

灌溉总量限制下灌水频率对冬小麦产量及地下水变化的影响

——以河北省太行山山前平原为例

侯永浩, 王楠, 丁蓓蓓, 张雪靓*

(中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:【目的】在亟须推广限水灌溉模式的浅层地下水超采区——河北省太行山山前平原, 探讨如何将有限的灌水量在冬小麦生育期内进行最优化分配, 以期减少产量损失并提高地下水灌溉利用效率。【方法】应用改进的 SWAT 模型对冬小麦生育期 90 mm 灌溉定额下不同灌水频率的 3 种限水灌溉情景进行模拟, 比较各情景下的冬小麦产量、浅层地下水位、冬小麦根区纵向 2 m 土层深度的水分渗漏量和实际蒸散发量, 基于地下水灌溉生产力优选出研究区 22 个子流域的最佳灌溉方案。【结果】在拔节期和抽穗期分别进行 1 次灌溉的“45 mm-二水”方案可实现最高的冬小麦产量, 与当地农民历史灌溉情景相比, 平均减产率约为 20%; 只在拔节期进行一次灌溉的“90 mm-一水”方案会形成较大的渗漏量, 相比其他 2 种方案具有更好的压采效果; “30 mm-三水”方案与“45 mm-二水”方案的渗漏量相近, 实际蒸散量之差在 2 mm 范围内, “30 mm-三水”方案下的土面蒸发量较大, “45 mm-二水”方案下的作物蒸腾量较大, 后者对地下水的有效利用程度更高; 为最大化地提升地下水灌溉对冬小麦增产的贡献, 在河北省太行山山前平原范围内优选出适用于方案“90 mm-一水”、“45 mm-二水”和“30 mm-三水”的子流域分别有 13、8 和 1 个, 分别占研究区总面积的 54%、40% 和 6%。【结论】冬小麦生育期限水灌溉模式(灌溉定额限定为 90 mm)可使研究区浅层地下水位下降速度减缓 60%~75%, 压采效果显著, 但冬小麦产量平均下降 20%~25%。不同子流域应“因地制宜”地合理分配有限的地下水资源, 统筹考虑地下水涵养与作物生产, 以选取最佳的灌水方案、提高地下水灌溉利用效率。

关键词: 限水灌溉; 灌水频率; 冬小麦; 地下水灌溉生产力; SWAT 模型

中图分类号: P962

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022054

OSID:



侯永浩, 王楠, 丁蓓蓓, 等. 灌溉总量限制下灌水频率对冬小麦产量及地下水变化的影响: 以河北省太行山山前平原为例[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 1-9.

HOU Yonghao, WANG Nan, DING Beibei, et al. Adjusting Irrigation Frequency to Ameliorate Winter Wheat Yield Reduction Due to Restricted Groundwater Extraction for Irrigation: A Case Study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 1-9.

0 引言

【研究意义】我国水资源人均占有量少, 时空分布不均, 粮食生产对灌溉水的依赖程度高^[1]。作为重要的淡水资源, 地下水在农业系统中扮演着极为关键的角色; 研究表明, 全球约 70% 的地下水开采被用于农田灌溉^[2]。然而, 随着地下水开采量的不断增加, 北方地区的地下水位持续下降, 已成为威胁我国农业生态的突出问题^[3]。强化区域节水灌溉始终是提高农业水资源效率、保障粮食安全的重要任务^[4]。在我国地下水超采最严重的华北平原, 充分灌溉具有不可持

续性, 实行冬小麦调亏(亏缺)灌溉, 将有限的水量重点分配于作物水分敏感期, 是建设节水农业的必经之路^[1,3-4]。在“以水定灌”的条件下(在特定的灌溉定额限制条件下), 应“少量多次”地兼顾更多的水分亏缺期, 还是“多量少次”地将有限的水用于最为关键的作物水分敏感期, 已成为限水灌溉方案制定中亟待明确的科学问题。

【研究进展】冬小麦-夏玉米轮作是华北平原最为典型且占比最大的农业种植模式。其中, 冬小麦生育期内降水匮乏、必须依靠井灌以维持产量是造成华北平原地下水超采的根本原因^[5]。20 世纪 90 年代以来, 该区域农民普遍在冬小麦生育期内灌溉 4~6 次(传统的充分灌溉), 灌溉定额约为 300~400 mm^[6-7]。自 2010 年起, 为治理因地下水超采导致的生态环境问题, 非充分灌溉、调亏灌溉、关键期灌溉、限水灌

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807183)

作者简介: 侯永浩(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事水土资源耦合模拟方向研究。E-mail: houyonghao@cau.edu.cn

通信作者: 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与流域综合发展研究。E-mail: zhangxueliang@cau.edu.cn

溉等降低冬小麦生育期内灌溉水总量的节水灌溉方案已成为研究者和管理者关注的重要议题^[8-12]。在位于华北平原浅层地下水超采区内（太行山山前平原）的栾城生态实验站（以下简称“栾城站”），有学者针对冬小麦非充分灌溉（足墒播种条件，结合追肥只灌1次拔节水）、冬小麦夏玉米2季最小灌溉（保证作物出苗的水分条件，生育期内不灌水）、冬小麦生育期不同灌水频次等方案开展了一系列的定点试验研究^[13-15]。河北省《冬小麦和夏玉米调亏灌溉技术规程》指出，对于太行山山前平原区的灌溉农田，冬小麦越冬前、返青一起身前、起身一拔节前、籽粒灌浆一成熟期合理地实施调亏灌溉，可在丰水年和平水年平均减少灌溉次数1~2次，节约灌溉水600~1500 m³/hm²。河北省《冬小麦节水高效灌溉制度》提出，太行山山前平原区应采取“前足、中控、后保”的灌溉原则，推荐的灌溉制度包括适用于不同降水水平的灌水1次（每次灌溉40 mm）、灌水2次（每次灌溉30 mm）和灌水3次（每次灌溉35 mm）等方案。无论是定位试验还是技术规程，核心问题均聚焦于如何将有限的水在冬小麦生育期内进行最优化分配，而不同分配方案下的总灌溉水量（灌溉定额）通常较为相近，主要差别往往在于单次灌溉量（灌水定额）与灌水频率（灌水次数）的差异。张喜英^[16]在栾城站对冬小麦90 mm灌溉定额下的不同灌水次数开展了试验研究，结果表明：增加灌水频率、缩减单次灌水量可促进作物根系生长、提升作物产量。【切入点】然而，上述结果仅能代表特定点位在特定年份的田间试验结果，对于区域尺度上未考虑空间异质性的影响。此外，鲜有针对相同灌溉定额不同灌水频率方案下的浅层地下水动态的比较研究，而上述信息也正是地下水超采区政策制定者在合理制定限水灌溉方案、提高地下水井灌利用效率亟须的决策支撑。

