

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01485

黄淮海地区冬小麦关键生育期不同灌溉水平对产量影响的模拟

徐建文^{1,2,3} 梅旭荣^{1,4} 居 辉^{1,3} 李迎春^{1,3} 刘 勤^{1,4,*} 杨建莹^{1,4}

¹ 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 / 作物高用水与抗灾减损国家工程实验室, 北京 100081; ² 大连市气象局, 辽宁大连 116001; ³ 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; ⁴ 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081

摘 要: 研究黄淮海地区不同灌溉水平下冬小麦产量的变化规律, 对于识别干旱对冬小麦产量的影响和制定合理的节水灌溉措施具有指导意义。基于 DSSAT 作物模型, 参考各生育阶段的水分亏缺量以及当地的灌溉习惯, 制定模型输入的不同处理的灌溉量, 模拟分析近 30 年黄淮海灌溉冬麦区 4 个典型站点冬小麦关键生育期不同灌溉水平下, 产量及产量构成的相对变化规律, 并且以典型处理为例, 探讨 2 个关键生育阶段减产的累积概率。结果表明, 拔节至抽穗期的水分胁迫对冬小麦的产量影响最大, 产量相对变化主要由水分胁迫引起单位面积粒数的相对变化引起。在重度干旱条件下, 拔节至抽穗期胁迫造成中等程度减产概率约为灌浆期胁迫的 2 倍(山东兖州点除外); 在河北石家庄和天津点, 轻度和重度减产主要由拔节至抽穗期胁迫引起, 而在山东兖州和河南新乡点, 拔节至抽穗期及灌浆期胁迫造成轻度减产概率差别不大, 但灌浆期重度干旱导致一定概率的重度减产。因此, 在黄淮海冬小麦灌区偏南部, 不但要加强拔节至抽穗期的灌溉措施, 还应该注重灌浆期的干旱风险。

关键词: 冬小麦; 生育期; 灌溉; 产量; DSSAT 作物模型; 黄淮海地区

Simulation of Winter Wheat Yield in Response to Irrigation Level at Critical Growing Stages in the Huang-Huai-Hai Plain

XU Jian-Wen^{1,2,3}, MEI Xu-Rong^{1,4}, JU Hui^{1,3}, LI Ying-Chun^{1,3}, LIU Qin^{1,4,*}, and YANG Jian-Ying^{1,4}

¹ State Key Engineering Laboratory of Crops Efficient Water Use and Drought Mitigation, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ² Dalian Meteorological Bureau, Dalian 116001, China; ³ Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; ⁴ Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

Abstract: Water deficiency is recognized as a major problem in winter wheat production in the Huang-Huai-Hai Plain. This study aimed to assess the impact of drought stress on winter wheat yield and raise irrigation proposals for water-saving production in this area. With reference to the fact of water deficits in major growth stages of wheat and the local irrigation practice, we input different irrigation levels (volumes) required by the DSSAT crop model to simulate yield variations in response to irrigation levels at critical growing stages in four typical sites during the past three decades. The cumulative probability for yield reduction was concluded based on irrigation at jointing–heading and filling stages. The greatest yield reduction was found under jointing–heading drought stress, and the relative change rate in yield was two folds to that under drought stress at filling stage. This relative yield change was primarily attributed to the relative change in grain number per square meter caused by water deficiency during jointing–heading stage. Under high-strength drought stress, medium yield reduction dominantly resulted from water deficiency during jointing–heading, with a two-fold probability to that under drought stress at filling stage (except for Yanzhou site); whereas, slight and severe yield reductions at Shijiazhuang and Tianjin sites resulted from early (jointing–heading) drought stress and those at Yanzhou and Xinxiang sites were attributed to either early (jointing–heading) or late (filling stage) drought stress. At Yanzhou and Xinxiang sites, the probabilities of slight yield reduction were similar under early and later drought stressed; however, water deficiency at filling stage resulted in severe yield reduction. These results indicate that irrigation is important not only from jointing to heading but also at filling stage of winter wheat in the southern area of the Huang-Huai-Hai Plain.

本研究由国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB955904)和国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD09B01; 2013BAD11B03)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 刘勤, E-mail: liuqin02@caas.cn, Tel: 010-82109773

第一作者联系方式: E-mail: xujianwen0101@163.com

Received(收稿日期): 2013-10-15; Accepted(接受日期): 2014-06-16; Published online(网络出版日期): 2014-06-21.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140621.0844.002.html>

Keywords: Winter wheat; Growth stage; Irrigation; Yield; DSSAT crop model; The Huang-Huai-Hai Plain

小麦是我国最主要的粮食作物之一,其播种面积占全国农作物播种面积的20%左右,其产量占粮食总产的20%~25%^[1]。黄淮海平原是我国最大的冬麦区,常年小麦播种面积 $8.7 \times 10^3 \text{ km}^2$,占全国小麦播种总面积的55.5%,小麦总产量占全国的61.6%^[2],但黄淮海平原又是我国水资源严重不足的地区之一,人均水资源只有 790 m^3 ,远远低于我国平均水平^[3]。由于黄淮海平原冬小麦生长季正值降水稀少的时期,在冬小麦拔节、抽穗与灌浆的需水关键期(4月至5月),同期降水量仅占需水量的1/5~1/4,水分亏缺量达200 mm左右,因此在冬小麦生产实践中干旱灾害频发^[4]。

