doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.029

华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化

彭致功[1,2]　张宝忠[1,2]　刘　钰[1,2]　蔡甲冰[1,2]　王　蕾[1,2]　杜丽娟[1,2]

(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)

摘要: 以经校验 Aquacrop 模型模拟了不同土壤条件下冬小麦水分与产量响应关系,结合北京大兴区土壤分布及其冬小麦实际种植情况,对模型模拟结果进行区域尺度拓展,以此为基础分析了研究区不同灌溉制度下冬小麦耗水量、产量及水分生产率的变化规律,并推荐了与华北地区水资源实际情况相适宜的冬小麦亏缺灌溉制度。结果表明:应用 Aquacrop 模型能较好模拟冬小麦生育期内土壤墒情和冠层覆盖度的动态变化过程及其生物量与产量情况,可利用经校验后的模型进行冬小麦水分与产量响应关系研究。灌溉定额在 300 mm 范围内,随着灌溉量增加,耗水量增大;在灌水次数相同条件下,灌溉日期不同,因蒸腾量变化导致耗水量差异显著。在相同处理下总体上降水多年份产量较高,而不同处理之间随着灌溉量增加产量增大;在灌水次数相同情况下,灌溉关键生育时段选择对冬小麦产量形成及水分生产率提高至关重要。以冬小麦增产提效为原则,在灌 1 水情况下重点保障拔节-抽穗阶段的需水;灌 2 水情况下重点保障返青-拔节、抽穗-乳熟阶段需水;灌 3 水情况下重点保障返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-乳熟阶段需水。针对华北水资源严重短缺实际,建议北京大兴区冬小麦采用灌 2 水的亏缺灌溉制度,较灌 4 水情况下的灌溉量与耗水量分别减少 140、65 mm,能确保 75% 产量。可见,在与华北类似的资源性缺水区域,选择适宜亏缺灌溉制度,能大幅降低区域灌溉量与耗水量,在稳定区域冬小麦产量及涵养地下水源方面具有重要的现实意义。

关键词: 冬小麦; Aquacrop 模型; 产量; 耗水量; 水分生产率; 亏缺灌溉制度

中图分类号: S274　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)11-0238-09

Simulation for Regional Water Consumption and Optimization of Irrigation Schedule for Winter Wheat in North China

PENG Zhigong[1,2]　ZHANG Baozhong[1,2]　LIU Yu[1,2]　CAI Jiabing[1,2]　WANG Lei[1,2]　DU Lijuan[1,2]

(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 of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing* 100048, *China*)

Abstract: The relationship between grain yield response of winter wheat and soil water under different soils was simulated based on the calibrated Aquacrop model, and the expansion at regional scale was conducted to the results from the model simulation, combined with the soil distribution and the actual planting of winter wheat in Daxing District, Beijing, on the basis of which the variations of the water consumption, the yield and the water productivity of winter wheat under different irrigation schedules were analyzed, and the deficit irrigation schedule for winter wheat that was suitable for the actual situation of the water resources in North China was recommended. The results showed that the application of Aquacrop model can better simulate the dynamic changeable process of the soil moisture and the canopy coverage during the growth period of winter wheat as well as the biomass and the yield, and the calibrated model can be used to study the relationship between grain yield response of winter wheat and soil water. When the irrigation quota was within the range of 300 mm, the water consumption was increased with the

收稿日期: 2017-08-25　修回日期: 2017-09-24

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(节基本科研 KY1740)、水利部公益性行业科研专项(201501016、201501017)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究项目(2016TS06)

作者简介: 彭致功(1975—),男,高级工程师,博士,主要从事农业用水管理研究,E-mail: pengzhg@iwhr.com

通信作者: 张宝忠(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: zhangbz@iwhr.com

increase of irrigation amount; under the condition of the same number of irrigation times, the difference of the water consumption was significant due to the variation of the transpiration amount since the irrigation date was different. Under the same treated conditions, the yield was higher in the years with excessive precipitation on the whole, while the yield was increased with the increase of irrigation amount under different treated conditions; with the same irrigation times, the selection of irrigation date for key growing stage was essential to the yield formation of the winter wheat and the increase of water productivity. Based on the principle of production-increasing and efficiency-improving of the winter wheat, in the case of the irrigation for one time, the key guarantee should be on the water demand for the jointing-heading-stage; in the case of the irrigation for two times, the key guarantee should be on the water demand for the returning-green-jointing stage and heading-milky-ripe-stage; in the case of the irrigation for three times, the key guarantee should be on the water demand for the returning-green-jointing stage, the jointing-heading-stage and the heading-milky-ripe-stage. Aiming at the actual situation of the serious shortage of water resources in North China, it was recommended that the deficit irrigation schedule with two times of irrigation should be adopted for the winter wheat in Daxing District, Beijing, which can reduce the irrigation quantity and water consumption respectively by 140 mm and 65 mm to ensure 75% of the yield, compared with the condition of the irrigation for four times. Thus it can be seen that the selection of proper deficit irrigation schedule can greatly reduce the regional irrigation amount and water consumption in the areas of shortage of water resource similar to North China, which had important practical significance in stabilizing the yield of winter wheat and conserving water sources in the region.

