

朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 2014. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究. 气象, 40(11):1398-1407.

基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦 最佳灌溉方案研究^{* 1}

朱津辉¹ 郭建茂¹ 毛留喜²

¹ 南京信息工程大学, 南京 210044

² 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 利用 WOFOST 模型对保定地区冬小麦不同年型灌溉方案进行模拟分析, 确定最佳灌溉量及灌溉时间, 力争灌溉效益最大化, 对缓解农业生产和水资源匮乏的尖锐矛盾尤为重要。文章以河北省保定市为例, 应用 WOFOST 模型对不同降水年型的 2003/2004、2005/2006 和 2008/2009 年 3 个代表生长季, 分别进行一次灌溉、两次灌溉、三次灌溉的不同灌溉方案进行模拟, 试图揭示冬小麦产量随灌溉时间及灌溉量的变化规律, 选择最佳灌溉方案, 为干旱缺水的河北省保定市小麦节水、高产提供理论依据。模拟研究结果表明: 在冬小麦全生育期中最佳灌溉时期为拔节—孕穗期和抽穗—灌浆期, 这两个时期的灌溉对产量的贡献率最高。与此同时, 总结出了既可以满足冬小麦生长又可以获得较大经济效益的两次灌溉及三次灌溉的最佳灌溉方案。

关键词: 保定地区, WOFOST 模型, 冬小麦, 灌溉, 产量

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.013

Study on the Optimum Irrigation Program of Winter Wheat in Baoding Based on WOFOST Model

ZHU Jinhui¹ GUO Jianmao¹ MAO Liuxi²

¹ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Under the situation of growing water shortage, determining the optimum irrigation period and the best irrigation quantity of winter wheat is an important issue that needs immediate solution in Baoding, Hebei Province. In order to determine the optimal irrigation quantity and irrigation time, this paper using WOFOST model to simulate the winter wheat in Baoding Area. In this paper the Baoding Station is selected as a representative station. During the different rainfall year-types in 2003/2004, 2005/2006 and 2008/2009, the different irrigation plans and quantities are simulated, including irrigating once, twice and three times, to reveal the correlation between the yield under water stress and irrigation time. The simulation results show that optimal irrigation time in the whole winter wheat growth process is the period of booting stage and heading to filling stage. During these periods, irrigation can achieve the most obvious effect, and have the highest contribution to wheat yield. Besides, the best plan of irrigating twice and three times to meet the winter wheat growth is given out, which might help obtain greater economic benefits at the same time.

Key words: Baoding Area, WOFOST model, winter wheat, irrigation, yield

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106030)和国家自然科学基金项目(41071282)共同资助

2013 年 9 月 29 日收稿; 2014 年 5 月 29 日收修定稿

第一作者: 朱津辉, 主要从事农业气象及作物模型研究. Email: zhujinhui1988@126.com

通信作者: 毛留喜, 主要从事生态与农业气象研究. Email: maolx@cma.gov.cn

引 言

保定市地处河北省中部,辖区内地势西高东低、地貌复杂,自西而东分为山地丘陵、平原和洼淀三部分,气候属暖温带大陆性季风气候,冬小麦为该地主要农作物之一。冬小麦生长期一般在 10 月至翌年 6 月上旬,正好处于保定市气候旱季,其降水量仅占年降水量的 20% 左右,自然降水严重匮乏,多不能满足冬小麦生长需求。该地的耕作制度以冬小麦-夏玉米一年两熟制为主,与一年一熟制和两年三熟制相比,冬小麦生育期内水分亏缺量最高(康西言等,2010;李德等,2012)。干旱已成为该地区冬小麦高产的最主要制约因素(王学等,2013)。因此,利用 WOFOST 模型对保定地区冬小麦不同降水年型灌溉方案进行模拟分析,确定最佳灌溉量及灌溉时间,力争灌溉效益最大化,对缓解农业生产和水资源匮乏的尖锐矛盾尤显重要,为干旱缺水的保定市小麦节水、高产提供理论依据(成林等,2012;韩慧芳等,2010;康西言等,2011;吴荣军等,2013;裴宏伟等,2011)。

WOFOST 作物模型由荷兰瓦赫宁根大学开发,国外已应用于农业生产服务(刘布春,2002; Huygen et al, 1990; Boogaard et al, 1998; Hooijer, 1994),我国也开展了一些相关研究(高永刚等,2006;王石立等,2008;王涛等,2010)。邬定荣等(2003)根据在禹城综合试验站进行的水分处理试验验证了它在华北平原的适用性;马玉平等(2005a)针对华北地区气候特征和冬小麦品种生态类型,从冬小麦越冬、返青的气象指标出发对 WOFOST 模型部分参数进行了调整,张雪芬等(2006)利用 WOFOST 模型对冬小麦晚霜冻灾害进行模拟分析,定义了晚霜冻害损失综合指数,实现了灾害损失的量化评估。该模型目前在我国实现了对冬小麦越冬损耗的模拟,探讨了区域模拟应用技术,分析了推进模型业务化应用存在的问题及其可能的解决途径。在我国,WOFOST 模型应用于节水灌溉方案的研究还较为鲜见,李良涛等(2010)利用 WOFOST 模型对冬小麦的灌溉方案进行了初步研究,发现冬小麦全生育期灌溉次数不少于 5 次的灌溉方案高产稳产性都比较好,但灌溉次数在 4 次以下时效果则因灌溉时间及灌溉量的不同而有显著差异,部分方案无法满足冬小麦正常生长。故本文对 1~3 次灌溉

