文章编号:1000-7601(2019)03-0117-06

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.15

## 旱地小麦产量及其构成因素灌溉效应的模拟分析

聂志刚1,任新庄2,李 广3,雒翠萍1,董莉霞1,王 钧1,逯玉兰1

(1.甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070; 3.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为揭示灌水时期与灌水量对黄土丘陵区小麦产量及其构成因素的影响规律,依据黄土丘陵典型区域定 西 1971 - 2016 年气象数据及定 西市安定区 凤翔镇安家沟村 2016 年大田试验数据,利用 APSIM (Agricultural Production Systems Simulator)平台,动态模拟各灌溉处理下的小麦生长发育过程,并对各灌溉响应进行模拟分析。结果表明:小麦全生育期需水量为 315.25 mm,各生育阶段需水量为播种~出苗 21.13 mm、出苗~分蘖 26.60 mm、分蘖~拨节 33.27 mm、拔节~孕穗 77.17 mm、孕穗~开花 69.31 mm、开花~灌浆 36.19 mm、灌浆~成熟 51.58 mm。为提高产量,最佳灌水时期应在播种至拔节,灌水量不宜超过 60 mm;开花前各生育阶段灌溉处理都明显提高了单位面积籽粒数量,其中以分蘖~拔节阶段(TS)最明显,拔节~孕穗阶段(JS)灌水量不宜超过 80 mm、孕穗~开花阶段(BS)灌水量不宜超过 20 mm。开花~灌浆阶段(FS)灌水量 40 mm 对粒重增加的促进作用最明显。

关键词:小麦产量;APSIM;灌水时期;灌水量;黄土丘陵区

中图分类号:S512.1;S126 文献标志码:A

# Simulation analysis of irrigation effect on yield and its constitute factors of dryland wheat

NIE Zhi-gang<sup>1</sup>, REN Xin-zhuang<sup>2</sup>, LI Guang<sup>3</sup>, LUO Cui-ping<sup>1</sup>, DONG Li-xia<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, LU Yu-lan<sup>1</sup>

- (1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
  - 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
  - 3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to reveal the influence of irrigation time and amount on yield and its constituent factors of wheat in the hill-gullied region of the Loess Plateau, using the field experimental data in Anjiagou village, Fengxiang town, Anding district of Dingxi in 2016 and the meteorological data in Anding district of Dingxi from 1971 to 2016 with APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) platform, the growth process of wheat were dynamically simulated under different irrigation treatments and the effect of each irrigation treatment were analyzed. The results showed that the water requirements of wheat during whole growth period was 315.25 mm. The water requirements for different growth stages were different that was 21.13 mm from sowing to seeding, 26.60 mm from seeding to tillering, 33.27 mm from tillering to jointing, 77.17 mm from jointing to booting, 69.31 mm from booting to flowering, 36.19 mm from flowering to filling, and 51.58 mm from filling to maturation. To improve yield, the best irrigation stage should be from sowing to jointing, and the irrigation amount should not be more than 60mm. Irrigation treatment at each growing stage before flowering significantly increased the grain number per unit area, among which it was most obvious from tillering to jointing (TS). The irrigation amount from jointing to booting (JS) and booting to flowering (BS) should not exceed 80 mm and 20 mm, respectively. The optimum irrigation treatment for increasing grain weight was from flowering to filling (FS) and the irrigation amount was 40 mm.

收稿日期:2018-04-15 修回日期:2019-04-13

基金项目:国家自然科学基金(31660348,31560378,31560343);甘肃农业大学青年导师基金资助项目(GAU-QNDS-201701);甘肃农业大 学学科建设基金项目(GAU-XKJS-2018-254)

作者简介: 聂志刚(1980-), 男, 甘肃兰州人, 主要从事作物生长模拟模型研究。 E-mail: niezg@ gsau.edu.cn

通信作者:李广(1971-),男,内蒙化德人,教授,主要从事农业生态方面的研究。E-mail;lig@gsau.edu.cn

Keywords: wheat yield; APSIM; irrigation time; irrigation amount; the hill-gullied region of the Loess Plateau

水分亏缺是限制小麦产量的最主要原因,在水资源严重不足的黄土丘陵区,如何经济合理地利用有限的水资源是小麦生产中重要的技术问题<sup>[1]</sup>。欲制定经济合理的农田灌溉方案,对小麦在不同生育阶段水分的需求以及灌水时期与灌水量对产量及其构成因素影响规律的揭示尤为重要。

