

信志红,郭建平,谭凯炎,等,2019.气象因子对半冬性小麦灌浆速度的影响效应研究[J].气象,45(12):1736-1746. Xin Z H, Guo J P, Tan K Y, et al, 2019. Effect of meteorological factors on grain filling rate of semi-winter wheat[J]. Meteor Mon, 45 (12):1736-1746(in Chinese).

气象因子对半冬性小麦灌浆速度的影响效应研究^{*}

信志红^{1,2} 郭建平^{2,3} 谭凯炎² 张利华⁴ 孙 义⁵ 杨荣光⁶

1 山东省东营市气象局,东营 257091

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心,南京 210044

4 江苏省徐州市气象局,徐州 221009

5 安徽省宿州市气象局,宿州 234300

6 山东省泰安市气象局,泰安 271001

提 要: 选用黄淮海冬麦区 4 个半冬性小麦品种郑麦 98、山农 18、徐麦 33、皖麦 52 为试验材料,通过分期播种试验,利用方差分析、相关分析、逐步回归和通径分析等方法,分析半冬性小麦籽粒灌浆速度变化趋势和气象因子对灌浆速度的影响。结果表明,正常播期冬小麦灌浆速度波动性最小、千粒重最大,迟播 10 d 冬小麦灌浆速度波动性最大、千粒重最小;华北区品种郑麦 98 灌浆速度表现最稳定、千粒重最高,而黄淮区品种皖麦 52 灌浆速度最大;半冬性小麦灌浆持续期为 35~39 d;南北气候差异是影响各品种冬小麦灌浆速度不同的原因之一。半冬性小麦各播期灌浆速度的变化趋势一致,灌浆速度变化与相关显著气象因子的变化规律相符合;灌浆速度峰值期一般出现在开花后 15~25 d,迟播冬小麦最大灌浆速度出现时间较对照处理提前,不利于提高粒重;气温条件对冬小麦灌浆速度影响显著,其中最高气温要素是影响不同播期品种灌浆速度的共有关键因子。通径分析表明,最高气温对灌浆速度的作用由自身的直接效应决定,而日照时数与最低气温对灌浆速度的作用与间接效应一致;最高气温平均值对灌浆速度的影响最重要,日照时数和最低气温平均值对灌浆速度的影响较弱;最高和最低气温平均值、日照时数均为灌浆速度的限制因子,其中最高气温平均值对灌浆速度变化的决策作用最大。

关键词: 气象因子,灌浆速度,通径分析,决策指标

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.011

Effect of Meteorological Factors on Grain Filling Rate of Semi-Winter Wheat

XIN Zhihong^{1,2} GUO Jianping^{2,3} TAN Kaiyan² ZHANG Lihua⁴ SUN Yi⁵ YANG Rongguang⁶

1 Dongying Meteorological Office of Shandong Province, Dongying 257091

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Xuzhou Meteorological Office of Jiangsu Province, Xuzhou 221009

5 Suzhou Meteorological Office of Anhui Province, Suzhou 234300

6 Taian Meteorological Office of Shandong Province, Taian 271001

Abstract: Four semi-winter wheat varieties Tanmai 98, Shannong 18, Xumai 33 and Wanmai 52 in Huanghuaihai winter wheat area were selected as test materials. Through the sowing date tests, the trends of grain filling rate and the influence of meteorological factors on the filling rate were analyzed by means of

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-2,GYHY201506001-3)和中国气象局“国内外作物产量气象预报专项”共同资助