模拟进行详细分析和探讨,以找出最佳灌溉时间及灌溉量进行合理灌溉。进一步拓展和探索该模型在我国的应用。

1 模型与方法

1.1 WOFOST 作物模型

WOFOST 模型基于作物基本的生长发育过程,解释了作物的生长,如光合作用和呼吸作用,并描述了这些过程如何受光、温、水等环境条件的影响,能够模拟温度、水分对作物生长发育和产量形成的胁迫时期与胁迫程度(郭建茂,2007)。该模型能模拟潜在生长(potential crop growth)、水分胁迫下的生长(water-limited crop growth)及养分胁迫下的生长(nutrient-limited crop growth)(Boogaard et al, 1998;王琦等,2013)。本文选取水分胁迫条件下的生长进行模拟,所谓水分胁迫下的生长,即作物生长处于肥料适宜状态,作物生长速率不仅取决于辐射和温度,而且受生长过程中水分短缺的限制。在 WOFOST 模型中,产量的表现形式为穗生物量(Total dry weight of storage organs, TWSO)。本文将潜在生长模式下的潜在穗生物量表示为 PTWSO,水分胁迫生长模式下的穗生物量表示为 WTWSO。PTWSO 是指在水分、土壤肥力和农业技术措施等条件适宜的情况下,由当地辐射和温度决定的作物最大穗生物量。WTWSO 是指在土壤肥力及农业技术措施等条件适宜的情况下,由当地水分、辐射和温度决定的作物最大穗生物量。本研究利用该模型模拟出不同时间、不同灌溉量的 TWSO,进而将 WTWSO 与 PTWSO 相比较分析,追寻最佳灌溉方案。

1.2 数据及资料

模型运行所需要的气象要素包括 1960—2011 年逐日最高和最低气温(单位:℃)、太阳辐射(单位: $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)、日平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、水汽压(单位: kPa)、08 至次日 08 时降水量(单位: mm)。基本气象资料均来自国家气象中心农业气象中心业务数据库,辐射资料用日照时数通过经验公式计算获得。

冬小麦生长发育资料包括保定最近 15 年的农业气象观测资料:冬小麦发育期、产量数据、土壤湿度,以及田间管理资料(施肥时间和数量、灌溉时间

和数量、病虫害及其他管理情况等)。资料均来自国家气象中心农业气象中心业务数据库。

模型中应用的土壤参数由台站实地测定得到。

1.3 WOFOST 模型参数的调整及验证

WOFOST 虽起源于欧洲,但在我国仍然得到了广泛的应用(张黎等,2007;孙琳丽等,2013)。郭定荣等(2003)利用田间试验资料,验证了 WOFOST 在华北地区的适用性;马玉平等(2005a)根据华北地区冬小麦的越冬特点,对模型进行了改进,使之能够更好地模拟华北地区冬小麦的生长情况。作者在前人研究的参数基础上(郭定荣等,2003;马玉平等,2005;郭建茂,2007),依据近 15 年农业气象观测资料,山东禹城及河北固城等地区冬小麦田间试验资料,对作物参数做了系统的调试和验证,并利用模型进行了华北冬小麦气候适宜度研究(李艳等,2008)。在本研究中,利用保定地区冬小麦生长发育和产量结构数据等资料对模型进行了适当调整,使得模型可以模拟当地冬小麦生长发育。以下为对调

整后的 WOFOST 模型进行校正和验证的结果:

以近 15 年农业气象观测资料及固城农业气象试验站 2011—2012 年的田间试验数据对其进行校正,再以 2012—2013 年的冬小麦田间试验数据对校正的 WOFOST 模型进行验证。图 1 为 2012—2013 年田间试验资料验证模拟结果,2012—2013 年茎干重的模拟结果稍差,叶干重和地上生物总量的模拟结果较好。

模型中的发育参数(不同发育阶段所需要的积温和光周期影响因子等)较稳定主要与冬小麦品种有关。本文根据近 30 年河北省保定市冬小麦发育期资料计算平均值,作为模型参数值。再以调试后参数对 2000—2012 年保定市的冬小麦发育期观测资料进行冬小麦出苗期、开花期以及成熟期模拟检验,其相关性均通过了 0.05 显著性水平检验,模拟与实测天数偏差不超过 4 d。

综上,经校正和验证后的 WOFOST 模型可以用来模拟保定地区冬小麦的生长发育和产量形成过程。

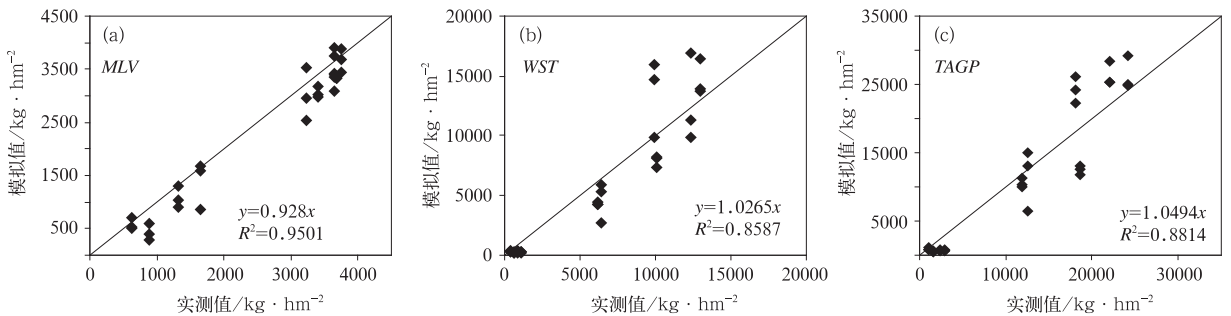


图 1 2012—2013 年田间试验资料与 WOFOST 模型的模拟结果对比

(MLV 为叶片干重, WST 为茎干重, TAGP 为地上部分生物量总干重)

Fig. 1 Comparison between the field experiment data of 2012—2013 and the simulation results of WOFOST model

(MLV: dry weight of living storage organs, WST: dry weight of living stems, TAGP: total above ground production)

