

冬小麦生育期地下水补给量表征及水位阈值试验研究

薛 歆^{1,2}, 蔡甲冰^{1,2*}, 于颖多^{1,2}, 张宝忠^{1,2}, 韩延安³

(1. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 陕西省交口抽渭灌溉中心, 渭南市 714000)

摘 要: 作物生育期地下水补给量精量表征可准确量化灌区农田地下水的利用情况, 对促进地下水资源合理使用及区域农业生产可持续发展具有重要的意义。为构建冬小麦生育期地下水补给量估算模型, 探究冬小麦各生育期地下水水位临界埋深和适宜阈值, 该研究通过群集式蒸渗仪开展不同地下水水位和不同灌溉处理下的冬小麦生长过程试验观测, 利用率定和校核后的 AquaCrop 模型模拟了不同灌溉制度和地下水水位埋深情景下的冬小麦生长发育和土壤水分动态变化过程。结果表明: 1) 不同处理冬小麦土壤含水率、冠层覆盖度、生物量和产量模拟值与实测值之间统计参数可同时达到决定系数不小于 0.8、相对误差和标准化均方根误差均小于 16%, 可见 AquaCrop 模型能较好模拟冬小麦生长发育过程。2) 利用校核后的 AquaCrop 模型模拟了 52 种不同灌溉处理和地下水水位情景下冬小麦生长过程, 构建了冬小麦生育期土壤储水量—地下水补给强度和地下水水位埋深—土壤储水量的非线性回归方程; 将地下水补给强度计算值与田间实测值对比验证, 决定系数均在 0.873 及以上、相对误差不大于 9.22%、均方根误差不大于 0.316 mm/d、标准化均方根误差不大于 11.89%。3) 通过联立冬小麦生育期土壤储水量—地下水补给强度和地下水水位埋深—土壤储水量的非线性回归方程, 得到不同灌溉处理下冬小麦各生育期地下水水位临界埋深, 可知灌溉越少地下水补给需求越强烈, 临界埋深越深; 分析 52 种模拟情景下冬小麦产量与地下水水位埋深之间的关系, 可知其适宜生长的最优埋深阈值为 2.0~2.5 m, 此时冬小麦非充分灌溉处理 (返青水+灌浆水) 产量和水分利用效率均达到最优, 分别为 8.848 t/hm² 和 2.18~2.43 kg/m³。研究结果可为准确评估农田地下水贡献量以及精量灌溉决策与管理提供技术支撑。

关键词: 冬小麦; 地下水; 补给量; 地下水临界埋深; AquaCrop 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406082

中图分类号: S274; S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0101-11

薛歆, 蔡甲冰, 于颖多, 等. 冬小麦生育期地下水补给量表征及水位阈值试验研究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 101-111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406082 <http://www.tcsae.org>

XUE Xin, CAI Jiabing, YU Yingduo, et al. Quantifying groundwater contributions and threshold in the growth stages for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 101-111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406082 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

提高水资源利用效率、合理利用各类水资源, 是缓解中国水资源紧缺和促进农业可持续发展的战略选择。地下水作为农业生产中的重要水源, 合理利用可保障作物生长所需水分供应; 尤其在干旱半干旱地区地下水补给可增加土壤水分储备, 提高作物抗旱能力^[1-2], 保障产量的稳定性^[3]。因此, 精量表征地下水补给量并探求作物生长的适宜地下水水位阈值, 可明晰并量化农田水循环过程, 为实施科学灌溉提供技术支撑。

地下水补给量是土壤蒸发和植被蒸腾引起的地下水通过毛细作用上升的向上通量^[4]。地下水埋深决定了地下水参与 SPAC 系统水分运动的程度, 探寻作物生

长的临界地下水水位埋深对于合理调控地下水位、使作物最大限度的利用地下水进行补给以及实现高效节水增产具有重要意义^[5]。目前计算地下水补给量的方法大致分为经验模型和机理模型法^[6]。经验模型通过解析地下水补给量与水位埋深、土壤质地等因素之间的关系来提出经验方法、构建经验函数关系式^[7-8]。基于此, 有学者通过田间试验建立土壤容重、黏粒含量、初始含水率、地下水埋深、时间等因素与上升毛管水补给量之间的经验公式, 反映地下水补给量与各因素间的量化关系^[9-10]。此外, 1977 年 DOORENBOS 和 PRUITT 提出了最流行的地下水补给量估算方法, 该方法的简化关系可以根据根系土壤水分储存量变化计算地下水补给量; 由于农田土壤水分处于动态变化之中, WANG 等^[11]考虑了灌溉和降雨对地下水补给的影响, 提出了一种综合考虑静态因素 (作物生长阶段、土壤质地)、动态因素 (土壤水分) 和高度可变因素 (气候条件、地下水埋深) 的估算方法, 定量计算区域地下水补给量。利用经验公式估算地下水补给量大多建立在观测数据统计分析的基础上, 形式简单、参数较少, 但地下水蒸发过程具有复杂性和高度非线性^[12], 尺度扩展性受限。

收稿日期: 2024-06-12 修订日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52130906; 51979286); 内蒙古科技兴蒙项目 (NMKJXM202301-3)

作者简介: 薛 歆, 研究方向为精量灌溉决策技术与理论。

Email: liebe122@163.com

*通信作者: 蔡甲冰, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为灌区灌溉用水管理理论与技术。Email: caijb@iwhr.com

机理模型法基于水量平衡原理,利用土壤水分运移方程的解析解或数值解计算地下水补给量。利用机理模型估算地下水补给量通常不受研究区地域限制,精度较高,不仅可以缩短试验周期、节约成本,还可以考虑多种因素间的相互作用,排除干扰因素,厘清试验因素间的真正关系^[13-14]。Hydrus 系列模型基于 Richards 方程能较为准确地反映土壤水与地下水的互补关系,在模拟农田水分运移方面具有可靠的精度,可处理复杂的边界条件,但该类模型未将作物的生长过程考虑在内,不能直接模拟作物产量,难以优化作物水分利用效率^[15-16]。为弥补这一缺陷,实现水分动态和作物生长的同步模拟,许多学者利用作物生长模型或多种模型耦合的方式估算地下水补给量。如刘钰等^[17]利用一维土壤水动力学模型 (water and agrochemicals in the soil and vadose environment, WAVE) 模拟不同地下水位埋深和作物不同腾发量条件下根区底部上升通量的变化,归纳出计算地下水毛管上升通量的简化方法。此外,农业生产系统模拟模型 (agricultural production systems simulator, APSIM)^[3]、土壤-水-大气-作物模型 (soil-water-atmosphere-plant, SWAP)^[18]、农业技术转让决策支持系统 (decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)^[19]、作物-水生产力水分驱动模型 (FAO crop model to simulate yield response to water, AquaCrop)^[20-21] 等均可实现水文和生态过程的耦合模拟。其中 AquaCrop 模型需要的输入信息更少、操作简捷及适用范围广,在参数不易获得的地区更具有优势^[22-23]。

为明晰冬小麦生育期生长发育过程和量化地下水贡献量,本文利用 24 个群集式大型蒸渗仪开展不同地下水位和不同灌溉制度的田间试验以对 AquaCrop 模型进行参数率定和校验,以冬小麦土壤含水率、冠层覆盖度、生物量和籽粒产量为评价指标,通过设置不同灌溉制度和地下水位埋深情景,模拟冬小麦的生长发育和土壤水分动态变化过程;进而分析冬小麦生育期地下水补给量并进行量化表征,并获得不同生育期地下水水位临界埋深和适宜阈值,为水资源高效利用和农业灌溉管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区情况与试验处理

试验在北京市国家节水灌溉工程技术研究中心大兴试验研究基地 (39°37.25'N, 116°25.21'E) 开展。本区属半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 12.1℃,日照时数 2 600 h 左右,多年平均降雨为 556 mm,主要集中于 6—8 月。研究区种植模式为冬小麦-夏玉米连作,蒸渗仪内土体土壤类型以粉壤土为主,其基本物理性质见表 1。