近年来,随着信息技术的快速发展,作物模型 作为定量分析灌溉措施对农作物生产影响效应的 方法已经得到广泛的应用。滕晓伟等[2]利用 AquaCrop 模型针对陕西杨凌及周边区域的冬小麦 生产设置了固定时间和等量灌水的4种灌溉情景, 并对产量和生物量进行模拟研究,表明在播种后第 77 天进行冬灌并且在播种后第 172 天的拔节期再 进行灌水的两种情景可获得最大的生物量,在播种 后第77天进行冬灌、播种后第172天拔节期和播种 后第200天抽穗期再分别灌水,小麦产量最高。王 文佳等[3]运用 DSSAT 模型对陕西杨凌不同降水年 型冬小麦灌溉制度进行研究,表明枯水年、平水年 和丰水年最优灌溉定额分别为:125、75、50 mm 左 右。张文萍等[4]建立早稻产量、千粒质量、有效穗、 穗粒数与出苗~分蘖、分蘖~孕穗以及孕穗~抽穗3 个阶段灌水量之间的统计回归数学模型,揭示了孕 穗~抽穗期的灌溉对早稻产量的影响最大,分蘖~ 孕穗期的灌溉次之,出苗~分蘖期影响最小,可在出 苗~分蘖、分蘖~孕穗期适当亏缺灌溉的节水规律。 众多学者因地制宜,利用作物模型揭示灌溉处理对 作物产量形成过程的影响规律,为当地农作物生产 灌溉方案的制定提供了决策依据,然而针对小麦灌 水时期与灌水量阈值区间准确量化的研究还不够, 因此不同灌溉方案对小麦产量形成过程的影响规 律,仍有待进一步研究。定西是典型的黄土丘陵 区,小麦是该区域重要的粮食作物,目前针对该区 域小麦产量及其构成因素灌溉效应的研究鲜有报 道。为揭示灌水时期与灌水量对小麦产量及其构 成因素的影响规律,本文依据定西 1971-2016 年气 象数据,定西市安定区凤翔镇安家沟村 2016 年大田 试验数据,利用 APSIM (Agricultural Production Systems Simulator)模拟平台,动态模拟各灌溉处理下 的小麦产量形成过程,并对各灌溉响应进行模拟分 析,为黄土丘陵区小麦生产中制定经济合理的农田 灌溉方案提供一定的决策依据。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

大田试验于 2016 年在甘肃省定西市安定区风翔镇安家沟村进行。该地区海拔 1 980 m,气候属中温带半干旱区;年均气温为 6.3℃,年均≥10℃积温 2 235.1℃,年均日照时数 2 408.6 h,平均无霜期 141 d;多年平均降雨量为 385.00 mm,降水集中在 7-9 月份,且多暴雨事件发生,年均蒸发量 1 549.0 mm。

#### 1.2 试验设计

大田试验总灌水量设 5 个水平,分别是 0、50、100、150、200 mm,所有水平分别在分蘖~拔节阶段的 5 月 8 日、拔节~孕穗阶段的 5 月 27 日以及开花~灌浆阶段的 6 月 23 日进行漫灌。试验小区面积 6 m×4 m,保护行 0.5 m,完全随机区组设置,共计 15 个小区。供试作物为"甘春 32 号"春小麦,播种量187.5 kg·hm<sup>-2</sup>,免耕播种机播种,播深均为 7 cm,行列距 0.25 m<sup>[5]</sup>。各处理施肥量同当地,且作为基肥播种时一次性施入,其他田间管理亦同当地。以当地适宜播期每年 3 月 19 日正常播种,7 月 22 日收获。全生育期可划分为播种、出苗、分蘖、拔节、孕穗、开花、灌浆、成熟等生育时期。

#### 1.3 APSIM 平台简介

APSIM 是由澳大利亚农业生产系统研究组 (Agricultural Production Systems Research Unit, APS-RU),自1991年开始研制的农业生产系统模拟平台。国内外对 APSIM 的地域适用性、气候变化对作物的影响效应、水土保持评价以及水肥管理等方面取得了大量的研究成果<sup>[5-11]</sup>,该平台以作物属性模块(APSIM-Wheat)为通用作物生长模拟框架<sup>[7]</sup>,在研究区气象参数库支持及土壤参数库驱动下,可实现作物生长发育过程的动态模拟。