1.4 研究方法

利用 WOFOST 模型模拟当水分、肥力及其他田间管理等条件处于最适状态时,不同降水年型的潜在穗生物量(PTWSO),以及当水分胁迫模式下,不同灌溉时间及不同灌溉量的穗生物量(WTWSO)。

将灌溉方案对最终产量作用的程度大小定义为灌溉贡献率(irrigation contribution)作为判定最佳灌溉方案的一个指标,计算公式为

$$\text{灌溉贡献率} = \frac{\text{WTWSO} - \text{WTWSO}_0}{\text{WTWSO}} \times 100\%$$

式中, WTWSO_0 为全生育期灌溉量为 0 mm 时,水分胁迫生产模式下的穗生物量。

同时,将水分胁迫产量差作为判定最佳灌溉方案的另一个指标。所谓产量差即作物实际产量与潜在产量的差值(王纯枝等,2009)。本文中水分胁迫产量差定义为潜在穗生物量与水分胁迫模式下穗生物量的差值。

$$\text{水分胁迫产量差} = \text{PTWSO} - \text{WTWSO}$$

水分胁迫产量差 $< \text{PTWSO}$ 的 10%, 即视该方案为有效灌水方案;反之,若 $> \text{PTWSO}$ 的 10%, 则该方案的灌水效率以及经济效益不明显,造成水资

源的浪费。水分胁迫产量差小且灌溉贡献率大的灌溉方案即为最佳灌溉方案,反之,水分胁迫产量差很大且灌溉贡献率几乎为零的灌溉方案即视为无效方案。

2 保定近 50 年冬小麦生长期降水年型的划分

在河北,冬小麦生长大部分时间处于少雨的冬春季节,且降水年际差异大(朱自玺等,1987;张皓等,2010;赵翠光等,2012;赵聚宝,1987)。播前充足底墒是冬小麦正常出苗及冬前壮苗形成的基础(宋艳玲等,2006),考虑到底墒对冬小麦的影响,累计 1960—2011 年当年 9 月至翌年 6 月冬小麦生育期内逐日降水量(图 2)。

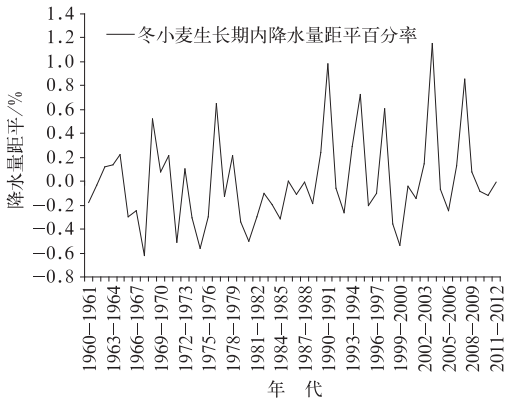


图 2 保定市近 50 年冬小麦生长期
降水量距平百分率

Fig. 2 Distribution of precipitation anomalies during the wheat growing period in Baoding in recent 50 years

从图 2 看出,保定市近 50 年冬小麦生长期内降水量波动较大,50 年平均降水量为 217.3 mm。最多年份降水达 467.1 mm,相当于常年平均降水量的 2 倍以上,而最少年份仅 81.6 mm,不到 50 年平均降水的 1/2。为了解不同降水年型的灌溉方案的差异,以生长期降水距平百分率 $\pm 20\%$ 为指标,将该地区降水划分为丰水年、平水年和缺水年 3 种年型。排除气象灾害等特殊年份影响,分别选取降水分布较均匀的 2003/2004、2008/2009 及 2005/2006 年作为丰水年、平水年和缺水年的代表年份(见表 1),对这 3 个生长年的冬小麦进行不同灌溉量与产量之间关系的模拟。

表 1 降水年型及其代表生长期

Table 1 Rainfall year-type and representative year				
年型	距平百分率/%	降水量/mm	出现频次	代表生长期
丰水年	>20	>260.8	11	2003/2004
平水年	$-20\sim 20$	$173.8\sim 260.8$	25	2008/2009
缺水年	<-20	<173.8	16	2005/2006

3 模拟结果与分析

自然降水的不足导致保定市冬小麦生育常常处于缺水状态,当地习惯上通过全生育期多次灌水确保冬小麦的水分供应。一般包括:越冬水、返青水、拔节水和开花(灌浆)水等(李昊宇等,2012)。为更清晰地了解每次灌溉对产量的贡献程度,更好地指导节水灌溉,将模拟分为一次灌溉模拟、两次灌溉模拟和三次灌溉模拟。在模拟中,将不同灌溉量添加到 WOFOST 模型气象文件的当日降水中。

首先对潜在产量进行模拟,丰水年典型生长期 2003/2004 年的 $PTWSO$ 为 $8824 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,缺水年 2005/2006 年为 $6806 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平水年 2008/2009 年为 $7809 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.1 一次灌溉模拟

为了便于比较与分析,模拟的播种日期设定为当地普遍适播期 10 月 8 日,在平年中的日序为 281,在闰年中为 282。在一次灌溉模拟中设定整个生长期只进行一次灌溉,由播种期开始每间隔 12 d 执行一个灌溉方案的模拟,共有 22 种方案。将 $WTWSO$ 模拟结果随灌溉执行时间的变化用直方图表示。生长季中仅一次灌溉的模拟分 4 个灌溉等级(40、70、100 和 130 mm),丰水年、平水年、缺水年中典型年的模拟结果见图 3a~3c。

可以看出,不同灌溉量的 $WTWSO$ 差别明显,当灌溉量为 40~130 mm,同一灌溉时间,灌溉量越大,产量也越大。另外,无论单次的灌溉量如何,产量与灌溉时间的关系均呈现出明显的波动,即不同时间的灌溉对冬小麦产量的形成影响很大。