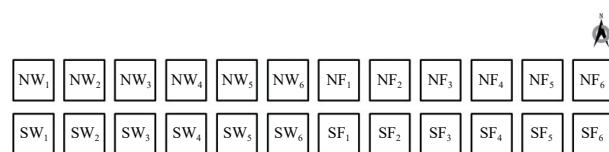
试验观测在 2021—2022、2022—2023 年冬小麦主要生育期 (3—6 月) 进行,两季冬小麦生育期内的平均最高气温分别为 15.1、15.9℃,平均最低气温为 1.3、

1.5℃,相差不大。供试小麦品种为济麦 21,于每年 10 月中旬播种,次年 6 月中旬收获。群集式大型蒸渗仪包括 12 个称重式蒸渗仪 (2.0 m×2.0 m×2.4 m) 和 12 个非称重式蒸渗仪 (2.0 m×2.0 m×3.5 m),其中非称重式蒸渗仪配备地下供排水装置以控制作物生长过程中地下水水位。群集式蒸渗仪分布图及冬小麦研究区图见图 1。

表 1 蒸渗仪内土体基本物理特性
Table 1 Main physical properties of soil in lysimeters

土层厚度 Soil layer/m	土壤粒径质量分数 Soil particle size mass fraction/%			干容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	凋萎点 Wilting point/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水量 Saturated water content/ (cm ³ ·cm ⁻³)
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand				
0~0.6	20	77.1	2.9	1.43	0.14	0.32	0.43
>0.6~1.3	27	68.9	4.1	1.54	0.18	0.33	0.40
>1.3~2.4	8	90.1	0.9	1.38	0.23	0.41	0.44
>2.4~3.3	10	78.5	11.5	1.48	0.14	0.33	0.43

为排除降雨对作物生育期水量平衡的影响,在冬小麦返青后试验观测期内降雨时用挡雨棚进行遮挡。参考当地灌水经验在冬小麦返青后设置 3 种灌溉处理,分为 Ia 处理 (返青后灌 3 水即正常水分条件)、Ib 处理 (返青后灌 2 水即轻度水分胁迫) 和 Ic 处理 (返青后灌 1 水即重度水分胁迫)。2021—2022 年每个灌溉处理 4 个重复,2022—2023 年每个处理 3 个重复 (增设 1 个裸土处理本文不做数据分析)。因只有 12 组蒸渗仪+供排水系统,地下水位埋深控制条件设置情况为 2021—2022 年度 1.0、1.5、2.0 m,和 2022—2023 年度的 0.7、1.3、1.8 m,每个深度 2 个重复。其中 2021—2022 年度因追肥在灌浆-成熟期全部处理多补充灌水 45 mm,具体数据见表 2。



a. 24 个蒸渗仪分布示意图
a. Distribution schematic of 24 lysimeters



b. 冬小麦研究区图
b. Map of winter wheat research area



c. 蒸渗仪地下水供排水装置
c. Groundwater supply and drainage device for lysimeter

注: 北 N, 南 S, 称重式蒸渗仪 W, 非称重式蒸渗仪 F, 由西向东编号依次为 1-6。

Note: N is north, S is south, W is the weighing lysimeter, F is the non-weighing lysimeter. And the numbers are 1 to 6 from west to east.

图 1 群集式大型蒸渗仪试验设施及冬小麦试验小区分布
Fig.1 Distribution and main instruments of cluster lysimeters for winter wheat experiment

表 2 冬小麦灌溉试验处理和地下水水位设置水平
Table 2 Irrigation treatments and groundwater table controls of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	灌水定额 Irrigating quota on each application/mm					灌溉定额 Irrigation quota/mm	蒸渗仪编号 Lysimeter number
		冬灌 Winter irrigation (11-11)	返青-拔节期 Reviving-Jointing (03-08—04-14)	拔节-抽穗期 Jointing-Heading (04-15—04-29)	抽穗-灌浆期 Heading-Filling (04-30—05-18)	灌浆-成熟期 Filling-Harvesting (05-19—06-10)		
2021— 2022	Ia	90.0	67.5	67.5	75.0	45.0	345.0	NW1/NW5/SW1/SW6
	Ib	90.0	67.5	75.0		45.0	277.5	NW2/NW3/SW4/SW5
	Ic	90.0	75.0			45.0	210.0	NW4/NW6/SW2/SW3
	Ib _{1.0} ; Ib _{1.5} ; Ib _{2.0}	90.0	67.5	75.0		45.0	277.5	NF6/SF4; NF5/SF6; NF4/SF3
	Ic _{1.0} ; Ic _{1.5} ; Ic _{2.0}	90.0	75.0			45.0	210.0	NF3/SF2; NF2/SF5; NF1/SF1
2022— 2023	Ia	75.0	67.5	67.5	75.0		285.0	NW2/NW4/SW1/NW3 (裸土)
	Ib	75.0	67.5	75.0			217.5	NW1/SW2/SW5/NW5 (裸土)
	Ic	75.0	75.0				150.0	NW6/SW3/SW6/SW4 (裸土)
	Ia _{0.7} ; Ia _{1.3} ; Ia _{1.8}	75.0	67.5	67.5	75.0		285.0	NF6/SF4; NF5/SF6; NF4/SF3
	Ic _{0.7} ; Ic _{1.3} ; Ic _{1.8}	75.0	75.0				150.0	NF3/SF2; NF2/SF5; NF1/SF1

注：Ia、Ib 和 Ic 分别代表冬小麦在返青后灌 3 水、2 水和 1 水，2021—2022 年全部处理因追肥在灌浆-成熟期多补充灌水 45 mm；灌水处理角标代表地下水水位埋深，m。

Note: Ia, Ib and Ic represent that winter wheat were treated with 3 irrigations, 2 irrigations and 1 irrigation after reviving, respectively. Specially in 2021—2022, all treatments received an additional irrigation water of 45 mm during the filling - harvesting period due to topdressing. The subscript of the irrigation treatment represents the depth of the groundwater level in meter.

1.2 观测指标

利用大兴试验站 TRM-ZS1 型自动气象站采集空气温度、相对湿度、风向、风速、太阳辐射等，时间间隔 0.5 h，以计算参考作物腾发量 ET_0 。称重式蒸渗仪测量土体总质量，采集间隔 30 min。利用内置的 Hydra Probe II 和 SM10D 土壤水分传感器测定土壤含水率，其中称重式蒸渗仪测定深度为 10、20、40、60、100、150、210、240 cm，非称重式蒸渗仪为 10、20、40、60、100、150、210、240、270、300、330 cm。试验期内地下水供排水装置每 0.5 h 自动监测 12 个非称重式蒸渗仪进出水量，可换算为地下水实际贡献量。

冠层覆盖度 (canopy coverage, C_c) 代表作物叶片的发育程度。在小区选取 3 株代表性植株并标记，平均每 5 d 人工测量植株叶片的最大长度和宽度，采用折算法推求叶面积指数 (leaf area index, LAI) [24]， C_c 由 LAI 与其之间关系式转换计算得到 [25]：

$$LAI = K\rho \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n (L_{ij}B_{ij})}{3} \quad (1)$$

$$C_c = 1.005[1 - \exp(-0.6LAI)]^{1.2} \quad (2)$$

式中 K 为折算系数； ρ 为种植密度，株/ m^2 ； n 为第 i 株作物的叶片总数； L_{ij} 和 B_{ij} 分别第 i 株作物，第 j 个叶片的长度和最大宽度，m。

地上部生物量在试验时段内每隔 7 d 测量一次，选取 10 cm 长度长势均匀的植株，从地表截取地上部分放入烘箱 105 °C 杀青 1 h 后，用 75 °C 恒温烘至质量恒定并称量。在作物成熟期各小区选取 1 m^2 植株风干后人工脱粒，测定其穗籽粒质量并换算产量。

1.3 AquaCrop 模型数据库特征参数

AquaCrop 模型基于完善的作物水分生产理论与函数关系，预测不同水分供给条件下农作物可获得的产量，需要输入气象、作物、土壤、地下水和田间管理等参数 [26]。模型通过综合考虑这些参数实现土壤水平衡计算并将其与作物生长模拟相结合以评估作物对水分胁迫