Key words: winter wheat; Aquacrop model; yield; water consumption; water productivity; deficit irrigation schedule

引言

华北平原幅员约 40 万 km^2，占全国 23% 耕地面积，生产了近 40% 的粮食，在保证我国粮食安全方面具有举足轻重的作用；但因持续干旱及其工农业的快速发展，该区域水资源开发利用率达到 119%，其中京津冀地下水超采面积占平原区的 90% 以上，并对区域内国民经济发展、人民生活水平提高及区域生态环境改善等造成很大影响[1]。冬小麦作为华北平原种植面积最大的粮食作物，其产量占全国的 50% 以上[2]。由于受季风的影响，华北平原降水分布与冬小麦需水过程的耦合性较差，生育期内的降水不到其需水量的 40%[3]。为保证冬小麦正常生长，必须通过灌溉补充冬小麦生育期内需水，其灌溉用水量占华北平原农业用水量的 70% 左右[4]。

冬小麦需耗水规律研究一直是华北地区农业节水研究热点与重点，但大多研究主要集中于田间试验下不同灌溉制度对冬小麦耗水特征与产量的作用，并通过对各处理产量与水分利用效率进行分析，提出了现状降水条件下适宜的用水管理措施[5-7]。田间试验研究结果准确可靠，但因受制于人力、物力及田间试验期间降水随机性等因素影响，存在较大局限性，实用性差，且周期比较长[8]。利用模型研究作物耗水规律，不仅不受研究地域限制，可缩短试验周期和节约成本，增加研究变量，还可排除干扰因素，弄清试验因素间的真正关系[9]。但为确保模型模拟结果合理性，必须根据田间试验数据对模型进行适用性评价，所以田间试验和模型研究是互为补充的关系[10]。

作物水分模拟研究多集中于两类模型，一类是以土壤水氮运移及转化利用为中心的模型，其中以美国的 HYDRUS 模型为代表，已在土壤水和溶质运移领域得到广泛应用[11-13]，但该模型没将作物生长过程考虑在内，不能直接模拟作物产量；另一类是以作物生长发育为中心的模拟模型，主要研究土壤水分和养分条件对作物生长的影响，能够为作物生长管理提供决策支持[14-15]。为解决大多作物生长模型计算复杂、透明度不足、输入参数多等问题，世界粮农组织研究提出的关于作物生长的水分驱动模型，与其他作物模型相比，Aquacrop 模型具有输入参数少、简捷易操作，同时能满足大田作物生长模拟精度要求[16]。自 Aquacrop 模型开发以来，世界各地对该模型适用性展开的大量研究表明，利用该模型能较好模拟不同水分处理多种农作物的产量形成机制[17-19]，部分学者利用经校验后的模型开展了气候变化响应[20-21]、灌溉制度优化[22-23]、经济效益评价[24]等模型应用方面的研究；但涉及该模型应用研究多限于站点土壤，存在区域代表性不足，而对于不同土壤条件下区域应用研究总体偏少，不利于该模型进一步推广应用。

本文以 Aquacrop 为技术支持，选择华北冬小麦为研究对象，以田间观测结果对作物生长模型进行校验，确保模型对土壤水分、作物长势与产量模拟精度；并结合研究区土壤分布与冬小麦实际种植情况，

对不同土壤条件模拟成果进行区域尺度拓展，基于此分析不同灌溉制度情景下冬小麦区域耗水特征、产量及其水分生产率等指标变化规律，并优化灌溉制度，以期对华北地区冬小麦灌溉管理提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2008年10月—2010年6月在中国水利水电科学研究院大兴节水灌溉试验研究基地进行，该基地距北京南约30 km，地处39°37.25′N，116°25.21′E，多年平均气温为12.1℃，全年大于10℃的有效积温为4 730℃，无霜期平均为185 d，全年日照时数约为2 600 h，属半干旱大陆性季风气候。试验研究基地占地200 m×200 m，灌溉水源为地下水，埋深在10 m左右。

1.2 试验设计

供试小麦品种为京麦9428，2008—2009年冬小麦的播种与收获日期分别为2008年10月9日、2009年6月12日，生育期降水量为120 mm；2009—2010年冬小麦播种与收获日期分别为2009年10月12日、2010年6月20日，生育期降水量为169 mm。小麦冬灌的灌水量都为60 mm，满足小麦苗期水分供应，确保出苗整齐。返青后开始水分处理，当土壤含水率分别达到田间持水量的70%、60%和50%的灌溉下限开始灌溉，设置3个处理，各处理3次重复，随机区组排列，共9个小区，小区面积约30 m^2；为避免各小区间土壤水分侧渗，各小区外设有1 m的保护行。各小区采用的农田管理措施如播种、施肥、耕作等均与当地农民习惯保持一致。

1.3 观测项目

气象数据主要包括太阳辐射、风速、气温、大气湿度和降雨量等，均来自试验基地的气象站，并根据试验站的经度、纬度、海拔等，采用FAO推荐的Penman－Monteith公式计算参照作物腾发量[25]，试验期间的气温、降水量及参照作物腾发量变化见图1。采用TRIMER－T3/IPH型土壤水分测定仪测定0～100 cm土层的土壤含水率，间隔3～5 d，灌溉或降雨后加测。冬小麦出苗后，每10 d测定一次地上生物量；在各小区选取有代表性3株植株，从茎基部剪下，获得完整的冠部，烘干后称量，并根据同期分蘖情况，推算单位面积的生物量。冬小麦收获时考种测产，在各试验小区选取有代表性1 m^2样方，测定经自然风干后籽粒质量，并折算成每公顷的产量。叶面积指数（*LAI*）每10 d测定一次；在各小区选取长势均匀，有代表性的3株植株，利用直尺测量所选植株各叶片长和最大宽度，采用折算系数法推算冬小麦叶面积指数。冬小麦冠层覆盖度（*C*）通过叶面积指数获得，计算公式为[26]