丰水年生长期 $WTWSO$ 最大值 $8755 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 出现在日序 121,灌溉量为 130 mm 时,并且在日序 73~120 达到 $PTWSO$ 的 50% 以上。由图 3a 可以看出,丰水年的产量随灌溉时间的变化波动较缓,且不同灌溉量之间差距较小。而缺水年生长期 $WTWSO$ 最大值 $5861 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 出现在日序为

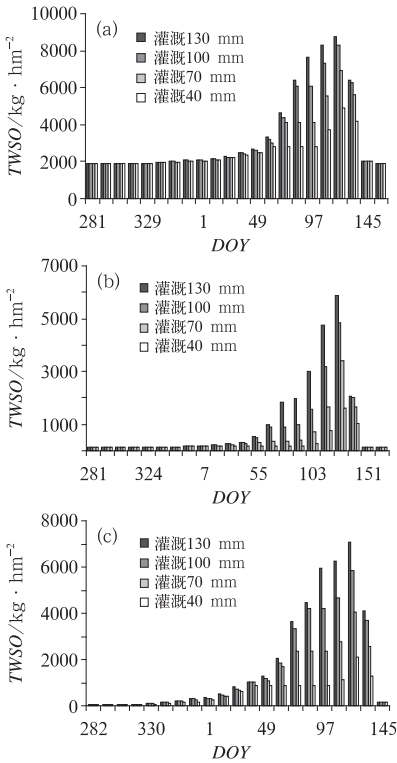


图 3 保定市冬小麦各年型代表生长期的一次灌溉模拟

- (a) 丰水年 2003/2004 年生长期,
- (b) 缺水年 2005/2006 年生长期,
- (c) 平水年 2008/2009 年生长期

(纵坐标 WTWSO 为贮藏器官重, 横坐标 DOY 为当年日序)

Fig. 3 The simulation of irrigating winter wheat once in Baoding

- (a) wet year 2003/2004, (b) drought year 2005/2006, (c) normal year 2008/2009

[Ordnate WTWSO represents total dry weight of storage organs (dead and living), abscissa DOY represents the day number of calendar year]

127, 灌溉量为 130 mm 时, 在日序 103~126 均达到 PTWSO 的 50% 以上。由图 3b 可以看出, 缺水年的产量随灌溉时间的变化波动较大, 灌水量的变化对产量影响较大, 即缺水年冬小麦产量几乎全部靠

灌溉来维持。平水年生长期 WTWSO 最大值 7090 kg·hm⁻² 出现在日序 121, 灌溉量为 130 mm 时, 在日序 73~120 达到 PTWSO 的 50% 以上。由此可见, 3 个代表生长期水分限制产量的最大值均出现在日序 120~128, 结合生育期资料知该段日序处于抽穗—灌浆期。另外, 3 个代表生长期中水分限制下产量达到潜在产量的 50% 以上的日序均处于拔节—孕穗期之间, 可知在拔节—孕穗期间进行灌溉对产量也有较大贡献。由此可得出结论, 如条件只允许进行一次灌溉时, 在抽穗—灌浆期进行灌溉, 较其他时期灌溉可得到最大的产量提升。

3.2 两次灌溉产量模拟

冬小麦较重要的生育期为播种、越冬、返青、拔节、孕穗、灌浆和乳熟期, 将这 7 个生育期组合成两次灌溉方案, 方案如表 2 所示。

根据生育期资料对应当年日序, 在进入该生育期的第一天进行灌溉处理, 如当天有降水则选取最近的无降水日为灌溉日期。对 3 个代表生长期分别进行不同灌溉量(每次灌溉 40、70、100 和 130 mm) 的两次灌溉模拟, 结果见图 4。

从模拟结果(图 4)可看出, 在水分充足的 2003/2004 年生长期平均模拟结果高于缺水年及平水年。丰水年 4 个不同灌溉量的差距较小, 甚至部分方案模拟结果相同(例如方案 16 和 19), 而平水年和缺水年不同灌溉量之间相差较大(例如方案 16)。缺水年较少的灌溉量对最终产量贡献不明显, 几乎无法维持冬小麦正常生长。

丰水年不同灌溉量模拟得到的 WTWSO 最大值均出现在方案 19。缺水年 WTWSO 的最大值出现在方案 16(灌溉 130 和 100 mm)、方案 19(灌溉 70 和 40 mm)。平水年 WTWSO 的最大值为方案 16(灌溉 130 和 100 mm)以及方案 19(灌溉 70 和 40 mm)可见, 在两次灌溉模拟中, 方案 16(拔节期、孕穗期)和 19(孕穗期、灌浆期)的效果最佳。

表 2 冬小麦两次灌溉的模拟方案

Table 2 The simulation program of irrigating the winter wheat twice

灌溉方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
发育期	播种 越冬	播种 返青	播种 拔节	播种 孕穗	播种 灌浆	播种 乳熟	越冬 返青	越冬 拔节	越冬 孕穗	越冬 灌浆	越冬 乳熟
灌溉方案编号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
发育期	返青 拔节	返青 孕穗	返青 灌浆	返青 乳熟	拔节 孕穗	拔节 灌浆	拔节 乳熟	孕穗 灌浆	孕穗 乳熟	灌浆 乳熟	