的反应和产量潜力，具体计算见式 (3) [27]。

$$W_{r,t+1} = W_{r,t} + I + P - R_o + C_R - E - T_r - D_p \quad (3)$$

式中 $W_{r,t+1}$ 和 $W_{r,t}$ 为 $t+1$ 时刻和 t 时刻的土壤根区含水量，mm； I 为灌溉量，mm； P 为降雨量，mm； R_o 为地表径流损失量，mm； C_R 为地下水补给量，mm； E 为土壤蒸发量，mm； T_r 为作物蒸腾量，mm； D_p 为深层渗漏量，mm。

当地下水位埋深小于 4 m 时启动地下水模块 [21]，地下水通过毛细上升通量提供给作物根系以满足作物水分供应，模型中通过输入恒定或变化的地下水位埋深来估算地下水对作物需耗水的补给，具体计算见式 (4) [27]。

$$C_R = \exp\left(\frac{\ln(z) - b}{a}\right) \quad (4)$$

式中 z 代表地下水位相对于土壤表面的深度，m； a 、 b 是特定参数。由于地下水补给受土壤水分保持曲线形状和水力传导度与土壤含水量关系的强烈影响，参数 a 、 b 随着土壤质地不同而改变，蒸渗仪土壤类型为粉壤土， $a = -0.4986 + 9 \times (10^{-5})K_{sat}$ ， $b = -2.1320 + 0.4778 \ln K_{sat}$ ， K_{sat} 是土壤饱和导水率，结合研究区土质和 AquaCrop 模型给定取值范围，本文 K_{sat} 取 575 mm/d [27]。

模型模拟所需气象数据来源于试验站安装的自动观测气象站。作物参数中的保守参数不随地理位置、种植时间和管理措施等改变，非保守参数如种植密度、冠层覆盖度、冠层增长系数和衰减系数等采用田间试验数据驱动模型，以土壤含水率、冠层覆盖度、生物量和产量为指标，依据 AquaCrop 模型给定参考值和 FAO-56 提供的冬小麦参数取值范围进行校正。土壤参数包括土层厚度、土壤类型、干容重、凋萎点、田间持水量、饱和含水量和饱和水力传导度等。田间管理参数包括田间措施和灌溉制度两方面。模型输出主要包括土壤含水率变化过程、冠层覆盖度发育过程、地上生物量积累过程及最终产量等。本研究中 AquaCrop 模型参数取值见表 3。

1.4 模型评价指标

本文选用统计参数决定系数 (coefficient of determination, R^2)、相对误差 (relative error, RE)、均方根

误差 (root mean square error, RMSE) 和标准化均方根误差 (normalized root mean square error, NRMSE) 对模型

精度进行评价。其中 R^2 越接近 1、RE、RMSE 和 NRMSE 越小, 说明模型模拟效果越好, 数据越接近真实值。

表 3 冬小麦 AquaCrop 模型特征参数取值
Table 3 Values of main parameters in AquaCrop model for winter wheat

基本作物参数 Basic parameter	取值 Value	水分胁迫参数 Water stress parameter	取值 Value
基底温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	水分胁迫对冠层生长影响上限	0.2
上限温度/ $^{\circ}\text{C}$	26	水分胁迫对冠层生长影响下限	0.65
最大冠层覆盖度/%	99	冠层扩张的水分胁迫形状因子	5.0
冠层增长系数/ $(\% \cdot \text{d}^{-1})$	3.0	水分胁迫对气孔关闭影响上限	0.65
冠层衰减系数/ $(\% \cdot \text{d}^{-1})$	11.6	气孔关闭的水分胁迫形状因子	2.5
播种到出苗所需有效积温/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$	123	水分胁迫对冠层衰老影响上限	0.7
播种到开始衰老所需有效积温/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$	1388	冠层衰老的水分胁迫形状因子	2.5
播种到成熟所需有效积温/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$	1763		
播种到开花所需有效积温/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$	1095		
播种到达最大根深所需有效积温/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$	486		
最大有效根深/m	0.8		
最大作物系数	1.1		
归一化干物质水分生产力/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	20		
参考收获指数/%	50		

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型率定与校验

以 2021—2022 年度田间试验数据对模型特征参数进行适应性调整和修正, 利用 2022—2023 年试验数据进行模拟效果检验。选择冬小麦根区土壤含水率、冠层覆盖度、生物量和产量为 AquaCrop 模型率定及校验效果的对比指标。

图 2 为 AquaCrop 模型率定过程中各个处理所模拟

的土壤含水率、冠层覆盖度和生物量与实测值对比。当地下水位埋深小于 1 m 时, 根区土壤含水率取 0~60 cm 平均土壤含水率, 其余处理均取 0~100 cm 平均土壤含水率。由图 2 可见土壤含水率模拟值与实测值比较接近, R^2 在 0.83~0.97 之间, RE 为 2.40%~5.15%, RMSE 均为 $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, NRMSE 为 3.20%~6.29%。在相同的灌水方式下, 有地下水控制的处理模拟误差较小, Ib 处理的相对误差最大为 5.15%。

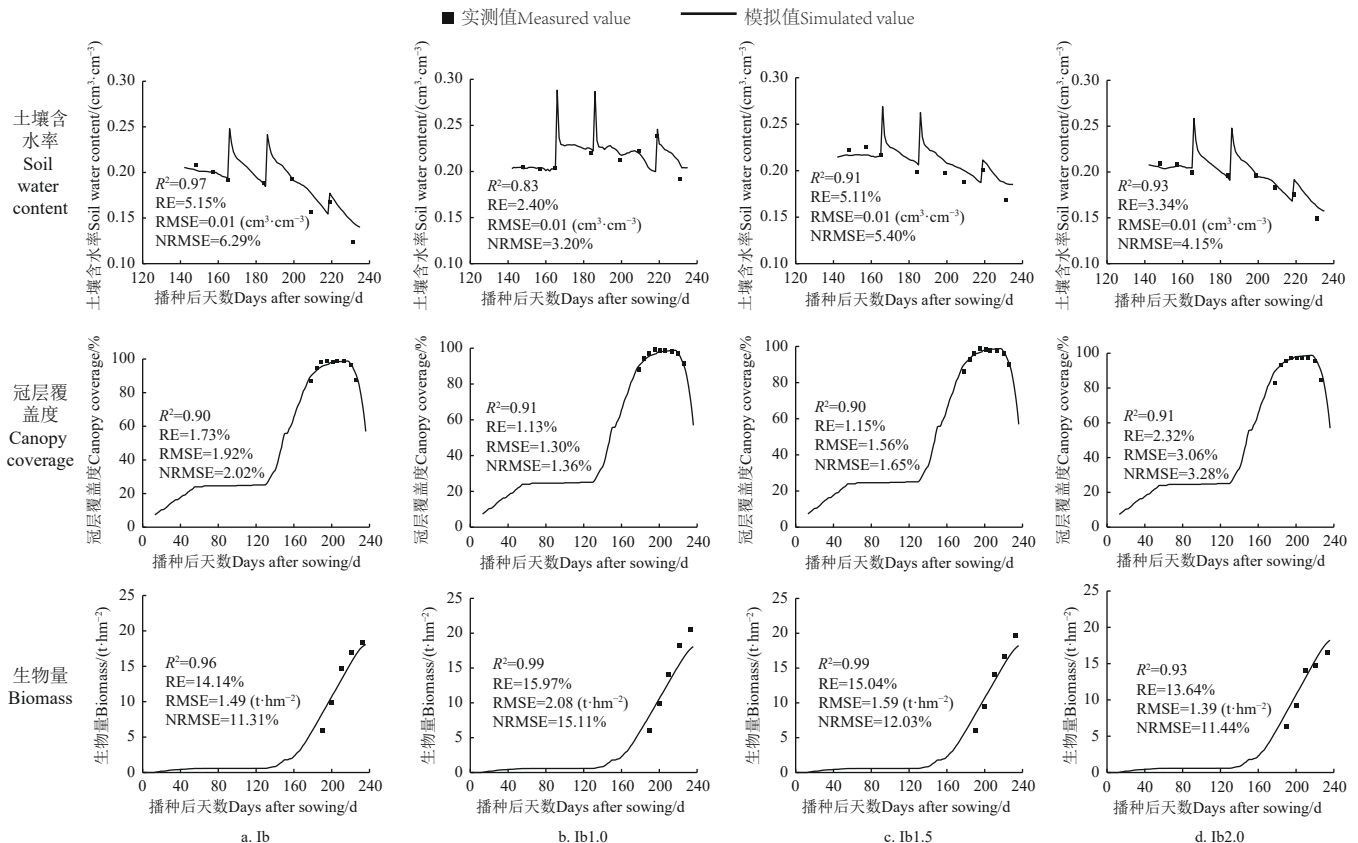


图 2 AquaCrop 模型率定过程中冬小麦土壤含水率、冠层覆盖度和生物量模拟值与实测值对比 (2021—2022)