$$C = 1.005\left[1 - \exp(-0.6LAI)\right]^{1.2} \quad (1)$$

1.4 模型验证

利用实测的作物生长数据、气象数据、土壤数据、灌溉制度、田间管理措施等资料建立模型基础数

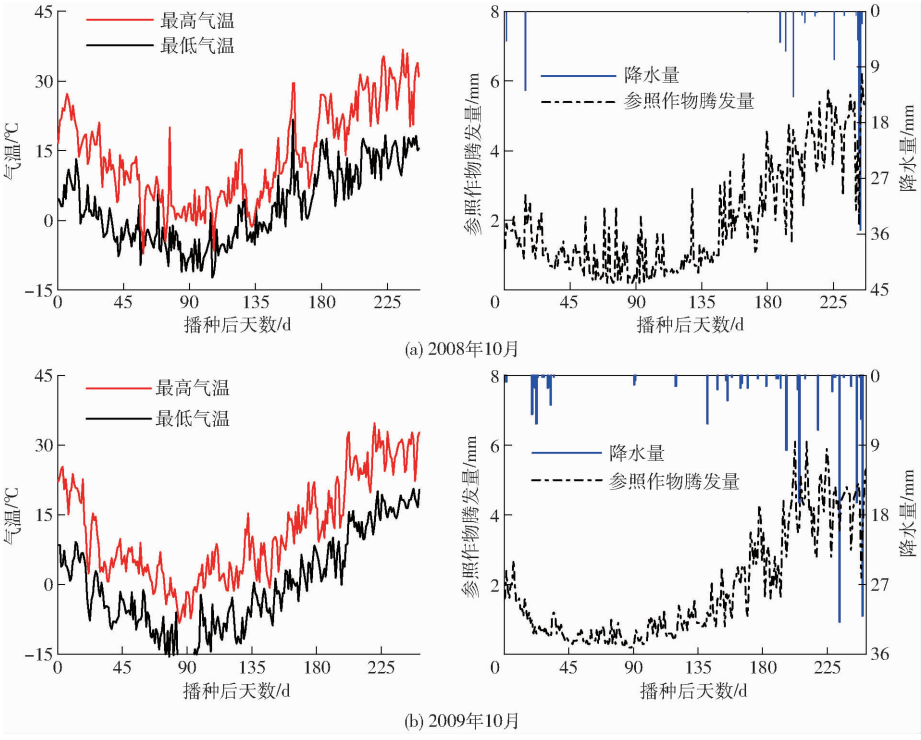

图1 冬小麦生育期内气象参数

Fig. 1 Weather parameters during winter wheat growth period

据库，分别选择土壤含水率、冠层覆盖度、生物量与产量等指标对模型参数进行校验，其中选择 2009 年 10 月—2010 年 6 月冬小麦生育期间的实测数据对模型进行率定，后利用 2008 年 10 月—2009 年 6 月的实测数据对模型进行验证，得到采用 Aquacrop 模拟华北冬小麦生长的主要参数见表 1。

表 1　模型中冬小麦部分参数

Tab.1　Preliminary input parameters for winter wheat in Aquacrop

参数	数值
临界温度/℃	26
作物系数	1.2
土壤水分消耗系数范围	0.15 ~ 0.60
水分胁迫对冠层生长影响的修正系数	4.5
土壤胁迫气孔控制上限系数	0.65
水分胁迫对气孔开度影响的修正系数	2.5
冠层增长率	0.029 37
冠层衰老率	0.161 06
最大冠层覆盖度	0.92
最小有效根深/m	0.3
最大有效根深/m	1.0
水分生产率/(g·m^{-2})	18
参考收获指数/%	39
株数/(个·hm^{-2})	5 200 000

对于模型校验过程中的模拟值与观测值之间的吻合程度采用均方根误差(R_{MSE})、平均绝对误差(M_{AE})、平均相对误差(M_{BE})、Nash 效率系数(E_F)等指标进行评价，其中均方根误差和平均绝对误差可检验模型无偏性，指标值越低，模型无偏性强，模拟更准确；Nash 效率系数属相对误差指标，是一种无量纲的模型评价指标，取值接近 1 表示模型可信度高，取值接近 0 表示模拟结果总体可信，但模拟过程误差大；平均相对误差大于 0 表示模拟结果偏大，而其小于 0 表示模拟结果偏小。各模型评价指标具体计算方程为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M_i - Q_i)^2} \tag{2}$$

$$M_{AE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|M_i - Q_i| \tag{3}$$

$$M_{BE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M_i - Q_i) \tag{4}$$

$$E_F = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \overline{Q})^2} \tag{5}$$

式中　Q_i、M_i、$\overline{Q}$——实测值、模拟值、实测值平均值

n——实测次数

1.5　情景方案设置

通过对大兴区近 50 a 降水量进行频率分析，获得冬小麦生育期内多年平均、丰水年、平水年、干旱年及特旱年降水量分别为 128、163、114、79、57 mm，与之相应的年份分别为 1997 年、2005 年、1962 年、1974 年、1975 年。选择播种-返青、返青-拔节、拔节-抽穗及抽穗-乳熟 4 个关键生育期，灌水次数分别考虑雨养、灌 1 水、灌 2 水、灌 3 水及灌 4 水等，按全排列共分 16 种处理。根据相关研究成果，冬小麦的灌水定额多在 60 ~ 80 mm，在播种-返青期根系较浅时灌水定额取 60 mm，而其它生育阶段灌水定额取 80 mm，各灌溉制度情景方案见表 2。

表 2　灌溉制度情景方案

Tab.2　Scenarios of irrigation schedule

灌溉方案	各生育阶段				灌溉定额/mm
	播种-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-乳熟	
T0					0
T1	√				60
T2		√			80
T3			√		80
T4				√	80
T5	√	√			140
T6	√		√		140
T7	√			√	140
T8		√	√		160
T9		√		√	160
T10			√	√	160
T11	√	√	√		220
T12	√	√		√	220
T13	√		√	√	220
T14		√	√	√	240
T15	√	√	√	√	300