#### 1.4 产量、气象及土壤数据

研究区多年(1971-2015年)产量数据来源于 定西市安定区历年统计年鉴,2016年产量为安家沟 村实测数据。

甘肃省气象局提供定西市安定区多年(1971-2016年)历史气象资料。APSIM 所需逐日气象数据:逐日太阳辐射量(MJ·m<sup>-2</sup>)、逐日最高气温(℃)、逐日最低气温(℃)和逐日降水量(mm),逐日太阳辐射值利用李广等<sup>[5]</sup>在黄土丘陵区 APSIM 适用性研究中所使用的日照时间转换计算法获取。基于田间试验,根据李广等<sup>[5]</sup>在黄土丘陵区 APSIM

适用性研究中经过率定的土壤属性数据,得到研究 区土壤主要属性参数(表1)。

#### 1.5 参数校准

利用 2016 年田间实际测算数据,以及李广等<sup>[5]</sup> 在黄土丘陵区 APSIM 适用性中的研究,经过反复修 改和订正,可得研究区本土化作物基本属性参数库 (表 2)。基于 APSIM V7.7 平台,设计 APSIM - Wheat 控制文件 Wheat.xml,链接研究区 1971-2016 年气象数据参数库和土壤数据参数库,实现旱地小麦生长发育的动态模拟。

表 1 APSIM 中研究区土壤主要属性参数

Table 1 Soil property of the experiment sites used in APSIM

类别	项目	土层深度 Soil depth/mm								
Category	Item	50	100	300	500	800	1100	1400	1700	2000
土壤水分 Soil water	容重 BD/(g・cm <sup>-3</sup> )	1.29	1.23	1.32	1.20	1.14	1.14	1.13	1.12	1.11
	萎蔫系数 WC/(mm・mm <sup>-1</sup> )	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.13	0.13
	最大持水量 DUL/(mm・mm <sup>-1</sup> )	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.26	0.26
	饱和水分含量 SM/(mm・mm <sup>-1</sup> )	0.46	0.49	0.45	0.50	0.52	0.52	0.48	0.53	0.53
	风干系数 CA/(mm・mm <sup>-1</sup> )	0.01	0.01	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	土壤导水率 SWC/(mm・h <sup>-1</sup> )	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	小麦有效水分下限 LLW/(mm·mm <sup>-1</sup> )	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15

注: BD 为容重,WC 为萎蔫系数,DUL 为最大持水量,SM 为饱和水分含量,CA 为风干系数,SWC 为土壤导水率,LLW 为小麦有效水分下限。

Note: BD is bulk density, WC is wilting coefficient, DUL is drainage upper limit, SM is saturated moisture, CA is coefficient of air-dry, SWC is conductivity of soil water, and LLW is lower water limit of wheat.

表 2 APSIM 中供试小麦主要属性初始参数

Table 2 Initial property of the trial wheat used in APSIM

参数 Parameter	值 Value
主茎叶数 Leaf number of main stem/(piece·stem-1)	7
分蘗质量 Weight of tiller/(g・tiller <sup>-1</sup> )	1.22
单株质量 Weight of single plant/g	4
株高 Stem length/cm	100
穗下节长 Lower internode length/cm	33
每克茎籽粒数 Grain number per gram stem/(grain · g <sup>-1</sup> )	25

#### 1.6 检验方法

模型检验方法主要采用均方根误差(RMSE)以及决定系数( $R^2$ )对模拟值与观测值的拟合度进行分析。计算公式如下:

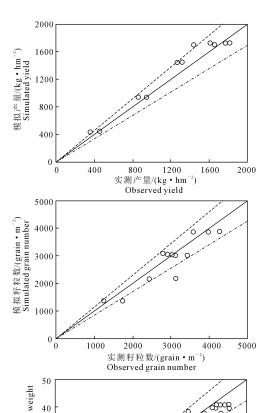
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_{Obs} - Y_{Sim})^{2}}$$
 (1)

式中,RMSE 为均方根误差, $Y_{Obs}$  为实测值; $Y_{Sim}$  为模拟值。RMSE 的值越小,表明模拟值与实测值之间误差越小。

## 2 结果与分析

#### 2.1 APSIM 检验

依据定西市安定区凤翔镇安家沟村 2016 年 5 个灌水量、3 个灌水时期的田间试验实测数据,对 APSIM 平台进行检验。小麦产量、籽粒数和千粒重模拟值与实测值之间的关系如图 1 所示。由图可知,小麦产量模拟值与实测值绝大多数分布于 1:1 实线的左右,误差控制在-15%~+15%的范围内,决定系数  $R^2$ 为 0.957,均方根误差  $R^2$  为 131.94 kg·hm<sup>-2</sup>, APSIM 对小麦产量模拟精度较高;小麦籽粒



