

成林,刘荣花. 黄淮地区冬小麦最佳灌水日期模拟研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(6):54-59.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.014

黄淮地区冬小麦最佳灌水日期模拟研究

成林^{1,2}, 刘荣花^{1,2}

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,河南郑州 450003;

2. 河南省气象科学研究所,河南郑州 450003)

摘要:基于参数调试和适用性验证后的 DSSAT - CERES Wheat 作物模型,结合各地农业灌溉习惯,以黄淮地区 4 个典型灌溉麦区为代表站点,模拟分析了 1981—2010 年冬小麦在越冬、返青、拔节及抽穗普遍期前后不同日期各灌水 1 次,产量、产量结构及产量稳定性的差异。结果表明:越冬后 10 d 内灌溉比越冬普遍日期当日灌溉可提高 4.1% ~ 7.0% 穗密度;返青普遍日期后 15 d 内灌溉比返青前灌溉利于提高穗密度和穗粒数,但产量的波动性增大;与拔节普遍期当日灌溉相比,拔节期晚灌导致穗密度和穗粒数大幅降低,提前 5 ~ 10 d 灌溉可获得高产和稳产;在前期无水分补给的情况下,抽穗普遍期前后灌溉对稳产的影响不大,但提前灌溉的最大产量可较抽穗后灌溉平均相差 31.1%,抽穗后 15 ~ 20 d 灌溉对粒质量的促进作用减弱。

关键词:冬小麦;灌溉日期;DSSAT - CERES Wheat 模型;累计百分位;产量结构

中图分类号: S512.1⁺10.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)06-0054-06

黄淮麦区属于温带季风气候区,该区域热量和光照条件充足,灌溉条件便利,是我国生态条件最适宜冬小麦生长的地区^[1],冬小麦种植面积和总产量居全国各区域首位,对我国粮食总产有重要贡献。然而,该区域有较强的气候过渡性特征,降水分布不均,大部分年份自然降水不能满足冬小麦正常生长的水分需求,灌溉是冬小麦高产的重要保证。

近年来针对灌溉农区生产,在不同生育期灌溉对小麦光合特性^[2]、养分吸收积累、水分利用效率^[3-4]、籽粒品质、农艺性状、产量构成的影响,以及如何实现节水灌溉^[5]、提高水分利用效率^[6]方面的研究已取得了显著成果。以小麦抗旱高产为目的,研究学者根据冬小麦不同生育期需水特征和不同麦区的气候特征,已明确了冬小麦灌溉需水的关键期^[7],朱

津辉等利用 WOFOST 模型对河北保定 3 个不降水年型冬小麦灌溉时期的模拟证明,冬小麦拔节至孕穗期,以及抽穗至灌浆期 2 个时期灌溉对产量的贡献率最高^[8];谭念童等通过田间试验手段,证实了拔节期、孕穗期和灌浆期灌水是影响作物叶片光合作用最重要的时期^[9-11]。在灌溉量的研究方面,多针对高产节约和提高水分利用效率,既有通过需水量和降水量的差值计算灌溉需水量的技术方法^[12],也可通过测墒补灌技术测算理论灌溉量^[13-14],一般认为黄淮麦区不同生育期灌溉量在 50 ~ 70 mm 为宜^[15]。因此,目前在冬小麦生产中关于哪个生育期灌溉、需灌溉多少水量都已有较明确的结论^[16]。但在实际生产中,具体的灌溉时间多具有随机性和盲目性,现有成果中关于灌溉时期的分析多针对大的生育期,而对于该生育期内最优灌溉日期的成果尚不多见,远不能满足现代农业生产的精细化需求。本研究利用 DSSAT - CERES Wheat 模型在田间管理方面的优势,考虑冬小麦需水关键期和传统灌溉习惯,开展不同生育期、不同灌溉日期对产量及产量构成要素的模拟研究,从产量及产量稳定性等角度分析最佳灌水

收稿日期:2016-12-13

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201506001)。

作者简介:成林(1982—),女,新疆伊宁人,硕士,高级工程师,主要从事冬小麦农业气象灾害研究。E-mail:rainwood2@163.com。

[16] 简大为,祁军,张燕,等. 播种期和密度对冬小麦新冬 29 号产量形成的影响[J]. 西北农业学报,2011,20(11):47-51.

[17] 胡焕焕,刘丽平,李瑞奇,等. 播种期和密度对冬小麦品种河农 822 产量形成的影响[J]. 麦类作物学报,2008,28(3):490-495.

[18] 李宁,段留生,李建民,等. 播期与密度组合对不同穗型小麦品种花后旗叶光合特性、籽粒库容能力及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2010,30(2):296-302.

[19] 蒋会利. 播期密度对不同小麦品种群体茎数及产量的影响[J]. 西北农业学报,2012,21(6):67-73.

[20] 姜丽娜,赵艳岭,邵云,等. 播期播量对豫中小麦生长发育及产量的影响[J]. 河南农业科学,2011,40(5):42-46.

