

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.201015

刘志良, 李晓爽, 曹彩云, 郑春莲, 马俊永, 李科江, 杨会英, 李树宁, 党红凯. 春灌一水时间对冬小麦灌浆特性和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1296–1304

LIU Z L, LI X S, CAO C Y, ZHENG C L, MA J Y, LI K J, YANG H Y, LI S N, DANG H K. Effects of time of spring one irrigation on the grain filling characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1296–1304

春灌一水时间对冬小麦灌浆特性和水分利用效率的影响*

刘志良^{1,2}, 李晓爽³, 曹彩云², 郑春莲², 马俊永², 李科江²,
杨会英⁴, 李树宁^{1**}, 党红凯^{2**}

(1. 山东农业大学水利土木工程学院 泰安 271018; 2. 河北省农林科学院旱作农业研究所 衡水 053000;
3. 衡水学院 衡水 053000; 4. 武强县农业农村局 武强 053300)

摘 要: 针对河北平原区水粮矛盾尖锐, 开展冬小麦春一水优化灌溉研究, 可为区域粮食安全和地下水超采治理提供技术依据。本研究于 2018—2020 年采用田间定位试验方法, 以节水小麦品种‘衡 4399’为材料, 设置 5 个春灌一水时间处理(拔节后 0 d, AJ0; 拔节后 5 d, AJ5; 拔节后 10 d, AJ10; 拔节后 15 d, AJ15; 拔节后 20 d, AJ20)和 2 个对照处理(无春灌, CK1; 春灌二水, CK2), 分析了不同处理对冬小麦籽粒灌浆特性参数、产量和水分利用效率的影响。结果表明, 随着春灌一水时间的推迟, 冬小麦灌浆持续时间增长, 平均灌浆速率减小, 理论最大千粒重增大; 与 AJ0 相比, 其他春灌一水处理的灌浆持续时间延长 3~7 d, 平均灌浆速率减小 2.40%~13.51%, 理论最大千粒重增加 1.61%~18.62%。春灌一水条件下, 冬小麦单位面积穗数、穗粒数和籽粒产量随着灌水时间的推迟均是先增大后减小, 千粒重逐渐增加, 其中, 籽粒产量最高的处理为 AJ5, 其次是 AJ10, 二者间差异不显著($P>0.05$), 但均显著高于 AJ0、AJ15、AJ20 处理($P<0.05$); 2018—2019 年和 2019—2020 年, 与 CK1 相比, AJ5、AJ10 处理的产量分别增加 96.04%和 52.18%、90.15%和 49.84%; 与 CK2 相比, AJ5、AJ10 处理的产量依次降低 0.80%和 16.75%、3.79%和 18.03%。两个试验年度春灌一水处理的水分利用效率, 都是灌水较早的 AJ0、AJ5 和 AJ10 处理较高, 且 3 个处理间的差异均不显著($P>0.05$), AJ15 和 AJ20 的水分利用效率明显降低($P<0.05$)。与 CK1 和 CK2 相比, AJ5 处理的水分利用效率 2018—2019 年分别增加 20.78%和 18.47% ($P<0.05$)、2019—2020 年分别增加 41.07% ($P<0.05$)和 5.33% ($P>0.05$), AJ10 处理 2018—2019 年分别增加 12.34%和 10.19% ($P>0.05$)、2019—2020 年分别增加 37.50% ($P<0.05$)和 2.67% ($P>0.05$)。综上所述, 在试验区冬小麦春灌一水条件下, 最优灌水时间为拔节后 5~10 d, 能获得较高产量和水分利用效率。

关键词: 冬小麦; 春灌一水; 灌水时间; 灌浆特性; 籽粒产量; 水分利用效率

中图分类号: S275; S512

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



* 国家重点研发计划项目(2017YFD03009002)、河北省重点研发计划项目(18397005D, 19226343D)、河北省现代农业产业技术体系小麦产业创新团队项目(494-0503-JSN-NIE3)和河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站开放基金项目(FIRI202004-0101)资助

** 通信作者: 李树宁, 主要研究方向为水资源高效利用, E-mail: lishuning001@163.com; 党红凯, 主要研究方向为小麦节水技术, E-mail: wheatecrop@126.com

刘志良, 研究方向为农业水资源高效利用。E-mail: liuzhiliang_1995@163.com

收稿日期: 2020-12-29 接受日期: 2021-03-28

* The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD03009002), the Key Research and Development Program of Hebei Province (18397005D, 19226343D), the Wheat Industry Innovation Team Project of Modern Agricultural Technology System in Hebei Province (494-0503-JSN-NIE3) and the Fund of National Agro-Ecosystem Observation and Research Station of Shangqiu (FIRI202004-0101).

** Corresponding authors: LI Shuning, E-mail: lishuning001@163.com; DANG Hongkai, E-mail: wheatecrop@126.com

Received Dec. 29, 2020; accepted Mar. 28, 2021

Effects of time of spring one irrigation on the grain filling characteristics and water use efficiency of winter wheat^{*}

LIU Zhiliang^{1,2}, LI Xiaoshuang³, CAO Caiyun², ZHENG Chunlian², MA Junyong², LI Kejiang²,
YANG Huiying⁴, LI Shuning^{1**}, DANG Hongkai^{2**}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Dryland Farming Institute of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China; 3. Hengshui University, Hengshui 053000, China; 4. Agricultural and Rural Bureau of Wuqiang County, Wuqiang 053300, China)