2018 年 3 月 23 日收稿; 2019 年 10 月 8 日收修定稿

第一作者:信志红,主要从事农业气象应用研究. Email: sddyxin@126.com

通信作者:郭建平,主要从事农业气象灾害研究. Email: gjp@cma.gov.cn

analysis of variance, correlation analysis, stepwise regression and path analysis. The results showed that the fluctuation of grain filling rate is the least and the 1000-grain weight is the highest in the normal sowing period, the late-sowed 10 d winter wheat has the highest volatility and smallest 1000-grain weight. The grain filling rate of Tanmai 98 is most stable and the 1000-grain weight is the highest in winter wheat area of North China, while the grain filling rate of Wanmai 52 is the highest in Huanghuai winter wheat area. The grain filling of semi-winter wheat usually lasts 35—39 days. The climate difference between north and south is one of the reasons for the different filling rates of winter wheat. The variation trends of the filling rate of semi-winter wheat in each sowing period are the same, and the change of filling rate is consistent with the change law of related significant meteorological factors. The peak period of grain filling generally appears 15—25 days later than flowering, and the appearance time is earlier of the maximum filling rate of late-sowed winter wheat than the control treatment, which is not conducive to increasing the grain weight. The temperature conditions have significant effects on the grain filling rate of winter wheat, of which the highest temperature factor is the common key factor affecting the filling rate of different sowing dates and varieties. Path analysis showed that the effect of maximum temperature on filling rate is determined by its direct effect, while the effect of sunshine hours and minimum temperature on filling rate is consistent with indirect effect. The average of highest temperature has the most important effect on filling rate, while the sunshine time and averaged minimum temperature influence the filling rate weakly. The averages of highest and lowest temperature and the sunshine hours are the limiting factors of the filling rate, of which the average of highest temperature has the greatest decision-making effect on the change of filling rate.

Key words: meteorological factor, grain filling rate, path analysis, decision index

引 言

小麦灌浆速度对粒重形成影响较大,是决定小麦产量高低的重要因素之一,而小麦生长发育及最终产量与光、温、水等气象因子的关系错综复杂。国内外许多学者对小麦籽粒灌浆特性进行了研究,如 Liang et al(2017)研究了碳水化合物积累对小麦籽粒灌浆的影响,Liu et al(2016)研究了干旱胁迫条件下多胺对小麦籽粒灌浆的影响,还有学者研究指出播期对不同品种冬小麦灌浆特性有很重要的影响(温红霞等,2008;阴卫军等,2005),分析了小麦粒重形成与灌浆特性的关系(周竹青和朱旭彤,1999;张晓龙,1982;刘丰明等,1997;周强等,2003)。郭天财等(2007)指出灌浆速率是影响小麦粒重的主要因素,而灌浆持续时间对粒重影响不显著等;在籽粒形成与气象条件的关系方面,国外学者 Kobata et al(2018)研究了小麦灌浆适应性对温度的响应情况,认为籽粒重量差异主要源于对高温的敏感性,Dias and Lidon(2009)发现热胁迫普遍降低小麦的灌浆

速率,国内学者分析了气候变化对小麦播期、生育期及生产潜力的影响(郭瑞等,2011;车少静等,2005;田展等,2013),以及气候生态因子与小麦千粒重之间的关系(夏国军等,2003;崔金梅等,2000;马体顺等,2006),认为气象条件是引起小麦粒重变化的根本原因,小麦生育期内的光、热、水配置直接影响小麦的生长发育和产量形成(张明捷等,2009;刘芳等,2015;魏瑞江等,2007),傅晓艺等(2015)研究表明灌浆期高温处理使小麦生理活动受到抑制,影响籽粒灌浆等。在上述已有研究中,多侧重讨论小麦灌浆特性与粒重形成之间的关系或通过简单对比分析气象要素与籽粒形成之间的相关性等,但对自然气候年景下不同播期不同地域品种冬小麦籽粒灌浆速度变化及其与气象因子的关系尚缺少系统论述,同时由于灌浆过程中单因子对小麦生长的效应可能会通过其他因子加强或减弱,而简单相关分析法不能定量区分直接和间接影响因子及路径,因此,准确选取冬小麦灌浆速度的关键影响因子并进行通径和贡献度等分析,对厘清引起灌浆速度变化的归因十分必要。本文利用黄淮海地区不同地理位置的半冬性小

麦分期播种田间试验数据,通过方差分析等方法对小麦籽粒灌浆速度等要素的分布状况进行了探讨,并应用通径分析等方法探究气象因子对冬小麦灌浆速度的影响和贡献,以期为研究区域内夏粮高产栽培提供科学理论依据。