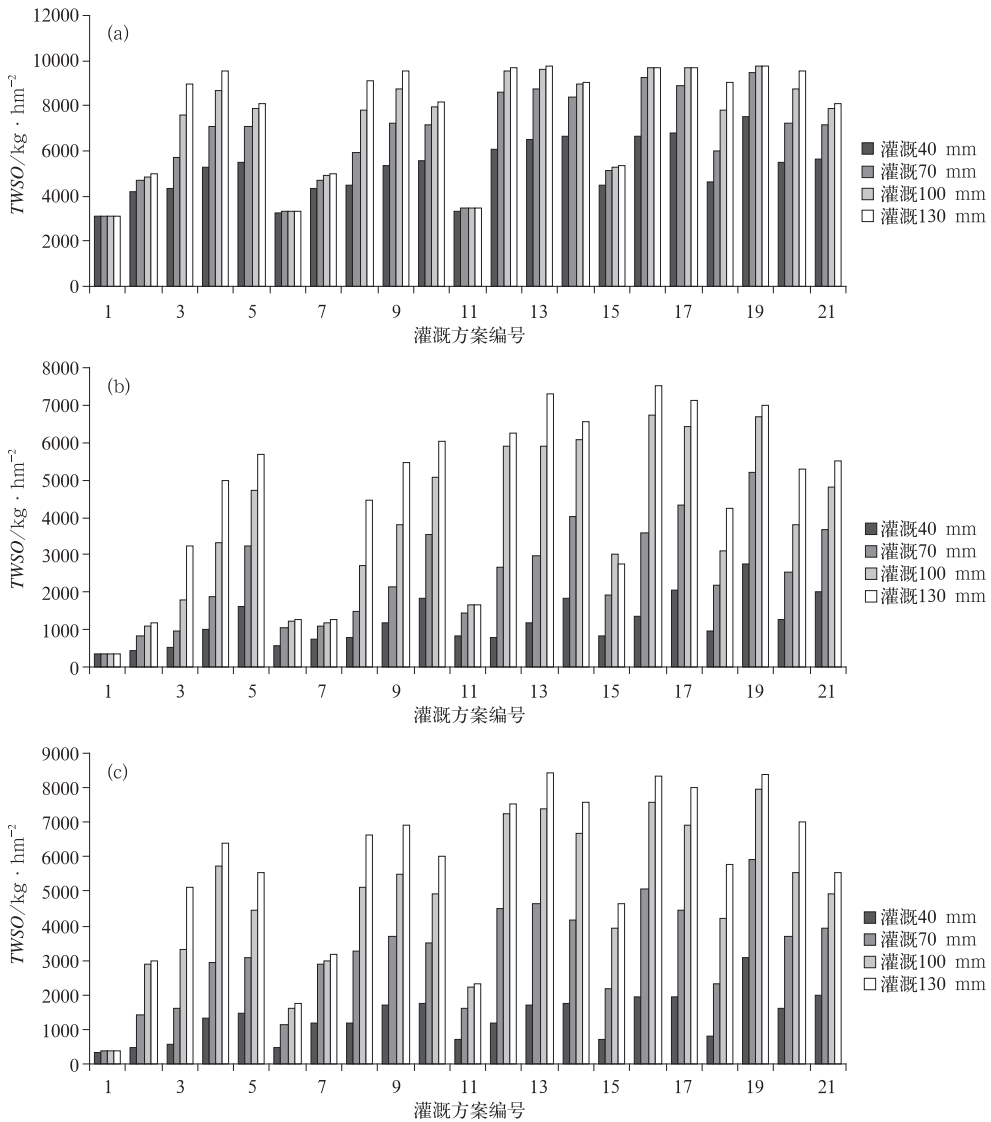


图 4 保定市冬小麦各年型代表生长期的两次灌溉模拟
 (a) 丰水年 2003/2004 年生长期, (b) 缺水年 2005/2006 年生长期,
 (c) 平水年 2008/2009 年生长期

Fig. 4 The simulation of irrigating winter wheat twice in Baoding
 (a) wet year 2003/2004, (b) drought year 2005/2006, (c) normal year 2008/2009

由表 3 可知,丰水年灌溉 130 mm 时,模拟结果中有 12 个灌溉方案(方案 3、4、8、9、12、13、14、16、17、18、19 和 20)的水分胁迫产量差未达到当年 *PTWSO* 的 10%,为有效灌溉方案。在灌溉量为 100 mm 时,7 个方案(方案 9、12、13、14、16、17、19)达到有效灌溉方案水平。灌溉 70 mm 时,仅有方案 19(孕穗期、灌浆期)的水分胁迫产量差未达到 *PTWSO* 的 10%。而灌溉量为 40 mm 时,方案 19 的最大水分胁迫产量差达到了当年 *PTWSO* 的 22.6%,因此,灌溉量为 40 mm 时,所有方案都无法满足冬

小麦的正常生长,均为无效灌溉方案。在各有效灌水方案中,灌溉贡献率处于 68.3%~69.2%,差异仅有 0.9%。可见,在有效灌水方案中,灌溉 70 mm 的方案(方案 19)以最少的灌溉量达到了较大的灌溉贡献率且其水分胁迫产量差也小于当年 *PTWSO* 的 10%,既保证了高产又可以保证了节水灌溉,即达到了最优的灌溉效果。

缺水年灌溉量为 130 mm 时,模拟结果只有 4 个灌溉方案(方案 13、16、17、19)的水分胁迫产量差未达到当年 *PTWSO* 的 10%。在灌溉量为 100 mm

表 3 冬小麦两次灌溉模拟结果

Table 3 The simulation result of irrigating the winter wheat twice

	$PTWSO/$ $kg \cdot hm^{-2}$	灌溉量 /mm	平均 $WTWSO$ / $kg \cdot hm^{-2}$	最大 $WTWSO$ / $kg \cdot hm^{-2}$	最大水分胁迫 产量差/ $kg \cdot hm^{-2}$	灌溉 贡献率/%
丰水年	9731	0	2996.0	2996	6735	0.0
		40	5206.1	7529	2202	60.2
		70	6585.8	9460	271	68.3
		100	7396.4	9728	3	69.2
		130	7759.2	9731	0	69.2
缺水年	6806	0	264	264	6542	0.0
		40	1056.1	2509	4297	91.8
		70	2067.0	4693	2113	95.6
		100	3171.7	6060	746	96.6
		130	3871.4	6684	122	97.0
平水年	7809	0	51	51	7748	0.0
		40	1515.7	2919	4890	98.0
		70	3300.8	5843	1966	99.0
		100	4284.7	7336	473	99.2
		130	5224.7	7809	0	99.3