Abstract: There is a serious contradiction between water resources and grain production in the Hebei Plain; therefore, this study aimed to investigate the optimal time of once irrigation in spring for winter wheat to provide a technical basis for regional food security and groundwater overdraft control. A field positioning experiment was conducted from 2018 to 2020, with the water-saving winter wheat cultivar 'Heng 4399' under five treatments of spring one irrigation time (0 d after jointing, AJ0; 5 d after jointing, AJ5; 10 d after jointing, AJ10; 15 d after jointing, AJ15; and 20 d after jointing, AJ20) and two control treatments (no spring irrigation, CK1; and spring two irrigations, CK2). The effects of different treatments on the grain filling characteristics, yield, and water use efficiency of winter wheat were analyzed. The results showed that the delay of one spring irrigation time increased the duration of grain filling and the theoretical maximum 1000-grain weight, and decreased the average grain filling rate. Compared with AJ0, the duration of grain filling was prolonged by 3–7 d, the average grain filling rate decreased by 2.40%–13.51%, and the theoretical maximum 1000-grain weight increased by 1.61%–18.62% in the other spring one irrigation treatments. Under the spring one irrigation condition, the spike number per unit area, grain number per spike, and grain yield of winter wheat first increased and then decreased with the delay of irrigation date, whereas the 1000-grain weight gradually increased. Grain yield in the AJ5 treatment was the highest, followed by AJ10, and there was no significant difference between AJ5 and AJ10 ($P>0.05$), but both were significantly higher than those of AJ0, AJ15, and AJ20 ($P<0.05$). The yields of AJ5 and AJ10 increased by 96.04% and 52.18% in 2018–2019, and 90.15% and 49.84% in 2019–2020, respectively, compared to CK1. However, compared to CK2, the same treatments decreased by 0.80% and 16.75% in 2018–2019, and 3.79% and 18.03% in 2019–2020, respectively. In the two experimental years, the water use efficiency of spring one irrigation treatments was higher in AJ0, AJ5, and AJ10, and there was no significant difference among the treatments ($P>0.05$). AJ15 and AJ20 significantly decreased the water use efficiency compared to the above-mentioned treatments ($P<0.05$). Compared to CK1 and CK2, the water use efficiency of AJ5 increased by 20.78% and 18.47% ($P<0.05$) in 2018–2019, and by 41.07% ($P<0.05$) and 5.33% ($P>0.05$) in 2019–2020, respectively; AJ10 increased by 12.34% and 10.19% ($P>0.05$) in 2018–2019, and by 37.50% ($P<0.05$) and 2.67% ($P>0.05$) in 2019–2020, respectively. In summary, under spring one irrigation conditions of winter wheat in the experimental area, the optimal irrigation date is 5–10 days after jointing, which resulting in a higher yield and water use efficiency.

Keywords: Winter wheat; Once irrigation in spring; Irrigation date; Grain filling characteristics; Grain yield; Water use efficiency

小麦(*Triticum aestivum*)是我国主要粮食作物之一, 种植面积占粮食种植面积的22%^[1], 小麦的稳产高产对确保粮食安全具有重要意义。河北省小麦播种面积居全国前列, 但降水量无法满足其生长发育的需求, 必须在生育期, 特别是播种后第2年春季进行灌溉才能获得高产^[2–4]。然而, 该区地表淡水资源匮乏, 农业生产长期超采地下水, 造成地下水漏斗, 引发地面沉降等严重的环境地质问题^[5–7]。随着国家地下水限采政策的实施, 地下水超采并灌区如何平衡灌溉用水不足和粮食生产对水分刚性需求的矛盾, 是当前亟需解决的重要议题^[8]。拔节期是小麦需水关键期, 也是根系向下生长最旺盛时期^[9]。张喜英^[10]研究发现, 限水条件下冬小麦拔节期灌溉一次, 可显著促进作物营养生长和根系生长, 利于水分利用

效率提高。李晓爽等^[11]研究表明, 冬小麦拔节阶段适期春灌一水可保持较高产量水平。在稳定小麦产量和减少地下水开采量的双重压力下, 实施春灌一水在本地区冬小麦水分管理中越来越有必要。

灌浆期是小麦产量形成的重要时期, 粒重作为小麦产量的构成要素之一, 与籽粒灌浆特性密切相关。关于水分对小麦灌浆影响的研究已有很多^[12–16]。Kang等^[12]研究表明, 适当控制土壤水分含量可以促进小麦干物质向有利的方向转移; 吴少辉等^[14]研究发现, 在一定干旱胁迫下小麦平均灌浆时间相对缩短, 而平均灌浆速率增加, 可短期内快速积累籽粒干物质; 惠海滨等^[15]研究表明, 水分供应不足会显著提高小麦灌浆前期灌浆速率, 却不利于中后期粒重稳定持续增加; 黄玲等^[16]研究发现, 适度水分胁

迫促使小麦花前和花后干物质积累与转移及对籽粒的贡献率更加平衡。可见,关于水分对灌浆特征影响的结论并不一致,但大多数研究认为小麦整个生育期内始终保持充足的水分供应是不必要的^[17-18]。前人对限量灌溉下小麦灌浆规律的研究已较深入,但关于不同时间春灌一水对小麦灌浆特性影响的报道较少。明确拔节期不同灌水时间下小麦灌浆特征参数,阐述其对产量形成的影响效应,对确定适宜灌水时间具有重要意义。基于此,本文研究了不同时间春灌一水对冬小麦灌浆特性、籽粒产量及水分利用效率的影响,旨在探寻适宜的春灌一水时间,构建河北平原区小麦节水稳产技术体系。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018—2020年冬小麦生长季在河北省农林科学院旱作节水农业试验站(115°72'E, 37°91'N)进行。该站位于河北省深州市护驾迟镇,地处河北平原中南部,海拔高度21.0 m,属于温带大陆性季风气候,年均日照时数2509.4 h、无霜期188 d、蒸发量1785 mm、降水量510 mm、年均气温12.8℃。试验区地势平坦,地下水埋深>5 m,土壤质地为壤土,0~200 cm土壤平均容重为1.46 g·cm⁻³,0~20 cm耕作层土壤有机质含量15.68~17.42 g·kg⁻¹,全氮1.48~

1.54 g·kg⁻¹,速效氮127.24~134.68 mg·kg⁻¹,速效磷21.95~24.13 mg·kg⁻¹,速效钾113.68~128.42 mg·kg⁻¹。2018—2019年和2019—2020年冬小麦生长季降水量分别为133.7 mm和124.1 mm。