[21] 曲善珊,李松坚,孙锡勇,等. 不同播期、基本苗对小麦产量及构成三因素的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版),2013,

30(1):22-25.

[22] 赵吉平,左联忠,王彩萍,等. 不同播期和播量对晋麦 86 号生长发育及产量的影响[J]. 现代农业科技,2010(19):39-40.

[23] 顾芹芹,胡大明,蒋其根,等. 不同播期和播量对青浦区主推小麦品种产量的影响[J]. 上海农业学报,2012,28(3):127-131.

[24] 王夏,胡新,孙忠富,等. 不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(21):170-176.

[25] 钱兆国,吴科,王瑞霞,等. 节水条件下不同播期密度设计对不同品种冬小麦群体生长特性和产量的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(27):124-129.

[26] 张立生,裴自友,王宏兵,等. 播期和播种密度对晋太 182 植株高度的影响[J]. 山西农业科学,2016,44(7):957-961.

[27] 张立生,裴自友,王宏兵,等. 播期和播量对晋中盆地冬小麦产量的影响[J]. 山西农业科学,2016,44(8):1114-1117.

时机,为开展精细化的现代农业生产服务指导提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

在黄淮地区选择气候特征不同、种植品种属性有一定差异的河南新乡(35°19'N, 113°53'E)、河南商丘(34°27'N, 115°40'E)、江苏徐州(34°17'N, 117°09'E)和安徽蒙城(33°17'N, 116°32'E)为代表站点。1981—2010 年代表站逐日平均气温(℃)、降水量(mm)、最低气温(℃)、日照时数(h)源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),1981—2010 年冬小麦发育期观测资料源于各省气象局,历史产量资料源于统计部门。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《中国土志》^[17]。

1.2 作物模型

农业技术转移决策支持系统 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 由农业技术转移国际基准网 IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) 开发研制,该系统支持下的 CERES Wheat 模型,近年来已被我国学者证实可适用于大部分冬小麦生产区^[18-19]。在建立作物管理文件、土壤文件和气象数据文件的基础上,采用 DSSAT V4.5 中的 GLUE 模块对作物品种参数进行调试,采用归一化均方根误差、一致性指数^[20]及模拟值与观测值的相关系数检验模型的模拟效果。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}; \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100\%; \quad (2)$$

$$D = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right| \quad (3)$$

式(1)~式(3)中, $RMSE$ 是均方根误差, $NRMSE$ 为归一化均方根误差, D 为一致性指数, S_i 是第 i 个模拟值, O_i 为第 i 个观测值, \bar{O} 为观测值的平均值, n 为数据个数。

1.3 冬小麦主要生育阶段水分亏缺量

冬小麦生长某一时段的水分亏缺量(mm)用 D 表示:

$$D = K_c \times ET_0 - P. \quad (4)$$

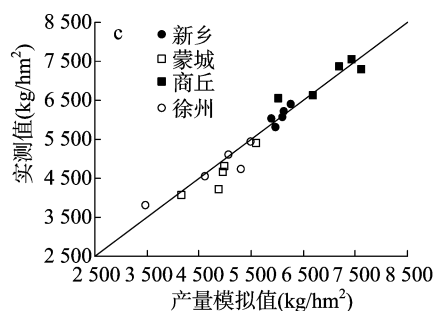
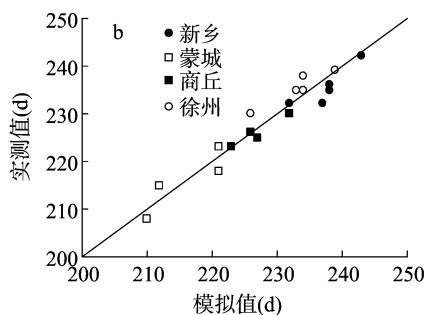
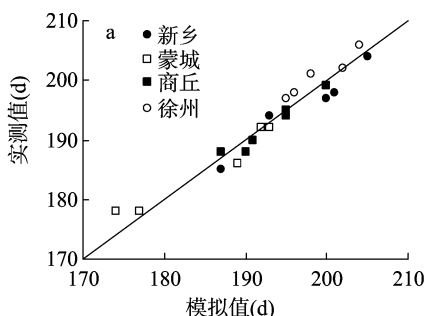


图1 开花期(a)、成熟期(b)与产量(c)的模拟值与实测值的关系

2.2 冬小麦主要生育阶段水分亏缺量

从图2可以看出,各代表站点冬小麦主要生育期多年平均水分亏缺量变化趋势基本一致,水分亏缺量分蘖—返青前变化平稳,新乡和商丘站11月中旬至次年2月上旬的平均水

式中: K_c 为作物系数,采用方文松等推荐的数据^[21]计算; ET_0 为某时候的潜在蒸散量(mm),采用FAO推荐的Penman-Monteith方法计算^[22]。