【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究以华北平原典型的浅层地下水超采区——河北省太行山山前平原为例，应用改进地下水模块的分布式水文模型SWAT模型对冬小麦生育期相同灌溉定额下不同灌水频率的限水灌溉方案进行模拟，分析不同方案下作物产量与浅层地下水动态的时空变化，并基于“水—粮”权衡，比较不同灌溉方案的优劣，为实现区域尺度“节水压采”的农田高用水策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北省太行山山前平原（东经114°17′—116°14′，北纬36°07′—39°35′）地处海河流域中部，涵盖保定、石家庄、邢台和邯郸4个地级市，总面积约22 753

km²，其中耕地面积占比超过80%^[17]。该区域以太行山以东的冲积平原为主，地势平坦，土壤肥沃，适宜农业发展^[18]。

研究区内冬小麦和夏玉米的播种面积约占粮食总播种面积的90%以上^[17]。流经研究区的主要河流为海河水系的2条重要支流——大清河与子牙河。基于全国水资源分区，研究区包括大清河淀西平原和子牙河平原这2个水资源三级区，本研究基于SWAT模型将其进一步细分为22个子流域（图1）。研究区为温带半湿润、半干旱的大陆性季风气候，根据1970—2012年降水情况，区域多年平均降水量为450~550 mm，但冬小麦生育期（10月上旬—次年6月中旬）内的降水量占比却不足全年的20%^[18-19]。该区域属于第四系松散堆积平原，由于浅层含水层水质良好，因此成为最主要的地下水资源开采层^[20]，但连续的过量开采导致浅层地下水位以超过1 m/a的速度持续下降^[21]。当前，由农田灌溉造成的浅层地下水大范围超采已经成为限制该区域农业可持续发展的瓶颈问题。

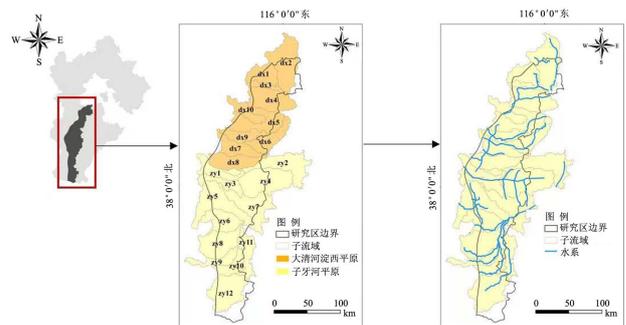


图1 研究区水系、子流域分布情况

Fig.1 The river system and subbasins of the study area

1.2 SWAT模型的模拟情景设置

SWAT模型是一种流域尺度的分布式水文模型，可模拟气候、水文、泥沙、土壤水和作物生长等过程，在国内外已得到广泛应用^[22]。Zhang等^[23]及任理等^[11]就该模型无法直接模拟与输出浅层地下水埋深的缺陷，增加了浅层含水层给水度、底板埋深、侧向补给量等参数，以期更好地模拟研究区的地下水循环过程。综合水文地质勘察资料将第四纪含水岩系中的第I含水层与第II含水层概化为浅层含水层^[24-25]。在此基础上，基于16口国家监测井和148口区域调查井（前者具有较长时间监测序列且监测频率相对密集，后者空间分布较为密集但监测频率相对稀疏）的浅层地下水埋深实测数据，对修改后的地下水模块及土壤水模块中的4个参数进行了率定；并根据地下水资源评价资料、遥感数据和统计年鉴分别对浅层地下水储量变化、农田蒸散量和作物产量的模拟结果进行了多模块验证，最终构建了能够准确模拟研究区冬小麦-夏玉米农田水文循环过程的SWAT模型^[11,23]，并成功应用

于限水灌溉模式的定量模拟^[26-28]。本文运用 SWAT 模型对研究区内的 22 个子流域就不同的灌溉情景进行模拟。为了更直观地与前期研究结果进行对比，设置 1990—2012 年为模拟时段，其中 1990—1992 年作为模型预热期，1993—2012 年作为模拟分析期。本研究设定 90 mm 灌溉定额下的单次灌水（下文统称“90 mm-一水”方案）、2 次灌水，每次 45 mm（下文统称“45 mm-二水”方案）和 3 次灌水，每次 30 mm（下文统称“30 mm-三水”方案）方案作为模拟情景（表 1）。上述模拟方案的设置主要考虑了以下原因：①前人相关研究表明，研究区在“完全休耕”条件下，通过入渗补给与侧向补给进入浅层含水层的总补给量（可近似为浅层地下水天然补给量）约为 138 mm^[19]；对于冬小麦-夏玉米轮作，夏玉米生育期（包括播前水）的平均井灌开采量约为 42 mm^[19]，由水量平衡原理计算得出冬小麦生育期的井灌开采量需控制在 96 mm 以内，才可能实现浅层地下水采补平衡这一压采

目标；②在“少量多次”情况下，在灌水 3 次时，若灌溉量少于 30 mm，即使实施小定额灌溉方案，也难以在畦灌条件下得到应用；③基于研究区内田间试验及地方灌溉技术规程中的相关信息^[10,13-15]，最终制定本研究中的 3 种灌溉方案。各模拟情景中的灌水时间是基于前期研究中的模拟试验结果^[12,26]并参考冬小麦关键需水期相关研究确定^[9]。“90 mm-一水”与“45 mm-二水”方案涉及的灌水时间在 22 个子流域内保持一致，而“30 mm-三水”方案在不同子流域之间略有差异（表 1）。为评估不同灌溉方案的地下水压采效果及其对冬小麦产量的影响，将 3 种情景的模拟结果与基本情景（农民历史灌溉制度）的相应结果进行比较。基本情景的设置沿用前期研究基础^[6-7]，农民普遍在冬小麦生育期灌水 4 次，在枯水期和特枯水期时增加 1~2 次灌溉，模拟分析时段内平均灌溉量为 356 mm^[11,23]。