Fig.2 Comparisons of simulated and measured values of soil moisture content, canopy coverage and biomass during AquaCrop model calibration process for winter wheat in 2021 — 2022

冬小麦出苗后冠层缓慢生长发育，进入越冬期后，冠层生长停滞；返青期后冠层快速生长，约在抽穗期达到最大冠层覆盖度。随着冬小麦逐渐成熟，冠层覆盖度逐渐降低。所有处理冠层覆盖度模拟值与实测值的 R^2 、RE、RMSE 和 NRMSE 的范围分别为 0.90~0.91、1.13%~2.32%、1.30%~3.06%、1.36%~3.28%，模型模拟误差较小。冬小麦生物量在播种后缓慢增长，至越冬期一直维持在较低水平，返青后出现大幅增长。冬小麦生物量所有处理的 R^2 、RE、RMSE 和 NRMSE 分别为 0.93~0.99、13.64%~15.97%、1.39~2.08t/hm²、11.31%~15.11%，模拟值与实测值变化趋势基本一致，模拟值能反映生物量在生育期内的变化过程。

图 3 为 AquaCrop 模型率定过程中产量模拟值与实测值的对比图。冬小麦籽粒产量所有处理模拟值与实测值的 R^2 、RE、RMSE 和 NRMSE 分别为 0.85、1.97%、0.23 t/hm²、2.58%，模型模拟误差较小，AquaCrop 模型能够较好地反映冬小麦实际产量水平。

以 2022—2023 年数据对 AquaCrop 模型校验的统计参数如表 4 所示。Ia、Ia_{0.7}、Ia_{1.3}、Ia_{1.8} 处理土壤含水率模拟值与实测值的 RE 分别为 5.40%、2.50%、3.33% 和 4.61%，可见当地下水位埋深不断增加时，模型模拟误差

加大，模型精度随着所受水分胁迫的增加而减小。所有处理生物量和产量的模拟值与实测值间统计参数 R^2 均不小于 0.85、RE 不大于 13.95%、NRMSE 不大于 14.88%，模拟精度较好。冠层覆盖度模拟值与实测值的 R^2 、RE、RMSE 和 NRMSE 的范围分别为 0.91~0.95、1.17%~1.38%、1.40%~1.66%、1.45%~1.76%，模拟效果最好。以上结果表明，AquaCrop 模型可很好的模拟不同灌溉制度和地下水位埋深条件下的冬小麦生长生产过程。

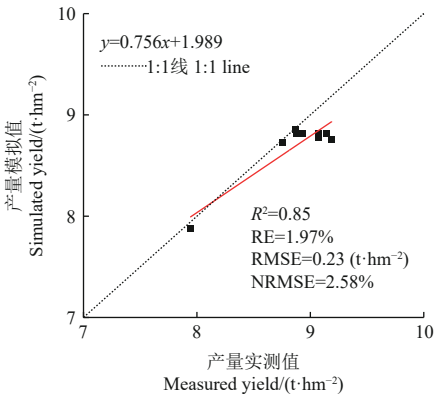


图 3 冬小麦产量模拟值与实测值对比（2021—2022）
Fig.3 Comparison between simulated and measured values of winter wheat yield in 2021 2022

表 4 2022—2023 年冬小麦 AquaCrop 模型校验结果
Table 4 Verification results of AquaCrop model for winter wheat in 2022—2023

指标 Index	土壤含水率 Soil water content/ (cm ³ ·cm ⁻³)				冠层覆盖度 Canopy coverage/%				生物量 Biomass/ (t·hm ⁻²)				产量 Yield/ (t·hm ⁻²)
	Ia	Ia _{0.7}	Ia _{1.3}	Ia _{1.8}	Ia	Ia _{0.7}	Ia _{1.3}	Ia _{1.8}	Ia	Ia _{0.7}	Ia _{1.3}	Ia _{1.8}	
R^2	0.85	0.95	0.80	0.84	0.95	0.92	0.91	0.92	0.97	0.95	0.99	0.96	0.85
RE/%	5.40	2.50	3.33	4.61	1.30	1.35	1.17	1.38	10.81	10.38	9.36	13.95	9.69
RMSE	0.01	0.01	0.01	0.01	1.59	1.57	1.40	1.66	1.82	1.63	1.50	1.78	0.95
NRMSE/%	6.03	3.94	3.74	6.01	1.65	1.64	1.45	1.76	12.54	11.67	10.64	14.88	12.03

2.2 不同情景下冬小麦地下水补给强度数值模拟

利用校核后的 AquaCrop 模型，通过设置不同灌水处理和不同地下水位情景，模拟冬小麦生长发育与土壤水分动态变化过程以量化地下水补给量。本研究参考 2021—2022 年的灌水处理和气象数据，设计了 4 种灌水情景，包括充分灌溉 T1（返青水 67.5 mm + 拔节水 67.5 mm + 抽穗水 75.0 mm + 灌浆水 45.0 mm），和 3 种非充分灌溉（T2 返青水 75.0 mm、T3 返青水 67.5 mm + 拔节水 75.0mm、T4 返青水 75.0 mm + 灌浆水 45.0 mm）；在冬小麦根区 0.4~2.0 m 地下水位埋深间隔 0.2 m（0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 m 共 9 个水平）、2.0~4.0 m 地下水位埋深间隔 0.5 m（2.5、3.0、3.5、4.0 m 共 4 个水平），共设置 13 个地下水位埋深处理。以此交叉组合，共计 52 个不同灌溉制度和不同地下水位的处理，利用 AquaCrop 模型分别进行作物生长过程模拟。