1 资料与方法

1.1 试验设计

采用田间小区分期播种试验方案。试验于 2016 年 10 月至 2017 年 6 月在河北固城(39°08'N、115°40'E)、山东泰安(36°10'N、117°09'E)、江苏徐州(34°17'N、117°09'E)、安徽宿州(33°64'N、117°05'E)4 个农业气象试验站进行,供试品种分别为郑麦 98、山农 18、徐麦 33、皖麦 52,均为半冬性品种。试验设 4 个播期处理,以当地常年冬小麦实际播种期为界,早播 10 d 为 A 处理,正常播为 B 处理,迟播 10 d 为 C 处理,迟播 20 d 为 D 处理。小麦播种方式采用南北方向条播,保持良好的通风透光,行距统一为 20 cm;选择同批次麦种在不同播期进行播种,播种量与当地农田保持一致,于小麦开花始期在每个处理选择同日开花、大小一致的 200 个麦穗,挂牌并注明日期,10 d 后开始每 5 d 取 20 穗直到小麦成熟,剥下籽粒数出总粒数,放入铝盒烘干后称重,测定籽粒干物质质量(K),记录单位为 $g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$,按照式(1)和式(2)分别计算灌浆速度(V)和平均灌浆速度(\bar{V}),记录单位为 $g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1} \cdot d^{-1}$,最大灌浆速度(V_x)为灌浆期内灌浆速度的最大值,观测与考种方法均按《农业气象观测规范上卷》(国家气象局,1993)进行。依照《地面气象观测规范》(中国气象局,2003),在试验点所在气象站开展开花—成熟期气象要素的观测工作。

$$\text{灌浆速度}(V) = (K_{n+5} - K_n) / 5 \quad (1)$$

$$\text{平均灌浆速度}(\bar{V}) = K_x / D \quad (2)$$

式中, K_{n+5} 为第($n+5$)天干物质质量, K_n 为第 n 天干物质质量, K_x 为成熟期干物质质量, D 为灌浆持续期。

1.2 统计分析方法

利用方差分析对试验品种分期播种观测资料进

行差异性检验;对大、小样本分别选用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)方法和 Shapiro-Wilk(S-W)方法进行正态性检验;采用 Pearson 相关对灌浆速度与气象因子的相关性进行分析;选用逐步回归方式构建灌浆速度与气象因子关系的最优回归方程,并采用 F 统计量检验回归方程的拟合优度;利用通径分析(张聪聪等,2013;赵益新和陈巨东,2007)研究多个自变量与响应变量间的线性关系(崔秀珍等,2013;袁志发等,2001),用决策系数(张雪松等,2017;Zhang et al,2014)表示自变量对因变量的作用程度,并计算自变量对回归方程 r^2 的贡献。

2 结果与分析

2.1 播期和品种对灌浆速度的影响

分期播种条件下半冬性小麦的平均灌浆速度、灌浆持续期及千粒重分布情况如表 1 所示。从播期对灌浆速度的影响来看,随播期延后冬小麦的平均灌浆速度呈递减趋势,其中早播 10 d 处理平均灌浆速度为 $1.32 g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1} \cdot d^{-1}$,列最大,两迟播处理平均灌浆速度一致为 $1.22 g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1} \cdot d^{-1}$,列最小;早播 10 d 和正常播冬小麦平均灌浆速度接近,差值为 $0.02 g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1} \cdot d^{-1}$;各播期处理中,正常播灌浆速度波动性最小,变异系数(CV)为 1.69%,迟播 10 d 灌浆速度波动性最大,变异系数为 11.15%。从品种对灌浆速度的影响来看,南部品种皖麦 52 平均灌浆速度为 $1.32 g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1} \cdot d^{-1}$,列最大,北部品种山农 18 平均灌浆速度为 $1.19 g \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1} \cdot d^{-1}$,列最小;华北区品种郑麦 98 灌浆速度变异程度最小,变异系数为 1.42%,黄淮区品种山农 18 灌浆速度变异程度最大,变异系数为 8.07%。

结合分期播种半冬性小麦灌浆持续期分布情况(图 1)可以看出,同品种不同播期处理的灌浆起止日期和日数有趋于一致的倾向性,各播期或品种平均灌浆日数为 37 d;各品种中郑麦 98 平均灌浆期(39 d)最长,皖麦 52 平均灌浆期(35 d)最短,灌浆期变异程度从小到大依次为山农 18、皖麦 52、徐麦 33、郑麦 98;早播、正常播、迟播冬小麦平均灌浆期依次为 36、37 和 38 d(两迟播处理灌浆期相同),早

表 1 播期和品种对半冬性小麦平均灌浆速度、时间及千粒重的影响差异
Table 1 Differences in effects of sowing date and variety on grain filling rate, time and 1000-grain weight of semi-winter wheat