时,方案 6(拔节期、孕穗期)的水分胁迫产量差为当年 $PTWSO$ 的 11.0%。然而,灌溉量为 70 及 40 mm 时,水分胁迫产量差均远大于当年 $PTWSO$ 的 10%,即灌溉低于 70 mm 均不能达到冬小麦生育期水分的需求。在各有效灌水方案中,灌溉贡献率处于 96.6%~97.0%,差异仅有 0.4%。可见,在有效灌水方案中,灌溉 100 mm 时的方案 17(拔节期、灌浆期)的灌溉贡献率为 96.6%,以最少的灌溉量达到了较大的灌溉贡献率且其水分胁迫产量差也接近当年 $PTWSO$ 的 10%,既节省了水源又可以满足冬小麦的正常生长,故此方案为缺水年最佳节水灌溉方案。

平水年灌溉 130 mm 时有 4 个灌溉方案(方案 13、16、17 和 19)的水分胁迫产量差均未达到当年 $PTWSO$ 的 10%。灌溉量为 100 mm 时,有 2 个方案(方案 16 和 19)的水分胁迫产量差未达到 $PTW-$

SO 的 10%。在灌溉量为 70 及 40 mm 时,水分胁迫产量差分别不低于当年 $PTWSO$ 的 29.9% 和 63.7%,故这两个灌溉量的方案均视为无效方案。在各有效灌水方案中,灌溉贡献率处于 99.17%~99.22%,在方案 19 灌溉 100 mm 所得 $WTWSO$ 可达到 $PTWSO$ 的 94.2%。可见,在平水年灌溉 100 mm 时方案 19(孕穗期、灌浆期)以较少的灌溉量达到了较大的灌溉贡献率,既有效利用了水资源又满足冬小麦正常生长所需水分,故此方案为平水年最佳灌溉方案。

3.3 三次灌溉产量模拟

冬小麦主要生育期组合成三次灌溉方案,如表 4 所示。

结合以上灌溉方案,模拟方法如两次灌溉模拟,在进入生育期的第一天进行灌溉模拟,如当天有降

表 4 冬小麦三次灌溉的模拟方案

Table 4 The simulation program of irrigating the winter wheat three times

灌溉方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
发育期	播种	播种	播种	播种	播种	播种	播种	播种	播种	播种	播种	播种
	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬	返青	返青	返青	返青	拔节	拔节	拔节
	返青	拔节	孕穗	灌浆	乳熟	拔节	孕穗	灌浆	乳熟	孕穗	灌浆	乳熟
灌溉方案编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	播种	播种	播种	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬
	孕穗	孕穗	灌浆	返青	返青	返青	返青	拔节	拔节	拔节	孕穗	孕穗
灌溉方案编号	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
	越冬	返青	返青	返青	返青	返青	返青	拔节	拔节	拔节	孕穗	
	灌浆	拔节	拔节	拔节	孕穗	孕穗	灌浆	孕穗	孕穗	灌浆	灌浆	
发育期	乳熟	孕穗	灌浆	乳熟	灌浆	乳熟	乳熟	灌浆	乳熟	乳熟	乳熟	

雨则选取最近的无降水日进行灌溉处理。模拟分 4 个灌溉等级 (40、70、100 以及 130 mm), 结果见图 5。

不难看出,在丰水年和平水年生长期,4 个不同灌溉量的曲线差距较小,即在较少的灌溉量 (70 mm) 时适宜的灌溉方案也可达到较大灌溉量 (130 mm) 的灌溉效果。而缺水年,不同灌溉量曲线之间相差较大,即缺水年需要更大的灌溉量来维持冬小麦的正常生长。

在丰水年 WTWSO 的最大值灌溉量为 130 mm 时出现在方案 17、29 和 30,灌溉量为 100 和 70 mm 的最大值均出现在方案 29 (返青期、孕穗期、灌浆期),方案 32 在灌溉 40 mm 时是同灌溉量的模拟结果中的最大值。缺水年灌溉 130 mm 时,方案 27、

29、32 和 33 为模拟结果中的最大值,而在灌溉量为 100 mm 以下时,WTWSO 的最大值均出现在方案 32 (拔节期、孕穗期、灌浆期)。可见,在全生育期三次灌溉中,方案 29 和 32 可达到最佳效果。

同以上两个灌溉方案的分析可以得出,丰水年灌溉 40~70 mm 时,灌溉方案 29 (返青期、孕穗期、灌浆期) 或 32 (拔节期、孕穗期、灌浆期) 能以较少的灌溉量达到最优的灌溉效果。在缺水年灌溉 70 mm 时,方案 32 (拔节期、孕穗期、灌浆期) 能以最少的灌溉量带来较大的产量,达到了最优的灌溉效果。在平水年灌溉 70 mm 时,方案 32 (拔节期、孕穗期、灌浆期) 为最佳灌溉方案,方案 26、27 和 29 也可达到较优的灌溉效果。