干旱对小麦生长发育影响较大的生育期是播种期、拔节到孕穗期以及灌浆期。拔节后到孕穗期为小麦的需水临界期,此时期受旱可造成小花大量退化不孕,粒数大减。灌浆期是小麦一生中需水最多的时期,缺水可使粒小而瘪^[5]。拔节到抽穗期水分胁迫造成的冬小麦减产幅度最大,而灌浆期水分胁迫同样可以造成减产^[6]。籽粒灌浆速率对小麦粒重影响显著,而灌浆期干旱明显影响小麦的灌浆速率,而且使小麦灌浆时间缩短^[7-8]。谢明等^[9]在淮北地区试验表明冬小麦抽穗开花期降水显著偏少,直接影响到小麦开花授粉和灌浆,对产量影响较大。张建平^[10]则使用WOFOST模型模拟分析了不同发育期干旱对冬小麦灌浆的影响。随着农业现代化的发展,华北冬麦区各地灌溉能力有了一定的提高,产量也大幅度增长^[11]。但是在农业生产中,存在冬小麦灌溉用水量过大、农业用水效率低下等问题,导致农业水资源浪费现象严重^[12-14]。目前,国内外学者主要利用农田水分控制试验及计算机模拟试验等方法来研究干旱对作物产量的影响以及制定合理的灌溉策略^[15],而且传统的农田水分控制试验大多局限于单个站点的干旱机理研究,而目前模型模拟试验在具体生育期干旱对产量的影响方面的研究尚不多见。DSSAT模型在近几年来已经被国际和国内的许多学者用于模拟基于未来气候变化、作物胁迫等对作物生长及产量的影响^[16-17]。如研究气候变化对我国小麦产量的影响^[18-19],水肥互作以及不同的灌溉措施对作物产量的影响^[20-21]等。从需水关键生育阶段的角度,使用作物模型探明黄淮海地区不同灌溉水平下冬小麦产量的变化规律,对于更具体地识别干旱对冬小麦产量的影响以及制

定合理的节水灌溉措施具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 资料来源

根据京津地区及河北、山东、河南、安徽和江苏的45个灌溉冬小麦的农业气象站点资料,从中选择了具有1981—2009年田间完整观测数据的4个典型灌溉站点,分别是天津(N117.10, E39.10)、河北石家庄(N114.42, E38.03)、河南新乡(N113.88, E35.32)和山东兖州(E35.57, N116.85)。统计数据包括:(1)近30年逐日降水量(mm)、平均气温()、最低气温()、最高气温()、日照时数(h)、风速(m s^{-1})和平均相对湿度(%),由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供;(2)1981—2009年冬小麦播种日期、发育期(出苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、乳熟期和成熟期)、播种密度、灌溉额、施肥量以及产量和产量构成要素,来源于国家气象信息中心;(3)各土壤层的深度、质地、全氮含量、土壤容重、pH值以及有机碳含量和阳离子交换量等土壤数据,来源于《中国土种志》^[22]。

1.2 作物模型

农业技术转移决策支持系统(Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT)是目前国内外应用最广泛的作物模型之一,可逐日模拟作物生长和发育过程,可响应许多因素,包括作物遗传特性、管理措施、环境、氮素和水分的胁迫、病虫害等,主要用于农业试验分析、农业产量预报、农业生产风险评估、气候对农业的影响评价等^[23]。

在检验模型的适用性时,使用归一化均方根误差 *NRMSE* 来计算模型模拟的误差,用符合度 *D* 来判定模拟值与实测值分布的符合程度。

$$NRMSE = \frac{RMSE}{obsi} \times 100\% \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^n (simi - obsi)^2 \right) / n \right]} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (simi - obsi)^2}{\sum_{i=1}^n \left(|simi - \overline{obsi}| + |obsi - \overline{obsi}| \right)^2} \quad (3)$$

($0 < D < 1$)

式中,*RMSE* 为均方根误差, *simi* 为模拟值, *obsi* 为实测值, $\overline{obsi}$ 为实测值的平均值, *n* 为样本容量。

1.3 实验设计

首先计算出各站点冬小麦拔节至抽穗期与开花至乳熟期的水分亏缺量，并以此为依据结合当地的灌溉实际情况，确定实验处理的灌溉量。

$$WD = E - P^{[24]}$$
(4)

$$E = Kc \times PE$$
(5)

式中， WD 为某一阶段的水分亏缺量， P 为某一阶段的实际降水量， E 为某一阶段的需水量， Kc 为作物系

数， PE 为某时段的潜在蒸散量，采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法^[25]计算。

为了研究不同水分胁迫水平对冬小麦产量及产量构成的影响，在其他栽培管理措施输入一致的情况下，设计拔节期和灌浆期轻度(减少灌溉 10 mm)、中度(减少灌溉 20 mm)和重度(减少灌溉 30 mm) 6 个干旱处理(表 1)，以充分灌溉为对照，自然降水极端异常时适当调整灌溉量。

表 1 4 个实验点不同灌溉处理的模拟灌水方案
Table 1 Simulated irrigation schedules of different treatments of four experimental sites

处理 Treatment	冻水 Water before wintering period		拔节水 Water at jointing stage		灌浆水 Water at filling stage	
	日期 Date (month/day)	灌水量 Irrigation (mm)	日期 Date (month/day)	灌水量 Irrigation (mm)	日期 Date (month/day)	灌水量 Irrigation (mm)
CK	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	70–90	5/01–5/20	30–60
TJ1	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	60–80	5/01–5/20	30–60
TJ2	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	50–70	5/01–5/20	30–60
TJ3	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	40–60	5/01–5/20	30–60
TF1	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	70–90	5/01–5/20	20–50
TF2	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	70–90	5/01–5/20	10–40
TF3	11/20–12/05	60–75	3/25–4/20	70–90	5/01–5/20	0–30

不同站点不同年份灌溉日期和灌溉量有差异，表中设计为灌溉日期和灌溉量的范围。CK 为充分灌溉对照；TJ 和 TF 分别表示拔节至抽穗期和灌浆期干旱，胁迫程度为轻度(1)、中度(2)和重度(3)。

Irrigation dates and amounts were different in four sites and different years; the value in table is the range of the dates and amount of irrigation at four sites. CK is the control of adequate irrigation. TJ and TF indicate drought stress at jointing–heading and grain filling stages, with light (1), moderate (2), and heavy (3) stresses, respectively.