注："√"表示该生育阶段灌水。

1.6　区域用水指标计算

根据遥感监测数据[27]，北京大兴区冬小麦多年平均播种面积为 121.47 km^2。土壤类型按照发生学分类，主要分为褐土、潮土、水稻土 3 个土类，细分为 13 类土壤类型，各类土壤颗粒组成见表 3，不同土壤类型下冬小麦播种面积见表 4；其中 S13 类与中国水利水电科学研究院大兴节水灌溉试验研究基地土壤类型一致，而在该种土壤类型下冬小麦播种面积不到 21%，所以仅利用该种土壤类型下冬小麦生长模拟结果难以代表整个区域实际。为此，依据各土壤类型下模拟结果，考虑不同土壤类型下冬小麦实际面积，对模拟计算结果进行区域拓展，使研究成果更具有区域代表性，具体计算公式为

$$I_Q = \sum_{i=1}^{13} k_i I_i \tag{6}$$

式中　I_Q——区域模拟指标

k_i——第 i 种土壤的比例系数

I_i——第 i 种土壤模拟指标

表 3 大兴区土壤颗粒组成

Tab. 3 Soil particlesize distribution in Daxing District %

参数	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
砂粒质量分数	48.0	31.5	79.2	35.6	46.8	30.8	57.5	39.5	51.8	35.3	32.3	46.7	48.0
粉粒质量分数	41.2	47.5	12.4	47.7	30.4	44.5	27.0	39.5	36.8	54.0	50.1	42.3	41.2
粘粒质量分数	5.8	5.1	2.0	7.4	6.9	7.1	3.5	6.8	4.8	3.4	5.9	4.2	5.8
胶粒质量分数	4.9	15.8	6.5	9.3	16.0	17.6	11.9	14.3	6.6	7.4	11.7	6.8	4.9

注:1 m 土层内砂粒、粉粒、粘粒及胶粒的粒径大小分别为 0.05 ~ 2 mm、0.005 ~ 0.05 mm、0.002 ~ 0.005 mm、0 ~ 0.002 mm。

表 4 不同土壤类型下冬小麦播种面积

Tab. 4 Winter wheat planting area under different soils

参数	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
面积/km^2	5.66	10.88	2.09	7.31	43.85	0.31	0.16	0.05	0.01	0.63	13.08	12.14	25.30
比例系数	0.046 6	0.089 6	0.017 2	0.060 2	0.361 0	0.002 5	0.001 3	0.000 4	0.000 2	0.005 1	0.107 7	0.099 9	0.208 3

2 结果与讨论

2.1 模型校验

由图 2 可看出,在小麦返青期后实测土壤含水率与模拟值吻合较好,模拟值能反映土壤含水率动态变化过程。在模型校验时,土壤含水率模拟值与观测值之间的 R_{MSE}、M_{AE} 分别小于 2.35%、1.94%;决定系数 R^2 均大于 0.735($p < 0.001$),而效率系数 E_F 均大于 0.514,表明模型模拟土壤含水率的拟合度与精度都较高。

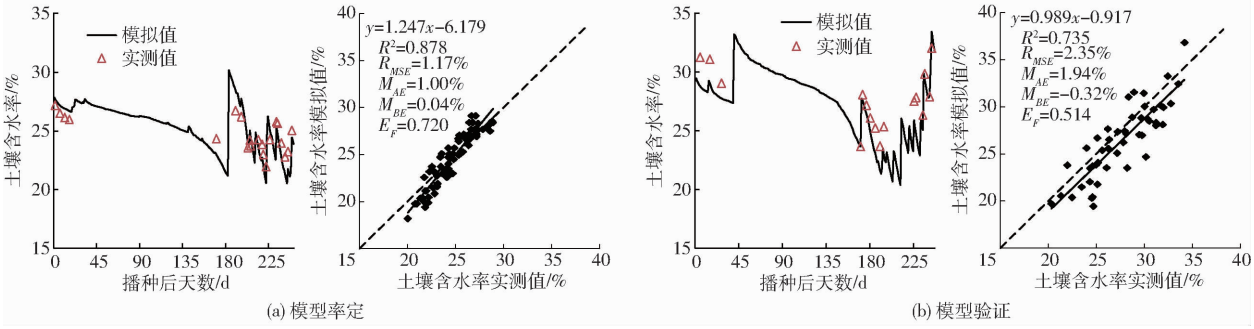

图 2 冬小麦土壤含水率的模拟值与实测值比较

Fig. 2 Comparison between simulated and measured values of soil water content

由图 3 可看出,冬小麦出苗后进入越冬期,生长缓慢甚至停止,冠层覆盖度保持较低水平,低于 20%,翌年 3 月气温回升,返青后冠层覆盖度迅速增加,至抽穗期达到生育期内最大值,而后随着冬小麦成熟,叶片发黄,茎秆衰老,冠层覆盖度下降。在模型校验时,冠层覆盖度模拟值与观测值之间的 R_{MSE}、M_{AE} 分别小于 7.0%、5.9%,模拟误差在可接受范围内;决定系数 R^2 均大于 0.686($p < 0.001$),而效率系数 E_F 均大于 0.628。实测冠层覆盖度与模型模拟值基本吻合,模拟值能反映冠层覆盖度在生育期内变化过程。