表 1 模拟情景设置

Table 1 Simulation scenario settings

模拟灌溉情景	灌水定额/mm	灌溉定额/mm	灌水时间	日期	备注
基本情景					
“90 mm-一水”方案	90	90	拔节期	4月5日	“30 mm-三水”方案涉及的灌水时间在不同子流域之间略有差异，有 15 个子流域为拔节期、抽穗期和灌浆期，其他 7 个子流域为越冬期、拔节期和抽穗期，这主要与降水量的时空变异及土壤质地等下垫面分异有关，具体详见 Zhang 等 ^[26] 及任理和张雪靓 ^[11] 。
“45 mm-二水”方案	45	90	拔节期和抽穗期	4月5日和5月5日	
“30 mm-三水”方案	30	90	越冬期、拔节期和抽穗期	11月15日、4月5日和5月5日	
	30	90	拔节期、抽穗期和灌浆期	4月5日、5月5日和15日	

1.3 灌溉方案的评估及优选指标

研究区是我国冬小麦主产区之一，也是优质高筋小麦的高产区^[18]。在限水灌溉条件下的冬小麦减产程度是政策制定者需重点考虑的因素。同时，不同灌溉方案下浅层地下水位的变化亦是开展压采工作须关注的核心问题。在本研究区，冬小麦根区纵向 2 m 深度土层是一个在重力作用下自由排水的土壤剖面，本研究涉及的水文过程与作物生长机理之间的相互关系，均是在这个土壤剖面上发生的。灌溉于农田中的浅层地下水一部分转化为蒸散量进入大气层，另一部分贮存在冬小麦根区纵向 2 m 深度土体中，当该部分水量超过土壤田间持水率后则会产生深层渗漏，进而补给浅层地下水。因此，合理的井灌方案应是灌溉水和降水更多地转化为对作物增产有益的作物蒸散量。分析不同情景下的冬小麦根区纵向 2 m 深度土体的渗漏量与农田实际蒸散量（ ET_a ）的差异，可为定量描述农田水文循环、探寻作物产量及地下水变化的原因提供依据。

本研究将在 3 种限水灌溉情景下模拟分析时段内的冬小麦单产（ kg/hm^2 ）、浅层地下水位变化速度

（ m/a ）、作物根系土壤水分渗漏量（ mm ）和 ET_a （ mm ）。此外，为“因地制宜”地推行限水灌溉方案，采用作物地下水灌溉生产力这一指标，即 $CGWP$ （Crop Groundwater Productivity），对各子流域内的 3 种模拟情景进行优选，进而形成冬小麦相同灌溉定额限制下不同灌水频率的区划设计。 $CGWP$ 体现了“水-粮”权衡的思想，可反映地下水消耗量对冬小麦产量的贡献。本研究定义 $CGWP$ 为旱作条件与雨养条件相比，浅层地下水位（ m ）每下降一个单位所带来的作物增产量（ kg/hm^2 ）。因此， $CGWP$ 值越高，说明灌溉水对冬小麦产量的贡献越大，或冬小麦的单位增产量所消耗的浅层地下水资源量就越少，也就说明该灌溉模式下地下水井灌利用效率越高。计算式为：

$$CGWP_i = \frac{YLD_r - YLD_t}{SHGWHT_r - SHGWHT_t} \times 10^4, \quad (1)$$

式中： $CGWP_i$ 为第 i 种情景下（ $i=1, 2, 3$ ）模拟分析时段内的作物地下水灌溉生产力（ kg/m^3 ）； YLD_i 为第 i 种情景下（ $i=1, 2, 3$ ）模拟分析时段内冬小麦的年均产量（ kg/hm^2 ）； YLD_r 为模拟分析时段内冬小麦在雨养条件下的年均产量（ kg/hm^2 ）； $SHGWHT_i$ 为第 i 种

情景下 ($i=1, 2, 3$) 模拟分析时段内的浅层地下水平均埋深 (m); $SHGWHT_i$ 为模拟分析时段内冬小麦在雨养条件下的浅层地下水平均埋深 (m)。其中, 冬小麦雨养条件下的模拟结果取自 Zhang 等^[26]、任理等^[11]研究。

2 结果与分析

2.1 作物产量及减产率

在大清河淀西平原, 除子流域 dx1 外, 其他子流域在 90 mm 灌溉定额下的冬小麦产量均分布在 4 000~4 700 kg/hm² (表 2)。对比 3 种情景, 在该水资源三级区若要收获更高的冬小麦产量, 该区内的 10 个子流域均表现为“45 mm-二水”方案最优; 对于大部分子流域, “30 mm-三水”方案优于“90 mm-一水”方案。其中, 子流域 dx2 (位于保定地区北部) 在不同灌溉方案下的冬小麦产量的差异 (最优情景与最劣情景的差值) 最大, “45 mm-二水”方案下的产量相比“30 mm-三水”方案的产量高出近 400 kg/hm²。同时, dx2 也是唯一一个“90 mm-一水”方案在冬小麦产量方面的表现明显优于“30 mm-三水”方案的子流域。与基本情景相比, 在“90 mm-一水”、“45 mm-二水”、“30 mm-三水”方案下, 大清河淀西平原各子流域的冬小麦平均减产率分别为 24%、21% 和 23%。

表 2 2 个水资源三级区内各子流域在 3 种模拟情景下的冬小麦年平均产量

Table 2 The annual average yield of winter wheat in the subbasins under the three limited irrigation scenarios