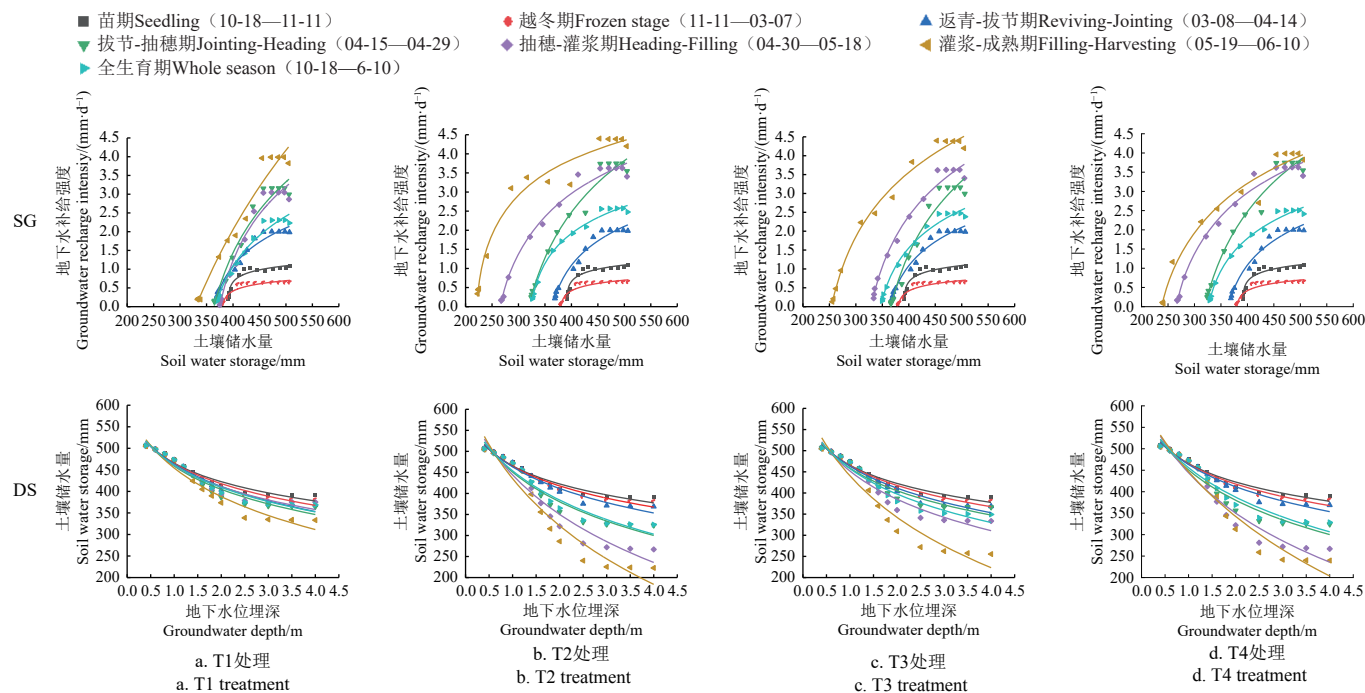
基于上述这 52 种不同处理情景的 AquaCrop 模型模拟结果，对 4 种灌溉处理下冬小麦生育期土壤储水量—地下水补给强度和地下水位埋深—土壤储水量之间分别进行回归分析，结果见图 4 所示。由图 4 中可见，当地下水位埋深水平处于 0.4~4.0 m 范围内时，土壤储水量

和地下水补给强度呈现正相关，地下水位埋深和土壤储水量呈现负相关，回归趋势线均成对数关系。4 种灌水处理下冬小麦地下水补给强度均在灌浆-成熟期达到最大；在充分灌溉条件下土壤储水量基础值较高，地下水补给土壤水量随着水位埋深的增加而减小，地下水位埋深越大，地下水对土壤和作物生长的影响越小，由于充分灌溉在抽穗-灌浆期补充灌水，相较其他处理，该时期需要较少的地下水补给就能满足作物需水要求；非充分灌溉条件下，当土壤储水量相同时，灌水量越少，地下水埋深越浅，地下水补给强度越大。表 5 给出 T1 和 T4 灌溉处理不同生育阶段两组变量之间回归关系式中各个参数的具体数值。

为检验回归方程的准确性，需利用 13 种地下水位埋深水平情景之外的冬小麦生育期地下水位埋深实测数据进行验证，因此选用 2022 年 1.5 m 埋深和 2023 年 0.7 m、1.3 m 埋深下的实测补给强度对 T1 和 T4 两种灌溉处理下模拟情景结果的回归方程进行检验。回归方程的地下水补给强度计算值与实测值的拟合关系见图 5 所示。可见，在充分灌溉条件下冬小麦地下水补给强度实测值与计算值的 R^2 、RE、RMSE 和 NRMSE 分别为 0.873、

8.9%、0.316 mm/d和 11.8%，非充分灌溉条件下分别为 0.915、9.2%、0.275 mm/d 和 9.1%，统计参数数值较优。由此可以表明拟合的土壤储水量—地下水补给强度和

地下水位埋深—土壤储水量回归方程，能够很好的估算不同灌溉制度和地下水位埋深下的冬小麦地下水补给强度。



注：SG 代表土壤储水量—地下水补给强度；DS 代表地下水位埋深—土壤储水量；T1 为充分灌溉，包括返青水+拔节水+抽穗水+灌浆水（67.5 mm+67.5 mm+75.0 mm+45.0 mm）；T2、T3、T4 为非充分灌溉，分别代表包含了返青水（75.0 mm）、返青水+拔节水（67.5 mm+75.0 mm）、返青水+灌浆水（75.0 mm+45.0 mm）的处理。

Note: SG represents soil water storage-groundwater recharge intensity; DS represents groundwater depth-soil water storage; T1 is the sufficient irrigation treatment with irrigations at reviving, jointing, heading and filling stages(67.5 mm+67.5 mm+75.0 mm+45.0 mm). T2、T3、T4 are the insufficient irrigation treatments, representing irrigation occurred at the reviving stage only(75.0 mm), at the reviving and jointing stages(67.5 mm+75.0 mm), and at the reviving and filling stages(75.0 mm+45.0 mm), respectively.

图4 冬小麦生育期土壤储水量—地下水补给强度和地下水位埋深—土壤储水量回归分析

Fig.4 Regression analysis of soil water storage - groundwater recharge intensity and groundwater depth - soil water storage during winter wheat growth period under 4 irrigation conditions

表5 T1 和 T4 灌溉处理时土壤储水量—地下水补给强度与地下水位埋深—土壤储水量回归方程形式及参数

Table 5 Fitted regression equations of soil water storage - groundwater recharge intensity and groundwater depth - soil water storage under T1 and T4 treatment

生育期 Growth stage	灌溉处理 Irrigation treatment	$y=a_1-b_1 \cdot \ln(s+c_1)$				$s=a_2-b_2 \cdot \ln(x+c_2)$			
		a_1	b_1	c_1	R^2	a_2	b_2	c_2	R^2
苗期 Seedling	T1	0.254	-0.178	-390.490	0.96	474.359	68.067	0.140	0.96
	T4	0.254	-0.178	-390.490	0.96	474.359	68.067	0.140	0.96
越冬期 Frozen stage	T1	-0.069	-0.159	-378.809	0.93	481.548	78.894	0.242	0.97
	T4	-0.069	-0.159	-378.809	0.93	481.548	78.894	0.242	0.97
返青-拔节期 Reviving-Jointing	T1	-2.763	-0.966	-346.315	0.97	496.318	96.421	0.411	0.97
	T4	-2.762	-0.966	-346.622	0.97	496.235	96.168	0.410	0.97
拔节-抽穗期 Jointing-Heading	T1	-8.437	-2.273	-323.084	0.97	479.584	91.999	0.258	0.94
	T4	-8.241	-2.235	-279.340	0.98	500.105	134.017	0.448	0.94
抽穗-灌浆期 Heading-Filling	T1	-5.987	-1.830	-348.628	0.97	475.067	81.564	0.202	0.95
	T4	-5.045	-1.579	-241.356	0.99	570.439	212.913	0.813	0.94
灌浆-成熟期 Filling-Harvesting	T1	-33.650	-6.435	-143.108	0.97	508.393	130.680	0.515	0.95
	T4	-5.925	-1.735	-207.419	0.97	715.140	302.315	1.432	0.94
全生育期 Whole Season	T1	-4.733	-1.403	-337.258	0.98	484.456	90.591	0.296	0.96
	T4	-2.956	-1.050	-309.273	0.99	524.641	142.486	0.621	0.95

注：y 是地下水补给强度，mm/d；s 是土壤储水量，mm；x 是地下水位埋深，m。

Note: y is groundwater recharge intensity, mm/d; s is soil water storage, mm; x is groundwater depth, m.