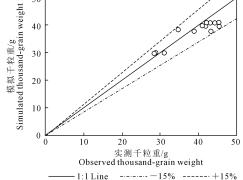


图 1 小麦产量、籽粒数和千粒重模拟与实测值关系

1 The relationship of simulated and observed value of yield, grain number and thousand-grain weight of wheat

数模拟值与实测值大多数分布在-15%~+15%的范围内,决定系数  $R^2$ 为 0.874,均方根误差 RMSE 为 332.85 grain·m<sup>-2</sup>,误差主要是由于 APSIM 中与小麦籽粒数模拟相关参数,即每克茎籽粒数的估算准确度所造成<sup>[12]</sup>,整体来看,APSIM 仍可用于小麦籽粒数的模拟;小麦千粒重模拟值与实测值全部分布在-15%~+15%的范围内,决定系数  $R^2$  为 0.883,均方根误差 RMSE 为 2.28 g,APSIM 对小麦千粒重模拟精度较高。

#### 2.2 小麦各生育期需水量模拟分析

利用研究区多年(1971-2016年)产量数据及历史气象资料,对研究区小麦产量与各生育阶段降水量进行回归分析。研究区 1971-2016年小麦各生育阶段平均降水量特征如表 3 所示。小麦全生育期内平均降水量为 181.26 mm。小麦各生育阶段平均降水量以灌浆~成熟阶段为最多,可达 67.14 mm,占年均降水量的 17.44%,且变异系数最低,这表明灌浆~成熟阶段的降水最为稳定,这与定西地区地形复杂多山脉屏障,且降水时期分布有关,该地区降水多分布在 7-9 月份,而春小麦灌浆期正好在此段时间内[13]。开花~灌浆阶段平均降水量占年均总降水量

的比例最小,这与开花~灌浆历时较短有关。

利用 DPS 软件对无量纲化处理之后的变量进行回归分析,得出各生育阶段降水量对产量的多元回归方程为:  $Y = -0.08 + 0.28X_1 + 0.19X_2 + 0.69X_3 + 1.19X_4 - 1.98X_5 + 0.45X_6 + 0.63X_7 - 0.6X_8 - 0.21X_{12} - 0.19X_{22} - 0.68X_{32} - 0.79X_{42} + 1.12X_{52} - 0.23X_{62} - 1.81X_{72} + 0.71X_{82} + 0.51X_1X_2 - 0.58X_1X_3 - 0.02X_1X_4 + 1.09X_1X_5 + 1.17X_1X_6 - 2.16X_1X_7 + 0.4X_1X_8 + 1.06X_2X_3 + 1.54X_2X_4 - 2.34X_2X_5 + 2.27X_2X_7 - 0.9X_2X_8 + 0.85X_3X_4 + 1.72X_3X_5 - 0.21X_3X_6 + 0.05X_4X_5 - 0.88X_4X_6 - 0.6X_4X_7 - 2.13X_4X_8 - 0.55X_5X_6 + 0.28X_5X_7 + 3.75X_5X_8 + 1.52X_6X_7 - 0.8X_6X_8$ 。其中,Y是小麦产量, $X_1$ 至  $X_8$ 分别为播种~出苗、出苗~分蘖、分蘖~拔节、拔节~孕穗、孕穗~开花、开花~灌浆、灌浆~成熟和休闲阶段的降水量。回归方程相关系数为 0.9999,且  $\alpha$ <0.01,回归方程能够反映各生育阶段降水量与产量之间的关系。

为进一步分析小麦各生育阶段降水量对产量的影响,对上述回归方程分别求导进行降维处理,得到单因素降维方程(表4),小麦休闲阶段降水量 $(X_8)$ 影响不显著,被回归方程忽略。

表 3 1971-2016 年小麦各生育阶段降水量特征

Table 3 Characteristics of precipitation of different wheat growth stages from 1971 to 2016

