原典型的深层地下水严重超采区——黑龙港地区所开展的农业水文模拟研究工作,在区域尺度上宏观地评估了对冬小麦灌溉时禁采深层地下水而采用“外调地表水渠灌”对其产量的影响,这些基于多年定量研究的结果所阐述的观点可供政府相关管理部门针对该区域兼顾水安全与口粮安全进行决策时参考。

致谢:感谢河北省农林科学院旱作农业研究所的李科江研究员就黑龙港地区深层地下水井灌现状所给予的指教,感谢水利部南水北调规划设计管理局副局长姚建文教授级高级工程师就南水北调工程的有

关引用水问题所给予的指教,感谢水利部水利水电规划设计总院水资源一处陈飞高级工程师就“南水北调东线一期工程北延应急供水工程”和“引黄入冀补淀工程”在黑龙港地区的线路所给予的指教。

参考文献 (References) :

- [1] 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)]
- [2] 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)]
- [3] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 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. [ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, CHEN Zongyu, et al. Investigation and assessment of groundwater sustainable utilization in the North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [4] 陈秀敏, 李科江, 贾银锁. 河北小麦[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008. [CHEN Xiumin, LI Kejiang, JIA Yinsuo. Wheat in Hebei Province[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2008. (in Chinese)]
- [5] 贾银锁, 郭进考. 河北夏玉米与冬小麦一体化种植[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009. [JIA Yinsuo, GUO Jinkao. Integration planting of summer maize and winter wheat in Hebei Province[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009. (in Chinese)]
- [6] 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 capacity in Hebei Province[M]. Shijiazhuang: Science and Technology Press of Hebei Province, 2010. (in Chinese)]
- [7] FOSTER S, GARDUNO H, EVANS R, et al. Quaternary aquifer of the North China Plain—assessing and achieving groundwater resource sustainability[J]. *Hydrogeology Journal*, 2004, 12: 81 – 93.
- [8] SHI J S, WANG Z, ZHANG Z J, et al. Assessment of deep groundwater over-exploitation in the North China Plain[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(4): 593 – 598.
- [9] 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: 1791 – 1799.
- [10] LI P, REN L. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: II. scenario simulation and analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 715 – 732.
- [11] 任理, 李佩. 华北平原在限水和咸水灌溉及喷灌情景下作物水分生产力的模拟与深层地下水压采量的估算——以河北省黑龙港地区为例[M]. 北京: 科学出版社. 2021. [REN Li, LI Pei. Simulation of the crop water productivity and estimation of the reduction in deep groundwater exploitation under the scenarios of limited irrigation, saline water irrigation and sprinkler irrigation in the North China Plain: A case study in the Heilonggang region in Hebei Province[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [12] 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). <http://info.hebei.gov.cn/eportal/ui?pageId=1962757&articleKey=6272943&columnId=329982>. [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)]
- [13] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国财政部, 中华人民共和国国家发展改革委, 等. 联合印发《华北地区地下水超采综合治理行动方案》[EB/OL]. 2019. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/201902/t20190222_1108258.html. [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 over-exploitation in the North China Plain[EB/OL]. 2019. (in Chinese)]
- [14] LI P, REN L. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. parameter sensitivity analysis, calibration and model validation[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 497 – 516.
- [15] 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局. 河北农村统计年鉴1995—2013[M]. 北京: 中国统计出版社: 1995—2013. [General Office of People's Government of Hebei Province, Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei rural statistical yearbook 1995—2013[M]. Beijing: China

- Statistics Press: 1995—2013. (in Chinese)]
- [16] “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)]
- [17] 中华人民共和国水利部. 南水北调东线一期工程北延应急供水水头顺利通过穿漳卫新河倒虹吸工程[EB/OL]. 2022. http://szy.mwr.gov.cn/lyxx/202203/t20220328_1567061.html. [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The northern extension emergency project of the eastward route of the South-to-North Water Diversion(SNWD) successfully passed the inverted siphon project through Zhangweixin River [EB/OL]. 2022. (in Chinese)]
- [18] 中国新闻网. 河北省引黄入冀补淀水利工程正式开工[EB/OL]. 2015. <https://www.chinanews.com.cn/sh/2015/10-26/7590301.shtml>. [China News Website. Water diversion project from the Yellow River to the Baiyangdian Lake of Hebei Province started[EB/OL]. 2015. (in Chinese)]
- [19] 河北省水利厅. 河北省水资源公报 1999—2012[M]. 石家庄: 河北省水利厅, 1999—2012. [Water Resources Department of Hebei Province. Hebei provincial water resources bulletin 1999—2012[M]. Shijiazhuang: Water Resources Department of Hebei Province, 1999—2012. (in Chinese)]

编辑: 张若琳