子流域及其所在的 水资源三级区	“90 mm-一水” 方案	“45 mm-二水” 方案	“30 mm-三水” 方案	
	产量/(kg hm ⁻²)	产量/(kg hm ⁻²)	产量/(kg hm ⁻²)	
大清河 淀西 平原	dx1	3 261	3 504	3 418
	dx2	4 263	4 430	4 034
	dx3	4 451	4 683	4 567
	dx4	4 380	4 639	4 533
	dx5	4 202	4 358	4 254
	dx6	4 283	4 475	4 372
	dx7	4 216	4 381	4 208
	dx8	4 431	4 528	4 405
	dx9	4 401	4 660	4 553
	dx10	4 222	4 335	4 233
平均	4 211	4 399	4 258	
子牙河 平原	zy1	4 444	4 687	4 547
	zy2	4 478	4 679	4 541
	zy3	4 481	4 618	4 498
	zy4	4 570	4 803	4 628
	zy5	4 536	4 657	4 416
	zy6	4 564	4 558	4 476
	zy7	4 420	4 633	4 271
	zy8	4 384	4 389	4 197
	zy9	4 566	4 476	4 338
	zy10	4 484	4 525	4 366
	zy11	4 645	4 629	4 382
	zy12	4 787	5 077	4 657
平均	4 530	4 644	4 443	

在子牙河平原, “45 mm-二水”方案下的冬小麦产量依然在大清河淀西平原的优势明显 (表 2)。对于分布在子牙河中部的一部分子流域, “90 mm-一水”方案下的产量已非常接近甚至反超“45 mm-二水”方案下的产量。与大清河淀西平原相比, 子牙河平原 12 个子流域的冬小麦产量在不同模拟情景下的空间异质性更大。例如, “90 mm-一水”方案在子牙河平原表现出较强的地域性, 对于 zy1、zy2、zy3 和 zy4 (多分布于石家庄地区) 这 4 个子流域, 该情景下的冬小麦产量与其他 2 种情景相比是最低的, 而在 zy6、zy9 和 zy11 (多分布于邯郸和邢台地区) 这 3 个子流域, 该情景下的冬小麦产量与其他 2 种情景相比却是最高的。与基本情景相比, “90 mm-一水”、“45 mm-二水”和“30 mm-三水”方案下的子牙河平原各子流域的冬小麦平均减产率分别为 22%、20% 和 23%。

2.2 浅层地下水位变化

在“90 mm-一水”、“45 mm-二水”、“30 mm-三水”灌溉方案下, 大清河淀西平原浅层地下水的平均变化速度分别为 -0.22、-0.28、-0.27 m/a, 与基本情景下的 -1.0 m/a 相比, 下降速度存在显著减缓。其中, 子流域 dx1 (位于保定地区北部) 表现出了浅层地下水位“止降回升”的压采效果, 平均回升速度约为 0.17~0.27 m/a (表 3)。对于研究区南部的子牙河平原, 其浅层地下水超采形势相比大清河淀西平原更为严峻, “90 mm-一水”、“45 mm-二水”、“30 mm-三水”灌溉方案下的浅层地下水位平均变化速度分别为 -0.44、-0.49、-0.47 m/a, 与基本情景下的 -1.2 m/a 相比, 下降速度同样存在显著减缓; 其中, 子流域 zy1 (位于石家庄地区西部) 表现出了浅层地下水接近“采补平衡”的压采效果, 而子流域 zy2 (位于石家庄地区中东部) 的浅层地下水位下降速度仍高达 1.0 m/a 以上 (表 3)。整体来看, 在绝大部分子流域, “90 mm-一水”方案与其他 2 种方案相比具有更优秀的地下水压采效果, 这种优势在大清河淀西平原内的除子流域 dx2 以外的 9 个子流域以及子牙河平原内的 zy1、zy2、zy3 和 zy12 子流域 (这 13 个子流域位于保定地区及石家庄地区中东部) 尤为突出。

2.3 冬小麦根区纵向 2 m 土层深度内的土壤水分渗漏量

表 4 为 2 个水资源三级区内各子流域及三级区之间在 3 种灌溉情景下的冬小麦根区纵向 2 m 土层深度内的土壤水分渗漏量 (以下简称渗漏量)。在大清河淀西平原, 各子流域在 3 种模拟情景下的年平均渗漏量分布在 50~64 mm 之间。其中, “90 mm-一水”方案下的渗漏量平均值最大, 相比“45 mm-二水”方案平均高出 8.8 mm, 相比“30 mm-三水”方案平均高

出 6.8 mm。在子牙河平原，各子流域在 3 种模拟情景下的渗漏量介于 49~60 mm 之间。其中，“90 mm-一水”方案下的渗漏量平均值分别比“45 mm-二水”和“30 mm-三水”高出 7.2 mm 和 5.6 mm。

表 3 大清河淀西平原和子牙河平原内的各子流域在 3 种模拟情景下的浅层地下水水位年平均变化速度

Table 3 The variation rates of shallow groundwater table in the subbasins of the Dianxi Plain of the Daqing River basin and the Plain of the Ziya River basin under the three limited irrigation scenarios

子流域及其所在的水资源三级区	“90 mm-一水”方案	“45 mm-二水”方案	“30 mm-三水”方案	
	年平均变化速度/(m a ⁻¹)	年平均变化速度/(m a ⁻¹)	年平均变化速度/(m a ⁻¹)	
大清河淀西平原	dx1	0.27	0.18	0.19
	dx2	-0.25	-0.30	-0.23
	dx3	-0.17	-0.23	-0.23
	dx4	-0.21	-0.30	-0.29
	dx5	-0.20	-0.25	-0.24
	dx6	-0.58	-0.64	-0.64
	dx7	-0.13	-0.16	-0.16
	dx8	-0.33	-0.37	-0.37
	dx9	-0.26	-0.31	-0.31
	dx10	-0.37	-0.42	-0.42
平均	-0.22	-0.28	-0.27	
子牙河平原	zy1	0.02	-0.06	-0.05
	zy2	-1.08	-1.19	-1.19
	zy3	-0.20	-0.25	-0.25
	zy4	-0.61	-0.67	-0.62
	zy5	-0.35	-0.39	-0.36
	zy6	-0.56	-0.61	-0.55
	zy7	-0.70	-0.75	-0.71
	zy8	-0.31	-0.35	-0.33
	zy9	-0.34	-0.34	-0.32
	zy10	-0.37	-0.39	-0.39
	zy11	-0.50	-0.56	-0.52
	zy12	-0.30	-0.36	-0.34
平均	-0.44	-0.49	-0.47	