2.3 冬小麦生育期地下水水位关键阈值

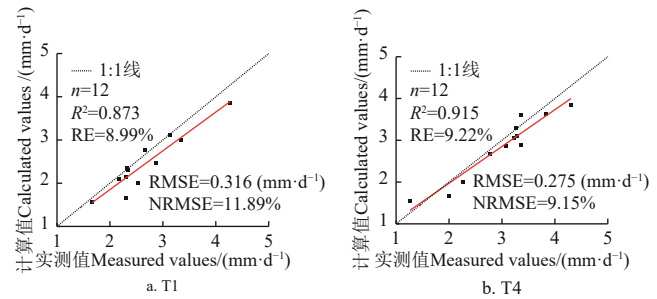
2.3.1 地下水水位临界埋深

地下水水位临界埋深是指地下水不能上升至土壤上层、潜水面开始为零时的地下水水位埋深^[28]，

文章通过联立 2.2 小节中构建的冬小麦生育期土壤储水量—地下水补给强度及地下水位埋深—土壤储水量的回归方程，计算 4 种灌溉处理下冬小麦全生育期和各生育阶段的临界地下水水位埋深。计算结果见表 6 所示。由

表 6 可知, T1、T3 和 T4 处理下冬小麦全生育期临界地下水位埋深分别为 3.38、3.39 和 3.40 m, 冬小麦生育期临界地下水位埋深总体上随着灌水量的增加而降低, 灌溉越少, 地下水补给越强烈, 临界埋深越深; T2 处理由于生育期内只进行了 1 次灌溉补水, 导致作物提前进入成熟期, 生育后期需水减少, 临界地下水水位降低, 全生育期临界水深降低至 3.39 m。4 种灌水处理下的临界地下水水位埋深在冬小麦苗期、越冬期和返青-拔节期相同, 分别为 3.28、3.36 和 3.54 m。返青-拔节期 4 种灌水处理的临界埋深均为最深, 因为该时期处于冬小麦的快速生长期, 需保证其水分供应。返青后因充分灌溉 T1 处理下各个生育期都有灌溉补水, 临界地下水水位埋深相较其他处理较浅, 全生育期临界地下水水位埋深为 3.38 m。在拔节-抽穗期, 4 种灌水处理下的冬小麦临界地下水水位埋深开始出现差异, 非充分灌溉中 T2 和 T4 处理的临界地下水水位埋深为 3.41 m, T3 处理为 3.22 m, 可见由于返青期的灌溉水已被作物消耗和蒸发, 导致需要更深的地下水位为作物提供补给, 侧面反映了拔节-抽穗期是

冬小麦的需水敏感期。在灌浆-成熟期, 地下水补给最为强烈, 地下水水位临界埋深加深; T4 处理在拔节-抽穗期和抽穗-灌浆期面临更高的土壤水分消耗, 导致在灌浆-成熟期需要更深的地下水位才能为作物提供足够补给, 全生育期临界水深加深为 3.41 m。



注: n 为样本个数。
Note: n is the number of samples.

图 5 地下水补给强度回归方程计算值与实测值对比验证
Fig.5 Comparisons of the regression equations for calculated and measured groundwater recharge intensity under 2 irrigation conditions

Table 6 Critical groundwater table of winter wheat in different growth stages under four irrigation conditions								m
灌溉制度 Irrigation Scheduling	苗期 Seedling	越冬期 Frozen stage	返青-拔节期 Reviving-Jointing	拔节-抽穗期 Jointing-Heading	抽穗-灌浆期 Heading-Filling	灌浆-成熟期 Filling-Harvesting	全生育期 Whole Season	
T1	3.28	3.36	3.54	3.25	3.21	3.41	3.38	
T2	3.28	3.36	3.54	3.41	3.37	3.36	3.39	
T3	3.28	3.36	3.54	3.22	3.39	3.38	3.39	
T4	3.28	3.36	3.54	3.41	3.37	3.42	3.41	

2.3.2 冬小麦适宜生长的地下水水位埋深
冬小麦各生育期临界地下水水位埋深所处的环境条件虽能满足冬小麦基本生长需求, 但并非作物产量达到最优时的地下水水位状态。本文为探究冬小麦适宜生长的地下水水位埋深, 对前述 52 组情景模拟数据中冬小麦产量与地下水水位埋深进行对比分析, 结果如图 6 所示。

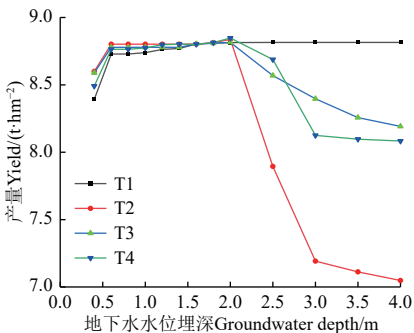


图 6 不同灌溉条件下冬小麦产量与地下水水位埋深拟合曲线
Fig.6 Fitted curves of groundwater depth and gain yield of winter wheat under four irrigation treatments

由图 6 可知, 当地下水位埋深较浅 (小于 0.6 m) 时, 土壤经常处于饱和状态导致土壤含氧量和透气性降低, 对冬小麦根系发育构成障碍, 进而影响产量。随着地下水位埋深的增加, 土壤状态改善, 冬小麦根系发育良好, 产量增加。充分灌溉 T1 条件下, 冬小麦产量随着地下水位埋深的增加而缓慢增加, 直到地下水位埋深达到 2.0 m

时, 产量达到最高, 此后地下水位埋深持续增加, 产量基本保持不变。在 3 种非充分灌溉条件下, 冬小麦产量随灌水量的增加而增加, 在地下水位埋深均在 2.0 m 时, 产量最高, 此时 T2、T3、T4 的产量分别为 8.837、8.815、8.848 t/hm², 说明当地下水位埋深较浅时, 可以通过适当的水分亏缺促进高产。当地下水位埋深大于 2.0 m 时, 灌水量越少, 其产量随着地下水位埋深增加减小的幅度越大, 在 2.5 m 左右下降明显。灌水当地下水位埋深持续增加到 3.0 m 时, 产量减小的幅度趋于平缓。通过计算单位蒸发蒸腾量所产生的作物产量, 得到冬小麦水分利用效率, 可知当地下水位埋深处于 2.0~2.5 m 时, 充分灌溉条件下的水分利用效率为 2.17~2.35 kg/m³, 非充分灌溉 (T2、T3、T4) 的水分利用效率分别为 2.18~2.39 kg/m³、2.17~2.34 kg/m³、2.18~2.43 kg/m³。

综上所述, 为实现冬小麦高产和地下水合理利用的双重目标, 地下水位埋深应控制在 2.0~2.5 m 之间, 此时 T4 处理产量和水分利用效率能够同时达到最优, 分别为 8.848 t/hm² 和 2.18~2.43 kg/m³, 这样既能保证土壤状态适宜冬小麦根系发育, 又能合理利用地下水资源, 实现农业可持续发展。

3 讨论

作物地下水补给量精量表征是制定合理田间水管理制度的前提, 虽有众多学者提出了一系列估算方法, 但

考虑到试验的局限性和实际可操作性, 其应用受到了限制; 本文从冬小麦田间试验出发, 在应用 AquaCrop 模拟结果的基础上, 构建冬小麦生育期地下水补给量经验函数关系式。该方法相对简单, 所需数据容易获得, 具有一定实用性。

AquaCrop 模型可以很好的模拟不同水分条件下冬小麦生长发育和土壤水分动态运移。从本文数据可知, AquaCrop 模型在充分灌溉和地下水位埋深较浅的条件下模型精度高于其他处理, 表明其可以较为精确的模拟没有水分胁迫或轻微胁迫条件下的作物生长发育, 但在严重水分胁迫条件下模拟精度变差^[29]; 同时模型作物参数的选取对模型可靠性影响较大^[30]。基于模型模拟结果构建冬小麦生育期地下水补给量回归方程, 分析得到地下水补给量在冬小麦灌浆-成熟期最大, 因为此时作物根系发育完全。将地下水补给强度田间实测值与计算值对比分析中统计参数较优, 验证了回归方程的准确性, 为后续地下水位关键阈值进一步探究提供支撑。