播种/ 品种	灌浆速度			灌浆持续期			千粒重			
	平均值/ [g·(1000 粒) ⁻¹ ·d ⁻¹]	标准差/ [g·(1000 粒) ⁻¹ ·d ⁻¹]	CV/%	平均值/d	标准差/d	CV/%	平均值/ [g·(1000 粒) ⁻¹]	标准差/ [g·(1000 粒) ⁻¹]	CV/%	
播期	A	1.32	0.078	5.91	36	1.000	2.82	46.65	1.937	4.15
	B	1.30	0.022	1.69	37	2.363	6.43	47.75	2.406	5.04
	C	1.22	0.136	11.15	38	2.517	6.71	45.57	5.471	12.01
	D	1.22	0.03	2.46	38	1.732	4.62	45.63	3.178	6.96
品种	郑麦 98	1.27	0.018	1.42	39	2.708	6.94	49.45	2.996	6.06
	山农 18	1.19	0.096	8.07	37	0.000	0.00	43.92	3.606	8.21
	徐麦 33	1.27	0.095	7.48	36	1.155	3.21	45.88	2.195	4.78
	皖麦 52	1.32	0.088	6.67	35	0.500	1.42	46.36	2.461	5.31

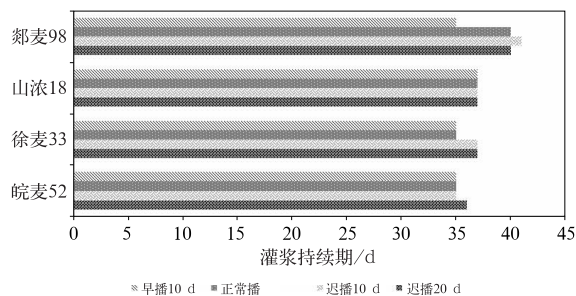


图 1 分期播种半冬性小麦灌浆持续期分布
Fig. 1 Distribution of grain filling period in semi-winter wheat on different sowing dates

播 10 d 处理灌浆持续期最稳定,迟播 10 d 处理灌浆持续期稳定性最差。冬小麦千粒重变化趋势与平均灌浆速度变化状况有一致性,正常播处理千粒重为 $47.75 \text{ g} \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$,列最大,迟播 10 d 处理千粒重为 $45.57 \text{ g} \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$,列最小;早播 10 d 和正常播冬小麦千粒重接近,差值为 $1.10 \text{ g} \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$,两迟播处理冬小麦千粒重接近,差值为 $0.06 \text{ g} \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$;各播期处理中,早播 10 d 千粒重波动性最小,变异系数为 4.15%,其次为正常播变异系数为 5.04%,迟播 10 d 千粒重波动性最大,变异系数为 12.01%;各品种中郑麦 98 千粒重为 $49.45 \text{ g} \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$,列最大,山农 18 千粒重为 $43.92 \text{ g} \cdot (1000 \text{ 粒})^{-1}$,列最小;徐麦 33 千粒重变异程度最小,变异系数为 4.78%,山农 18 千粒重变异程度最大,变异系数为 8.21%。另由方差分析表明,品种对平均灌浆速度和千粒重影响不显著,而对花后 20~25 d 灌浆速度和千粒重的影响差异显著 ($P < 0.05$),表明用较长时段计算的灌浆速率会掩盖短期气象条件变化对灌浆速率产生的影响,这与王婷和柴守玺(2008)的相关研究结论一致。

2.2 不同气象因子对灌浆速度的影响

分期播半冬性小麦平均灌浆速度、灌浆持续期及灌浆期内的气象要素分布情况如表 2 所示,从灌浆期气象因子的分布来看,华北麦区日照时数明显多于其南部各麦区,另由方差分析表明,品种间最高和最低气温、气温日较差平均值、最高和最低气温平均值、平均风速、相对湿度、降水量、日照时数均存在显著差异 ($P < 0.05$),表现出南北地域气候分布的差异性。

灌浆速度与同时段内气象因子的相关分析(表 3)表明,灌浆速度与活动积温、平均气温、最高气温和最高气温平均值呈极显著负相关,与最低气温平均值呈显著负相关,与平均相对湿度呈极显著正相关;灌浆期内平均灌浆速度与平均气温呈极显著负相关,与积温、最高气温平均值呈显著负相关,与平均相对湿度显著正相关;最大灌浆速度与同时段内气象因子相关不显著。灌浆速度与千粒重、灌浆期的相关分析(表 3)表明,灌浆速度与灌浆持续时间和千粒重均相关极显著,其中与灌浆持续期(D)即籽粒发育天数呈极显著负相关,而与千粒重即灌浆累积量呈极显著正相关,这与高金成等(2001)研究结果一致;灌浆期内平均灌浆速度与灌浆持续期呈负相关但相关不显著,而与千粒重呈极显著正相关。综合上述,进一步分析灌浆期内气象要素对灌浆速度的影响表明,在花后 15~25 d 籽粒快增期内,由于多日平均气温连续高于 25°C ,超过灌浆适宜温度 $20\sim 24^\circ\text{C}$ 的上限(金善宝,1996),加之灌浆中后期各播种区域分别出现 4~7 d 连续大于 32°C 的高温天气,日最高气温甚至达到 35.9°C ,导致小麦蒸腾量加大,体内水分失衡,籽粒灌浆受到抑制或