2.4 农田耗水量

研究区各子流域在 3 种灌溉情景下的年平均 ET_a 介于 530~576 mm 之间，其与基本情景相比的降低程度及其空间分布如图 2 所示。各子流域在“45 mm-二水”和“30 mm-三水”情景下年平均 ET_a 的减幅约为 13%~18%，在“90 mm-一水”情景下年平均 ET_a 的减幅约为 15%~19%。在大清河淀西平原，“90 mm-一水”情景下的年平均 ET_a 比“45 mm-二水”和“30 mm-三水”情景分别平均降低 10.3 mm 和 8.8 mm；在子牙河平原，“90 mm-一水”情景下的年平均 ET_a 比“45 mm-二水”和“30 mm-三水”情景分别平均降低 7.4 mm 和 5.8 mm。虽然“45 mm-二水”和“30 mm-三水”方案下的年平均 ET_a 差异不超过 2 mm，但“45 mm-二水”方案不仅具有更高的蒸散量，而且对作物增产有效的蒸腾量占比也略高于“30 mm-三水”

方案。

表 4 大清河淀西平原和子牙河平原内的各子流域在 3 种模拟情景下的作物根系带 2 m 土体的年平均水分渗漏量

Table 4 The percolation from the soil profile (2 m) in the subbasins of the Dianxi Plain of the Daqing River basin and the Plain of the Ziya River basin under the three limited irrigation scenarios

子流域及其所在的水资源三级区	“90 mm-一水”方案	“45 mm-二水”方案	“30 mm-三水”方案	
	年平均水分渗漏量/(mm a ⁻¹)	年平均水分渗漏量/(mm a ⁻¹)	年平均水分渗漏量/(mm a ⁻¹)	
大清河淀西平原	dx1	59.8	50.8	58.2
	dx2	60.3	51.6	56.0
	dx3	61.2	52.4	53.1
	dx4	62.2	53.3	57.0
	dx5	62.5	53.6	54.4
	dx6	62.9	54.0	54.8
	dx7	63.4	54.5	55.2
	dx8	63.5	54.6	55.3
	dx9	63.7	54.6	55.3
	dx10	62.5	54.8	54.3
平均	62.2	53.4	55.4	
子牙河平原	zy1	57.1	50.0	51.9
	zy2	57.4	50.3	52.2
	zy3	57.8	50.6	52.6
	zy4	58.2	50.9	52.9
	zy5	58.1	51.3	52.5
	zy6	58.4	51.2	52.9
	zy7	58.3	50.7	52.4
	zy8	57.8	50.5	52.1
	zy9	57.6	50.4	52.0
	zy10	57.6	50.2	51.6
	zy11	57.3	50.0	51.4
	zy12	57.1	49.9	51.2
平均	57.7	50.5	52.1	

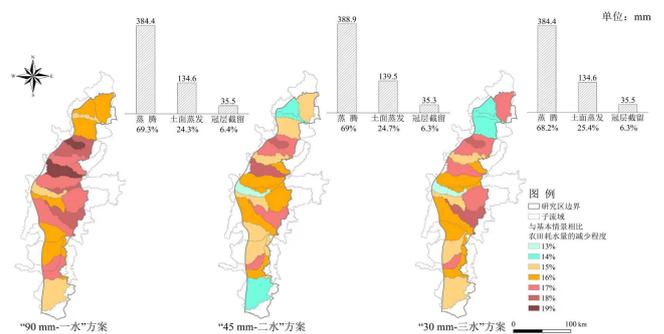


图 2 与基本情景相比，3 种模拟情景下农田实际蒸散量减少程度的空间分布及各组分的占比情况

Fig.2 Spatial distribution of reduction in actual evapotranspiration (ET_a) under different simulation scenarios compared with the current situation and the proportions constituting in the ET_a under the three limited irrigation scenarios

2.5 区域尺度冬小麦灌溉方案优选

基于能够同时兼顾地下水涵养与作物生产的

CGWP 指标, 针对每一个子流域, 挑选出地下水消耗对作物增产贡献最大的灌溉方案, 作为在该子流域所推荐的灌溉方案, 进而获得优选灌溉方案的区划设计方案。22 个子流域在 3 种灌溉情景下的 CGWP 结果及优选后的灌溉方案区划如表 5 和表 6 所示。在大清河淀西平原, 有 6 个子流域 (dx3、dx4、dx5、dx6、dx8 和 dx10) 在“90 mm-一水”情景下的 CGWP 最高, 有 4 个子流域 (dx1、dx2、dx7 和 dx9) 在“45 mm-二水”情景下的 CGWP 最高, 表明基于这 2 种灌溉方案在相应的子流域中进行井灌, 冬小麦的增产所消耗的浅层地下水资源相对最少。大清河淀西平原内所有子流域在“30 mm-三水”情景下的 CGWP 最低, 表明从提高作物对地下水灌溉的利用效率角度来讲, 这种灌溉方案的优势最不明显。dx7、dx8 和 dx9 (位于石家庄地区北部和保定地区南部) 在各模拟情景下的 CGWP 相比其他子流域更高, 可见在这些地区井灌对冬小麦增产的贡献相对较大。

在子牙河平原, 优选结果为“90 mm-一水”方案的子流域依然是最多的, 约占 58%; 其次是“45 mm-二水”方案, 约占 33%; 与大清河淀西平原不同的是, 该水资源三级区内出现了一个优选结果为“30 mm-三水”方案的子流域 (zy4), 其位于石家庄地区东部。整体来看, 子牙河平原各子流域的 CGWP 平均值低于大清河淀西平原。其中, 子流域 zy2 和 zy6 (位于石家庄地区东北部和邢台地区西北部) 的 CGWP 最低, 表明在这些地区井灌对冬小麦增产的贡献相对较小。

表 5 大清河淀西平原和子牙河平原各子流域在不同灌溉情景下的作物地下水灌溉生产力

Table 5 Crop groundwater irrigation productivity under different irrigation scenarios in the 10 subbasins of the Dianxi Plain of the Daqing River basin and the 12 subbasins of the Plain of the Ziya River basin