临界地下水位埋深和适宜作物生长的地下水位埋深均为高度动态参数, 随着作物种类、土壤质地、气象条件和田间管理措施等的变动而变动^[11,31]。对比冬小麦生育期临界地下水位埋深可知, 冬小麦在不同生育期适宜生长的地下水位埋深不同, 最佳地下水位埋深随着冬小麦的生长发育进程而变动。本文冬小麦全生育期临界地下水位埋深范围为 3.38~3.41 m, 超出该范围时, 地下水已基本失去对冬小麦需水的动态调节能力, 与冯绍元等^[32]结论一致。冬小麦生育期临界地下水位埋深虽能满足冬小麦基本生长需求, 但并非产量达到最优时的地下水位埋深, 以产量最优为目标, 冬小麦适宜生长的地下水位埋深阈值在 2.0~2.5 m 之间, 此时更有利于干物质和产量积累; 当地下水位埋深大于 2.0 m 时, 地下水对冬小麦的补给作用不足以弥补因灌水量不足而造成的损失, 最终导致产量降低且减大幅度随埋深的增加先逐渐变大而后趋于平缓^[33]。类似研究在美国玉米带区域, 通过机器学习分析可知, 该区 1.1~2.5 m 深度为地下水对产量影响的增产区域 (补贴区域); 当地下水位处于此深度时, 产量高于自由排水条件下的基线产量, 而地下水位浅于 1.1 m 时, 产量会下降^[3]。因此开展地下水水位的适宜阈值研究和确定, 对于本区的作物生产具有很好的指导作用。

本研究通过两年地下水补给观测试验数据, 探究冬小麦生育期地下水补给量量化表征, 其结果可在相同或类似土质地区应用, 为区域水文模型构建和水量平衡计算提供支持。在生产实践中, 发展节水高产农业, 需要寻求产量最大和地下水利用率最高两者的最佳结合点, 综合运用各种措施调控地下水运移, 在满足作物需水的同时, 达到合理高效利用水资源的目标。鉴于随机降雨会对当前灌溉制度和地下水补给产生影响^[34], 本试验排除降雨干扰以确保地下水补给量测定的准确性; 后期研究中可考虑研究区降雨因素影响, 进一步探究随机降雨和灌溉条件下地下水补给量优化经验公式。同时由于条件所限, 缺少更深的地下水位埋深水平的数据以及验证

数据, 因此如有适宜的试验设施, 可进一步探索作物生长对更深层地下水的利用情况。

4 结 论

本研究利用群集式蒸渗仪的冬小麦田间试验数据对 AquaCrop 模型进行了率定和校验, 模拟了不同灌溉处理、不同地下水位下的冬小麦生长过程, 分析得到冬小麦生育期地下水水位临界埋深以及适宜生长的埋深阈值。主要结论如下:

1) 利用 2 a 不同地下水位和灌溉处理下的冬小麦试验数据对 AquaCrop 模型进行率定和校验。冬小麦不同处理土壤含水率、冠层覆盖度、生物量和产量模拟值与实测值之间统计参数可同时达到决定系数不小于 0.8、相对误差和标准化均方根误差均小于 16%, AquaCrop 模型能够较好模拟冬小麦生长发育。AquaCrop 模型能够较好模拟冬小麦生长发育过程。

2) 利用校验后的 AquaCrop 模型对 52 种不同灌溉处理和地下水位情景下的冬小麦生长过程进行模拟, 分析得到 4 种灌溉处理下冬小麦生育期土壤储水量—地下水补给强度和地下水位埋深—土壤储水量的非线性回归方程。回归趋势线均成对数关系, 且冬小麦在灌浆-成熟期地下水补给强度最大。利用田间实测地下水补给强度值与计算值对比, 决定系数均在 0.873 及以上、相对误差不大于 9.22%、均方根误差不大于 0.316 mm/d、标准化均方根误差不大于 11.89%, 模型统计参数较优, 表明拟合的回归方程可估算不同灌溉制度和地下水位埋深下的冬小麦地下水补给强度。

3) 通过冬小麦生育期地下水补给量估算模型, 计算获得冬小麦苗期、越冬期和返青-拔节期的临界埋深分别为 3.28、3.36 和 3.54 m; 临界地下水位埋深随着灌水量的增加而降低, T1 (充分灌溉) 处理全生育期为 3.38 m, 不同生育期的非充分灌溉处理临界埋深不同, 其中 T2 (返青水) 处理由于生育期内仅进行 1 次补充灌水, 导致作物提前进入成熟期, 生育后期需水减少, 全生育期临界地下水位降低至 3.39 m, 其他处理灌溉越少地下水补给越强烈, 临界埋深越深。

4) 通过分析 52 种情景模拟下冬小麦产量与地下水水位埋深之间的关系, 得到冬小麦适宜生长的最优地下水位埋深阈值为 2.0~2.5 m, 此时非充分灌溉的 T4 (返青水+灌浆水) 处理产量和水分利用效率均达到最优, 分别为 8.848 t/hm² 和 2.18~2.43 kg/m³。

[参 考 文 献]

- [1] ZHANG W C, ZHU J Q, ZHOU X G, et al. Effects of shallow groundwater table and fertilization level on soil physicochemical properties, enzyme activities, and winter wheat yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 307-317.
- [2] RONG Y, DAI X Q, WANG W S, et al. Dependence of evapotranspiration validity on shallow groundwater in arid area—a three years field observation experiment[J]. *Agricultural*

- [Water Management](#), 2023, 286: 108411.
- [3] DEINES J M, ARCHONTOULIS S V, HUBER I, et al. Observational evidence for groundwater influence on crop yields in United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(36): 2-9.
 - [4] JORENUSH M H, SEPASKHAH A R, et al. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions[J]. [Agricultural Water Management](#), 2003, 61(2): 125-141.
 - [5] 杨建峰, 李宝庆, 李运生, 等. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用初步研究[J]. *水利学报*, 1999(7): 28-33.
YANG Jianfeng, LI Baoqing, LI Yunsheng, et al. Preliminary studies on groundwater effects on SPAC sysstem in shallow groundwater field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999 (7): 28-33. (in Chinese with English abstract)
 - [6] LIU T G, Luo Y. An empirical approach simulating evapotranspiration from groundwater under different soil water conditions[J]. [Environmental Earth Sciences](#), 2012, 67(5): 1345-1355.
 - [7] ZAMMOURI M. Case study of water table evaporation at Ichkeul Marshes (Tunisia)[J]. [Journal of Irrigation and Drainage Engineering](#), 2001, 127: 265-271.
 - [8] LIU Y, PEREIRA L S, FERNANDO R M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation[J]. [Agricultural Water Management](#), 2006, 84: 27-40.
 - [9] 钟韵, 费良军, 傅渝亮, 等. 多因素影响下土壤上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 83-89.
ZHONG Yun, FEI Liangjun, FU Yuliang, et al. HYDRUS simulation and verification of movement characteristics of upward capillary water flow in soil as affected by multi-factor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(5): 83-89. (in Chinese with English abstract)
 - [10] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学学报*, 2014, 32(7): 617-624.
LIU Zhandong, LIU Zugui, YU Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME)*, 2014, 32(7): 617-624. (in Chinese with English abstract)
 - [11] WANG X W, HUO Z, FENG S Y, et al. Estimating groundwater evapotranspiration from irrigated cropland incorporating root zone soil texture and moisture dynamics[J]. [Journal of Hydrology](#), 2016, 543: 501-509.
 - [12] QIU J X, ZIPPER S C, MOTEW M, et al. Nonlinear groundwater influence on biophysical indicators of ecosystem services[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 475 – 483.
 - [13] PISA P R, PRETI F, ROSSI M, et al. Water, soil and chemical losses: field experiments and model analysis[J]. [Water Science and Technology](#), 1999, 39(3): 93-102.
 - [14] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 128-136.
HAO Yuanyuan, XU Xu, HUANG Quanzhong, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(20): 128-136. (in Chinese with English abstract)
 - [15] 杨锋, 和玉璞, 洪大林, 等. 基于 Hydrus-1D 模型模拟灌排调控稻田地下水补给过程[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(11): 90-97.
YANG Feng, HE Yupu, HONG Dalin, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on the capillary rise in paddy fields simulated using the HYDRUS-1D model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(11): 90-97. (in Chinese with English abstract)
 - [16] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 利用 HYDRUS-2D 模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态与根系吸水[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 23-32.
DING Yuntao, CHENG Yu, ZHANG Tibin, et al. Modeling of dynamics of deep soil water and root uptake of maize with mulched drip irrigations using HYDRUS-2D[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(3): 23-32. (in Chinese with English abstract)
 - [17] 刘钰, 蔡林根, R. M. Fernando, 等. 作物根区底部土壤水分向上运移通量的计算方法[J]. *水利学报*, 2001(12): 19-25.
LIU Yu, CAI Lingen, FERNANDO R M, et al. Calculation method of the soil water upword flux at the botton boundary of the root zone[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(12): 19-25. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 冯绍元, 马英, 霍再林, 等. 非充分灌溉条件下农田水分转化 SWAP 模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 60-68.
FENG Shaoyuan, MA Ying, HUO Zailin, et al. Simulation study of field water transformation under deficit irrigation with SWAP model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(4): 60-68. (in Chinese with English abstract)
 - [19] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 138-150.
YAO Ning, ZHOU Yuangang, SONG Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT-CERES-Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stress at different growth stages[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(12): 138-150. (in Chinese with English abstract)
 - [20] 田旖旎, 邵东国, 李思明, 等. 东北寒区水稻需水对地下