表 2 分期播种半冬性小麦平均灌浆速度、千粒重、灌浆持续期及灌浆期气象要素值分布

Table 2 Grain filling rate, 1000-grain weight, filling duration and distribution of meteorological elements during grain filling in the semi-winter wheat varieties on each sowing date

播期	品种	平均灌浆速度/ [g·(1000粒) ⁻¹ ·d ⁻¹]	千粒重/ [g·(1000粒) ⁻¹]	灌浆持续期		灌浆期气象要素值						
				起止日/月-日	日数/d	A _a / (°C·d)	T/°C	T _{max} /°C	T _{min} /°C	U/%	R/ mm	S/h
A	郑麦 98	1.29	45.06	5-4 至 6-7	35	761.1	21.7	35.5	10.0	57	21.2	408.9
	山农 18	1.22	44.97	4-30 至 6-5	37	857.4	23.2	35.9	9.2	52	38.2	356.2
	徐麦 33	1.39	48.79	4-21 至 5-25	35	760.9	21.7	32.8	9.3	55	24.4	327.1
	皖麦 52	1.37	47.80	4-21 至 5-25	35	753.4	21.5	32.7	10.6	62	49.3	300.9
B	郑麦 98	1.28	51.12	5-3 至 6-11	40	884.9	22.1	38.3	10.0	55	21.5	469.9
	山农 18	1.29	47.70	4-30 至 6-5	37	857.4	23.2	35.9	9.2	52	38.2	356.2
	徐麦 33	1.30	45.57	4-21 至 5-25	35	760.9	21.7	32.8	9.3	55	24.4	327.1
	皖麦 52	1.33	46.63	4-23 至 5-27	35	771.2	22.0	35.6	10.9	62	49.3	304.0
C	郑麦 98	1.26	51.57	5-3 至 6-12	41	907.0	22.1	38.3	10.0	55	22.8	481.0
	山农 18	1.06	39.06	5-1 至 6-6	37	850.6	23.0	35.9	9.2	53	47.4	344.5
	徐麦 33	1.17	43.46	4-25 至 5-31	37	856.2	23.1	36.4	11.3	53	24.4	349.5
	皖麦 52	1.38	48.21	4-25 至 5-29	35	790.7	22.6	36.5	10.9	61	49.3	303.9
D	郑麦 98	1.25	50.06	5-4 至 6-12	40	886.7	22.2	38.3	10.0	55	22.5	470.5
	山农 18	1.19	43.98	5-1 至 6-6	37	850.6	23.0	35.9	9.2	53	47.4	344.5
	徐麦 33	1.23	45.68	4-25 至 5-31	37	856.2	23.1	36.4	11.3	53	24.4	349.5
	皖麦 52	1.19	42.81	4-27 至 6-1	36	842.5	23.4	36.5	10.9	60	49.3	316.1

注: A_a, T, T_{max}, T_{min}, U, R, S 分别表示活动积温、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、降水量和日照时数,下同。

Note: A_a, T, T_{max}, T_{min}, U, R, S indicate active temperature, average temperature, maximum temperature, minimum temperature, mean relative humidity, sunshine hours, respectively; the same as below.