采用相对变化率表示不同水分胁迫水平下产量与产量构成的变化幅度。

$$Y_{wi} = \frac{Y_{Ti} - Y_{CK}}{Y_{CK}} \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$
(6)

式中， Y_{wi} 为第 i 个处理的水分胁迫引起的产量或产量构成的变化率， Y_{Ti} 为第 i 个处理的产量或产量构成， Y_{CK} 为对照组的产量或产量构成。如果水分胁迫造成产量相对减产，参考《小麦干旱灾害等级》^[26]中小麦干旱灾害等级对应减产率的参考值，将减产率划分为轻度($-5\% \leq Y_{wi} < 0$)、中度($-15\% \leq Y_{wi} < -5\%$)、重度($-30\% \leq Y_{wi} < -15\%$)和严重($Y_{wi} < -30\%$) 4 个等级。

采用累积概率分布函数探究不同站点近 30 年拔节至抽穗期及灌浆期水分胁迫造成的产量变化的概率分布。

$$P(x) = \sum_{i=1}^n P_{xi} \quad (x < x_i, \quad n = 29)$$
(7)

式中， $P(x)$ 为产量相对变化率低于 x_i 的累积概率， P_{xi} 为第 i 年产量相对变化率的概率。

2 结果与分析

2.1 作物品种参数的调整与模型适用性的验证

所选品种为各站点近 30 年种植最广泛的冬小麦品种(表 2)，使用 DSSAT 模型中的 GLUE 模块，选择天津 1996 和 1998 年、河北石家庄 1987 和 2003 年、山东兖州 1991 和 2003 年、河南新乡 2002 年的田间观测资料对相应冬小麦品种逐一校准参数；然后，使用校准过的参数，对天津 1997、2000 和 2001 年，石家庄 1996、1997 和 1998 年，兖州 1989、1990 和 2007 年，新乡 2001、2006 和 2007 年相应品种模型的模拟效果进行评价(图 1)，开花期和成熟期的模拟结果的相对均方根误差均控制在 5% 以内，而产量的均方根误差控制在 10% 之内^[27]。表 2 为模拟值与观测值的相对均方根误差以及符合度，其中符合度越接近于 1 表示模拟的效果越好。

2.2 冬小麦生育阶段水分亏缺的变化

由图 2 可知，开花至乳熟期个别年份水分有盈余(定义为水分亏缺量=0)，拔节至抽穗期的水分亏

表 2 各站点冬小麦品种参数及开花期、成熟期与产量的模拟值与观测值的统计比较
Table 2 Statistical comparison between observed and simulated values for variety parameters, anthesis stage, maturity stage and yields of winter wheat in selected four sites

站点 Site	品种 Cultivar	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT	开花期 Anthesis		成熟期 Maturity		产量 Yield	
									NRMSE (%)	D	NRMSE (%)	D	NRMSE (%)	D
天津 Tianjin	京 东 8 Jingdong 8	22.6	71.3	559.9	24.2	29.6	1.70	95	1.4	0.84	1.7	0.82	7.5	0.87
石家庄 Shijiazhuang	冀 麦 26 Jimai 26	44	73.8	613.1	24.5	28.1	1.97	95	1.6	0.92	0.3	0.99	5.4	0.67
兖州 Yanzhou	济 宁 16 Jining 16	20	45.1	430.3	27.1	28.5	1.10	95	2.2	0.71	0.9	0.85	7.9	0.87
新乡 Xinxiang	新 麦 6 Xinmai 6	58.6	31.0	579.3	17.8	44.7	1.84	95	0.9	0.86	0.9	0.71	8.0	0.73

P1V: 春化作用特征参数; P1D: 光周期特征参数; P5: 灌浆特征参数; G1: 籽粒数特征参数; G2: 潜在灌浆速率参数; G3: 花期潜在单茎穗重参数; PHINT: 出叶间隔特性参数; NRMSE: 归一化均方根误差; D: 模拟值与实测值分布的符合程度。

P1V: vernalization parameter; P1D: photoperiod parameter; P5: grain filling duration parameter; G1: grain parameter at anthesis; G2: grain filling rate parameter; G3: dry weight of a single stem and spike; PHINT: interval between successive leaf tip appearances; RMSE%: normalized root mean squared error; D: coincidence degree of distribution between simulated and measured value.

