

滴灌量对冬小麦籽粒灌浆特性的影响研究

张娜, 张永强, 仵妮平, 吴培杰, 程雪峰, 张波, 徐文修

(新疆农业大学 农学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为优化滴灌冬小麦灌溉制度,于2012—2013年、2013—2014年连续两年在伊宁县采用单因子随机区组试验设计,并运用Logistic方程模拟,研究3 000(处理A),3 750(处理B),4 500(处理C) m^3/hm^2 三个滴灌量对冬小麦灌浆特性的影响。结果表明:两年试验冬小麦不同处理平均千粒重分别为48.35、50.27、52.17 g,不同年份不同处理灌浆各阶段持续时间均为缓增期(T_3)>速增期(T_2)>渐增期(T_1),其平均速率分别为1.25、1.92、0.54 mg/d,各阶段平均干物质累积贡献率分别为12.68%、60.90%、26.43%。随着滴灌量的增加,灌浆持续时间延长3~7 d不等,平均灌浆速率减小2.88%~16.79%。3个处理中,处理B具有较高的平均灌浆速率1.21 mg/d,较处理A仅降低了3.41%,较处理C增加了12.25%,适当延长了灌浆时间,但又不致贪青晚熟,较处理C节水750 m^3/hm^2 ,可作为大田生产参考。将灌浆参数与粒重进行相关分析得出,多数参数间存在显著或极显著相关关系,其中,平均灌浆速率、最大灌浆速率、灌浆持续期,尤其是速增期与缓增期的持续时间以及它们期间的灌浆速率都与粒重存在着显著或极显著相关性。

关键词:滴灌量;冬小麦;灌浆特性

中图分类号:S512.1⁺1; S311; S275.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0271-05

Study on the Grain Filling Characteristic of Winter Wheat Under Different Amounts of Drip Irrigation

ZHANG Na, ZHANG Yongqiang, WU Niping, WU Peijie, CHENG Xuefeng, ZHANG Bo, XU Wenxiu

(College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to optimize the drip irrigation of winter wheat in Yi'ning County of Xinjiang Uygur Autonomous Region, three different amounts of drip irrigation such as 3 000 (treatment A, T_A), 3 750 (treatment B, T_B), 4 500 (treatment C, T_C) m^3/hm^2 were conducted by using of randomized block experimental design in wheat growing seasons during the period from 2012 to 2013 and from 2013 to 2014, and the dynamics of grain filling were observed, which could be described well by Logistic equation. The result showed that the 1000-grain weights were 48.35 g, 50.27 g, and 52.17 g, respectively, over two years under different treatments. There were three phases during grain filling, namely grain-filling pyramid period (T_1), grain-filling fast increase period (T_2), and grain-filling slowly increase period (T_3). The durations followed the sequence: $T_3 > T_1 > T_2$, and the grain-filling rates were 1.25 mg/d, 1.92 mg/d and 0.54 mg/d, respectively. The contributions of biomass to grain were 12.68% in T_1 , 60.90% in T_2 , and 26.43% in T_3 , respectively. With the increase of drip irrigation, the duration of grain filling delayed 3~7 days, the mean grain filling rate decreased by 2.88%~16.79%. TB in wintering period had the higher average filling rate (1.21 mg/d), which was only 3.41% lower than TA, but 12.25% higher than TC, which did not only increased the days of grain filling but did not lead to late-maturing, but also saved 750 m^3/hm^2 of water than TC, and could be guidance for field production. Results from correlation and regression analysis methods indicated that there were significant or very significant correlations among the most parameters, and it could be seen that mean grain filling rate, biggest filling rate, the duration of grain filling, especially T_2 , T_3 and the filling rate of their phases were significantly correlated to 1000-grain weight.

Keywords: drip irrigation; winter wheat; grain filling characteristic

作为对密植作物灌溉的一次改革,麦田滴灌技术由于增产节水效果显著,促使其种植面积不断扩大,现已成为新疆小麦节水技术重点推广项目之一,但新疆滴灌小麦大田种植当中也存在滴水量和滴水次数偏多、缺乏相应的优化灌溉制度等问题,从而致使滴灌小麦产量、经济效益未能充分发挥。小麦的产量是由基因型、环境及栽培措施等多种因素共同决定的^[1-3],而小麦籽粒的灌浆特性与其产量关系又密切相关,因此,明确特定地区滴灌量对冬小麦籽粒灌浆特性的影响,对制定滴灌冬小麦目标产量及优化灌溉制度有着重要意义。