表 3 半冬性小麦灌浆速度与气象因子、灌浆期及千粒重的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between grain filling rate of semi-winter wheat and meteorological factors, filling stage and 1000-grain weight

灌浆速度	A _a	T	T _{max}	T _{min}	$\bar{T}_{\max-\min}$	\bar{T}_{\max}	\bar{T}_{\min}	U	S	R	v	D/d	K/[g·(1000粒) ⁻¹]
V	-0.415**	-0.414**	-0.448**	-0.205	-0.112	-0.464**	-0.279*	0.283**	-0.072	0.135	-0.025	-0.635**	1.000**
\bar{V}	-0.593*	-0.667**	-0.394	0.115	-0.195	-0.569*	-0.190	0.539*	-0.148	-0.073	0.358	-0.348	0.693**
V _{max}	0.027	0.027	-0.136	0.114	-0.076	-0.039	0.166	-0.051	-0.032	-0.005	0.350	-0.320	1.000**

注: $\bar{T}_{\max-\min}$, \bar{T}_{\max} , \bar{T}_{\min} , v 分别表示气温日较差平均值(单位: °C)、最高气温平均值(单位: °C)、最低气温平均值(单位: °C)、平均风速(单位: m·s⁻¹);

*、** 分别表示 P<0.05, P<0.01; 下同。

Note: $\bar{T}_{\max-\min}$, \bar{T}_{\max} , \bar{T}_{\min} , v represent the average of daily temperature range (unit: °C), the average maximum temperature (unit: °C), the average minimum temperature (unit: °C), and the average wind speed (unit: m·s⁻¹), respectively; * is P<0.05, ** is P<0.01; the same as below.

停止,进而影响了灌浆速度的提高。

2.3 关键气象因子对灌浆速度的影响

选取与灌浆速度相关显著(P<0.05)的气象因子作为关键影响因子进行分析。不同品种分期播种冬小麦灌浆速度与关键气象因子的关系曲线如图 2 所示,各品种灌浆速度的变化大致呈“M”型曲线走势,灌浆速度峰值一般出现在开花后 15~25 d,时间多集中在 5 月 10—20 日,而与之相关显著的各气象因子曲线变化亦呈明显的“M”型或“W”型趋势。影响分析显示,郑麦 98 灌浆速度与灌浆期内平均相对湿度、降水量均呈正相关,结合区域内气象资料分析表明,灌浆期内天气以晴热为主,降水量偏少,仅在

5 月 22 日出现一次大于 5 mm 的降水过程,灌浆时段内相对湿度一般在 44%~69%,最小日均相对湿度仅为 29%,湿度条件明显低于小麦灌浆期适宜相对湿度 75%(高金成等,2001),同时期内出现的高温低湿的干热风天气也是影响灌浆速度的因素之一。在上述天气背景下,相对湿度和降水量成为影响灌浆速度的关键因子,偏多的降水和略高的相对湿度有利于灌浆速度的提高。山农 18、徐麦 33 和皖麦 52 各播期灌浆速度的关键影响因子相似,其中最高气温是各品种灌浆速度共有的相关显著性因子。

不同播期冬小麦灌浆速度与气象因子的关系曲线如图 3 所示,各播期灌浆速度均呈“慢—快—慢”