1.2 试验设计

试验区种植制度为冬小麦-夏玉米(*Zea mays*)一年两熟制,前茬作物为夏玉米,收获后秸秆全量粉碎还田。供试材料为节水冬小麦品种‘衡399’。2018—2020年冬小麦播种时间为2018年10月15日和2019年10月15日,播种量225 kg·hm⁻²,行间距15 cm,收获时间分别为2019年6月5日和2020年6月7日。冬小麦播种前底施磷酸二铵525 kg·hm⁻²、氯化钾150 kg·hm⁻²,拔节期追施尿素375 kg·hm⁻²,折合N、P₂O₅、K₂O施用量分别为267 kg·hm⁻²、241.5 kg·hm⁻²和90 kg·hm⁻²。为保证足墒播种,所有处理在夏玉米收获前(9月25日)灌水75 mm。试验采用单因素随机区组设计,在小麦需水关键期(3—4月)设置5个春灌一水时间处理,分别为拔节后0 d (AJ0)、拔节后5 d (AJ5)、拔节后10 d (AJ10)、拔节后15 d (AJ15)和拔节后20 d (AJ20);设2个对照处理,分别为储墒旱作无春灌(CK1)和生产常规春灌二水(CK2)。各处理的灌水量和灌水时间如表1所示,每个处理3次重复,小区面积40 m² (5 m×8 m),处理间设置宽0.5 m的隔离区。

表 1 不同处理冬小麦春季生育期间灌水情况
Table 1 Description of irrigation treatments during spring growing period of winter wheat

处理 Treatment	灌水次数 Irrigation frequency	灌水时间/灌水量 Irrigation time (d) / irrigation volume (mm)
AJ0	1	拔节后 0/75 0 day after jointing / 75
AJ5	1	拔节后 5/75 5 days after jointing / 75
AJ10	1	拔节后 10/75 10 days after jointing / 75
AJ15	1	拔节后 15/75 15 days after jointing / 75
AJ20	1	拔节后 20/75 20 days after jointing / 75
CK1	0	无灌水 No irrigation
CK2	2	拔节后 5/75; 开花后 5/75 5 days after jointing / 75; 5 days after anthesis / 75

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

于每年小麦播种前和收获时,用土钻采集0~200 cm土层的土样,其中0~100 cm每10 cm分为一层,100~200 cm每20 cm分为一层,装入铝盒带回实验室,采用烘干法测定土壤含水率。每个重复各取一个样点。

1.3.2 籽粒干质量

小麦开花时,各小区选择花期一致,穗型、长势和大小基本相同,无病虫害的单穗挂牌标记。开花3 d后开始取样,此后每3 d取样1次,直至小麦完熟。

各小区每次取样5穗,全部取出籽粒,调查总粒数。籽粒于105℃下处理15 min后80℃烘干至恒重,称量干重,换算成千粒重。

1.3.3 考种与测产

小麦收获时,各小区随机选取3个点调查1 m双行的穗数,换算成每公顷穗数;每点随机选取10穗小麦测定穗粒数;每个小区随机收获3 m²测产,换算成每公顷产量,并测定千粒重。

1.3.4 耗水量和水分利用效率

耗水量采用水量平衡公式计算,公式为:

$$ET_c = W_1 + P + I + G - R - F - W_2 \quad (1)$$

式中: ET_c 为时段内耗水量, W_1 、 W_2 为时段开始、结束时 0~200 cm 土层土壤储水量, P 为时段内降水量, I 为时段内灌水量, G 为时段内地下水对作物根系的补给量, R 为时段内测定区域的地表径流量, F 为时段内根区深层渗漏量, 单位均为 mm。试验区地势平坦且有田埂, 无地表径流损失; 地下水位埋深大于 5 m, 不计地下水补给; 冬小麦生长期降水强度较小, 0~200 cm 土层无深层渗漏产生。因此, 公式可简化为:

$$ET_c = W_1 + P + I - W_2 \quad (2)$$

水分利用效率计算公式为:

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率, $kg \cdot m^{-3}$; Y 为小麦籽粒产量, $kg \cdot hm^{-2}$; ET 为小麦生育期耗水量, $m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

1.3.5 灌浆模型及参数计算

参照江晓东等^[13]报道的方法, 采用 Logistic 模型对小麦籽粒灌浆进程进行拟合, 以开花后天数(t)为自变量, 花后籽粒千粒重(y)为因变量, 灌浆拟合方程为:

$$y = K(1 + Ae^{-Bt})^{-1} \quad (4)$$

式中: y 为花后籽粒千粒重, g; K 为理论最大千粒重, g; t 为开花后天数, d; A 、 B 为拟合方程参数。

对灌浆拟合方程求一阶导数, 得到灌浆速率方程为:

$$R_t = KABe^{-Bt}(1 + Ae^{-Bt})^{-2} \quad (5)$$

式中: R_t 为灌浆速率, $g \cdot (1000\text{-grain})^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

由拟合方程和灌浆速率方程可推导出主要灌浆参数:

$$t_1 = -\ln[(2+3^{1/2})/A]/B \quad (6)$$

$$t_2 = -\ln[(2-3^{1/2})/A]/B \quad (7)$$

$$T = -\ln(1/99)/B \quad (8)$$

$$T_{\max} = (\ln A)/B \quad (9)$$

$$R_{\max} = KB/4 \quad (10)$$

$$R_{\text{mean}} = K/T \quad (11)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为两个拐点出现时间, d; T 为籽粒千粒重达理论最大千粒重 99% 的时间, 即灌浆持续时

间, d; $T_{\max}$ 为最大灌浆速率出现时间, d; $R_{\max}$ 为最大灌浆速率, $g \cdot (1000\text{-grain})^{-1} \cdot d^{-1}$; R_{mean} 为平均灌浆速率, $g \cdot (1000\text{-grain})^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Office Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行处理、分析和作图。采用 LSD 法对数据进行多重比较, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理对冬小麦籽粒灌浆特性的影响