子流域及其所在的水资源三级区	“90 mm-一水”	“45 mm-二水”	“30 mm-三水”	
	方案	方案	方案	
	地下水灌溉 生产力/(kg m ⁻³)	地下水灌溉 生产力/(kg m ⁻³)	地下水灌溉 生产力/(kg m ⁻³)	
大清河 淀西 平原	dx1	0.268	0.269	0.260
	dx2	0.288	0.293	0.244
	dx3	0.370	0.364	0.348
	dx4	0.282	0.280	0.268
	dx5	0.332	0.330	0.317
	dx6	0.288	0.287	0.272
	dx7	0.403	0.412	0.346
	dx8	0.436	0.420	0.393
	dx9	0.418	0.421	0.397
	dx10	0.242	0.240	0.230
平均	0.333	0.332	0.307	
子牙河 平原	zy1	0.266	0.272	0.232
	zy2	0.176	0.178	0.163
	zy3	0.340	0.330	0.309
	zy4	0.266	0.276	0.279
	zy5	0.337	0.329	0.280
	zy6	0.160	0.150	0.154
	zy7	0.301	0.304	0.240
	zy8	0.279	0.263	0.226
	zy9	0.342	0.322	0.286
	zy10	0.428	0.402	0.373
	zy11	0.255	0.229	0.193
	zy12	0.252	0.269	0.220
平均	0.284	0.277	0.246	

表 6 优选灌溉方案区划

Table 6 The spatial distribution of the recommended irrigation schemes

优选方案	优选方案所在子流域	涉及的具体县(市)
“90 mm-一水”方案	dx3、dx4、dx5、dx6、dx8、dx10、zy3、zy5、zy6、zy8、zy9、zy10 和 zy11 (共计 13 个子流域)	保定: 定州市 (东北部)、安国市、望都县 (西南)、定兴县、徐水区和清苑区 石家庄: 栾城区、藁城区 (北部)、赵县、元氏县、无极县、正定县和深泽县 邢台: 宁晋县、柏乡县、隆尧县、临城县、内丘县、仁泽区和沙河县
“45 mm-二水”方案	dx1、dx2、dx7、dx9、zy1、zy2、zy7 和 zy12 (共计 8 个子流域)	保定: 涞水县、易县、涿州市、高碑店市、曲阳县、定州市和望都县 石家庄: 新乐市、灵寿县、正定县、藁城区 (南部)、深泽县、无极县和赵县 邢台: 宁晋县 邯郸: 永年区、磁县、肥乡县和丛台区
“30 mm-三水”方案	zy4	石家庄: 辛集市和晋州市

3 讨论

水分胁迫是指作物水分散失超过其根系水分吸收, 使植株组织膨压降低、代谢失调的现象^[29]。水分胁迫对冬小麦生理与生态的影响是多方面的, 在水分胁迫下冬小麦的地上部分生长将受到抑制; 同时, 水分胁迫抑制根系生长, 降低了根系的吸水面积和吸水能力, 影响其对水分和养分的吸收和运输, 从而导致冬小麦产量下降^[29-32]。SWAT 模型可通过比较作物的实际蒸散发和潜在蒸散发来模拟水分胁迫^[22], 通过读取冬小麦生育期内存在水分胁迫的天数分析其对收

获产量的影响机制, 结果显示: 在大清河淀西平原, “90 mm-一水”、“45 mm-二水”、“30 mm-三水”情景下的冬小麦生育期内的水分胁迫天数分别为 71、62、72 d; 子牙河平原的相应结果分别为 68、61、69 d。因此, “45 mm-二水”灌溉方案下的水分胁迫天数最少, “90 mm-一水”和“30 mm-三水”灌溉方案下的水分胁迫天数相近, 这可能是导致“45 mm-二水”方案下的冬小麦产量整体占优的主要原因。不同灌溉方案对冬小麦产量的影响与水分在作物根系带土体中的分配情况有关, 进而导致不同水平的水分胁迫。尽管“90 mm-一水”方案是灌溉在冬小麦最关键的需水

期（拔节期），但是由于灌水定额偏大，使得灌溉后的土壤水分超过了田间持水率，从而形成了渗漏补给。与灌水次数为 2 次和 3 次的灌溉方案相比，单次大定额灌溉方案下，灌水发生前土壤水分相对不足、灌水发生时产生无效渗漏、灌水后土壤水分持续消耗未能得到继续补充所造成的水分胁迫是导致冬小麦产量相对不高的主要原因。而“30 mm-三水”方案与“45 mm-二水”方案相比，尽管作物根系带 2 m 土体的渗漏量较为相近，但“30 mm-三水”方案的蒸散量略低于“45 mm-二水”方案，且作物蒸腾量在蒸散量中的占比也明显低于“45 mm-二水”方案，从而造成了相对更大的减产幅度。

按研究区长序列（1970—2012 年）冬小麦生育期内降水量的统计数据^[19]进行划分，在冬小麦生育期不同降水水平下，3 种限水灌溉情景的冬小麦产量如表 7 所示。在特枯水期，“90 mm-一水”的方案冬小麦产量最高；而在丰水期、平水期和枯水期，“90 mm-一水”和“30 mm-三水”方案下的冬小麦产量无明显规律，但均低于“45 mm-二水”方案，这与前文中按 20 a 平均进行统计计算的结果一致。

表 7 冬小麦生育期不同降水水平下 3 种模拟情景的冬小麦平均产量

Table 7 Average yield of winter wheat in three simulated scenarios under different precipitation exceedance probabilities (PEPs) of winter wheat growing season

冬小麦生育期 降水水平	“90 mm- 一水”方案	“45 mm- 二水”方案	“30 mm- 三水”方案
	下的产量 平均产量/ (kg hm ⁻²)	下的产量 平均产量/ (kg hm ⁻²)	下的产量 平均产量/ (kg hm ⁻²)
丰水期 (PEP≤25%)	5 012	5 228	4 990
平水期 (25%<PEP<75%)	4 254	4 436	4 267
枯水期 (75%≤PEP<95%)	4 193	4 357	4 170
特枯水期 (PEP≥95%)	3 276	3 204	3 047