1.4 模拟方案

由于冬小麦生育期内水分亏缺情况各异,越冬期气温条件不同,各地形成了不同的农业灌溉习惯,如新乡、商丘站一般全生育期灌溉3次,即越冬水、拔节水和抽穗灌浆水,徐州和蒙城地区大部分年份以灌返青水和抽穗水为主。为区分不同生育期内不同灌溉日期的影响,模拟设定小麦全生育期仅灌水1次,具体灌溉时间:将新乡和商丘站该生长年度的越冬开始日期、拔节普遍期和抽穗普遍期分别记为W、J和T,灌溉日期以5d为间隔,分别模拟W-20d至W+20d, J-20d至J+20d, T-20d至T+20d灌溉的影响;将徐州和蒙城站返青普遍期记为G,抽穗普遍期也记为T,分别模拟G-20d至G+20d以及T-20d至T+20d灌溉的影响。灌溉量均设为60mm。各处理以该发育期普遍期当日灌溉为对照。

采用相对变化率定量评价不同灌溉日期对产量或产量构成要素的变化幅度:

$$Y_{wi} = \frac{Y_i - Y_{CK}}{Y_{CK}} \times 100\% \quad (5)$$

Y_{wi} 是第 i 个灌溉日期处理影响的产量或产量构成要素的相对变化率, Y_i 是第 i 个灌溉日期处理影响的产量或产量构成要素值, Y_{CK} 是其对应的对照值。

将某一站点同一发育期灌溉处理的产量进行排序,采用累计百分位法分别计算10%、25%、75%和90%百分位对应的产量值,利用箱形图分析产量的稳定性。

2 结果与分析

2.1 模型适应性验证

利用各站连续3年的作物资料对模型参数进行调试。根据调试后的模型参数,分别利用新乡2004—2009年、商丘2005—2010年、蒙城1995—2000年,以及徐州1995—1999年模型模拟的开花期、成熟期及实际产量进行验证,资料验证年份与参数调试年份无重合。发育期模拟效果是本研究开展的前提,从图1和表1可以看出,各站开花期和成熟期的模拟值相对均方根误差在2%以内,符合度和相关系数接近于1,产量模的均方根误差均小于9%,其他参数也在可接受范围内。

分亏缺量分别为71.2mm和59.0mm,而徐州和蒙城站为50.9mm和45.7mm。2月中下旬返青以后水分亏缺量迅速增加,返青至拔节期前后(2月中旬至3月下旬)各站的水分亏缺在45~65mm之间,而抽穗(4月中旬)至灌浆盛期(5月

表 1 代表站点冬小麦开花期、成熟期与产量的模拟值与观测值的统计比较

代表站	开花期			成熟期			产量		
	<i>NRMSE</i> (%)	<i>D</i>	<i>R</i> ²	<i>NRMSE</i> (%)	<i>D</i>	<i>R</i> ²	<i>NRMSE</i> (%)	<i>D</i>	<i>R</i> ²
新乡	1.12	0.96	0.945	1.19	0.85	0.78	5.27	0.75	0.77
蒙城	1.40	0.97	0.947	1.05	0.95	0.84	8.09	0.85	0.82
商丘	0.66	0.98	0.890	0.79	0.89	0.89	4.19	0.97	0.78
徐州	1.02	0.99	0.921	1.19	0.87	0.98	6.53	0.93	0.94

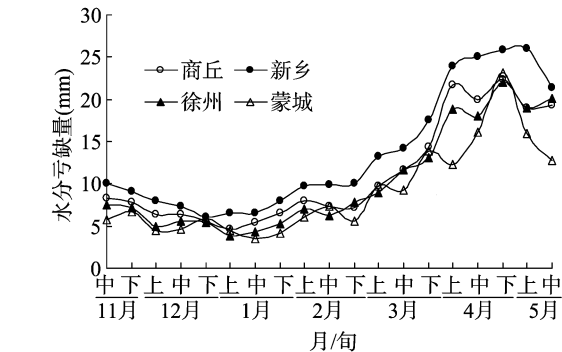


图2 冬小麦分蘖—乳熟期多年平均水分亏缺量

上旬)的水分亏缺在 55 ~ 76 mm 之间。因此按多年平均 60 mm 灌溉量可基本满足关键生育阶段的水分供给。

2.3 不同灌溉时间的产量平均变化率

商丘和新乡站返青前水分亏缺量相对大,且冬季气温相对较低,因此该地区农业生产上形成了冬灌的习惯。模拟结果发现,灌溉时间间隔为 5 d 对产量的影响却十分明显,不同

处理产量的变幅可达 ±15%。越冬期(图 3-a),商丘和新乡站越冬后灌溉的产量明显高于越冬前,且越冬前灌溉时间越早,产量越低;越冬后,新乡站 W + 10 d 处理产量最高,随着时间后移气温降低,产量有所降低;商丘站 W + 15 d 处理产量最高。表明越冬后灌溉对提高产量有利,但灌溉时间不宜过晚,易出现冻害风险,以进入越冬期后 5 ~ 15 d 为宜。