由图 1 可看出, 不同年份各处理冬小麦籽粒增重曲线均呈“S”型, 可用 Logistic 模型对其进行模拟。所有处理的拟合优度 R^2 均大于 0.99, 说明 Logistic 曲线可以较好地反映出小麦籽粒灌浆进程。

Logistic 模拟下各处理冬小麦的灌浆模型参数如表 2 所示。同一年份随春灌一水时间的推迟, 籽粒平均灌浆速率(R_{mean})和最大灌浆速率($R_{\max}$)呈降低趋势, 最大灌浆速率出现时间($T_{\max}$)推迟, 而灌浆持续时间(T)延长, 理论最大千粒重(K)逐渐增加。与 AJ0 处理相比, 2018—2019 年和 2019—2020 年小麦生长季 AJ5、AJ10、AJ15、AJ20 处理的 R_{mean} 分别降低 5.60% 和 9.46%、2.40% 和 8.78%、3.20% 和 10.81%、4.00% 和 13.51%, T 分别增加 3.14 d 和 3.13 d、4.35 d 和 3.60 d、5.09 d 和 4.95 d、6.19 d 和 6.59 d, K 依次增大 5.71% 和 1.61%、13.51% 和 3.75%、15.32% 和 6.70%、18.62% 和 8.58%。所有春灌一水处理的 R_{mean} 、 $R_{\max}$ 和 K 均大于 CK1 处理, 其中, 2018—2019 年三者的增加幅度分别为 8.26%~14.68%、7.53%~21.76% 和 4.72%~24.21%; 2019—2020 年增加幅度依次为 6.67%~23.33%、2.73%~34.77% 和 2.19%~10.96%。与 CK2 处理相比, 2018—2019 年, 春灌一水处理的 T 有所增大(AJ0 和 AJ5 处理除外), 但 R_{mean} 和 $R_{\max}$ 均减小(AJ0 处理除外); 2019—2020 年所有春灌一水处理的 R_{mean} (AJ20 处理

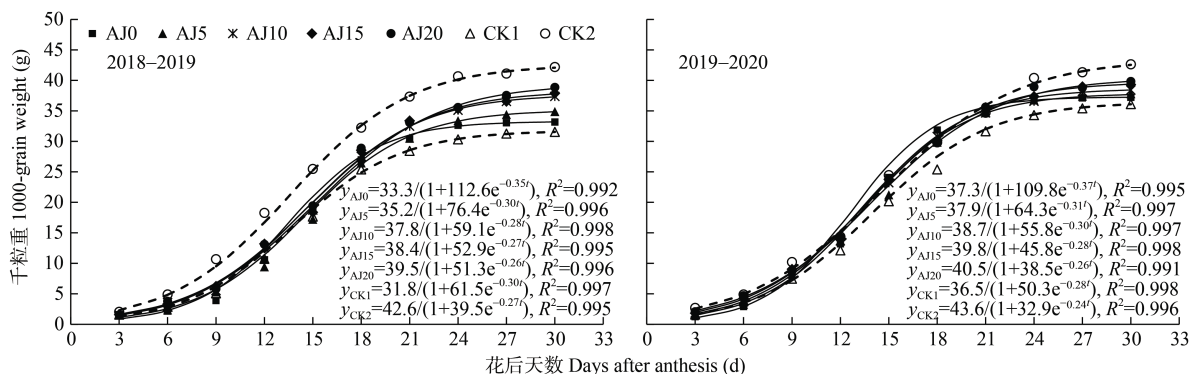


图 1 2018—2020 年不同灌水处理下冬小麦籽粒干质量积累曲线

Fig. 1 Grain dry weight accumulation curves of winter wheat under different irrigation treatments in 2018–2020
各处理详细描述见表 1。The description of each treatment is shown in the table 1.

表 2 2018—2020 年不同灌水处理下冬小麦籽粒灌浆模型参数

Table 2 Grain filling model parameters of winter wheat under different irrigation treatments in 2018–2020

年份 Year	处理 Treatment	t_1 (d)	t_2 (d)	$R_{\max}$ (g·1000-grain ⁻¹ ·d ⁻¹)	$T_{\max}$ (d)	R_{mean} (g·1000-grain ⁻¹ ·d ⁻¹)	T (d)	K (g·1000-grain ⁻¹)
2018—2019	AJ0	9.73	17.26	2.91	13.50	1.25	26.63	33.3
	AJ5	10.06	18.84	2.64	14.45	1.18	29.77	35.2
	AJ10	9.87	19.27	2.65	14.57	1.22	30.98	37.8
	AJ15	9.82	19.58	2.59	14.70	1.21	31.72	38.4
	AJ20	10.08	20.21	2.57	15.14	1.20	32.82	39.5
	CK1	9.34	18.12	2.39	13.73	1.09	29.05	31.8
	CK2	8.74	18.49	2.88	13.62	1.39	30.63	42.6
2019—2020	AJ0	9.14	16.26	3.45	12.70	1.48	25.12	37.3
	AJ5	9.18	17.68	2.94	13.43	1.34	28.25	37.9
	AJ10	9.02	17.80	2.90	13.41	1.35	28.72	38.7
	AJ15	8.95	18.36	2.79	13.66	1.32	30.07	39.8
	AJ20	8.98	19.11	2.63	14.04	1.28	31.71	40.5
	CK1	9.29	18.70	2.56	13.99	1.20	30.40	36.5
	CK2	9.07	20.04	2.62	14.56	1.29	33.70	43.6

各处理详细描述见表 1。 t_1 、 t_2 分别为两个拐点出现时间, $R_{\max}$ 为最大灌浆速率, $T_{\max}$ 为最大灌浆速率出现时间, R_{mean} 为平均灌浆速率, T 为灌浆持续时间, K 为理论最大千粒重。The description of each treatment is shown in the table 1. t_1 and t_2 are the appear times of two inflection points, $R_{\max}$ is the maximum grain filling rate, $T_{\max}$ is the appear time of the maximum grain filling rate, R_{mean} is the average grain filling rate, T is the grain filling duration, K is the theoretical maximum 1000-grain weight.