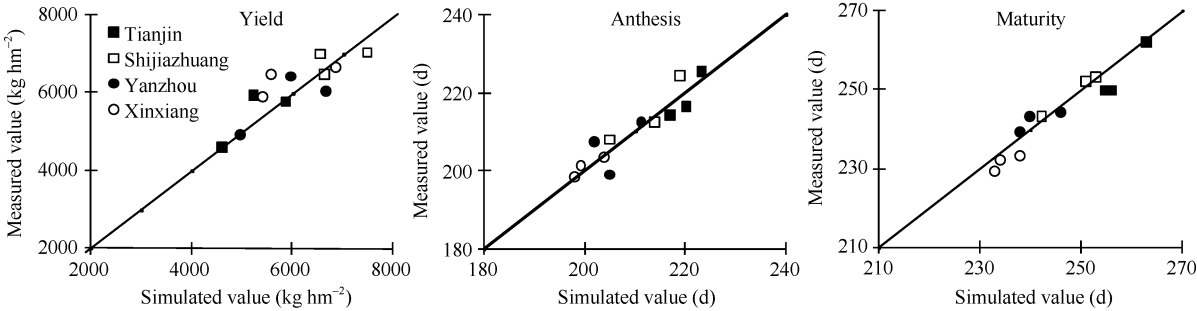


图 1 开花期、成熟期与产量的模拟值与实测值的关系
Fig. 1 Relationship of observed and simulated values for anthesis stage, maturity stage and yield in winter wheat

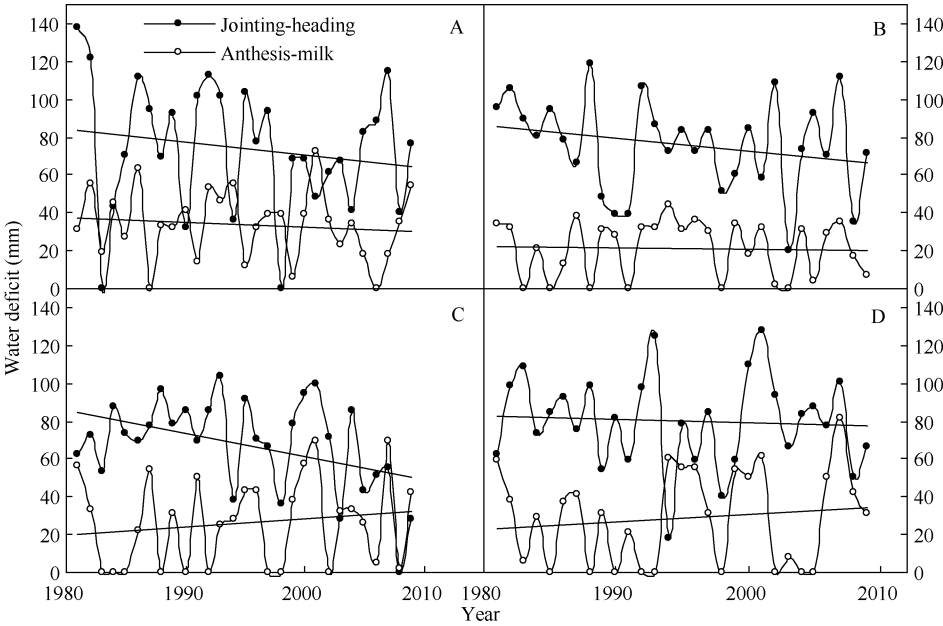


图 2 天津(A)、石家庄(B)、兖州(C)和新乡(D)站点冬小麦拔节期至抽穗期与开花至乳熟期水分亏缺量的变化
Fig. 2 Variations of water deficit during jointing to heading stage and anthesis to milk stage for winter wheat in Tianjin (A), Shijiazhuang (B), Yanzhou (C), and Xinxiang (D)

缺量明显大于开花-乳熟期, 且 4 个站点的水分亏缺量基本都在 70~90 mm 上下浮动, 而开花至乳熟期的水分亏缺量基本在 20~30 mm 上下浮动。除兖州点在拔节至抽穗期的水分亏缺量有显著减少的趋势 ($P<0.05$), 其他站点在上述 2 个生育阶段的水分亏缺量无明显趋势。据此, 并考虑当地实际灌溉量及冬小麦对灌溉水分的利用效率, 制定了模型模拟中不同灌溉水平的模拟实验。

2.3 不同灌溉水平处理的产量及粒数、粒重的相对变化率

拔节期至抽穗期灌溉水比充分灌溉减少 10 mm 时, 各站点的产量的相对变化率在-4%至-11%之间; 减少 20 mm 时, 产量变化在-6%至-13%之间; 而减少 30 mm 时, 产量的相对变化率已达-10%至-21%

(图 3-A)。灌浆期灌溉水比充分灌溉减少 10 mm 时, 产量相对变化率只有-1%至-6%; 当减少 20 mm 时, 产量变化在-3%至-6%之间; 当减少 30 mm 时, 各站点产量相对变化率则达到-6%至-14% (图 3-B)。可见, 拔节期至抽穗期的水分胁迫对冬小麦的产量影响最大, 且产量的相对变化率是灌浆期同等水分胁迫条件下的 2 倍左右。拔节-抽穗期水分胁迫, 石家庄点的产量相对变化率最大(-10%至-15%), 灌浆期水分胁迫, 以兖州点的产量相对变化率最大(-4%至-14%); 而新乡点则表现 2 种水分胁迫条件的产量相对变化率最小, 这主要与各站点的降水状况密切相关。