由图 4 可看出,生物量的模拟值与实测值均在 1∶1 线附近,模拟值与观测值之间的 R_{MSE}、M_{AE}、M_{BE} 分别为 294、221、92 kg/hm^2,决定系数 R^2 为 0.969($p < 0.001$),效率系数 E_F 为 0.966,表明模型能很好模拟冬小麦干物质累积过程。产量模拟值与观测值之间的 R_{MSE}、M_{AE}、M_{BE} 分别为 148、127、−32 kg/hm^2,决定系数 R^2 为 0.896($p < 0.001$),效率系数 E_F 为

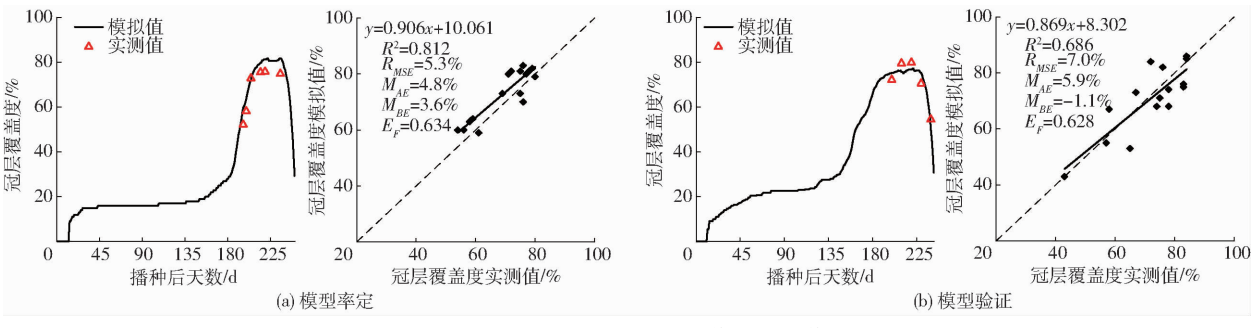

图 3 冬小麦冠层覆盖度的模拟值与实测值比较

Fig. 3 Comparison between simulated and measured values of canopy cover

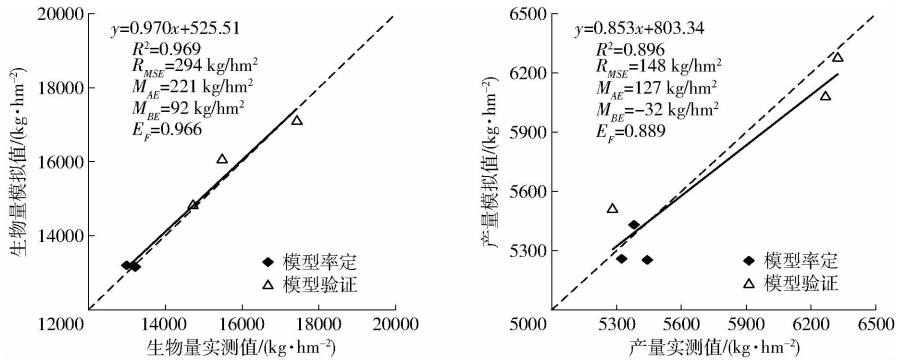

图 4　冬小麦生物量及产量的模拟值与实测值比较

Fig. 4　Comparison between simulated and measured values of biomass and yield

0.889，表明该模型也能较好地模拟冬小麦产量。

以上模型率定和验证结果表明，应用 Aquacrop 能较好地模拟不同灌溉制度下冬小麦生育期土壤墒情和冠层覆盖度的动态变化过程及其生物量与产量情况，可利用经校验后的模型进行冬小麦水分与产量响应关系研究，为华北冬小麦灌溉管理提供理论依据。

2.2　不同灌溉制度下冬小麦耗水量

不同灌溉制度下冬小麦耗水量见图 5，雨养条件下冬小麦耗水量最小；在相同灌溉制度下，与干旱年相比丰水年耗水量较高。在多年平均条件下，在雨养下耗水量为 236 mm；灌 1 水下耗水量在 266 ~ 329 mm 范围内；灌 2 水下耗水量在 309 ~ 404 mm 范围内；灌 3 水下耗水量在 396 ~ 426 mm 范围内；灌 4 水下耗水量为 437 mm。可见，总的趋势上随灌溉量增加耗水量增大；在灌水次数相同的条件下，不同的灌水日期冬小麦耗水量差异较大。在灌 1 水下，T2 处理耗水量最高，而 T4 处理耗水量较低；在灌 2 水下，T8 处理耗水量最高，而 T7 处理耗水量较低；在灌 3 水下，T11 处理耗水量最高，而 T13 处理耗水量较低。不同灌溉制度下冬小麦蒸腾量见图 6，雨养下冬小麦蒸腾量最小，在相同处理下不同水文年生育期内蒸腾量差异不显著。在多年平均条件下，雨养下蒸腾量为 115 mm；灌 1 水下蒸腾量在 115 ~ 215 mm 范围内；灌 2 水下蒸腾量在 167 ~ 314 mm 范围内；灌 3 水下蒸腾量在 295 ~ 337 mm 范围内；灌 4 水下蒸腾量为 348 mm。可见，蒸腾量与耗水量的变化规律相同，即随灌溉量增加蒸腾量增大；在灌水次数相同的条件下，不同的灌水日期冬小麦蒸腾量差异较大。由此可见，冬小麦蒸腾量的变化是导致冬小麦耗水量随之变化的最为关键影响因素之一。