除外)和 $R_{\max}$ 均有所增大, 但 T 减小。由此使得两年 CK2 处理的 K 均大于春灌一水处理, 分别增加 7.85%~27.93%和 7.65%~16.89%。

2.2 不同灌水处理对冬小麦产量和产量构成因素的影响

2018—2020 年各处理冬小麦产量及产量构成因素如表 3 所示。对春灌一水处理而言, 冬小麦穗数和穗粒数随灌水时间的推迟先增大后减小, 千粒重逐

渐增加。2018—2019 年 AJ5 处理的穗数最大, 与 AJ5 相比, AJ10、AJ15、AJ20 处理分别降低 3.80%、4.21%、4.28%, 差异达显著水平 ($P<0.05$)。2019—2020 年穗数最大的处理为 AJ10, 与 AJ10 相比, AJ5 处理仅降低 0.26%, 差异不显著 ($P>0.05$); AJ0、AJ15、AJ20 则分别显著降低 12.63%、17.67%和 17.76% ($P<0.05$)。2 年中穗粒数最多的处理均为 AJ5, 与之相比, AJ0、AJ10、AJ15 和 AJ20 处理穗粒数的减小幅度依次为

表 3 2018—2020 年不同灌水处理下冬小麦产量和产量构成因素

Table 3 Yield and yield components of winter wheat under different irrigation treatments in 2018–2020

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spikes number ($\times 10^4$ spike·hm ⁻²)	穗粒数 Grains number per spike (grain·spike ⁻¹)	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)
2018—2019	AJ0	702.42±53.84a	31.44±1.06b	33.22±0.13c	6529.34±203.24b
	AJ5	709.71±51.88a	35.64±0.76a	34.82±0.14c	7688.45±113.47a
	AJ10	682.74±57.46b	35.13±0.97a	36.84±0.15bc	7457.23±210.62a
	AJ15	679.81±55.37b	27.68±0.54c	38.06±0.09b	6352.56±141.31b
	AJ20	679.35±40.62b	26.47±1.14c	38.47±0.19b	6056.04±224.71b
	CK1	582.56±47.81d	22.72±1.13d	31.49±0.11d	3921.78±223.42c
	CK2	620.53±53.62c	35.53±1.19a	41.12±0.15a	7750.64±201.73a
2019—2020	AJ0	595.42±43.72c	25.29±0.97b	37.15±0.10c	4866.91±103.27c
	AJ5	679.76±58.46a	26.60±1.08b	37.61±0.07c	5943.63±97.84b
	AJ10	681.53±41.75a	25.67±0.95b	38.54±0.14bc	5852.51±182.00b
	AJ15	561.08±38.64d	25.16±0.87b	39.17±0.10b	4672.46±98.75c
	AJ20	560.52±50.23d	24.11±1.14bc	39.71±0.13ab	4722.46±103.62c
	CK1	629.57±52.71b	20.31±1.24d	34.83±0.16d	3905.75±211.70d
	CK2	660.05±58.43a	30.70±1.21a	40.22±0.14a	7139.43±233.21a

各处理详细描述见表 1。同一生长季同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 $P<5\%$ 显著水平。The description of each treatment is shown in the table 1. In the same growing season, different lowercase letters after data in the same column mean significant differences among treatments at $P<5\%$ level.

11.78%和4.92%、1.43%和3.50%、22.33%和5.41%、25.73%和9.36%。两个试验年度,冬小麦千粒重最小和最大的处理均分别为AJ0和AJ20,与AJ0相比,AJ5、AJ10、AJ15和AJ20处理的千粒重分别增加4.82%和1.24%、10.90%和3.74%、14.57%和5.44%、15.80%和6.89%。

2018—2019年所有春灌一水处理冬小麦的穗数均大于CK1和CK2,其中较CK1增加16.61%~21.83%,比CK2增加9.48%~14.37%,差异均达显著水平($P<0.05$);2019—2020年仅AJ5和AJ10处理的穗数大于CK1和CK2,二者较CK1显著增加7.97%和8.25%,较CK2增加2.99%和3.25%,差异不显著。两个试验年度所有春灌一水处理的穗粒数和千粒重均大于CK1,小于CK2(除2018—2019年AJ5处理的穗粒数外)。与CK1相比,春灌一水处理穗粒数和千粒重的增加幅度分别为16.51%~56.87%和5.49%~22.17%;与CK2相比,减小幅度依次为1.13%~25.50%和1.27%~19.21%。

两个试验年度,春灌一水处理冬小麦籽粒产量随灌水时间推迟均是先增加后减小。其中,AJ5处理的

产量最高,AJ10处理次之,二者间差异不显著,但均显著大于AJ0、AJ15和AJ20处理($P<0.05$)。所有春灌一水处理的产量均大于CK1,小于CK2。2018—2019年和2019—2020年,与CK1相比,AJ5、AJ10处理的产量分别增加96.04%和52.18%、90.15%和49.84%,差异均达显著水平($P<0.05$);与CK2相比,AJ5、AJ10处理的产量依次降低0.80%和16.75%、3.79%和18.03%,其中2019—2020年差异达显著水平($P<0.05$)。

2.3 不同灌水处理对冬小麦耗水量及水分利用效率的影响

2018—2020年冬小麦耗水量来源及水分利用效率如表4所示。由表4可知,同年份春灌一水处理随灌水时间的推迟,土壤供水量增加,耗水量(ET)逐渐增大。两个试验年度,与AJ0相比,AJ5、AJ10、AJ15和AJ20处理的ET分别增加19.5~68.4 mm、38.2~72.8 mm、49.1~75.0 mm和57.4~84.7 mm。其中,2018—2019年AJ0和AJ20处理较CK1多138.6 mm和196.0 mm,较CK2少101.0 mm和43.6 mm;2019—2020年AJ0处理较CK1和CK2分别少41.8 mm和167.6 mm,AJ20处理较CK1多42.9 mm,较CK2处理少82.9 mm。