单位面积的粒数和单粒重是构成最终产量的重要因素, 拔节至抽穗期的水分胁迫主要影响单位面积的粒数, 这一时期的灌溉水比充分灌溉减少

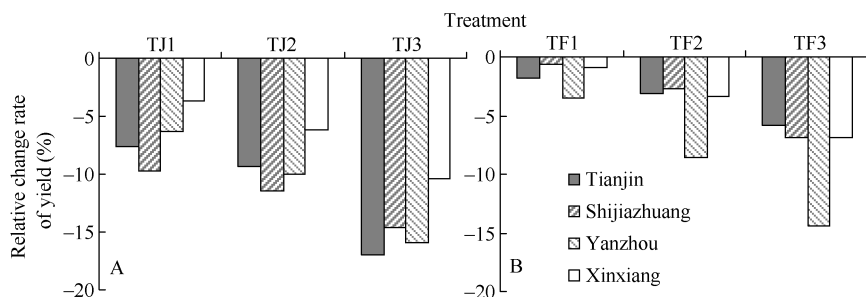


图 3 4 个站点不同灌溉水平下产量的相对变化率

Fig. 3 Relative change rates in yield under different irrigation levels in four sites

TJ and TF 分别表示拔节期至抽穗期(A)和灌浆期(B)干旱, 1~3 分别表示轻度、中度和重度胁迫。

TJ and TF indicate drought stress at jointing-heading (A) and grain filling stages (B) with light (1), moderate (2), and heavy (3) stress, respectively.

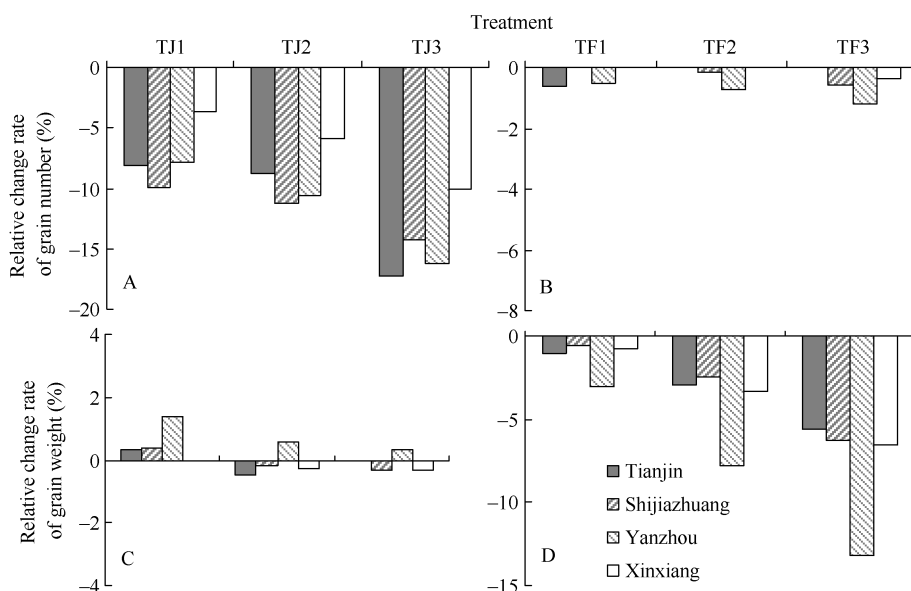


图 4 4 个站点不同灌溉水平下冬小麦粒数(A, B)与粒重(C, D)的相对变化率

Fig. 4 Relative change rates of grain number (A, B) and grain weight (C, D) under different irrigation levels in four sites

TJ and TF 分别表示拔节期至抽穗期和灌浆期干旱, 1~3 分别表示轻度、中度和重度胁迫。

TJ and TF indicate drought stress at jointing-heading and grain filling stages with light (1), moderate (2), and heavy (3) stresses, respectively.

10~20 mm 时,粒数的相对变化率为-4%至-11%;当减少 30 mm 时,变化率达到-10%至-17% (图 4-A);灌浆期的水分胁迫对粒数的形成影响不大(图 4-B)。拔节至抽穗期的水分胁迫对粒重的影响不明显,而且在拔节期的轻微水分胁迫,各站点均表现出粒重有小幅的增加(图 4-C);而灌浆期的水分胁迫则主要影响粒重,当灌溉量减少 20 mm 时,各站点粒重的相对变化率为-2%至-8%,当减少 30 mm 时,粒重的变化率达到-6%至-13% (图 4-D)。另外,各站点在拔节至抽穗期水分胁迫所造成的粒数的相对变化明显大于灌浆期胁迫所造成的粒重的相对变化。因此,产量的相对变化主要是拔节-抽穗期的水分胁迫导致的粒数相对变化所致。

2.4 产量相对变化率的累积概率

以 TJ3 和 TF3 处理为例,各站点拔节至抽穗期

以及灌浆期产量相对变化的累积概率有所不同,并且有一定的区域差异。拔节至抽穗期的水分胁迫造成减产的概率除新乡为 97%外,其他 3 个站点均为 100%,而在灌浆期的概率则分别为 48%、79%、93%和 62%;天津和石家庄在拔节期至抽穗期水分胁迫造成减产 10%以上的概率均为 86%,而灌浆期相应的概率则为 31%,兖州在两个阶段水分胁迫造成减产 10%以上的概率差别不大,在 80%左右,而新乡对应的概率分别为 62%和 24% (图 5);因此,除兖州外,其他站点拔节期至抽穗期水分胁迫造成减产 10%以上的概率约为灌浆期的 2 倍左右。另外,在拔节至抽穗期与灌浆期减产 5%以上的概率差,天津与石家庄明显大于兖州与新乡,而减产幅度超过 20%以上在天津与石家庄主要还是拔节至抽穗期水分胁迫所致,而在兖州和新乡则是由于灌浆期水分胁迫所致。