2.3　不同灌溉制度下冬小麦产量

不同灌溉制度下冬小麦产量见图 7，为保证顺利出苗，在各情景方案中设置初始含水量接近田间持水量，加之播种-返青阶段气温低、冬小麦植株矮小使其在该生育时段需水量较小；在其他生育时段不灌溉，而仅选择在播种-返青期灌溉（T1）或不灌溉（T0）都对稳定冬小麦产量作用不大，表明返青后灌溉对华北冬小麦稳产与提效具有重要的实际意义。灌溉定额在 300 mm 内，相同处理下，与干旱年份相比，总体上降水量多的年份产量较高；但部分处理因受年内降水分布影响，并不全是在丰水年产量最大，如 T3、T7、T8、T10、T13 及 T14 处理在多年平均下产量最大。在多年平均条件下，雨养条件下冬小麦产量为 1.70 kg/hm²；灌 1 水产量在 77.50 ~ 3 713.79 kg/hm² 范围内；灌 2 水下产量在 1 333.93 ~

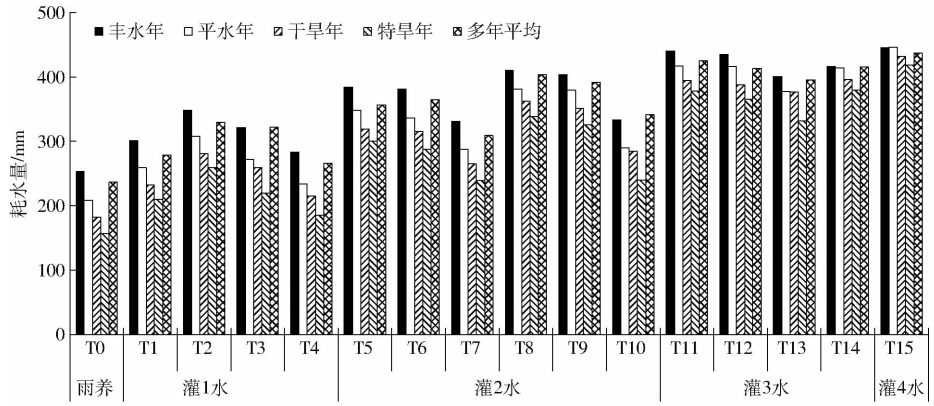

图 5　不同灌溉制度下冬小麦耗水量

Fig. 5　Water consumption under different irrigation schedules during winter wheat growth period

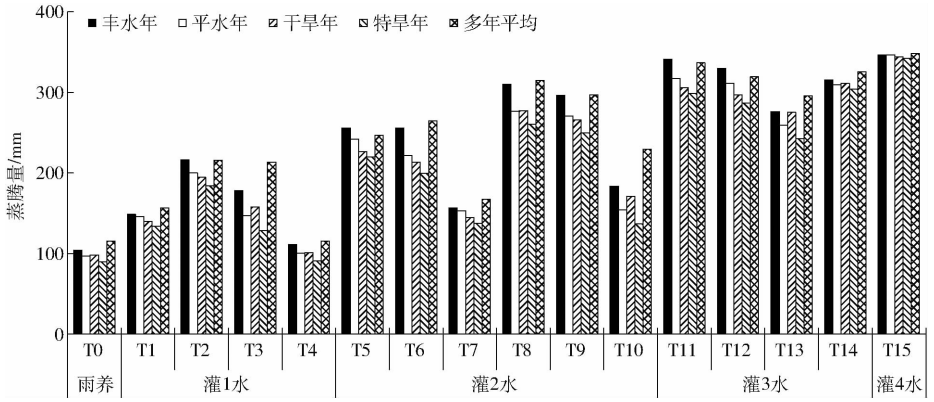

图 6 不同灌溉制度下冬小麦蒸腾量

Fig. 6 Transpiration under different irrigation schedules during winter wheat growth period

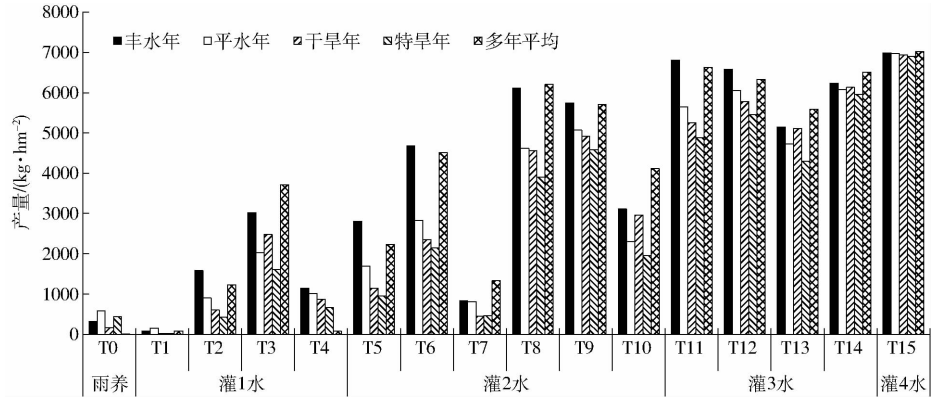

图 7 不同灌溉制度下冬小麦产量

Fig. 7 Yield of winter wheat under different irrigation schedules

6 201.05 kg/hm^{2}范围内;灌 3 水下产量在 5 584.37 ~ 6 626.09 kg/hm^2 范围内;灌 4 水下产量为 7 026.04 kg/hm^2。可见,灌溉定额在 300 mm 内,随灌溉量增加冬小麦产量增大。在灌水次数相同的条件下,灌水时间选择尤为关键。在灌 1 水条件下,T3 处理产量最高,而 T4 处理产量最小;在灌 2 水条件下,T9 处理产量最高,而 T7 处理产量最低;在灌 3 水条件下,T14 处理产量最高,而 T13 处理产量最低。