小麦灌浆特性受到自身生物学规律与外界环境条件的共同影响,与此同时,小麦的灌浆也因气候、土壤、田间管理等环境因素的变化而产生差异,籽粒灌浆作为小麦产量形成的最终过程,可以将小麦的品种特性及环境条件所产生效应集中体现出来,因此,水分对小麦生产的影响也必然在灌浆进程中得以体现。迄今,前人已在温度^[4]、水分^[5-7]、肥料^[8-9]、播期^[10-11]、密度^[12]、行距配置^[13]、灌溉方式^[14]等方面对小麦籽粒灌浆过程进行了研究,关于水分对小麦灌浆特性的影响虽有较多报道^[5-7],但这些研究都是在桶栽条件或常规灌溉条件下进行,滴灌条件下小麦籽粒灌浆规律并无报道。鉴于此,本研究试图在滴灌条件下,通过研究新疆不同灌量下冬小麦籽粒灌浆特性,探讨水分调控对滴灌冬小麦籽粒灌浆特性的影响,旨在为优化滴灌小麦高产栽培灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2012—2014 年在新疆伊犁哈萨克自治州伊宁县农业科技示范园(44°N,81°E)进行,该试验区位于伊犁河谷中部,海拔 813 m,属中温带干旱型内陆山地气候,日照年平均可达 2 800~3 000 h,多年平均降水量 257 mm,全年无霜期 169~175 d。试验地 0—20 cm 土壤耕层有机质含量为 1.56%,碱解氮 69.6 mg/kg,速效磷 2.5 mg/kg,速效钾 78.5 mg/kg。小麦开花至成熟阶段气象参数如表 1 所示。

表 1 冬小麦开花至成熟阶段气象参数

气象 参数	年份	5 月	6 月			7 月
		下旬	上旬	中旬	下旬	上旬
气温/ ℃	2012—2013	17.40	22.41	18.60	21.24	21.90
	2013—2014	17.70	17.81	23.26	24.61	22.41
降雨量/ mm	2012—2013	0.13	0.38	0.41	0.26	0.23
	2013—2014	11.80	5.11	0.53	1.90	2.23

1.2 田间试验设计

试验采用单因子随机区组试验设计,根据冬小麦需水特性及当地气候条件,自小麦拔节后共设置 3 个灌水处理,分别为 3 000(处理 A),3 750(处理 B),4 500(处理 C) m³/hm²,各处理均重复 4 次,具体灌水量分配如表 2 所示。小区面积 30 m²(5 m×6 m),各小区进水口由水表控制灌水量,不同小区间设置 1 m 宽的隔离带以防止水分外渗。冬小麦品种选用当地普遍种植的伊农 20 号,2012 年、2013 年的播种日期分别为 10 月 15 日、10 月 18 日,收获日期分别为 2013 年 7 月 2 日、2014 年 7 月 11 日。播种时基施磷酸二铵 290 kg/hm²,并采用漫灌方式浇足底墒水,拔节期、孕穗期分别随水滴施尿素 120,105 kg/hm²。2013 年滴灌冬小麦拔节水、抽穗水、扬花水及灌浆水的时间分别为 4 月 24 日、5 月 13 日、5 月 23 日和 6 月 8 日;2014 年分别为 5 月 2 日、5 月 18 日、5 月 29 日和 6 月 16 日。

表 2 不同处理各阶段的滴灌量 m³/hm²

处理	拔节— 孕穗	孕穗— 抽穗	抽穗— 扬花	扬花— 灌浆	灌水量
	孕穗	抽穗	扬花	灌浆	
A	1000	600	600	800	3000
B	1250	750	750	1000	3750
C	1500	900	900	1200	4500

1.3 测试项目与方法

灌浆过程的测定。于小麦开花期选择长势一致同日开花的植株麦穗 400 个进行拴线标记,自开花后第 5 天起,每隔 2 d 随机取标记麦穗 10 个,直至成熟为止。取出的籽粒在 105℃下杀青 20 min 后在 80℃下烘至恒重,随机数出 100 粒用万分之一天平测定粒重,重复 3 次,取 3 次重复的平均值用于方程的拟合。