蒙城和徐州站返青期不同日期灌溉产量的变化趋势与越冬水相似(图 3-b),即返青后灌溉对产量的形成更为有利,但对产量的影响率仅在 5% 以内。返青后灌溉产量明显高于返青前灌溉处理。与返青当日灌溉相比,蒙城站 G + 10 d 处理有较高的增产率,徐州站的增产率与返青后灌溉时间的关系不明显。

拔节期不同日期灌溉的产量变化趋势与越冬期、返青期相反(图 3-c),商丘和新乡两站产量随着灌溉时间的推迟而大幅减产,J + 20 d 处理商丘和新乡较拔节普遍期当日灌溉分别减产 17.7% 和 11.1%。拔节前 5 ~ 15 d 灌溉两站产量增加 0.9% ~ 5.6%,最大产量商丘和新乡分别出现在 J - 10 d 和 J - 5 d。

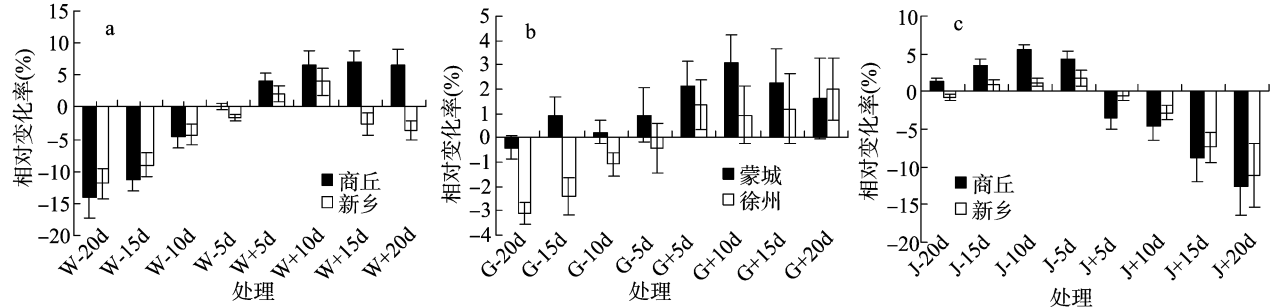


图3 越冬期(a)返青期(b)及拔节期(c)灌溉处理的产量相对变化率

抽穗不同日期灌溉导致的产量相对变化率最大(图 4),4 个代表站一致表现为灌溉时间越早,产量越高。T - 20 d 灌溉,各站的平均产量变化率达 21.09%,而抽穗期以后 5 ~ 15 d 再灌溉则明显减产,T + 15 d 处理各站的平均产量变化率为 -9.8%,T + 20 d 处理灌溉产量的相对变化率与 T + 15 d 处理接近,减产率不再明显增加。

2.3 不同灌溉时间产量结构变化

单位面积穗密度、每穗粒数和千粒质量是产量构成的 3 个重要因素,不同灌溉日期产量变化主要受产量结构变化的影响。从越冬期 2 个站点的产量结构数据来看,W - 20 d 处理,两站密度减小 12.2% ~ 14.2%,随着灌溉时间延后至越冬后 5 ~ 10 d,群体密度达最大值,商丘和新乡密度较越冬当日灌溉分别增加 7.0% 和 4.1%。模拟数据显示,越冬后灌溉对穗粒数增长有一定作用,但平均变化率仅在 1% 左右。千粒质量的变化可以忽略(表 1)。结合图 3-a 来看,越冬期灌溉适当延迟利于群体密度的提高,越冬普遍期前后不同日期

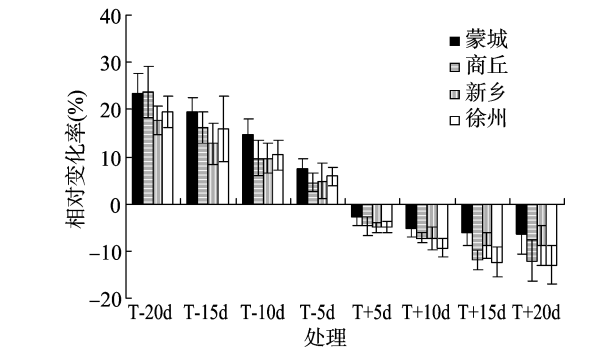


图4 抽穗不同日期灌溉产量变化率

灌溉处理密度的变化量级与产量的变化率相当,是影响产量变化的主要因素。

在灌水的情况下,返青期灌水同时影响群体密度与穗粒数(表 2、表 3),但返青日前后灌水蒙城与徐州站冬小麦产量各要素的变幅相对较小;与返青普遍期当日灌水相比,返青前