- 水埋深的响应及灌溉模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 68-77.
- TIAN Yini, SHAO Dongguo, LI Siming, et al. Response of rice water requirement to groundwater depths and irrigations simulation in cold region of Northeast China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 68-77. (in Chinese with English abstract)
- [21] 罗纨, 张裕, 杨星, 等. 江苏沿海垦区暗管排水对冬小麦产量的影响模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 83-91.
- LUO Wan, ZHANG Yu, YANG Xing, et al. Simulating the effects of subsurface drainage on winter wheat yield in coastal reclamation areas of Jiangsu, Chian[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 83-91. (in Chinese with English abstract)
- [22] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop-the fao crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426-437.
- [23] VANUYTRECHT E, RAES D, STEDUTO P, et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model[J]. Environment Modelling & Software, 2014, 62: 351-360.
- [24] 肖春安, 蔡甲冰, 常宏芳, 等. 考虑作物生长状态的农田表面温度数据精量甄别与区分[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 89-101.
- XIAO Chun'an, CAI Jiabing, CHANG Hongfang, et al. Precision data screening and partition of field surface temperature based on the crop growth status[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(22): 89-101. (in Chinese with English abstract)
- [25] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 238-246.
- PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Simulation for regional water consumption and optimization of irrigation schedule for winter wheat in North China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 238-246. (in Chinese with English abstract)
- [26] RAES D, STEDUTO P, HSIAO T C, et al. AquaCrop-the fao crop model to simulate yield response to water: II. algorithms and software description[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 438-447.
- [27] RAES D, STEDUTO P, HSIAO T C, et al. AquaCrop calculation procedures reference manual, Prototype v. 7.1[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023: 55-63.
- [28] 杨建锋, 万书勤, 邓伟, 等. 地下水浅埋条件下包气带水和溶质运移数值模拟研究述评[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 158-165.
- YANG Jianfeng, WAN Shuqin, DENG Wei, et al. Review of numerical simulation of soil water flow and solute transport in the presence of water table[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 158-165. (in Chinese with English abstract)
- [29] 朱成立, 徐雨琳, 黄明逸, 等. 基于 AquaCrop 模型的冬小麦咸淡水轮灌制度模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 330-342.
- ZHU Chengli, XU Yulin, HUANG Mingyi, et al. Simulation and evaluation of cycle irrigation with brackish and fresh water for winter wheat based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 330-342. (in Chinese with English abstract)
- [30] SHIRAZI S Z, MEI X R, LIU B C, et al. Assessment of the AquaCrop model under different irrigation scenarios in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 257: 107120.
- [31] XU X, HUANG G H, SUN C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 125: 46-60.
- [32] 冯绍元, 郑燕燕, 霍再林, 等. 冬小麦生长条件下土壤水与地下水转化试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 1-5.
- FENG Shaoyuan, ZHENG Yanyan, HUO Zailin, et al. Transformation between soil water and groundwater under the condition of winter wheat planting[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [33] 乔冬梅, 齐学斌, 庞鸿滨, 等. 地下水作用下微咸水灌溉对土壤及作物的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 55-61.
- QIAO Dongmei, QI Xuebin, PANG Hongbin, et al. Effects of brackish water irrigation on soil and crop under different groundwater depths[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 55-61. (in Chinese with English abstract)
- [34] FU G B, CROSBIE R S, BARRON O, et al. Attributing variations of temporal and spatial groundwater recharge: A statistical analysis of climatic and non-climatic factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 816-834.

Quantifying groundwater contributions and threshold in the growth stages for winter wheat

XUE Xin^{1,2}, CAI Jiabing^{1,2*}, YU Yingduo^{1,2}, ZHANG Baozhong^{1,2}, HAN Yan'an³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China; 3. Irrigation Center of Jiaokou Pumping Water in Weihe River, Weinan City 714000, China)

Abstract: Groundwater recharge can greatly contribute to the crop growth in farmland for the sustainable development of regional production in modern agriculture. It is crucial to precisely quantify the rational utilization of groundwater sources. Among them, groundwater recharge can be broadly classified into empirical and mechanistic models in recent years. However, some limitations are still remained in practical application, due to the complexity and highly nonlinear of groundwater recharge. In this study, a series of experiments were conducted on the winter wheat under different groundwater levels and irrigation treatments using 24 clustered large-scale lysimeters. The AquaCrop model was calibrated and validated using the soil moisture content, canopy coverage, biomass, and grain yield of winter wheat as evaluation indicators. The calibrated AquaCrop model was then utilized to simulate the growth and development of winter wheat, as well as the soil water dynamics under varying irrigation treatments and groundwater depths. An estimation model was proposed for the groundwater recharge in the period of winter wheat growth. Thereby, the critical groundwater levels were determined for the different growth stages, and the threshold depth of water table suitable for winter wheat growth. Results showed that: 1) The AquaCrop model was performed best on the growth and development of winter wheat under different irrigation treatments and groundwater levels. Simultaneously, the better performance was achieved in the statistical parameters between the simulated and measured values of soil water content, canopy coverage, biomass, and grain yield during the growth period, with the determination coefficient (R^2) ≥ 0.8 , the relative error (RE) and the normalized root mean square error (NRMSE) are both $< 16\%$. 2) The validated AquaCrop model was employed to simulate the growth of winter wheat under 52 scenarios of groundwater depth and irrigation treatments. Subsequently, the nonlinear regressions of soil water storage - groundwater recharge intensity and groundwater depth - soil water storage were fitted during the growth period of winter wheat. The groundwater recharge intensity was calculated to compare with the measured values for verification. The statistical parameters fell well within the acceptable error range of the model, such as $R^2 \geq 0.873$, $RE \leq 9.22\%$, $RMSE \leq 0.316$ mm/d and $NRMSE \leq 11.89\%$. 3) The critical tables of groundwater were calculated in different growth stages of winter wheat under various irrigation treatments. The critical tables of groundwater were 3.28, 3.36 and 3.54 m, respectively, for the winter wheat during the seedling, frozen and reviving-jointing stages under irrigation. Furthermore, the critical table of groundwater was 3.38 m under the sufficient irrigation treatment in the whole growth period. There was the various behavior in the different growth periods of winter wheat under the insufficient irrigation treatments. In general, the critical table of groundwater decreased with the increasing irrigation amount. The optimal threshold water table was ranged from 2.0 to 2.5 m for the winter wheat, according to the relationship between grain yields and groundwater levels under 52 simulated scenarios. Therefore, the yield and water use efficiency (WUE) of winter wheat were simultaneously reached their optimal levels under the insufficient irrigation treatment (at reviving and filling stages), which were 8.848 t/hm² and 2.17 to 2.43 kg/m³, respectively. The findings can also provide the technical support for the accurate assessments of groundwater contribution for the precision irrigation and decision-making management.

Keywords: winter wheat; groundwater; contribution; critical groundwater table; AquaCrop model