以开花后天数(t)为自变量,千粒重(Y)为因变量,用 logistic 方程 $Y=k/(1+ae^{-bt})$ 对籽粒生长过程进行模拟。其中 k 为最大生长量上限, a , b 为常数。对 logistic 方程求一阶导数,得灌浆速率方程: $V(t)=dy/dt=kabe^{-bt}/(1+ae^{-bt})^2$;同时推导出次级灌浆参数:籽粒平均灌浆速率(R_{mean} ,mg/d)、灌浆持续天数(T ,d)、最大灌浆速率(R_{max} ,mg/d)、达到最大灌浆速率的时间(T_{max} ,d);同时估算灌浆过程的 3 个阶段:渐增期、快增期和缓增期的灌浆持续天数 T_1 , T_2 , T_3 与各阶段的平均灌浆速率 R_1 , R_2 , R_3 ,此外,令 logistic=0 的 $t \rightarrow 0$,可得出起始生长势 $C_0=k/(1+e^a)$,以此反映受精子房的生长潜势。

1.4 数据分析

用 Excel 和 SPSS 17.0 软件对数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 滴灌量对冬小麦籽粒增重的影响

如图 1 所示,不同年份不同滴灌量冬小麦籽粒干重变化趋势均相似,表现出花后籽粒干重持续增长,灌浆速度前期增长迅速,后期趋于平缓。2014 年小麦籽粒干物质积累时间较 2013 年延长了 8 d,干物质积累量高出 4.90%~7.45%,这可能是由于 2014 年春季气温回升慢,拔节推迟,小麦花后温度与 2013 年相比较低、降雨量增大等原因所致。不同年份不同滴灌量处理间籽粒干物质积累量均随灌水量的增大表现为:前期处理 A>处理 B>处理 C;中期处理 B>处理 C>处理 A;后期处理 C>处理 B>处理 A,说明灌

浆期降低水分补给虽然可一定程度增加前期籽粒干物质的积累,但持续时间较短;适当增大灌水量将有利于延长籽粒灌浆时间,促进粒重的增加;较大的灌水量虽使小麦后期仍有较大的灌浆速率,但易导致籽粒晚熟,影响产量。

进一步对两年不同处理冬小麦的籽粒灌浆进程进行 logistic 方程拟合(表 3),*F* 检验结果显示均达到了极显著水平($p<0.01$),表明该方程能够客观反映不同处理冬小麦籽粒灌浆进程。此外,两年拟合方程中 *k* 值(理论千粒重)也呈现出随灌水量的增大粒重先升高后降低的趋势,可见适宜的水分管理可充分促进籽粒干物质的积累,水分偏低或过高均不利于籽粒的灌浆过程。

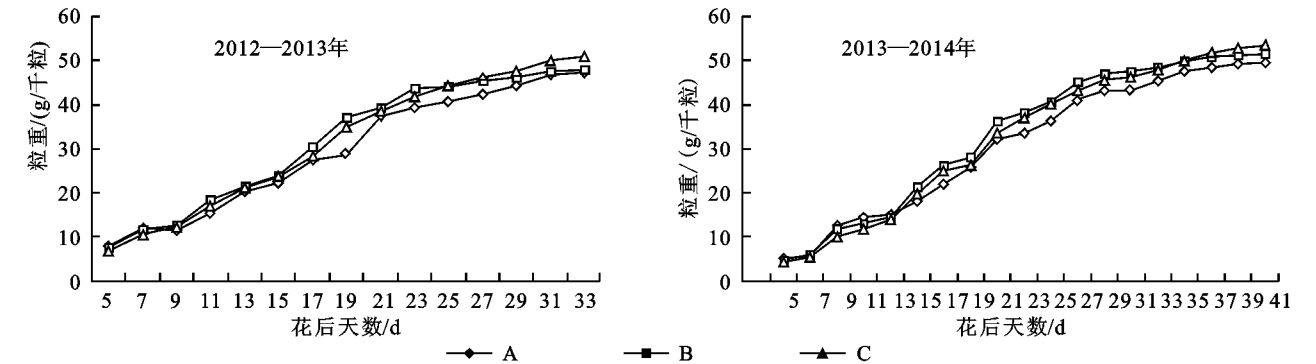


图 1 不同处理冬小麦千粒重动态变化

表 3 不同处理冬小麦籽粒灌浆进程的 logistic 方程参数估计值

处理	2012—2013 年			决定系数 R^2	2013—2014 年			决定系数 R^2
	$Y=k/(1+ae^{-bx})$				$Y=k/(1+ae^{-bx})$			
	k	a	b		k	a	b	
A	49.73	2.6969	0.1893	0.9929	52.06	3.1088	0.1799	0.9958
B	53.25	2.7119	0.1722	0.9978	53.56	3.1192	0.1684	0.9965
C	50.71	2.5129	0.1568	0.9914	51.30	2.7674	0.1494	0.9940