2.4 不同灌溉制度下冬小麦水分生产率

不同灌溉制度下冬小麦水分生产率见图 8,由于雨养条件下冬小麦每公顷产量小于 600 kg,但是其耗水量依然在 200 mm 左右;与其他有灌溉的处理相比,冬小麦雨养下水分生产率较低。针对同一处理,由于典型水文年内降水分布差异,各水文年间冬小麦水分生产率没有明显规律。在多年平均条件下,灌 1 水各处理水分生产率在 0.03 ~ 1.15 kg/m^3 范围内;灌 2 水各处理水分生产率在 0.43 ~ 1.54 kg/m^{3}范围内;灌 3 水各处理水分生产率在 1.41 ~ 1.57 kg/m^3 范围内;灌 4 水处理水分生产率为 1.61 kg/m^3。可见,灌溉定额在 300 mm 内,总体上随灌溉量增加水分生产率增大。在灌水次数相同

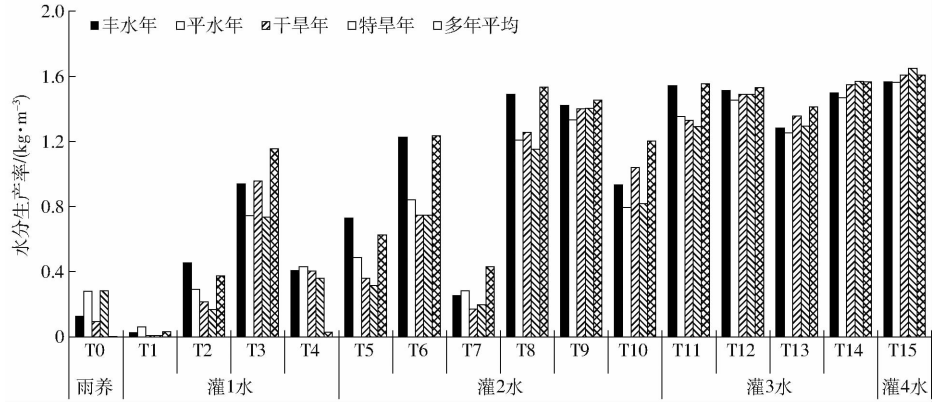

图 8 不同灌溉制度下冬小麦水分生产率

Fig. 8 Water productivity (WP) of winter wheat under different irrigation schedules

的条件下，灌溉关键期的选择对冬小麦水分生产率影响显著，其中灌 1 水、灌 2 水及灌 3 水情景方案下冬小麦水分生产率最高处理分别为 T3、T9 及 T14；而灌 1 水、灌 2 水及灌 3 水情景方案下冬小麦水分生产率最小的处理分别为 T1、T7 及 T13。

2.5　大兴区冬小麦适宜灌溉制度推荐

在确保冬小麦稳产条件下，以水分生产率较大为原则，推荐灌 1 水处理为 T3，即重点保障拔节-抽穗阶段需水，该处理下产量与水分生产率分别为 2 565 kg/hm^2、0.91 kg/m^3；推荐灌 2 水处理为 T9，即重点保障返青-拔节、抽穗-乳熟阶段需水，该处理下产量与水分生产率为 5 205 kg/hm^2、1.40 kg/m^3；推荐灌 3 水处理为 T14，重点保障返青-拔节、拔节-抽穗及抽穗-乳熟阶段需水，该处理下产量与水分生产率分别为 6 180 kg/hm^2、1.53 kg/m^3。针对华北地区水资源严重短缺实际，北京大兴区务必坚持量水发展，大力推广亏缺灌溉制度。由于灌 1 水优化灌溉制度下产量与水分生产率偏低，同时小麦品质也难以得到保证；而灌 3、灌 4 水处理下灌溉量与耗水量仍偏大，不利于该区域地下水涵养。为此，建议北京市大兴区冬小麦采用灌 2 水适度亏缺的灌溉制度，灌溉定额仅为 160 mm，与灌 4 水相比，灌溉量与耗水量分别减少 140、65 mm，但仍能保证 75% 产量。

3　结论

（1）应用 Aquacrop 能较好地模拟不同灌溉制度下冬小麦生育期内土壤墒情和冠层覆盖度的动态变化过程及其生物量与产量情况，其中模拟值与观测值之间决定系数 R^2、效率系数 E_F 分别大于 0.68、0.51，且模拟误差也在可接受范围内，可利用经校验后的模型进行冬小麦水分与产量响应关系研究。

（2）利用经校验的模型模拟了不同土壤条件下冬小麦水分与产量响应关系，结合北京大兴区土壤分布及其冬小麦的实际种植情况，对模型模拟结果进行区域尺度拓展，获得具有区域代表性的冬小麦耗水量、产量及水分生产率的变化规律。结果表明，灌溉定额在 300 mm 范围内，随着灌溉量增加，耗水量、产量及其水分生产率都相应增大；在灌水次数相同条件下，为了保证冬小麦产量与提高水分生产率，灌溉关键生育时段选择至关重要。

（3）在确保冬小麦稳产条件下，以水分生产率较大为原则，灌 1 水要重点保障拔节-抽穗阶段需水，该处理下产量与水分生产率分别为 2 565 kg/hm^2、0.91 kg/m^3；灌 2 水要重点保障返青-拔节、抽穗-乳熟阶段需水，该处理下产量与水分生产率分别为 5 205 kg/hm^2、1.40 kg/m^3；灌 3 水要重点保障返青-拔节、拔节-抽穗及抽穗-乳熟阶段需水，该处理下产量与水分生产率分别为 6 180 kg/hm^2、1.53 kg/m^3。可见，采用优化灌溉制度，在冬小麦各生育时段合理配置有限水资源，有利于实现高产与水分生产率最大化。

（4）针对华北地区水资源严重短缺实际问题，北京市大兴区务必坚持量水发展，大力推广亏缺灌溉制度，建议北京市大兴区冬小麦采用灌 2 水适度亏缺的灌溉制度，灌溉定额仅为 160 mm；与灌 4 水相比，灌溉量与耗水量分别减少 140、65 mm，但仍能保证 75% 产量。冬小麦采用适度亏缺的灌溉制度，能大幅降低区域灌溉量与耗水量，在稳定区域粮食产量及涵养地下水源方面具有重要现实意义。

参　考　文　献

1　WANG Zhanbiao, ZHANG Hailin, LU Xiaohong, et al. Lowering carbon footprint of winter wheat by improving management practices in North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(1):149 - 157.