处理密度的变化相对小,负变化率最大值-1.2%出现在徐州的G-20 d处理;而返青后灌溉可以提高分蘖成穗率,既有利于群体穗密度的增加,也利于单穗粒数的增加。返青后,同一站点的穗粒数变化率均大于密度的变化率。返青前灌溉处理的密度与穗粒数的变化有正有负,而返青后灌溉有利于促进群体有效穗的增加,也利于单穗粒数的增加。返青期灌溉处理千粒质量变化率在0.1%左右,可忽略。因此,返青后灌溉对产量形成更为有利,而返青普遍期后灌溉的时机选择有较强的灵活性。

拔节期灌溉对产量三要素均有一定程度的影响。其中,拔节前灌溉比拔节当日灌溉更有利于穗粒数的提高,商丘和新乡站均在J-15 d处理灌溉时穗粒数最大,分别增加5.65%和1.81%;而随着灌溉时间的推迟,穗粒数明显降低,到拔节后20 d,穗粒数可减少20%以上。拔节普遍期以前灌溉,对群体密度的影响很小,而过了拔节普遍期以后再灌溉,出现有效穗密度减少的趋势,这可能与前期水分供给不及时影响成穗有关。从表2、表3还可以看出,拔节期灌溉对提高千粒质量也有一定的促进作用。

表2 商丘和新乡灌溉处理产量结构相对变化率 %

处理	商丘			新乡		
	密度	穗粒数	千粒质量	密度	穗粒数	千粒质量
W-20d	-14.15	-1.86	0.29	-12.15	-1.28	0.30
W-15d	-11.20	-1.65	0.10	-8.82	-1.54	0.14
W-10d	-4.60	-0.98	0.19	-4.40	-0.98	0.21
W-5d	-1.68	-0.31	0.19	0.0	-0.61	0.21
W+5d	4.10	0.82	0.00	2.09	0.70	0.00
W+10d	6.60	0.75	0.00	4.10	0.98	0.00
W+15d	6.99	0.66	0.00	-2.46	1.67	0.00
W+20d	6.54	0.20	0.00	-1.95	1.79	0.00
J-20d	0.30	5.38	-0.26	0.77	-2.50	0.23
J-15d	0.09	5.65	-0.26	0.60	1.81	0.06
J-10d	0.14	4.84	-0.17	0.49	1.78	-0.33
J-5d	0.05	3.33	-0.09	0.65	1.17	-0.13
J+5d	-0.69	-5.09	0.17	-1.09	-1.03	-0.58
J+10d	-2.02	-9.99	0.62	-2.29	-4.73	0.69
J+15d	-3.65	-16.44	1.21	-4.40	-12.84	1.87
J+20d	-4.49	-22.02	1.98	-6.01	-20.29	4.26
T-20d	3.60	20.44	-1.51	6.15	19.25	-4.84
T-15d	2.40	13.52	-1.19	6.52	13.98	-5.25
T-10d	0.77	6.12	-0.87	3.69	8.08	-1.89
T-5d	0.49	2.07	-0.63	0.91	4.01	0.49
T+5d	-0.70	-2.12	1.378	-2.57	-9.40	3.48
T+10d	-1.11	-3.98	1.98	-4.59	-12.65	8.96
T+15d	-1.26	-4.57	2.45	-6.46	-16.27	12.19
T+20d	-1.30	-4.64	2.01	-8.54	-16.72	11.82

模拟发现,抽穗不同时期灌溉,对产量三要素均有影响,其中,群体密度随着灌溉时间推后减小,抽穗前灌溉处理群体增加,抽穗后灌溉密度减小。千粒质量随着灌溉时间的推后而增加,相对于抽穗普遍期当日灌溉,过早灌溉对千粒质量没有促进作用;各站各处理的千粒质量均在T+15 d时达到最大值,千粒质量的增幅在1.6%~12.2%之间,表明抽穗后15 d之内灌水对提高粒重最为有利。

穗粒数的变化趋势与千粒质量相反。抽穗前,即孕穗期

表3 蒙城和徐州灌溉处理产量结构变化率 %

处理	蒙城			徐州		
	密度	穗粒数	千粒质量	密度	穗粒数	千粒质量
G-20d	-0.17	-0.77	-0.50	-1.21	-1.44	-0.46
G-15d	0.56	-0.59	-0.50	-1.24	-0.91	-0.45
G-10d	0.19	-0.63	-0.50	-0.58	-0.19	-0.45
G-5d	0.13	-0.25	-0.50	-0.38	0.00	-0.45
G+5d	1.22	0.46	0.0	0.84	0.33	0.00
G+10d	1.57	0.33	0.11	1.03	0.45	0.08
G+15d	1.41	0.39	0.27	0.89	0.72	0.31
G+20d	1.41	0.61	0.56	1.01	0.56	0.62
T-20d	4.72	14.11	-0.71	4.26	13.71	-6.26
T-15d	2.65	12.31	-0.71	2.70	10.49	-5.43
T-10d	1.89	8.62	-0.24	0.41	7.44	-3.34
T-5d	0.67	4.57	0.00	0.62	4.02	-0.32
T+5d	-0.41	-3.86	0.00	-0.39	-3.11	3.80
T+10d	-1.51	-7.27	1.93	-1.58	-6.06	5.40
T+15d	-1.80	-7.69	2.52	-1.72	-7.09	6.34
T+20d	-2.12	-6.44	3.19	-1.11	-7.13	5.41