生育阶段 Growth stage	生育阶段平均降水量/mm Annual average precipitation of each growth stage	变异系数/% Coefficient of variation	生育阶段平均降水量比例/% The proportion of annual average precipitation of each growth stage
播种~出苗 Sowing~seeding	10.93	72.69	2.84
出苗~分蘗 Seeding~tillering	16.88	76.85	4.38
分蘗~拔节 Tillering~jointing	23.63	70.50	6.14
拔节~孕穗 Jointing~booting	31.18	82.09	8.10
孕穗~开花 Booting~flowering	21.19	84.59	5.50
开花~灌浆 Flowering~filling	10.31	107.64	2.68
灌浆~成熟 Filling~maturation	67.14	51.03	17.44

#### 表 4 单因素降维方程

Table 4 The dimension reduction equations of single factors

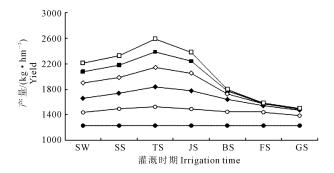
因素 Factor	单因素方程 Single factor dimension
$X_1$	$Y_1 = -0.08 + 0.28X_1 - 0.21X_1^2$
$X_2$	$Y_2 = -0.08 + 0.19X_2 - 0.19X_2^2$
$X_3$	$Y_3 = -0.08 + 0.69X_3 - 0.68X_3^2$
$X_4$	$Y_4 = -0.08 + 1.19X_4 - 0.79X_4^2$
$X_5$	$Y_5 = -0.08 - 1.98X_5 + 1.12X_5^2$
$X_6$	$Y_6 = -0.08 + 0.45X_6 - 0.23X_6^2$
$X_7$	$Y_7 = -0.08 + 0.63X_7 - 1.81X_7^2$

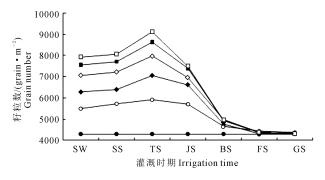
在各因素试验水平值范围内,当  $\mathrm{d}Y_i/\mathrm{d}X_i=0$ 时,可得各生育阶段的需水量阈值,分别为播种~出苗 21.13 mm、出苗~分蘖 26.60 mm、分蘖~拔节 33.27 mm、拨节~孕穗 77.17 mm、孕穗~开花 69.31 mm、开花~灌浆 36.19 mm、灌浆~成熟 51.58 mm。春小麦全生育期内需水量为 315.25 mm。

## 2.3 不同灌溉处理对产量及其构成因素影响的模 拟分析

依据小麦各生育阶段需水量模拟分析结果.各

生育阶段需水量范围为 77.17~21.13 mm,模拟试验 以大于需水量最大生育阶段(拔节~孕穗)阈值为参 考,确定灌水量上限为100 mm,以小于需水量最小 生育阶段(播种~出苗)阈值为参考,确定灌水量下 限为 0 mm。设计春小麦全生育期 5 个灌水量与 7 个灌水时期的两个因素模拟试验,其中,灌水时期 包括:播种~出苗阶段的3月19日(SW)、出苗~分 蘖阶段的 4 月 9 日(SS)、分蘖~拔节阶段的 5 月 10 日(TS)、拔节~孕穗阶段的5月28日(JS)、孕穗~ 开花阶段的 6 月 8 日(BS)、开花~灌浆阶段的 6 月 24 日(FS)和灌浆~成熟阶段的 6 月 29(GS),灌水 量分别为 20、40、60、80 mm 和 100 mm, 另外设一个自 然处理为对照(CK)。在 APSIM V7.7 平台图形化设 置灌水量,模拟 1971-2016 年产量、籽粒数和千粒重, 模拟值取年均值为分析依据。不同灌溉处理对小麦 产量、籽粒数和千粒重的模拟结果如图 2 所示。





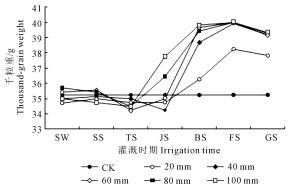


图 2 灌溉处理对小麦产量、籽粒数和千粒重的影响 Fig.2 The effect of irrigation on yield, grain number, and thousand-grain weight of wheat