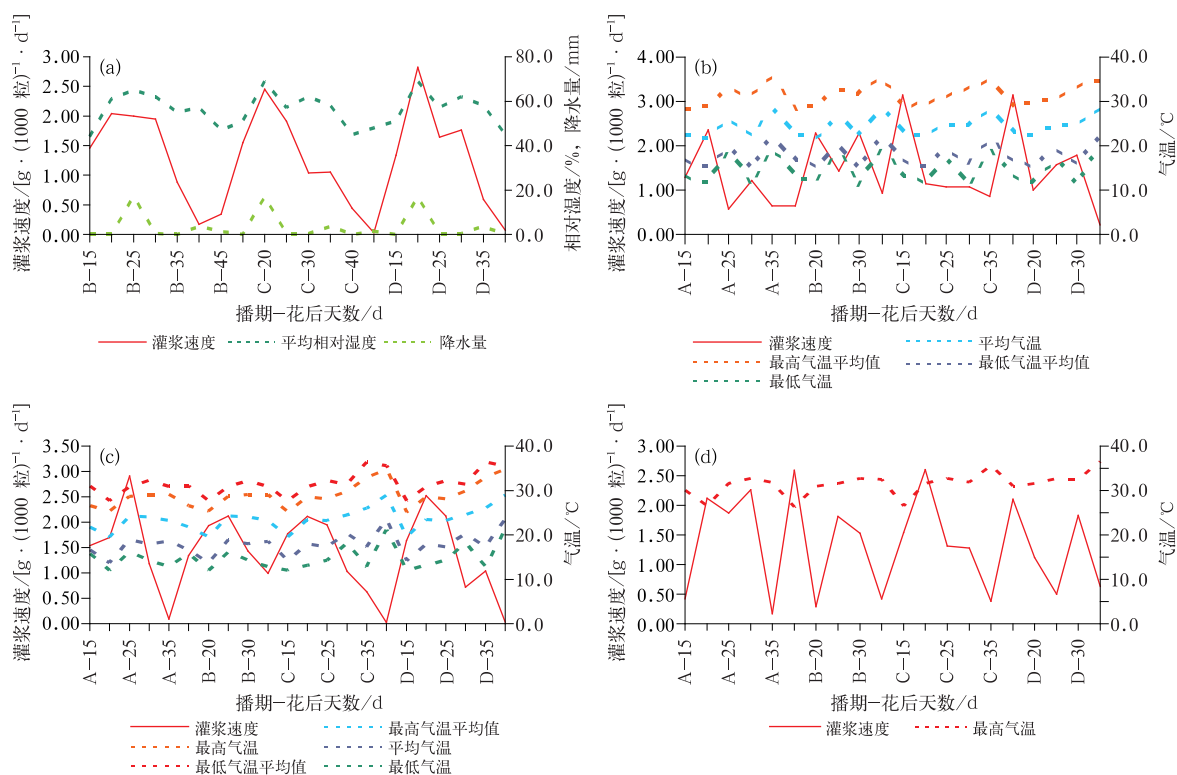


图 2 不同品种冬小麦灌浆速度与气象因子关系图

(a) 郑麦 98, (b) 山农 18, (c) 徐麦 33, (d) 皖麦 52

Fig. 2 Relationship between grain filling rate and meteorological factors of different winter wheat varieties

(a) Tanmai 98, (b) Shannong 18, (c) Xunmai 33, (d) Wanmai 52

的变化趋势,早播 10 d 和正常播处理灌浆速度峰值一般出现在花后 20~25 d,而迟播处理灌浆速度峰值一般出现在花后 15~20 d。影响分析显示,早播 10 d 和正常播处理的灌浆速度与气象因子相关不显著,而两迟播处理的灌浆速度均与平均气温、最高气温、最高气温平均值呈显著负相关,而与平均相对湿度呈显著正相关,结合气象资料分析表明,受不同处理灌浆期内最高气温要素最小值分别出现在花后 15~20 d(早播 10 d 和正常播)和花后 15 d(迟播)影响,迟播冬小麦最大灌浆速度出现时间较对照处理提前,导致其灌浆渐增期缩短,同时中后期灌浆速度下降,不利于提高粒重(刘丰明等,1997;温红霞等,2008);另外,迟播冬小麦灌浆期内最高气温平均值在 29.0℃ 以上,最低气温平均值在 16.5℃ 以上,且灌浆中后期连续多日出现大于 32℃ 的最高气温,也是造成灌浆速度下降的主要原因,这是因为高温可造成小麦茎叶早衰,不利于光合产物的形成和转运,日最低气温偏高,增加了小麦植株夜间的呼吸消耗,进而影响籽粒干物质的有效积累使灌浆速度下

降,此结论与金善宝(1996)、曲曼丽和王军(1984)的研究结果一致。因此,在试验当年高温晴热的气候背景下,较低的气温和略高的湿度对提高灌浆速度进而形成较高的粒重有积极作用。

2.4 气象因子对灌浆速度的影响模型

分别选择试验品种各播期的灌浆速度和平均灌浆速度作因变量,其中大样本灌浆速度资料选用 K-S 方法进行正态检验,小样本平均灌浆速度资料选用 S-W 方法进行正态性检验(表 4),结果显示,灌浆速度和平均灌浆速度统计量分别为 0.064 和 0.961,显著性水平分别为 0.200 和 0.683,均大于 0.05,即因变量灌浆速度和平均灌浆速度均服从正态分布,可以对其进行回归分析。

以灌浆速度为因变量,选取对应时段内各气象因子为自变量,采用逐步回归方法构建最优多元线性回归方程(表 5),在建模过程中,回归系数不显著(即对灌浆速度作用不明显)的因子被剔除,从显著性检验来看,方程的显著性水平在 0.01 以下,具有