灌溉,有利于减少小花的退化,提高结实率,增加穗粒数,而抽穗后再灌溉,这种促进作用减弱。结合产量的变化率看,抽穗前灌水增重的主要原因,是穗粒数的明显增加。而抽穗后灌水虽然千粒质量增加,但穗粒数的减少导致产量仍较抽穗当日灌溉偏低。

2.4 不同灌溉时间的产量稳定性分析

将累计百分位25%~<75%之间的产量区间定义为稳产区区间,75%~90%的产量区间为高产区间,累计百分位10%~<25%为低产区区间。各区间分布范围越大,表明产量离散程度越高,变异性越大,各区间分布越密集,表明产量的稳定程度高。

从图5可以看出,越冬普遍期前后灌溉,稳产区区间变化不大,但越冬前后5 d内灌溉的,25%~<75%的区间相对更集中,表明接近越冬期灌溉易获得稳产。W+5 d至W+15 d处理,高产区间较大,也在一定程度上表明进入越冬后,在某些年份推迟灌溉出现高产的可能性较大。

返青前后不同产量区间的变化不大,2个站的共同特点是返青后灌溉处理的25%~<75%产量区间增大,从表3可以发现,返青后灌溉对产量三要素的影响相对更明显,因此产量的波动性也增加。拔节前灌溉处理,商丘和新乡站的稳产区区间相对紧凑,除商丘J-20 d处理高产区间相对较大外,拔节以前的灌溉处理产量均相对稳定。拔节后,低产区区域增大,表明出现低产的可能性更高。同时,25%~<75%产量区间的间隔增大,表明拔节以后灌水产量年际间波动性大于拔节前。

抽穗的不同时期灌溉,稳产区区间的变化比其他时期处理稳定(图6)。各站的产量波动区间存在差异,但共同点是,抽穗前灌溉处理的高产区区间大于低产区区间,随着灌溉时间的推后,这种可能获得高产的区间减小。可以看出,抽穗期灌溉时间不同对稳产的影响相对小,但提早灌溉能够高产的概率较高。