注: k 为理论粒重(g/千粒), a 、 b 为 logistic 方程 $Y=k/(1+ae^{-bx})$ 的回归参数。

2.2 滴灌量对冬小麦籽粒灌浆阶段特征的影响

由表 4 可知,不同灌浆阶段对小麦籽粒灌浆进程的贡献率不同,表现为速增期最大,缓增期次之,渐增期最小。不同灌浆阶段中,缓增期持续天数最长,可占整个灌浆持续时间的 42.49%~46.12%,其次为速增期,占灌浆时间的 34.14%~37.06%,而渐增期所占比例最小,为 16.82%~23.36%。不同处理条件下,随着灌水量的增多,不同年份冬小麦各阶段增重均表现出先增大后减小的趋势;平均灌浆速率与最大灌浆速率减小;达到最大灌浆速率的时间延后;灌浆各阶段时间均有所延长,增加时间 1~4 d 不等,但速增期与缓增期的灌浆速率却随之降低,其中处理 A 与处理 B 差异不明显,二者与处理 C 有显著差异。说明适当增加灌水量有利于延长速增期和缓增期的持续时间,尤其是速增期,对灌浆进程的贡献率最大,

因此,在保持其灌浆速率较高的前提下,延长速增期的时间,对籽粒增重的意义重大。

2.3 滴灌量与冬小麦籽粒灌浆参数的关系

对冬小麦灌浆参数与其粒重进行相关性分析可知(表 5),不同年份冬小麦粒重与 R_{\max} 、 R_{mean} 、 T_1 、 T_2 、 T_3 和 C_0 呈极显著正相关,与 R_1 、 R_2 呈极显著(2012—2013 年)或显著(2013—2014 年)正相关,与 T_{\max} 呈极显著负相关,而与 R_1 、 T_1 无显著相关性。此外, R_{\max} 、 R_{mean} 与 T 有显著(2012—2013 年)或极显著(2013—2014 年)负相关关系,与 T_2 、 T_3 和 C_0 亦呈极显著负相关,与 R_1 、 T_1 和 T_{\max} 无显著相关性,但 T_2 、 T_3 与 R_2 、 R_3 之间却存在显著或极显著负相关关系。由此可见,小麦的平均灌浆速率、最大灌浆速率、灌浆持续期,尤其是速增期与缓增期的持续时间以及它们期间的灌浆速率大小对小麦的粒重形成具有重要的影响作用。

表 4 不同处理对冬小麦籽粒灌浆阶段特征参数的影响

处理	年份	渐增期				速增期				缓增期				$T_{\max}/$ d	$R_{\max}/$ ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)	$R_{\text{mean}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)
		T_1/d	W_1/g	$R_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)	贡献 率/%	T_2/d	W_2/g	$R_2/$ ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)	贡献 率/%	T_3/d	W_3/g	$R_3/$ ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)	贡献 率/%			
A	2012—2013	7.29	10.51	1.44	11.79	13.91	28.71	2.06	61.51	17.32	10.01	0.58	26.69	14.25	2.35	1.29
	2013—2014	9.96	11.00	1.10	14.79	14.64	30.06	2.05	59.42	18.22	10.48	0.58	25.79	17.28	2.34	1.22
B	2012—2013	8.10	11.25	1.39	11.91	15.30	30.74	2.01	61.43	19.04	10.72	0.56	26.66	15.75	2.29	1.25
	2013—2014	10.70	11.32	1.06	14.87	15.64	30.93	1.98	59.37	19.47	10.78	0.55	25.76	18.52	2.26	1.17
C	2012—2013	7.63	10.72	1.41	10.39	16.80	29.28	1.74	62.50	20.91	10.21	0.49	27.12	16.03	1.99	1.12
	2013—2014	9.71	10.84	1.12	12.32	17.63	29.62	1.68	61.14	21.94	10.33	0.47	26.53	18.52	1.92	1.04

注： T_1 为灌浆渐增期， T_2 为灌浆快增期， T_3 为灌浆缓增期， W_1 为灌浆渐增期增重， W_2 为灌浆快增期增重， W_3 为灌浆缓增期增重， R_1 为渐增期灌浆速率， R_2 为快增期灌浆速率， R_3 为缓增期灌浆速率， T_{\max} 为到达最大灌浆速率的时间， R_{\max} 为最大灌浆速率， R_{mean} 为平均灌浆速率。