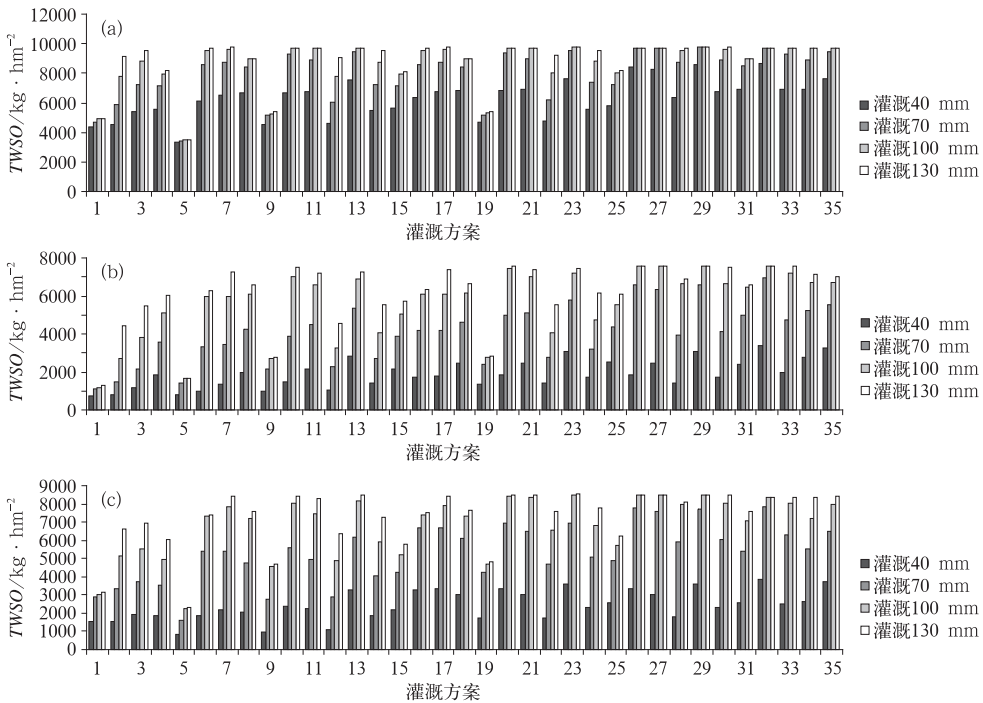


图 5 保定市冬小麦各年型代表生长期的三次灌溉模拟
 (a) 丰水年 2003/2004 年生长期, (b) 缺水年 2005/2006 年生长期,
 (c) 平水年 2008/2009 年生长期

Fig. 5 The simulation of irrigating winter wheat three times
 (a) wet year 2003/2004, (b) drought year 2005/2006, (c) normal year 2008/2009

4 结论与讨论

4.1 结论

不同的灌溉时间与冬小麦产量密切相关,不同

的灌溉量对冬小麦产量的影响程度也不同。在实际农业生产中,要依据不同年型及不同水源状况对灌溉方案进行选择。

(1) 对整个生长期仅有一次灌溉研究可见:在生长发育旺盛时期的灌溉对冬小麦产量形成有很大决定作用,如在抽穗期—灌浆期灌溉产量最高,在拔

节期—孕穗期灌溉产量次之,而在越冬、返青等时期进行灌溉对产量形成作用较小。韩慧芳等(2010)研究表明在拔节或抽穗期灌溉,会显著提高穗数和穗粒数;在灌浆期灌溉,显著提高千粒重。李全起等(2011)也表明在拔节及抽穗期灌溉显著提高了冬小麦的水分利用效率和籽粒产量。这些研究结果均与本文结论相符。同样是一次灌溉,不同的灌溉量增产效果不同,较大灌溉量有更大的产量。因此,如果只有一次灌溉机会,在抽穗期—灌浆期对实际生产最有效,增加灌溉量也对产量的提高有一定的作用。在降水越少的年份,灌溉量对产量的影响越大。

(2)对整个生长期有两次灌溉研究可见:灌水量越多对小麦产量贡献越大,研究也发现灌溉达到100 mm以上若继续增加灌溉量对增加产量的贡献不大,合适的灌溉方案可以以较少的灌溉量获得更大的经济效益。假如冬小麦全生育期只允许进行两次灌溉,在方案17(拔节期、灌浆期)或方案19(孕穗期、灌浆期)灌溉70~100 mm,既保证了高产又可以实现节水灌溉,达到较优的灌溉效果。前人曾在未考虑年型的条件下,得出结论在拔节和抽穗期各灌溉60 mm为宜(吕凤荣等,2000)。与本文中拔节期和灌浆期灌溉最佳略有偏差,由于WOFOST模型中只定义了出苗期、开花期以及成熟期的具体日序,所以对其他生育期的判断可能略有偏差。

(3)若整个生长期可有三次灌溉,则灌溉方案32(拔节期、孕穗期、灌浆期)为最佳方案,依据不同年型选择40~70 mm不等的灌溉量,能够以较少的灌溉量达到最优的灌溉效果。

4.2 保定市冬小麦灌溉现状及改进措施

1988年以前,冬小麦灌水次数大多为7~9次。而后,在试验和示范的基础上,大面积推广节水灌溉制度,推广后灌水次数减少到目前的5~6次(包括播前水),白月明等(2004)对冬小麦关爱减损经济效益进行了探讨,指出灌溉5~6次水既浪费水资源,又降低了经济效益。在水分关键期进行灌溉可以大大提高水分利用率。本文通过对1~3次不同灌溉方案的研究,筛选出了不同年型适宜的灌溉方案,建议3次关键期的灌溉可以满足保定冬小麦的生产要求,兼顾节水和产量提高水分利用效率。

为了保证冬小麦的正常生长和产量的稳定与提高,在制定冬小麦灌溉方案时,应考虑冬小麦生育期内的降水量和降水年型,根据不同年型选择文中

结论适宜的灌溉时间及灌溉量。降水量及其分布的差异对产量的影响,在选择灌溉方案时应根据具体情况酌情考虑。

4.3 讨论

本研究中将各典型年的其他限制条件均置于最优状态,突出降水对冬小麦的影响,有利于更清晰地了解不同灌溉方案对冬小麦最终产量的贡献。利用WOFOST模型对不同降水年型冬小麦灌溉方案的模拟,可以实现灌溉方案的定量化和动态化。

WOFOST模型考虑主要的生长发育过程,没有考虑病虫害、田间管理和气候变化等因果。由于时间所限,研究还需要进行更多的田间试验,考虑多品种的变化及模型应用尺度等问题,这些都有待于进一步的研究。