表 4 2018—2020 年不同灌水处理下冬小麦耗水量来源及水分利用效率

Table 4 Water consumption sources and water use efficiency of winter wheat under different irrigation treatments in 2018–2020

年份 Year	处理 Treatment	灌溉定额 Irrigation volume (mm)	降水量 Precipitation (mm)	土壤供水量 Soil water supply (mm)	耗水量 Water consumption (mm)	水分利用效率 Water use efficiency (kg·m ⁻³)
2018—2019	AJ0	75	133.7	185.2±14.32c	393.9±14.32c	1.66±0.13ab
	AJ5	75	133.7	204.7±15.62bc	413.4±15.62c	1.86±0.05a
	AJ10	75	133.7	223.4±13.78ab	432.1±13.78b	1.73±0.07ab
	AJ15	75	133.7	234.3±16.54a	443.0±16.54b	1.43±0.10bc
	AJ20	75	133.7	242.6±18.18a	451.3±18.18b	1.34±0.12c
	CK1	0	133.7	121.6±20.31d	255.3±20.31d	1.54±0.14b
	CK2	150	133.7	211.2±18.21b	494.9±18.21a	1.57±0.09b
2019—2020	AJ0	75	124.1	109.2±15.64e	308.3±15.64d	1.58±0.14a
	AJ5	75	124.1	177.6±12.43d	376.7±12.43b	1.58±0.09a
	AJ10	75	124.1	182.0±18.33c	381.1±18.33b	1.54±0.09a
	AJ15	75	124.1	184.2±16.41c	383.3±16.41b	1.22±0.12b
	AJ20	75	124.1	193.9±13.26bc	393.0±13.26b	1.20±0.11b
	CK1	0	124.1	226.0±17.51a	350.1±17.51c	1.12±0.07b
	CK2	150	124.1	201.8±18.33b	475.9±18.33a	1.50±0.06a

各处理详细描述见表1。同一生长季同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 $P<5\%$ 显著水平。The description of each treatment is shown in the table 1. In the same growing season, different lowercase letters after data in the same column mean significant differences among treatments at $P<5\%$ level.

两年中春灌一水处理的水分利用效率(WUE),灌水较早的AJ0、AJ5和AJ10处理均较高,且3个处理之间的差异不显著($P>0.05$),AJ15显著低于AJ5($P<0.05$),AJ20显著低于AJ0、AJ5和AJ10($P<0.05$)。春灌一水中AJ0、AJ5和AJ10处理的WUE均大于CK1和CK2。其中,

2018—2019年,AJ5处理的WUE较CK1和CK2显著增加20.78%和18.47%($P<0.05$),AJ10处理较CK1和CK2分别增加12.34%和10.19%;2019—2020年,AJ5和AJ10处理的WUE较CK1显著增加41.07%和37.50%($P<0.05$),二者较CK2分别增加5.33%和

2.67%, 差异均未达显著水平($P>0.05$)。

2.4 冬小麦产量、产量构成因素、耗水量和水分利用效率的相关性

由表5可以看出, 除千粒重与穗数以及WUE与千粒重之间为不显著的负相关以外, 产量及3个产量构成因素、ET、WUE两两之间均为正相关关系。其中, 产量与穗数和穗粒数呈极显著正相关关系,

但穗数与穗粒数间相关性不显著, 且二者与千粒重亦无显著相关性; ET与产量和千粒重呈极显著正相关关系, 与穗粒数为显著正相关关系, 但与穗数相关性不显著; WUE与穗粒数和产量呈极显著正相关关系, 与穗数为显著正相关关系。以上相关性结论表明, 产量和WUE是灌水处理对各产量构成因素间制约平衡的结果。

表 5 2018—2020 年冬小麦产量、产量构成因素、耗水量和水分利用效率的相关性

Table 5 Correlation among yield, yield components, water consumption and water use efficiency of winter wheat in 2018–2020

参数 Parameter	穗数 Spikes number	穗粒数 Grains number per spike	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield	耗水量 Water consumption	水分利用效率 Water use efficiency
穗数 Spikes number	1.000					
穗粒数 Grains number per spike	0.532	1.000				
千粒重 1000-grain weight	-0.156	0.173	1.000			
产量 Yield	0.678**	0.949**	0.312	1.000		
耗水量 Water consumption	0.428	0.658*	0.647**	0.791**	1.000	
水分利用效率 Water use efficiency	0.590*	0.748**	-0.281	0.681**	0.093	1.000

*和**分别表示在 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 水平(双侧)上显著相关。* and ** indicate significant correlation at $P<5\%$ and $P<1\%$ levels (bilateral), respectively.

3 讨论

3.1 春灌一水时间对冬小麦籽粒灌浆特性的影响

灌浆期是小麦籽粒产量形成的关键期。合理的灌溉可调控土壤湿度与农田小气候, 减小干旱、高温等逆境胁迫对小麦灌浆过程的影响^[19-20]。本研究基于Logistic模型得到的冬小麦籽粒灌浆特性参数表明, 随着春灌一水时间的推迟, 冬小麦平均灌浆速率呈降低趋势, 但开花时间提前, 灌浆持续时间增长, 理论最大千粒重增大。这说明不同时间春灌一水因影响灌浆持续时间而决定粒重形成, 与李世清等^[21]和吴少辉等^[22]研究得出相似的结论, 究其原因是在拔节后春灌一水时间早, 拔节中前期田间水分适宜、小麦生长发育较好, 但由于抽穗开花后田间水分不足, 致使籽粒灌浆时间缩短、粒重降低; 拔节后春灌一水时间晚, 拔节前期土壤水分不足, 小麦群体生长受到抑制, 但抽穗开花后麦田水分相对充足, 促使灌浆持续时间延长, 小麦出现晚熟。可见, 本研究条件下, 春灌一水偏早, 土壤水分不能满足灌浆后期的水分需求而降低粒重; 灌水偏晚, 则因成穗数和穗粒数不足而降低产量。从本文结论可知AJ20和AJ15的粒重较高, 是有利于灌浆的灌水处理, 然而由于其穗数或穗粒数不足, 产量并不理想, 最优处理要综合产量构成因素的协调情况确定。与春灌一水处理相比, CK1的灌浆速率和灌浆持续时间有所