由图 2 可知,各灌溉处理均提高了小麦产量。 同等灌水量下,分蘖~拔节阶段(TS)灌溉处理对产 量的提高最为明显,其次为拔节~孕穗阶段(JS),再 次为播种~出苗阶段(SW),影响最小的是灌浆~成 熟阶段(GS)。分蘖~拔节阶段(TS),灌水量为100 mm 的产量比自然处理对照(CK)高110.02%。随着 灌水量的增多,产量的增速呈先增加后减弱的趋 势,分蘖~拔节阶段(TS)灌溉处理下,灌水量介于0 ~20、20~40、40~60、60~80、80~100 mm,各区间的 产量增速分别为 14.83、15.50、15.23、12.12 kg· mm<sup>-1</sup>和 10.10 kg·mm<sup>-1</sup>。当孕穗~开花阶段(BS) 灌水量达 60 mm 以上时,对产量的增加无明显的差 别,在开花~灌浆阶段(FS)灌水量达 40 mm 以上 时,对产量的增加也已经没有差别。由此可知,在 开花~灌浆阶段(FS)和孕穗~开花阶段(BS)的灌 水量不宜超过 40 mm 和 60 mm。总体来看,当灌水 量达 60 mm 以上,各灌水时期对产量的增速均减 弱,灌水时期迟于开花期时减弱效果更加明显,因 此,为得到较好的灌溉效果,最佳灌水时期应在播 种至拔节,从效益方面考虑,灌水量不宜超过 60 mm<sub>o</sub>

由图 2 可知,花前灌溉处理都明显的提高了单 位面积籽粒数量,而开花~灌浆阶段(FS)和灌浆~ 成熟阶段(GS)灌溉处理对籽粒数量基本无影响,这 主要是开花后穗分化已经完成造成的。在同等灌 水量下,分蘖~拔节阶段(TS)灌溉处理对籽粒数的 影响最大,其中分蘖~拔节阶段(TS)灌水量为100 mm 的处理籽粒数比对照高 112.06%, 花前各生育 阶段灌溉处理对籽粒数的影响程度大致为 TS>SS> SW>JS>BS,其中拔节~孕穗阶段(JS)灌水量为20 mm 和 40 mm 时,对籽粒数的增加效果优于出苗~ 分蘖阶段和播种~出苗阶段。总体来看,开花前各 生育阶段灌溉处理都明显的提高了单位面积籽粒 数量,其中以分蘖~拔节阶段(TS)灌溉处理最明 显,拔节~孕穗阶段(JS)灌水量超过80 mm、孕穗~ 开花阶段(BS)灌水量超过20 mm、开花后各灌溉处 理,均对籽粒数的增长无明显影响。

由图 2 可知,播种~出苗阶段(SW)和出苗~分 葉阶段(SS)灌溉处理对小麦的粒重增加无明显影响,甚至分蘖~拔节阶段(TS)灌溉处理还会降低籽 粒的粒重,这可能是由于小麦生长前期灌溉效应提 高了单位面积籽粒数量,尽管籽粒数增加,但是干 物质积累有限,导致空瘪籽粒增多,干物质浪费,使 得粒重下降。开花~灌浆阶段(FS)灌溉处理对粒 重增加的影响最大,其中,在开花~灌浆阶段(FS) 和灌浆~成熟阶段(GS)灌水量 40 mm 以上,粒重比对照可分别增加 13.48%、11.06%,灌水量只有 20 mm 时,增加量也可达到 8.51%、7.33%。在孕穗~开花阶段(BS)灌水量 60 mm 至 100 mm 对粒重增加的影响略高于灌浆~成熟阶段(GS)灌水量 40 mm 至 100 mm 处理,当灌水量少于 40 mm 时,粒重增加的效果则不及灌浆期灌浆~成熟阶段(GS) 同等灌水量的处理。在拔节~孕穗阶段(JS)灌水量 80 mm 和 100 mm 对粒重增加有正效应,60 mm 以下则是负效应,灌水量 100 mm 对籽粒增加的效果类似于开花~灌浆阶段(FS)和灌浆~成熟阶段(GS)灌水量 20 mm。因此,提高粒重最佳方案为开花~灌浆阶段(FS)灌水量 40 mm,其次为孕穗~开花阶段(BS)灌水量 60 mm 以及灌浆~成熟阶段(GS)灌水量 40 mm。

## 3 结论与讨论

利用定西市安定区凤翔镇安家沟村 2016 年田间试验数据对 APSIM 平台的适应性进行检验,结果表明,模型对不同灌水时期与灌水量处理下的小麦产量、籽粒数和千粒重的决定系数  $R^2$ 均大于 0.85,均方根误差 RMSE 分别为 131.94 kg·hm<sup>-2</sup>、332.85 grain·m<sup>-2</sup>和 2.28 g·grains<sup>-1</sup>。APSIM 平台对黄土丘陵区小麦产量及构成因素的模拟精确较高。