在位于研究区内的栾城站，张喜英等^[16]在田间尺度上进行了与本研究设计的 3 种灌溉方案相似的大田测坑试验；结果表明，在田块尺度上，90 mm 灌溉定额下的 3 种灌溉方案的冬小麦产量约为 7 500~9 000 kg/hm²，而本文在区域尺度上的模拟产量约为 4 000~5 000 kg/hm²，造成这种差异的原因详见张雪靓等^[27]研究结果。张喜英等^[16]试验结果表明，在 90 mm 灌溉定额下，随着灌溉频率的增加，冬小麦产量也会增加，按冬小麦产量进行排序的结果为：“30 mm-三水”方案 > “45 mm-二水”方案 > “90 mm-一水”方案，而本文对栾城站所在水文单元的模拟结果为“45 mm-二水”方案 > “90 mm-一水”方案 > “30 mm-三水”

方案。造成上述较大差异的原因可能有以下几点：①水文响应单元面积远大于田间试验小区面积，模拟时所概化的区域尺度土壤质地以及输入的气象数据都与站点尺度大不相同，这都会影响水分和养分在作物根系带土体的分布状况，从而导致产量差异；②田间试验的 3 次灌水时期分别为拔节期、抽穗期与灌浆期，而在该水文响应单元内基于权衡考虑地下水涵养与作物生产而设置的灌溉时期为越冬期、拔节期和抽穗期，这也可能导致结果出现显著差异；③田间试验条件下采用小定额灌溉时常配套一些农艺补偿措施，如密播、深松耕、使用地膜覆盖或秸秆覆盖等，而 SWAT 模型却难以量化上述措施的贡献，这同时也是 SWAT 模型在未来亟须完善的问题。

现阶段研究区内大田作物的灌溉方式通常为畦灌，本研究设计有限供水（冬小麦生育期灌溉定额 90 mm）下的 3 种灌溉频率的灌水方案，除灌溉 1 次方案的灌水定额为 90 mm 以外，灌溉 2 次（灌水定额 45 mm）和 3 次方案（灌水定额 30 mm）可能都需要小畦灌溉、喷灌或滴灌等技术来实现小定额灌溉。然而，这些节水灌溉技术的成本投入较高^[33]；另一方面，灌水频率的增加也会带来劳动力成本投入的增加^[34]。因此，小定额灌溉方案还需配合简便易行且经济可行的节水灌溉系统，从这个角度来看，本文所推荐的灌溉方案区划中少有“30 mm-三水”的优选结果也具备一定的现实可操作性。

4 结论

限水灌溉模式（冬小麦生育期灌溉定额 90 mm）下，在河北省太行山山前平原分别于冬小麦拔节期、抽穗期进行灌溉的“45 mm-二水”方案下的冬小麦产量相对最高。与之相比，“90 mm-一水”方案（仅在拔节期进行灌溉）会产生较大的土壤水深层渗漏，“30 mm-三水”方案则会增大土面蒸发、降低作物蒸腾量在蒸散发中的比例，从而带来相对更高的减产风险。

90 mm 灌溉定额的冬小麦限水灌溉方案会造成研究区内大清河淀西平原和子牙河平原这 2 个水资源三级区冬小麦平均减产 21%~24% 和 20%~23%；在保定地区北部和石家庄地区西部的部分区域，可使得浅层地下水实现“止降回升”，在其他区域，尽管地下水仍表现为超采形势，但水位下降速度相比现状条件下平均减缓 60%~75%。

为最大化提高地下水的井灌利用效率，在冬小麦 90 mm 灌溉定额限制下，约 54% 的区域推荐实施“90 mm-一水”方案、只有石家庄东部的辛集市和晋州市（约占研究区面积的 6%）推荐实施“30 mm-三水”方案、其他区域推荐实施“45 mm-二水”方案。

参考文献:

- [1] 石玉林, 唐华俊, 高中琪, 等. 中国农业资源环境若干战略问题研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
SHI Yulin, TANG Huajun, GAO Zhongqi, et al. Research on key strategic issues of agricultural resource and environment in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018.
- [2] DÖLL Petra, SIEBERT Stefan. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 10-37.
- [3] 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[Z]. 2019.
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. Action Plan for comprehensive control of groundwater overdraft in North China[Z]. 2019.
- [4] 王浩, 汪林, 杨贵羽, 等. 中国农业水资源高效利用战略研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
WANG Hao, WANG Lin, YANG Guiyu, et al. Research on the strategy for agricultural water resources efficient use in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018.
- [5] 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 suitable water development[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2009.
- [6] SUN Chen, REN Li. Assessing crop yield and crop water productivity and optimizing irrigation scheduling of winter wheat and summer maize in the Haihe plain using SWAT model[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2 478-2 498.
- [7] 孙琛. 海河流域地表水资源量和蒸散发及作物水分生产力的模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
SUN Chen. Simulation of surface water resources and evapotranspiration and crop water productivity in the Haihe River Basin[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012.
- [8] 陈亚新, 康绍忠. 非充分灌溉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
CHEN Yaxin, KANG Shaozhong. Principle of deficit irrigation[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.
- [9] 潘登. 海河平原冬小麦和夏玉米水分生产函数及节水灌溉制度的模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
PAN Deng. Modelling of crop water production function and water saving irrigation of winter wheat and summer maize in Haihe Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011.
- [10] 河北省质量技术监督局. DB 13/T 1521—2012 冬小麦和夏玉米调亏灌溉技术规程[S]. 2012.
Bureau of Quality and Technical Supervision of Hebei Province. DB 13/T 1521—2012 Technical Regulations for Regulated Deficit Irrigation of Winter Wheat and Summer Maize[S]. 2012.
- [11] 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.
- [12] 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 crop water productivity and estimation of deep groundwater hydraulic yield in North China Plain under limited water and saline water irrigation and sprinkler irrigation scenarios: A case study of Heilonggang area - Hebei Province[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [13] ZHANG Xiyong, PEI Dong, CHEN Suying, et al. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1 620-1 626.
- [14] SUN Hongyong, ZHANG Xiyong, CHEN Suying, et al. Performance of a double cropping system under a continuous minimum irrigation strategy[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(1): 281-289.
- [15] CHEN Suying, SUN Hongyong, SHAO Liwei, et al. Performance of winter wheat under different irrigation regimes associated with weather conditions in the North China Plain[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2014, 8(4): 550-557.
- [16] 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): 1 454-1 464.
ZHANG Xiyong. Study on farmland water consumption and water-saving irrigation in typical areas of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1 454-1 464.
- [17] 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局. 河北农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1 995-2 013.
General Office of The People's Government of Hebei Province, Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1 995-2 013.
- [18] 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.
- [19] 张雪靓. 应用分布式水文模型评估耕地利用现状和限水灌溉及休耕对浅层地下水资源的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHANG Xueliang. Estimating the impacts of current arable land use, limited irrigation schedule and fallow cropland on shallow groundwater resources using the distributed hydrological model—a case study in the Piedmont Plain of Taihang Mountains in Hebei Province[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [20] “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[Z]. 2004.
National Groundwater Resources Assessment Project Office. Attached Tables of National Groundwater Resources Assessment[Z]. 2004.
- [21] 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.
- [22] NEITCSH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical documentation, version 2009[EB/OL]. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, TX. 2011. <http://www.brc.tamus.edu/swat/>.
- [23] ZHANG Xueliang, REN Li, KONG Xiangbin. 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: 1 221-1 240.
- [24] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
CHEN Wanghe. Groundwater in Hebei[M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [25] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源[M]. 北京: 中国地图出版社, 2005.
ZHANG Zonghu, LI Lierong. Groundwater resources in China[M]. Beijing: Sinomap Press, 2005.
- [26] ZHANG Xueliang, REN Li, WAN Li. 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.
- [27] 张雪靓, 丁蓓蓓. 冬小麦“春浇一水”限水灌溉模式对浅层地下水采