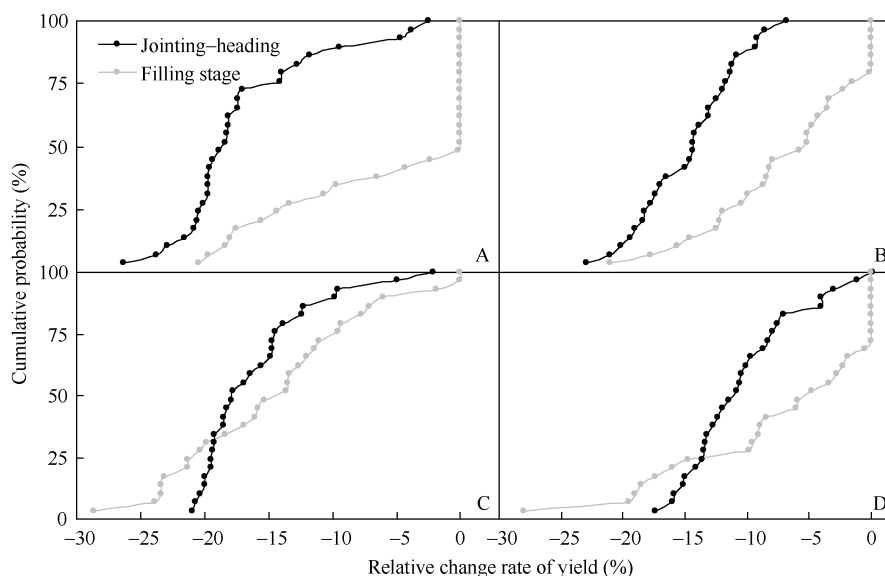


图5 天津(A)、石家庄(B)、兖州(C)、新乡(D)站点拔节至抽穗期和灌浆期重度干旱处理下产量相对变化率的累积概率

Fig. 5 Cumulative probability of relative change rate of yield under heavy drought stress at jointing-heading and grain filling stages in Tianjing (A), Shijiazhuang (B), Yanzhou (C), and Xinxiang (D)

3 讨论

近30年来冬小麦拔节期至抽穗期的水分亏缺要明显大于开花至乳熟期,且4个站点的水分亏缺基本都在70~90 mm上下浮动,而开花期至乳熟期虽然是小麦整个生长季需水最多的时期^[7],但由于此时期的降水相对较多,水分亏缺基本在20~30 mm之间,除兖州在拔节至抽穗期的水分亏缺有显著减少的趋势外,其他站点在这2个阶段的水分亏缺并没有明显的变化。黄修桥等^[28]研究指出,由于灌溉时间、灌溉量不当,中国农田灌溉水利用率仅为45%,远不

及发达国家的 80%。通过研究不同灌溉制度下作物生长的用水情况,并根据水分胁迫的预测来确定灌溉时间和数量,可以更合理地制订适应在气候变化条件下作物的灌溉制度^[29-30]。因此,结合作物需水关键生育阶段水分亏缺量,适时适量的灌溉对于节约农业用水、提高农田水分利用率,实现农业稳产、高产和可持续发展具有积极意义^[31]。

本文研究结果表明,拔节期至抽穗期的水分胁迫对冬小麦的产量影响最大,这与吕丽华等^[8]的研究结果一致,这主要是由于这一时期的水分胁迫主

要影响穗粒数, 灌浆期水分胁迫主要影响粒重^[7,32-33], 而由穗数和穗粒数构成的单位面积粒数为对产量贡献最大的要素^[34], 因此, 拔节至抽穗期的水分胁迫导致的单位面积粒数的减少, 将直接导致冬小麦产量的减产。另外, 合理的水分亏缺可提高小麦的抗逆能力和水分利用效率^[35-36], 研究中发现在拔节期的轻微水分胁迫, 使各站点均表现出粒重的小幅增加, 可能是拔节期轻微水分亏缺促进灌浆期同化物从营养器官向生殖器官分配所致^[42]。另外, 在兖州和新乡, 灌浆期的干旱导致的同等程度减产概率大于北部的天津与石家庄, 且导致一定概率的重度减产, 这主要是2个区域的气候因素及品种差异所致。因此, 在冬小麦生产实践中, 不但要加强拔节至抽穗期灌溉及抗旱等措施, 在兖州和新乡还应该注重灌浆期的抗旱减灾措施。在未来气候变化背景下, 应根据对冬小麦需水关键期灌溉时间和灌溉量的预测, 因地制宜, 优化冬小麦的水分管理措施, 减少因水分亏缺导致的产量损失。

4 结论

通过模型模拟, 在拔节期至抽穗期减少灌溉量导致冬小麦明显减产, 且随干旱胁迫程度的增加而增加, 比充分灌溉减少10、20和30 mm条件下, 模拟减产率分别为4%~11%、6%~13%和10%~21%; 而灌浆期同样干旱处理, 小麦减产率分别为1%~6%、3%~6%和6%~14%。因而冬小麦生产中应高度重视拔节期至抽穗期的水分管理。4个典型站点间模拟结果不尽相同, 除兖州点外, 其他站点的拔节至抽穗期水分胁迫造成中度减产的概率约为灌浆期的两倍左右, 在石家庄和天津, 轻度和重度减产主要是由拔节至抽穗期的水分胁迫引起的, 而在兖州和新乡, 轻度减产由拔节至抽穗期和灌浆期的水分胁迫造成的概率差别不大, 灌浆期水分胁迫则会导致一定概率的重度减产。