本研究基于 1971-2016 年的安定区气象数据 及产量数据,对研究区旱地小麦各生育阶段的需水 量进行了模拟分析。研究区多年平均降水量为 385.00 mm, 春小麦全生育期内年均降水量仅占全年 年均降水量的二分之一不到,为 181.26 mm,分析结 果显示,春小麦全生育期内需水量为 315.25 mm,相 比之下,缺口达 133.99 mm。本文模拟分析结果与 杨琪等[14]采用 Mann-Kendall 趋势分析检验法得出 的甘肃河东地区近50年来的春小麦需水量平均值 在 262.16~382.08 mm 之间的结果一致。各生育阶 段的需水量,分别为播种~出苗 21.13 mm、出苗~分 蘖 26.60 mm、分蘖~拔节 33.27 mm、拔节~孕穗 77.17 mm、孕穗~开花 69.31 mm、开花~灌浆 36.19 mm、灌浆~成熟 51.58 mm。 雷娟娟等[15] 对定西地 区小麦全生育期内需水量分析中指出拔节~孕穗需 水量 80.6 mm, 抽穗~开花需水量 67.1 mm, 开花~

灌浆58.67 mm,灌浆期~成熟需水量30.4 mm,本文研究结果与之基本一致。

不同灌水时期与灌水量对旱地小麦产量及其构成因素进行模拟分析,结果表明:为提高产量,最佳灌水时期应在播种至拔节,灌水量不宜超过60mm。开花前各生育阶段灌溉处理都明显提高了单位面积籽粒数量,其中以分蘖~拔节阶段(TS)灌溉处理最明显,拔节~孕穗阶段(JS)灌水量不宜超过80mm、孕穗~开花阶段(BS)灌水量不宜超过20mm。开花~灌浆阶段(FS)灌水量40mm对粒重增加的促进作用最明显。

#### 参考文献:

- [1] 杨文雄.中国西北春小麦[M].北京:中国农业出版社.2016:132-138.
- [2] 腾晓伟,董燕生,沈家晓,等.AquaCrop 模型对旱区冬小麦抗旱灌溉的模拟研究[J].中国农业科学,2015,48(20):4100-4110.
- [3] 王文佳,冯浩,宋献方.基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬 小麦灌溉制度研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):1-10.
- [4] 张文萍,姚帮松,王辉.调亏灌溉献旱稻产量形状与作物灌溉水量模型的研究[J].中国农业科学,2011,1(11):37-40.
- [5] 李广, 黄高宝, William Bellotti, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 牛态学报, 2009, 29(5): 2655-2663.
- [6] 李广,李玥,黄高宝,等基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和  $CO_2$ 浓度升高的响应 [J].中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1088-1095.
- [7] 聂志刚,李广.基于 APSIM 的旱地小麦叶面积指数模拟模型构建 [J].干旱地区农业研究,2013,31(4):94-98.
- [8] 王伟,黄义德,黄文江,等.作物生长模型的适用性评价及冬小麦产量预测[J].农业工程学报,2010,26(3);233-237.
- [9] 何亮,赵刚,靳宁,等.不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析 [J].农业工程学报,2015,31 (14): 148-157.
- [10] 董朝阳,刘志娟,杨晓光.北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J].农业工程学报,2015,31(11):157-164.
- [11] Asseng S, Bar-Tal A, Bowden J W, et al. Simulation of grain protein content with APSIM-N wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2002,16;25-42.
- [12] Zheng B Y, Chenu K, Doherty A, et al. The APSIM-Wheat module (7. 5 R3008) documentation R. Toowoomba; APSRU, 2014;18-19.
- [13] 李葆春,李广.甘肃定西地区降水资源的分布格局[J].草业科学, 2006,23(10):60-62.
- [14] 杨琪,张勃,尹海霞,等.甘肃何东地区近 50 年小麦需水量变化趋势及影响因子[J].生态学杂志,2013,32(11):3074-3081.
- [15] 雷娟娟, 闫丽娟, 李广, 等. 基于 APSIM 模型小麦生育期需水量的模拟分析[J]. 草业科学, 2016, 33(5): 871-877.