3 结论与讨论

在实际生产过程中,因为灌溉日期相差不大,引起的产量

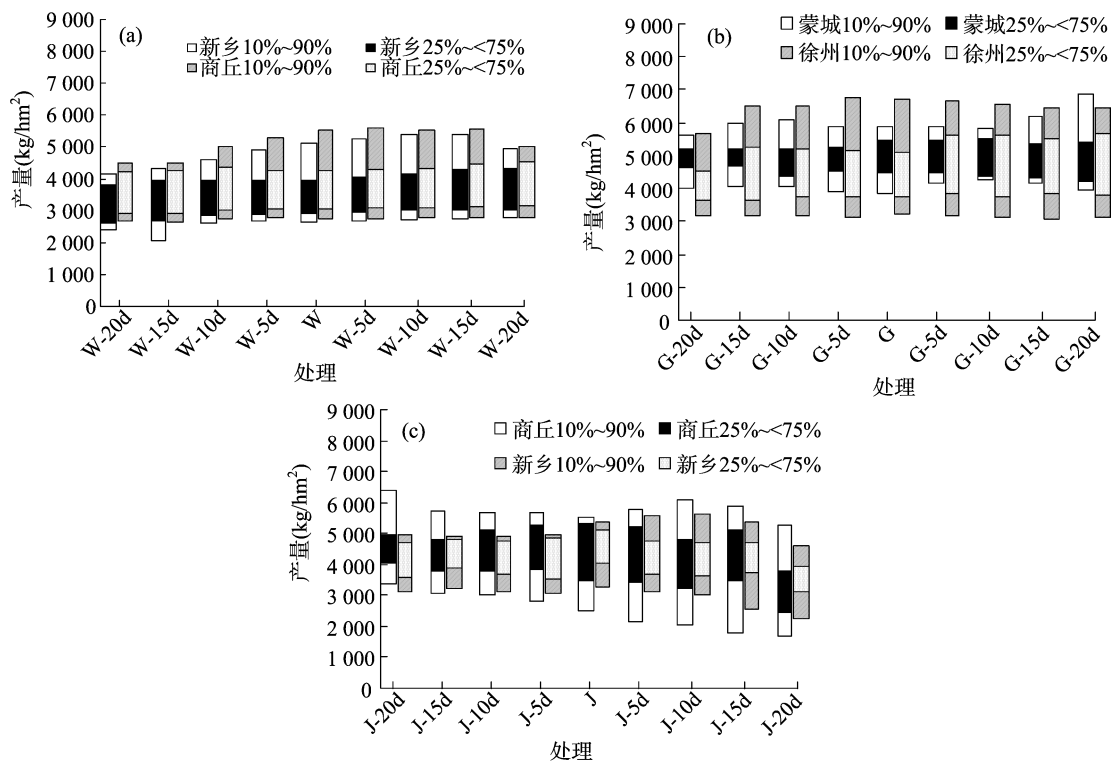


图5 越冬期(a)返青期(b)及拔节期(c)不同灌溉处理的产量分位图

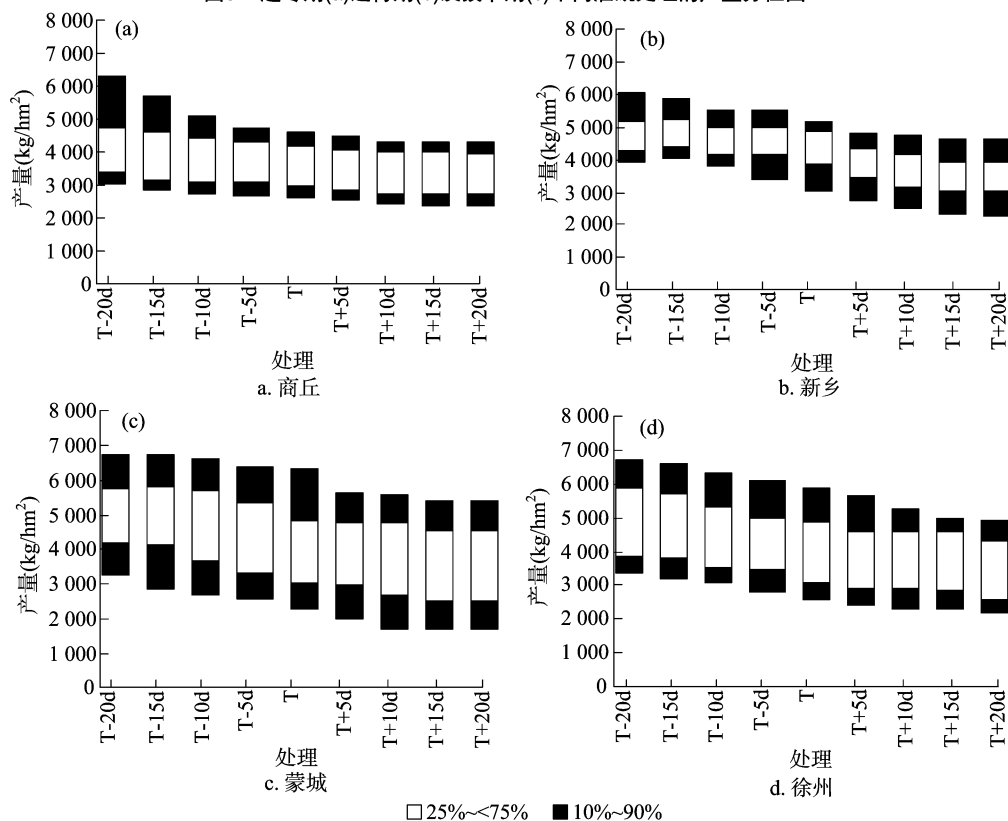


图6 抽穗期不同灌溉处理产量分位图

及产量结构差异往往被忽视。从已有的分析结果来看,灌溉日期的细化对小麦生长有一系列影响^[23-25]。在无冻害的年份,冬小麦越冬普遍期后 15 d 以内灌溉,有利于构建更合理的群体和提高产量;返青期灌溉宜迟不宜早,在返青后

5 ~ 15 d 内灌溉最佳,过晚灌溉对获得稳产不利;拔节水适宜早灌,对提高有效密度和穗粒数均有利,抽穗前后不同日期对稳产的影响不大,但提早 15 d 灌溉对提高产量有利,这对于开展精细化的农业生产指导有积极意义。

本研究中越冬普遍日期以连续 5 d 滑动平均气温稳定通过 0℃ 为依据,另一方面,CERES Wheat 模型中并没有对越冬日期的模拟,因此本研究分析的越冬期最优灌溉日期可能与大田实际情况不完全相符,但已有一些试验分析认为进入越冬期后 5~10 d 灌溉利于最终群体密度的增加^[26~27]。结合王文佳等^[28]、杨林林等^[29]的研究成果来看,返青期适当晚灌溉利于促进春生分蘖生长,并可避免过早灌溉气温偏低形成冻害。而拔节期适宜提前 5~10 d 早灌,偏晚灌溉则穗粒数明显下降,主要原因是拔节前正是小花分化、雌雄蕊分化的关键时期,对于极易发生春旱的黄淮麦区,拔节前有效的水分补充才能确保籽粒的形成,错过最佳灌溉时机,则穗粒数大幅下降。淮麦区因冬季低温风险低、冬前水分亏缺量相对小等原因一般不灌越冬水,返青期晚灌的作用与豫麦区拔节水早灌的效果相当。小麦需水的临界期一般出现在孕穗前^[30],水分不足主要影响小花退化不孕,减少穗粒数,抽穗前灌溉的模拟结果即反映出对穗粒数的贡献,这与前人的研究结果^[31~32]一致。灌浆期水分主要影响千粒质量^[33],但过晚灌溉,水分增质量的效果减弱,还可能增加后期倒伏的风险。但抽穗期前后灌溉对产量稳定性的影响最小,可能的原因是大多数年份抽穗灌浆期均存在水分亏缺的现象,受年型变化影响相对小。本研究未按降水年型对模拟结果进行分类,但可通过产量的波动性特征反映同一日期灌溉在不同年型下的表现。