References

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2011. pp 121-125
Editorial Board of China Agricultural Yearbook. China Agricultural Yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2011. pp 121-125 (in Chinese)
- [2] 熊文愈, 姜志林. 中国农林复合经营研究与实践. 南京: 江苏科技出版社, 1994
Xiong W Y, Jiang Z L. Research and Practice of Agriculture management in China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1994 (in Chinese)
- [3] 祁泉淞. 我国水资源现状及水资源管理中的问题和对策. 中国水运, 2008, 8(2): 180-181
- [4] Qi Q S. The problems and countermeasures in status of water resources and water management in China. *China Water Transport*, 2008, 8(2): 180-181 (in Chinese with English abstract)
- [5] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 卢志光, 庄立伟, 侯婷婷. 干旱对北方冬小麦产量影响的风险评估. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 118-125
Wang S Y, Huo Z G, Li S K, Lu Z G, Zhuang L W, Hou T T. Risk assessment of drought effect on yield of winter wheat in northern China. *J Nat Disasters*, 2003, 12(3): 118-125 (in Chinese with English abstract)
- [6] 金善宝. 中国小麦学. 北京: 中国农业出版社, 1996
Jin S B. China Wheat. Beijing: China Agriculture Press, 1996 (in Chinese)
- [7] 吕丽华, 胡玉昆, 李雁鸣, 王璞. 灌水方式对不同小麦品种水分利用效率和产量的影响. 麦类作物学报, 2007, 27: 88-92
Lü L H, Hu Y K, Li Y M, Wang P. Effect to irrigating treatments on water use efficiency and yield of different wheat cultivars. *J Triticeae Crops*, 2007, 27: 88-92 (in Chinese with English abstract)
- [8] 房稳静, 张雪芬, 郑有飞. 冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响. 中国农业气象, 2006, 27: 98-101
Fang W J, Zhang X F, Zheng Y F. Influence of drought on filling velocity of winter wheat during filling period. *Chin J Agrometeorol*, 2006, 27: 98-101 (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴少辉, 高海涛, 王书子, 段国辉. 干旱对冬小麦粒重形成的影响及灌浆特性分析. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 50-52
Wu S H, Gao H T, Wang S Z, Duan G H. Analysis on the effect of drought on the grain weight grow and the character of the grain filling of winter wheat. *Agric Res Arid Areas*, 2002, 20(2): 50-52 (in Chinese with English abstract)
- [10] 谢明, 宋亚申, 姜新河. 淮北地区冬小麦干旱发生的规律、成因和危害机理分析. 安徽农业通报, 2008, 14(20): 112-114
Xie M, Song Y S, Jiang X H. Analysis on the reason and damage mechanism of drought of winter wheat in Huaibei region. *Anhui Agric Sci Bull*, 2008, 14(20): 112-114 (in Chinese with English abstract)
- [11] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 杨晓光, 王靖. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟. 中国生态农业学报, 2012, 20: 1158-1165
Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, Yang X G, Wang J. Impact simulation of drought disaster at different developmental stages on winter wheat grain-filling and yield. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20: 1158-1165 (in Chinese with English abstract)
- [12] 王石立, 娄秀荣. 华北地区冬小麦干旱风险评估的初步研究. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 63-68
Wang S L, Lou X R. Preliminary study on the drought risk assessment of winter wheat in north China. *J Nat Disasters*, 1997, 6(3): 63-68 (in Chinese with English abstract)
- [13] 何希吾. 水资源在提高我国土地生产能力中的地位和作用. 自然资源学报, 1991, 6: 137-144
He X W. The status and role of water resource in raising the land productivity of China. *J Nat Resour*, 1991, 6: 137-144 (in Chinese with English abstract)
- [14] 李英能. 华北地区节水农业标准初探. 灌溉排水, 1993, 12(1): 1-6
Li Y N. A preliminary inquiry into the standards for water economized agriculture in the North China district. *Irrig Drainage*, 1993, 12(1): 1-6 (in Chinese with English abstract)