降低, 致使其粒重下降, 原因是该处理小麦生长期未灌水, 土壤干旱抑制了小麦正常生长发育。相比之下CK2灌水两次, 小麦各生长阶段的土壤水分较为适宜, 促使其平均灌浆速率较大、灌浆持续时间较长, 理论最大千粒重显著高于其他处理。

3.2 灌水时间对冬小麦产量及产量构成因素的影响

群体穗数、穗粒数和千粒重是小麦籽粒产量构成的三要素。以往研究指出, 冬小麦拔节期灌水对穗数的形成具有重要影响^[23-24]。本研究表明, 春灌一水处理冬小麦的穗数和穗粒数随灌水时间的推迟均是先增大后减小, 拔节后5~10 d灌水可获得最高值, 这与Li等^[25]得到的研究结论相似, 原因是适期春灌可促使小麦分蘖消亡减少, 小花发育的持续时间延长、退化减少^[26]。冬小麦千粒重随拔节期灌水时间的推迟逐渐增加, 这与理论最大千粒重的变化规律一致。随着春灌一水时间的推迟, 冬小麦籽粒产量呈现先增加后减小的趋势, 以AJ5或AJ10处理产量最大或较大, 二者间差异不明显但均显著大于其他春灌一水处理。由此可见, 适度推迟灌溉拔节水至拔节后5~10 d, 既能保证灌浆期水分的供应, 也能满足分蘖成穗和小花发育对水分的需求, 进而通过产量构成因素的协调而显著增加籽粒产量。通过对产量及产量构成因素的相关分析发现, 冬小麦籽粒产量与穗数和穗粒数呈显著正相关, 与千粒重

并无显著相关性,说明通过调控春一水灌水时间,在保证灌浆期小麦对水分需求的同时,如何进一步提高穗数和穗粒数,才是获得高产的关键。春灌一水各处理冬小麦的籽粒产量均显著高于CK1,表明在拔节期进行补灌是非常有必要的。与CK2的籽粒产量相比,2018—2019年AJ5和AJ10处理与之差异不显著,2019—2020年二者显著降低16.75%~18.03%,说明在水资源极度短缺的河北平原,在冬小麦生长关键期进行限量补灌,可能达到与春季灌溉2次相当的较高籽粒产量。年际间各处理的冬小麦籽粒产量差异较大,原因是2019—2020年冬小麦生长季出现倒春寒,造成穗粒数明显减少,产量较低。

3.3 灌水时间对冬小麦耗水特性及水分利用效率的影响

水分利用效率是衡量作物产量与用水量关系的一种指标,也是评价水分亏缺下植物生长适宜度的综合指标之一。通过对冬小麦耗水特性和水分利用效率的分析发现,春灌一水时间越晚,土壤供水越多,小麦耗水量增大,这与李晓爽等^[11]研究结果一致,原因是推迟春灌时间可促使小麦根系下扎,提高其对深层土壤水分的吸收利用^[9]。春灌一水条件下,AJ5处理的水分利用效率最高,AJ10与之差异不显著,原因是适期灌溉可优化冬小麦群体指标与冠层结构,促进籽粒发育^[27],进而增加产量,提高水分利用效率。与AJ5处理相比,CK1和CK2的水分利用效率显著降低。原因是与适期春灌一水相比,CK1处理因后期遭受干旱胁迫而导致产量降低,不利于产量和水分利用效率的同步提高;CK2处理产量较高,但由于灌水较多,导致耗水量偏大、水分利用效率较低。相对而言,本研究在春灌一水条件下通过调控灌水时间,既能稳定小麦产量,又可提高水分利用效率,是适宜在本地区推广的节水灌溉模式。

4 结论

1)春灌一水条件下,随着灌水时间的推迟,冬小麦平均灌浆速率与最大灌浆速率降低,但灌浆持续时间延长,理论最大千粒重增大;与拔节后0 d灌水相比,其他灌水处理的灌浆持续时间延长3~7 d,平均灌浆速率减小2.40%~13.51%,理论最大千粒重增加1.61%~18.62%。

2)随着春灌一水时间的推迟,冬小麦穗数、穗粒数和籽粒产量均是先增大后减小,千粒重逐渐增加。春灌一水处理中,拔节后5 d灌水的籽粒产量最高,其次是拔节后10 d灌水,二者间差异不显著但显著高于其他处理。所有春灌一水处理的产量均大

于不灌水处理而小于春灌二水处理。

3)春灌一水处理冬小麦耗水量随灌水时间的推迟逐渐增大,水分利用效率则是灌水较早的拔节后0~10 d灌水处理较高,且3个处理间差异不显著;与不灌水处理和春灌二水处理相比,拔节后5 d和10 d灌水处理的水分利用效率明显提高。