表 5 冬小麦灌浆参数与粒重的相关系数

年份	参数	R_{\max}	R_{mean}	R_1	R_2	R_3	T	T_{\max}	T_1	T_2	T_3	C_0
2012—2013	R_{\max}	1.00										
	R_{mean}	1.00*	1.00									
	R_1	0.37	0.41	1.00								
	R_2	1.00*	1.00*	0.37	1.00							
	R_3	1.00*	1.00*	0.37	1.00*	1.00						
	T	-0.9*	-0.92*	-0.74	-0.9*	-0.9*	1.00					
	T_{\max}	-0.74	-0.76	-0.90	-0.74	-0.74	0.96*	1.00				
	T_1	-0.06	-0.10	-0.95*	-0.06	-0.06	0.49	0.72	1.00			
	T_2	-0.94*	-0.96*	-0.66	-0.94*	-0.94*	0.99*	0.92*	0.39	1.00		
	T_3	-0.94*	-0.94*	-0.66	-0.94*	-0.94*	0.99*	0.92*	0.39	1.00*	1.00	
	C_0	-0.99*	-1.00*	-0.46	-0.99*	-0.99*	0.94*	0.80	0.01	0.97*	0.97*	1.00
	粒重	1.00*	1.00*	-0.42	1.00*	1.00*	0.92*	-0.97	-0.04	0.96*	0.96*	1.00
2013—2014	R_{\max}	1.00										
	R_{mean}	1.00*	1.00									
	R_1	-0.50	-0.44	1.00								
	R_2	1.00*	1.00*	-0.50	1.00							
	R_3	1.00*	1.00*	-0.50	1.00*	1.00						
	T	-0.96*	-0.98*	0.24	-0.96*	-0.96*	1.00					
	T_{\max}	-0.66	-0.71	-0.32	-0.66	-0.66	0.84	1.00				
	T_1	0.55	0.49	-1.00*	0.55	0.55	-0.29	0.27	1.00			
	T_2	-0.99*	-1.00*	0.37	-0.99*	-0.99*	0.99*	0.76	-0.42	1.00		
	T_3	-0.99*	-1.00*	0.37	-0.99*	-0.99*	0.99*	0.76	-0.42	1.00*	1.00	
	C_0	-0.99*	-0.98*	0.62	-0.99*	-0.99*	0.91	0.99*	-0.66	0.96*	0.96*	1.00
	粒重	0.94*	0.96*	0.17	0.94*	0.94*	1.00*	-0.94	-0.23	0.98*	0.98*	0.98

注：* 表示在 $p<0.05$ 水平显著，** 表示在 $p<0.01$ 水平显著， T 为灌浆时间， C_0 为生长潜势，其余灌浆参数定义同表 3。

3 讨论与结论

灌浆期是小麦籽粒产量形成的重要时期，水分对小麦灌浆进程和粒重有着重要影响^[15]，小麦灌浆期间适宜的水分状况，不仅能减缓高温下由于缺水引起的早衰，而且有利于光合产物的形成和向籽粒的转移、贮藏，能有效提高粒重^[16]。前人在常规灌溉条件下的研究表明，冬小麦前期干旱或是孕穗、抽穗、灌浆连续缺水都会缩短灌浆持续时间，明显影响籽粒灌浆过

程，灌浆速率峰值较水分适宜低，最终导致冬小麦早衰，粒重降低^[5]。干旱条件下冬小麦的平均灌浆时间相对缩短，可使平均灌浆速率相应增加，但过量供水同样会对灌浆不利，易引起贪青晚熟，穗粒重降低^[17-18]。本试验研究结果表明，滴灌条件下，一方面，灌水量偏低虽然提高了冬小麦渐增期的灌浆速率，但由于渐增期在整个灌浆持续期中所占比例仅为 16.82%~23.36%，因此对粒重贡献率仍然不占主导地位，也导致了灌浆持续期的缩短，灌浆进程提前结束，造成