- [14] 张秋平, 郝晋珉, 白玮. 黄淮海地区粮食生产中的农业水资源经济价值核算. 农业工程学报, 2008, 24(2): 1–5
Zhang Q P, Hao J M, Bai W. Estimation of economic value of agricultural water resource in grain production in Huang-Huai-Hai region. *Trans CSAE*, 2008, 24(2): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘明, 武建军, 吕爱锋, 赵林. 黄淮海平原典型区冬小麦水分胁迫规律与灌溉策略. 农业工程学报, 2010, 26(5): 40–44
Liu M, Wu J J, Lü A F, Zhao M. Water stress of winter wheat and irrigation strategy in typical region of Huang-Huai-Hai Plain. *Trans CSAE*, 2010, 26(5): 40–44 (in Chinese with English abstract)
- [16] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Evaluating strategies for improved water use in spring wheat with CERES. *Agric Water Manag*, 2006, 84: 249–258
- [17] Mera R J, Niyogi D, Buol G S. Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C₃) and maize (C₄) crops: an agrotechnology model based study. *Global Planetary Change*, 2006, 54: 163–182
- [18] 居辉, 熊伟, 许吟隆, 林而达. 气候变化对我国小麦产量的影响. 作物学报, 2005, 31: 1340–1343
Ju H, Xiong W, Xu Y L, Lin E D. Impacts of climate change on wheat yield in China. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 1340–1343 (in Chinese with English abstract)
- [19] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 林而达. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 164–167
Xiong W, Ju H, Xu Y L, Lin E D. Regional simulation of wheat yield in China under the climatic change conditions. *Chin J Eco-agric*, 2006, 14(2): 164–167 (in Chinese with English abstract)
- [20] He J Q, Michael D D, George J H. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES-Maize model. *Agric Water Manag*, 2012, 109: 61–70
- [21] He J Q, Cai H J, Bai J P. Irrigation scheduling based on CERES-Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China. *Agric Water Manag*, 2013, 128: 19–31
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第4卷). 北京: 中国农业出版社, 1995
National Soil Survey Office. Chinese Soil Genus Records (Vol. 4). Beijing: China Agriculture Press, 1995 (in Chinese)
- [23] 刘海龙, 诸叶平, 李世娟, 杨靖一, 白由路. DSSAT 作物系统模型的发展与应用. 农业网络信息, 2011, (11): 5–12
Liu H L, Zhu Y P, Li S J, Yang J Y, Bai Y L. Development and application of DSSAT cropping system model. *Agric Network Inf*, 2011, (11): 5–12 (in Chinese with English abstract)
- [24] 许莹, 马晓群, 吴文玉. 气候变化对安徽省主要农作物水分供需状况的影响. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 198–204
Xu Y, Ma X Q, Wu W Y. Impact of climate changes on water demand and supply of rice and winter wheat in Anhui Province. *Adv Climate Change Res*, 2012, 8(3): 198–204 (in Chinese with English abstract)
- [25] Allen P G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO. *Irrig Drainage Paper*, 1998, 56: 377–384
- [26] 中国气象科学研究院. 小麦干旱灾害等级(GX/T 81-2007). 北京: 气象出版社, 2007
Chinese Academy of Meteorological Sciences. Grading of Drought Disaster in Wheat (GX/T 81-2007). Beijing: Meteorological Press, 2007 (in Chinese)
- [27] 文新亚, 陈阜. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对不同品种冬小麦产量潜力的影响. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 74–79
Wen X Y, Chen F. Simulation of climatic change impacts on yield potential of typical wheat varieties based on DSSAT model. *Trans CSAE*, 2011, 27(suppl-2): 74–79 (in Chinese with English abstract)
- [28] 黄修桥, 高峰, 王宪杰. 节水灌溉与21世纪水资源的持续利用. 灌溉排水, 2001, 20(3): 1–5
Huang X Q, Gao F, Wang X J. Irrigation and sustainable utilization of water resources in the 21st century. *Irrig Drainage*, 2001, 20(3): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- [29] Santos A M, Cabelguenne M, Santos F L, Oliveira M R, Serralheiro R P, Bica M A. EPIC-PHASE: a model to explore irrigation strategies. *J Agric Eng Res*, 2000, 75: 409–416
- [30] Cabelguenne M, Debaeke P, Puech J, Bosc N. Real time irrigation management using the EPIC-PHASE model and weather forecasts. *Agric Water Manag*, 1997, 32: 227–238
- [31] 肖晶晶, 霍治国, 金志凤, 李娜, 王丽, 卢小凤, 张蕾. 冬小麦节水灌溉气象等级指标. 生态学杂志, 2012, 31: 2521–2528
Xiao J J, Huo Z G, Jin Z F, Li N, Wang L, Lu X F, Zhang L. Meteorological grading indices of water-saving irrigation for winter wheat. *Chin J Ecol*, 2012, 31: 2521–2528 (in Chinese with English abstract)
- [32] 唐玉霞, 孟春香, 贾树龙, 智建飞, 胡春芳. 水分胁迫对冬小麦氮素营养效率的影响. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 21–23
Tang Y X, Meng C X, Jia S L, Zhi J F, Hu C F. Effect of water stress on nitrogen nutrition efficiency of winter wheat. *Chin J Eco-agric*, 2002, 10(4): 21–23 (in Chinese with English abstract)
- [33] 成林, 刘荣花, 马志红. 缺水和灌水对冬小麦产量影响评估. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 101–106
Cheng L, Liu R H, Ma Z H. Variation and interrelationship of winter wheat canopy temperature, leaf water potential and water use efficiency under different water treatments. *Agric Res Arid Areas*, 2012, 30(2): 101–106 (in Chinese with English abstract)
- [34] 孙本普, 王勇, 李秀云, 刘锋, 王继诒, 张宝民, 孙在刚, 曲百收, 袁训成, 李萌. 不同年份的气候和栽培条件对冬小麦产量构成因素的影响. 麦类作物学报, 2004, 24(2): 83–87
Sun B P, Wang Y, Li X Y, Liu F, Wang J G, Zhang B M, Sun Z G, Qu B S, Yuan X C, Li M. The influence of climate and cultivation on the yield components of winter wheat in different years. *J Triticeae Crops*, 2004, 24(2): 83–87 (in Chinese with English abstract)
- [35] 陈晓远, 罗远培, 石元春. 作物对水分胁迫的反应. 生态农业研究, 1998, 6(4): 12–15
Chen X Y, Luo Y P, Shi Y C. The response of crops to water stress. *Eco-agric Res*, 1998, 6(4): 12–15 (in Chinese with English abstract)
- [36] 黄玲, 高阳, 邱新强, 李新强, 申孝军, 孙景生, 巩文军, 段爱旺. 灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响. 农业工程学报, 2013, 29(14): 99–108
Huang L, Gao Y, Qiu X Q, Li X Q, Shen X J, Sun J S, Gong W J, Duan A W. Effects of irrigation amount and stage on yield and water consumption of different winter wheat cultivars. *Trans CSAE*, 2013, 29(14): 99–108 (in Chinese with English abstract)
- [37] Johnson R R, Moss D N. Effect of water stress on ¹⁴CO₂ fixation and translocation in wheat during grain filling. *Crop Sci*, 1976, 16: 697–701