- 补平衡的影响：以河北省太行山山前平原为例[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 1-10.
- ZHANG Xueliang, DING Beibei. Effect of winter wheat "Spring watering one water" limited irrigation model on the balance of groundwater recharge and recovery: A case study of the Piedmont Plain of Taihang Mountains, Hebei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 1-10.
- [28] ZHANG Xueliang, REN Li. 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: 125-992.
- [29] MANUELA Chaves, JOAO S Pereira, JOÃO Maroco, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth[J]. Annals of Botany, 2002, 89: 907-916.
- [30] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 280-283.
- ZHANG Xiyong, PEI Dong, YOU Maozheng. Response of leaf water potential, photosynthesis and stomatal conductance to varying soil moisture in four crops, winter wheat, corn, sorghum and millet[J]. Acta Phyto Ecological Sinica, 2000, 24(3): 280-283.
- [31] ZHANG Xiyong, CHEN Suying, SUN Hongyong, et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors[J]. Field Crops Research, 2009, 114(1): 75-83.
- [32] 李炎, 王丹, 王仰仁. 水分养分胁迫对冬小麦器官生长相关性影响研究[J]. 节水灌溉, 2021(8): 56-61.
- LI Yan, WANG Dan, WANG Yangren. A study on correlation of winter wheat organ growth under different water and nutrient stress[J]. Water Saving Irrigation, 2021(8): 56-61.
- [33] 索滢, 王忠静. 典型节水灌溉技术综合性能评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 113-120.
- SUO Ying, WANG Zhongjing. Study on comprehensive performance evaluation of typical water-saving irrigation technology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 113-120.
- [34] 张光岩, 李俊良, 徐良菊, 等. 不同灌溉模式对小麦干物质积累及产量经济效益的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 31-38.
- ZHANG Guangyan, LI Junliang, XU Liangju, et al. Effects of different irrigation modes on dry matter accumulation and yield economic benefits of wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 31-38.

Adjusting Irrigation Frequency to Ameliorate Winter Wheat Yield Reduction Due to Restricted Groundwater Extraction for Irrigation: A Case Study

HOU Yonghao, WANG Nan, DING Beibei, ZHANG Xueliang*

(China Agricultural University, College of Land Science and Technology, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objective】 Over-extraction of groundwater over the past decades has resulted in shallow groundwater table dropping at an alarming rate in most regions in Hebei province. Reducing groundwater extraction for wheat winter irrigation has been proposed as a remedy to reverse this trend. Quantitative understanding of wheat yield reduction due to the restricted groundwater extraction and its consequence for groundwater dynamics is essential. Taking a piedmont plain of Taihang Mountain as an example, this paper investigates how to minimize the wheat yield loss by optimizing irrigation frequency when the irrigation amount is the same. 【Method】 The study was based on numerical simulation. We designed three scenarios with the irrigation amount kept the same at 90 mm, but the crop was irrigated at different frequencies. For each frequency, we simulated the winter wheat yield, variation in shallow groundwater table and soil water balance in the 0~200 cm of soil using the modified SWAT model. We divided the simulation area into 22 sub-basins, and the optimal irrigation frequency for each subbasin was calculated based on the index of crop-groundwater irrigation productivity. 【Result】 ① Irrigating the crop twice, one at jointing and one at the heading stages, at equal irrigation amount (45 mm) gave the highest winter wheat yield, with the average yield reduced approximately by 20% compared to business-as-usual irrigation method. ② Irrigating all 90mm of water at the jointing stage led to largest irrigation water leaching. ③ Increasing the irrigation frequency from two to three with the same irrigation amount in each (30 mm) did not noticeably change water leaching and evapotranspiration, but increased soil evaporation at the expense of transpiration. ④ To minimize yield reduction, 13 subbasins (approximately 54% of the studied area) should irrigate once only, 8 subbasins (approximately 40% of the studied area) should irrigate twice each with 45 mm of water, and one subbasin (approximately 6% of the studied area) should irrigate three times each with 30 mm of water. 【Conclusion】 Reducing groundwater extraction for winter wheat irrigation to 90 mm could mitigate shallow groundwater table falling by 60%~75% at the price of yield reduction of 20%~25%. To minimize the yield reduction, different regions should adjust the irrigation frequencies based on its heterogeneous aquifers. Optimizing irrigation frequency should consider the trade-off effect of irrigation on groundwater conservation and crop production, as well as irrigation water use efficiency.

Key words: limited irrigation scheme; irrigation frequency; winter wheat; groundwater irrigation productivity; SWAT model

责任编辑：韩洋