参考文献:

- [1] 茹振钢,冯素伟,李 淦. 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3388-3393.
- [2] 徐心志,马 超,孙 倩. 不同灌水量对黄淮海地区冬小麦叶绿素荧光及光保护特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):183-190.
- [3] 黄彩霞,柴守玺,赵德明,等. 灌溉对干旱区冬小麦干物质积累、分配和产量的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(12):1333-1344.
- [4] 王德梅,于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1965-1970.
- [5] 蔡焕杰,康绍忠,张振华,等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报,2000,16(3):24-27.
- [6] 张 瑞,石 玉,张永丽,等. 冬期测墒补灌对冬小麦光合特性和水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2015,35(7):964-970.
- [7] 王绍中,田云峰,郭天财,等. 河南小麦栽培学(新编)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2010:172-193.
- [8] 朱津辉,郭建茂,毛留喜. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究[J]. 气象,2014,40(11):1398-1407.
- [9] 谭念童,林 琪,姜 雯,等. 限量灌溉对旱地小麦旗叶光合特性日变化和产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):805-811.
- [10] 董 浩,毕 军,夏光利,等. 灌溉和种植方式对冬小麦生育后期旗叶光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(8):2259-2266.
- [11] 江 敏,易杰忠. WCSODS 模型在徐州地区冬小麦种植常年决策中的应用[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版),2004,22(4):54-58.
- [12] 宋 妮,孙景生,王景雷,等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1693-1700.
- [13] 许骥坤,石 玉,赵俊晔,等. 测墒补灌对小麦水分利用特征和产量的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(3):277-281,329.
- [14] 郭增江,于振文,石 玉,等. 不同土层测墒补灌对小麦旗叶光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2014,40(4):731-738.
- [15] 方文松,刘荣花,朱自玺,等. 黄淮平原冬小麦灌溉需水量的影响因素与不同年型特征[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2177-2182.
- [16] 张向前,曹承富,乔玉强,等. 灌水量和时期对小麦影响的研究综述[J]. 农学学报,2015,5(5):14-18.
- [17] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第 4 卷)[M]. 北京:中国农业出版社,1995.
- [18] 熊 伟,居 辉,许吟隆,等. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(2):164-167.
- [19] 丛振涛,王舒展,倪广恒. 气候变化对冬小麦潜在产量影响的模型模拟分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008,48(9):46-50.
- [20] 刘建刚,褚庆全,王光耀,等. 基于 DSSAT 模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(23):124-129.
- [21] 方文松,刘荣花,朱自玺,等. 黄淮平原冬小麦灌溉需水量的影响因素与不同年型特征[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2177-2182.
- [22] Allen P G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome:FAO, 1998:377-384.
- [23] 居 辉,王 璞,周殿玺,等. 不同灌溉时期的冬小麦土壤水分变化动态[J]. 麦类作物学报,2005,25(3):76-80.
- [24] 寇俊卿,张海涛,王跃明,等. 农业优化灌溉中灌溉时间和灌溉量的确定[J]. 洛阳工学院学报,2002,23(3):4-6.
- [25] 冯荣成,刘清瑞,王 璐. 小麦花后灌溉时间对土壤含水量叶片功能期及产量的影响[J]. 河南农业科学,2015,44(9):11-14.
- [26] 成 林,刘荣花,马志红. 缺水和灌水对冬小麦产量影响评估[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):101-106.
- [27] 祝新建,张红卫,闫小珍. 冬小麦分蘖死亡率与产量结构关系研究[J]. 气象与环境科学,2007,30(1):72-75.
- [28] 王文佳,冯 浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J]. 中国生态农业学报,2012,20(6):795-802.
- [29] 杨林林,高 阳,申孝军,等. 播前和不同生育阶段灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2015,34(9):1-6.
- [30] 徐建文,梅旭荣,居 辉,等. 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[J]. 作物学报,2014,40(8):1485-1492.
- [31] 李玉营,马东方,王书平,等. 孕穗期地下水埋深对小麦产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):107-110.
- [32] 朱 荣,李亚婷,虎芳芳,等. 花后干旱对春小麦荧光动力学参数的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):139-142.
- [33] 杨桂霞,赵广才,许 轲,等. 灌水及化控对不同粒色小麦籽粒灌浆及叶绿素含量的影响[J]. 华北农学报,2010,25(4):152-157.