粒重降低。另一方面,水分过高有利于延长速增期和缓增期的持续时间,但相对降低了这两个阶段内的灌浆速率、最大灌浆速率和平均灌浆速率,使得达到最大灌浆速率的时间延后,灌浆持续期天数增大,致使同期收获时灌浆不充分,籽粒饱满度降低,从而影响粒重。因此,确定适宜的灌水量对确保小麦植株前期具有良好群体结构,为生殖生长奠定良好基础,灌浆期适宜的水分管理有利于籽粒进程的高效持久性意义重大。本研究两年试验中,冬小麦整个生育期灌水量为 $3\ 750\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 的适水处理不仅保持较高的灌浆速率 $2.28\ \text{mg}/\text{d}$,与高灌水量处理相比提高了 16.04% ,同时一定程度上延长了速增期与缓增期的时间,较低灌水量处理分别延长了 $2.1\ \text{d}$,又不致晚熟,可以作为大田生产中滴灌灌水量的参考。

有关灌浆速率和灌浆持续天数与粒重的关系长期存在争议。有研究表明^[19],冬小麦籽粒灌浆过程即粒重的形成取决于该过程的灌浆速率,而与灌浆持续时间无显著相关关系,也有学者认为^[20],灌浆速率与灌浆过程持续天数均与粒重呈显著正相关,这与本试验两年研究结果一致,此外,本试验结果也同时表明,速增期与缓增期及它们期间的灌浆速率对粒重也具有决定性的作用,但灌浆速率与灌浆持续期之间也存在极显著负相关关系,这也给想要通过同时提高灌浆速率与延长灌浆持续期来增加粒重带来难度,因此,如何协调灌浆速率与其持续时间并进增长的矛盾,有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Motzo R, Giunta F, Pruneddu G. The response of rate and duration of grain filling to long-term selection for yield in Italian durum wheats[J]. *Crop & Pasture Science*, 2010, 61(2): 162-169.
- [2] Pireivatlou A G S, Aliyev R T, Lalehloo B S. Grain filling rate and duration in bread wheat under irrigated and drought stressed conditions[J]. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 2011, 1(1): 75-92.
- [3] Cossani C M, Slafer G A, Savin R. Do barley and wheat (bread and durum) differ in grain weight stability through seasons and water-nitrogen treatments in a Mediterranean location[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(2): 240-247.
- [4] Dias A S, Lidon F C. Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2009, 195(2): 137-147.
- [5] 吴晓丽, 汤永禄, 李朝苏, 等. 不同生育时期渍水对冬小麦旗叶叶绿素荧光及籽粒灌浆特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 309-318.
- [6] 赵洪亮, 马瑞昆, 刘恩财, 等. 不同冬小麦品种籽粒灌浆特性参数对供水的反应[J]. *华北农学报*, 2008, 23(1): 75-80.
- [7] 王姣爱, 裴雪霞, 张定一, 等. 灌水处理对不同筋型小麦籽粒灌浆特性及品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(4): 708-713.
- [8] Liu K, Ma B L, Luan L, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium nutrient effects on grain filling and yield of high-yielding summer corn [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2011, 34(10): 1516-1531.
- [9] 武文明, 陈洪俭, 李金才, 等. 氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(6): 1088-1096.
- [10] 郭明明, 赵广才, 郭文善, 等. 播期对不同筋力型小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(2): 192-197.
- [11] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 等. 播期对优质小麦籽粒灌浆特性及旗叶光合特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 121-128.
- [12] 张定一, 张永清, 闫翠萍, 等. 基因型、播期和密度对不同成穗型小麦籽粒产量和灌浆特性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(1): 28-34.
- [13] 张双利, 王晨阳, 胡吉帮, 等. 行距配置对高产冬小麦籽粒灌浆特性及淀粉和蛋白质积累的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(4): 704-709.
- [14] 姚素梅, 康跃虎, 吕国华, 等. 喷灌与地面灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆过程特性分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 13-17.
- [15] Guttieri M J, Stark J C, O'Brien K, et al. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficit[J]. *Crop Science*, 2001, 41(2): 327-335.
- [16] 山东农学院. 作物栽培学[M]. 北方本(上册). 北京: 农业出版社, 1980.
- [17] Johansson E, Prieto M L. Effects of wheat cultivar and nitrogen application on storage protein composition and breadmaking quality[J]. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(1): 19-25.
- [18] 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.
- [19] 蔡庆生, 吴兆苏. 小麦籽粒生长各阶段干物质积累量与粒重的关系[J]. *南京农业大学学报*, 1993, 16(1): 27-32.
- [20] 张凯, 任健, 全胜利, 等. 土壤水分调控对冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(5): 122-125.