2　IQBALM A, SHEN Y, STRICEVIC R, et al. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 135(1): 61 - 72.

3　WANG Xiangping, HUANG Guanhua, YANG Jingsong, et al. An assessment of irrigation practices: sprinkler irrigation of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159(9):197 - 208.

4　郭丽,郑春莲,曹彩云, 等. 长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):183 - 190. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170124&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.024.
GUO Li, ZHENG Chunlian, CAO Caiyun, et al. Effect of long-term saline water irrigation on photosynthetic characteristics of winter wheat and soil salt content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):183 - 190. (in Chinese)

5　LIU Haijun, YU Lipeng, LUO Yu, et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2011,98(4): 483 - 492.

6　QIU Guoyu, WANG Liming, HE Xinhua, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the north China plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148(11):1848 - 1859.

7 LIU Xiuwei, SHAO Liwei, SUN Hongyong, et al. Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2013, 129(1):173 - 180.

8 王亚莉, 贺立源. 作物生长模拟模型研究和应用综述[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5):529 - 535.
WANG Yali, HE Liyuan. A review on the research and application of crop simulation model [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005, 24(5):529 - 535. (in Chinese)

9 迟卉, 白云, 汪海涛, 等. HYDRUS - 3D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(5):531 - 535.
CHI Hui, BAI Yun, WANG Haitao, et al. HYDRUS - 3D in the soil water infiltration process simulation[J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(5):531 - 535. (in Chinese)

10 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.

11 李久生,张建君,饶敏杰. 滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J]. 水利学报,2005, 36(8):932 - 938.
LI Jiusheng, ZHANG Jianjun, RAO Minjie. Model verification of water and nitrate transport from a surface point source [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8):932 - 938. (in Chinese)

12 王珍,李久生, 栗岩峰. 土壤空间变异对滴灌水氮淋失风险影响的模拟评估[J]. 水利学报,2013, 44(3):302 - 311.
WANG Zhen, LI Jiusheng, LI Yanfeng. Assessing the influence of soil spatial variability on water leakage and nitrate leaching under drip irrigation through simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(3):302 - 311. (in Chinese)

13 SHAHID I, ANDREY K, HAROON Z K. Estimating nitrogen leaching losses after compost application in furrow irrigated soils of Pakistan using HYDRUS - 2D software[J]. Agricultural Water Management, 2016, 168(4):85 - 95.

14 MABROUK A El-Sharkawy. Overview: early history of crop growth and photosynthesis modeling[J]. BioSystems, 2011, 103(2):205 - 211.

15 谢云,JAMES K. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报, 2002, 28(2):190 - 195.
XIE Yun, JAMES K. A review on the development of crop modeling and its application[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(2):190 - 195. (in Chinese)

16 ELINE V, DIRK R, PASQUALE S, et al. AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model [J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 62:351 - 360.

17 MONTOYA F, CAMARGO D, ORTEGA J F, et al. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions[J]. Agricultural Water Management, 2016, 164(2):267 - 280.

18 TOUMI J, ER-RAKI S, EZZAHAR J, et al. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): application to irrigation management [J]. Agricultural Water Management, 2016, 163(1):219 - 235.

19 杜文勇,何雄奎, SHAMAILA Z, 等. 冬小麦生物量和产量的 Aquacrop 模型预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4):174 - 183.
DU Wenyong, HE Xiongkui, SHAMAILA Z, et al. Yield and biomass prediction testing of Aquacrop model for winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):174 - 183. (in Chinese)

20 DIMITRIOS V, ANDREAS K, GARIFALIA E, et al. Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis [J]. Agricultural Water Management, 2015, 147(1):116 - 128.

21 ANTONINO S, ROBERTO D, MZRINO M, et al. Climate variability and durum wheat adaptation using the AquaCrop model in southern Sardinia[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19:830 - 835.

22 RAPHAEL L, ILYA I, GEORGIOS S, et al. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: a simulation study with cotton, potato and tomato[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163:236 - 243.

23 NIRMAN S, DIRK R, SHRAWAN K S. Strategies to improve cereal production in the Terai region (Nepal) during dry season: simulations with Aquacrop[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19:767 - 775.

24 MARGARITA G, ELIAS F. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 36(1): 21 - 31.

25 ALLEN R G, PERIERA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspriation. Guidelines for computing crop water requirement[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, 1998.

26 HSIAO T C, HENG L K, STEDUTO P, et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: Ⅲ. Parameterization and testing for maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 10(3):448 - 459.

27 彭致功,刘钰,许迪, 等. 基于 RS 数据和 GIS 方法的冬小麦水分生产函数估算[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):167 - 171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140826&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.026.
PENG Zhigong, LIU Yu, XU Di, et al. Estimation of regional water product function for winter wheat using remote sensing and GIS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):167 - 171. (in Chinese)