参考文献

- 白月明,霍治国,刘玲. 2004. 冬小麦灌溉减损经济效益的初步探讨. 自然灾害学报,13(1):88-93.
- 成林,刘荣花,马志红,等. 2012. 缺水和灌水对冬小麦产量影响评估. 干旱地区农业研究,30(2):101-106.
- 高永刚,王育光,殷世平,等. 2006. 世界粮食研究模型在黑龙江省作物产量预报中的应用. 中国农业气象,27(1):27-30.
- 郭建茂. 2007. 基于遥感与作物生长模型的冬小麦生长模拟研究. 南京:南京信息工程大学.
- 韩慧芳,李全起,董宝娣. 2010. 灌溉频次和时期对动画小麦籽粒产量及品质特性的影响. 生态学报,30(6):1548-1555.
- 康西言,李春强,高建华. 2010. 河北省冬小麦生育期蒸降差的时空变化及其原因分析. 中国农业气象,31(2):261-266.
- 康西言,顾光芹,史印山,等. 2011. 冬小麦干旱指标及干旱预测模型研究. 中国生态农业学报,19(4):860-865.
- 李德,张学贤,刘瑞娜. 2012. 冬小麦冬季干旱时段灌溉气象适宜指数研究. 气象,38(12):1565-1571.
- 李昊宇,王建林,郑昌玲,等. 2012. 气候适宜度在华北冬小麦发育期预报中的应用. 气象,38(12):1554-1559.
- 李良涛,毛振强,牛灵安. 2010. 基于作物生长模型的冬小麦灌溉方案研究. 灌溉给排水学报,29(2):22-27.
- 李全起,沈加印,赵丹丹. 2011. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响. 农业工程学报,27(3):33-36.
- 李艳,薛昌颖,刘园,等. 2008. APSIM模型对冬小麦生长模拟的适应性研究. 气象,34(T1):271-279.
- 刘布春,王石立,马玉平. 2002. 国外作物模型区域应用研究进展. 气象科技,30(4):193-203.
- 吕凤荣,季书勤,赵淑章. 2000. 灌水次数和时期对小麦产量的影响. 河南农业科学,10:5-6.
- 马玉平,王石立,张黎,等. 2005a. 针对华北小麦越冬的WOFOST模型改进. 中国农业气象,26(3):145-149.
- 马玉平,王石立,张黎,等. 2005b. 基于遥感信息的华北冬小麦区域

- 生长模型及模拟研究. 气象学报, 63(2):204-215.
- 裴宏伟, 孙宏勇, 沈彦俊, 等. 2011. 不同灌溉处理下冬小麦水平衡与灌溉增产效率研究. 中国生态农业学报, 19(5):1054-1059.
- 王纯枝, 李良涛, 陈健, 等. 2009. 作物产量差研究与展望. 中国生态农业学报, 17(6):1283-1287.
- 王琦, 郭建茂, 郑腾飞, 等. 2013. 基于作物模型的冬小麦气候适宜度算法研究. 中国农学通报, 29(32):374-378.
- 王石立, 马玉平. 2008. 作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考. 气象, 34(6):3-10.
- 王涛, 吕昌河, 于伯华, 等. 2010. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价. 自然资源学报, 25(3):475-487.
- 王学, 李秀彬, 辛良杰. 2013. 河北平原冬小麦播种面积收缩及由此节省的水资源量估算. 地理学报, 68(5):694-707.
- 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 2003. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究. 植物生态学报, 27(5):594-602.
- 吴荣军, 史继清, 关福来, 等. 2013. 基于风险区划的农业干旱保险费率厘定——以河北省冬麦区为例. 气象, 39(12):1649-1655.
- 宋艳玲, 董文杰. 2006. 1961—2000 年干旱对我国冬小麦产量的影响. 自然灾害学报, 15(6):235-240.
- 孙琳丽, 马玉平, 俄有浩, 等. 2013. 基于约束性分析的数据与作物模型同化方法. 应用气象学报, 24(3):287-296.
- 朱自玺, 牛现增, 付湘军. 1987. 冬小麦耗水量和耗水规律的分析. 气象, 13(2):29-32.
- 张皓, 冯利平. 2010. 近 50 年华北地区降水量时空变化特征研究. 自然资源学报, 25(2):270-278.
- 张黎, 王石立, 何延波, 等. 2007. 遥感信息应用于水分胁迫条件下的华北冬小麦生长模拟研究. 作物学报, 33(3):401-410.
- 张雪芬, 余卫东, 王春乙, 等. 2006. WOFOST 模型在冬小麦晚霜冻害评估中的应用. 自然灾害学报, 15(6):337-341.
- 赵翠光, 李泽椿. 2012. 华北夏季降水异常的客观分区及时间变化特征. 应用气象学报, 23(6):641-649.
- 赵聚宝. 1987. 沧州地区冬小麦的水分供需特征及水资源的合理利用. 气象, 13(5):23-27.
- Boogaard H L, Wit de A J W, Roller te J A, et al. 2011. WOFOST CONTROL CENTRE 1. 8: User's guide for the WOFOST CONTROL CENTRE 1. 8 and the crop growth simulation model WOFOST 7. 1. 3. Wageningen (Netherlands), Alterra, Wageningen University & Research Centre.
- Boogaard H L, van Diepen C A, Rotter R P, et al. 1998. WOFOST 7. 1 User's guide for the WOFOST 7. 1 crop growth simulation model and WOFOST Control Centre 1. 5. Technical document 52. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
- Hooijer A A, van der Wal T. 1994. CGM S version 3. 1, user manual. Technical document 15. 1. SC-DLO, Wageningen, 17.
- Huygen, eds. 1990. Simulation studies on the limit ations to maize production in Zambia. Report 27. SC-DLO, Wageningen, 99.