综上所述,研究区冬小麦适期春灌一水可获得较高产量和水分利用效率,在冬小麦限水春灌一水条件下,推荐最优灌水时间为拔节后5~10 d。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017
- [2] FANG Q, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Selecting traits to increase winter wheat yield under climate change in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2017, 207: 30–41
- [3] 党红凯, 曹彩云, 郑春莲, 等. 造墒与播后镇压对小麦冬前耗水和生长发育的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1071–1079
DANG H K, CAO C Y, ZHENG C L, et al. Effects of pre-sowing irrigation and post-sowing soil compaction on water use and growth of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1071–1079
- [4] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 等. 冬小麦-夏玉米高产模式周年气候资源分配与利用特征研究[J]. 作物学报, 2019, 45(4): 589–600
ZHOU B Y, MA W, SUN X F, et al. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization in high-yielding winter wheat-summer maize double cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(4): 589–600
- [5] 吕丽华, 王慧军, 贾秀领, 等. 黑龙江平原区冬小麦、夏玉米节水技术模式适应性模糊评价研究[J]. 节水灌溉, 2012, (6): 5–8
LYU L H, WANG H J, JIA X L, et al. Fuzzy evaluation of technique adaptability of water-saving irrigation mode in Heilonggang Plain[J]. Water Saving Irrigation, 2012, (6): 5–8
- [6] 骆祖江, 王琰, 田小伟, 等. 沧州市地下水开采与地面沉降地裂缝模拟预测[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 198–204
LUO Z J, WANG Y, TIAN X W, et al. Simulating and forecasting of groundwater exploitation, land subsidence and ground fissure in Cangzhou City[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 198–204
- [7] 孙宏勇, 刘小京, 张喜英. 盐碱地水盐调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1528–1536
SUN H Y, LIU X J, ZHANG X Y. Regulations of salt and water of saline-alkali soil: a review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1528–1536
- [8] 王慧军, 张喜英. 华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效应探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 724–733
WANG H J, ZHANG X Y. Evaluating the comprehensive effects of planting winter wheat in the groundwater depletion

- regions in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 724–733
- [9] 邱新强, 高阳, 黄玲, 等. 冬小麦根系形态性状及分布[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2211–2219
QIU X Q, GAO Y, HUANG L, et al. Temporal and spatial distribution of root morphology of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2211–2219
- [10] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454–1464
ZHANG X Y. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454–1464
- [11] 李晓爽, 党红凯, 宋妮, 等. 分期定量春灌一水对麦田蒸散量与产量构成的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 280–289
LI X S, DANG H K, SONG N, et al. Effects of irrigation once at different time on water consumption and dry matter production of winter wheat in spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 280–289
- [12] KANG S Z, ZHANG L, LIANG Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 203–216
- [13] 江晓东, 陈惠玲, 姜琳琳, 等. 弱光条件下散射辐射比例增加对冬小麦籽粒灌浆进程的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(12): 753–760
JIANG X D, CHEN H L, JIANG L L, et al. Effect of increasing diffuse radiation fraction under low light condition on the grain-filling process of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(12): 753–760
- [14] 吴少辉, 高海涛, 王书子, 等. 干旱对冬小麦粒重形成的影响及灌浆特性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 49–51
WU S H, GAO H T, WANG S Z, et al. Analysis on the effect of drought on the grain weight grow and the character of the grain filling of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(2): 49–51
- [15] 惠海滨, 林琪, 刘义国, 等. 灌水对超高产麦田小麦灌浆期旗叶和籽粒糖含量与产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(5): 887–893
HUI H B, LIN Q, LIU Y G, et al. Effect of irrigation on sugar content in flag leaf and grain, and yield of super-high-yield wheat at grain-filling stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(5): 887–893
- [16] 黄玲, 高阳, 李新强, 等. 水分胁迫下不同年代冬小麦品种干物质积累与转运特性[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 943–950
HUANG L, GAO Y, LI X Q, et al. Effects of water stress on dry matter accumulation and translocation in winter wheat cultivars planted at different ages[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 943–950
- [17] 王维, 张建华, 杨建昌, 等. 适度土壤干旱对贪青小麦茎鞘贮藏性糖运转及籽粒充实的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1019–1025
WANG W, ZHANG J H, YANG J C, et al. Effects of controlled soil drought on remobilization of stem-stored carbohydrate and grain filling of wheat with unfavorably-delayed senescence[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(10): 1019–1025
- [18] 曹刚, 崔彦生, 孟建. 春季不同灌水处理对冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 466–468
CAO G, CUI Y S, MENG J. The effect of irrigation systems in spring on grain yield of winter wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 466–468
- [19] 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
FENG R C, LIU Q R, WANG L. Effect of irrigating time after flowering on soil water content, functional period of leaves and yield of wheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(9): 11–14
- [20] 赵花荣, 任三学, 齐月, 等. 不同时期灌水对冬小麦干热风的防御效应[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 58–65
ZHAO H R, REN S X, QI Y, et al. Defensive effect of irrigation at different stage on hot dry wind stress on winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 58–65
- [21] 李世清, 邵明安, 李紫燕, 等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 2030–2038
LI S Q, SHAO M A, LI Z Y, et al. Review of characteristics of wheat grain fill and factors to influence it[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(11): 2030–2038
- [22] 吴少辉, 高海涛, 张学品, 等. 播期对不同习性小麦品种籽粒灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(4): 105–107
WU S H, GAO H T, ZHANG X P, et al. Effect of sowing date on grain filling characters in different wheat varieties[J]. Acta Triticeae Crops, 2004, 24(4): 105–107
- [23] 王毅, 任爱霞, 孙敏, 等. 休闲期深翻覆盖配施氮磷肥对旱地小麦群体动态、叶面积的影响及其与产量的相关性[J]. 山西农业科学, 2014, 42(3): 242–246
WANG Y, REN A X, SUN M, et al. Effect of deep tillage and mulch in fallow period and nitrogen and phosphorus fertilizer before sowing on change of groups tiller, leaf area and their correlation with yield in dryland wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(3): 242–246
- [24] 崔帅, 王红光, 李东晓, 等. 限水减氮对高产麦田群体动态和产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(8): 1060–1068
CUI S, WANG H G, LI D X, et al. Effect of limited irrigation and reduced nitrogen on population dynamics and yield formation in high-yielding wheat field[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(8): 1060–1068
- [25] LI Q Q, BIAN C Y, LIU X H, et al. Winter wheat grain yield and water use efficiency in wide-precision planting pattern under deficit irrigation in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 153: 71–76
- [26] 韩惠芳, 任玉洁, 高超, 等. 推迟灌溉节水对不同种植模式冬小麦产量及品质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 792–797
HAN H F, REN Y J, GAO C, et al. Effect of delayed irrigation in jointing stage and planting pattern on winter wheat yield and quality[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(9): 792–797
- [27] FAN Y L, LIU J M, ZHAO J T, et al. Effects of delayed irrigation during the jointing stage on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different planting patterns[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 371–376