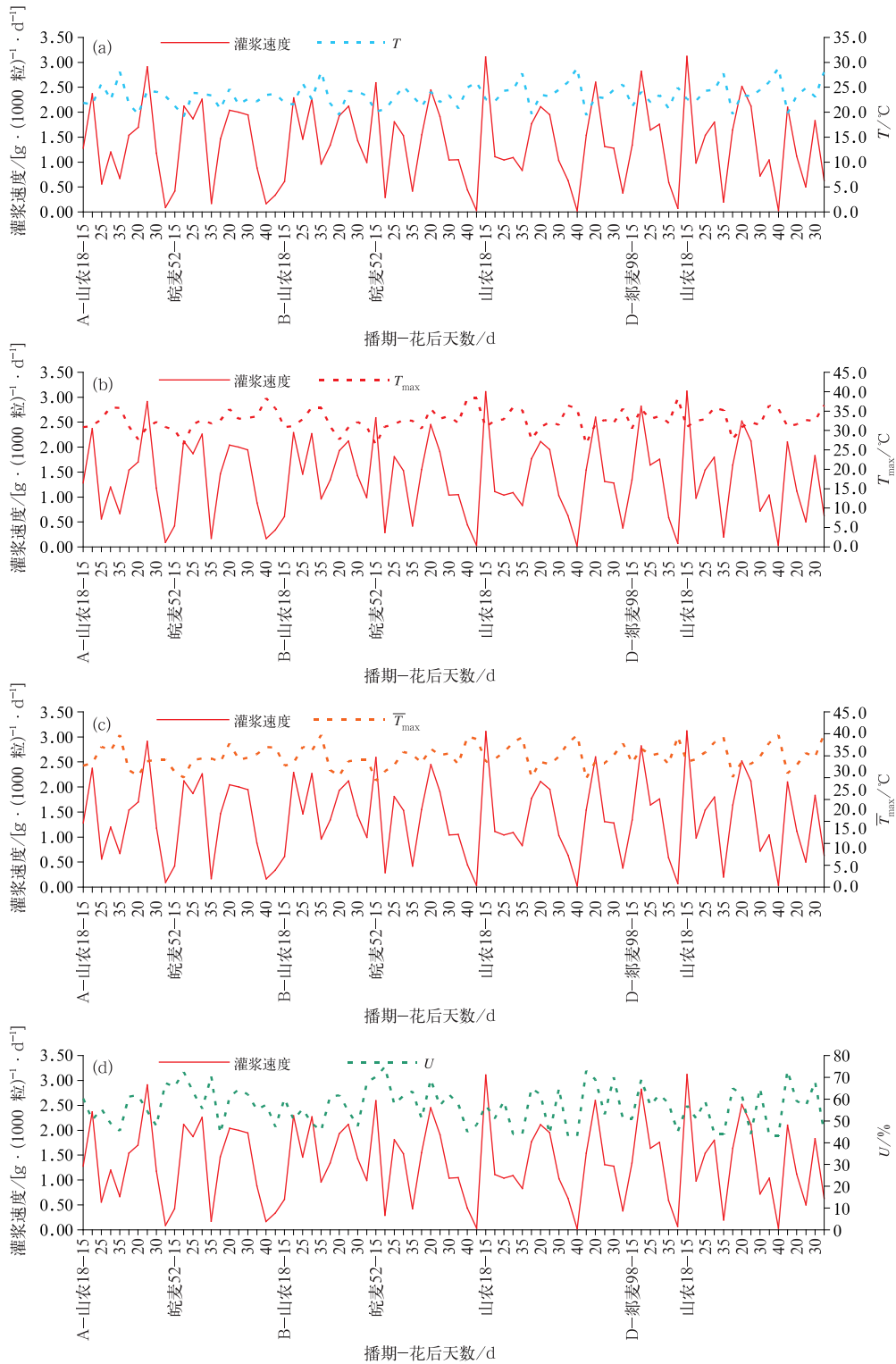


图 3 不同播期冬小麦灌浆速度与气象因子关系

(a) T , (b) T_{max} , (c) \bar{T}_{max} , (d) U

Fig. 3 Relationship between grain filling rate and meteorological factors of winter wheat on different sowing dates

(a) T , (b) T_{max} , (c) \bar{T}_{max} , (d) U

表 4 半冬性小麦灌浆速度相关统计量分析及正态性检验

Table 4 Statistical analysis and normality test of semi-winter wheat grain filling rate

	平均值/[g· (1000 粒) ⁻¹ · d ⁻¹]	方差/[g· (1000 粒) ⁻¹ · d ⁻¹]	SD/[g· (1000 粒) ⁻¹ · d ⁻¹]	极差/[g· (1000 粒) ⁻¹ · d ⁻¹]	CV/%	偏度	峰度	K-S 检验/S-W 检验		
								统计量	自由度	P
灌浆速度	1.34	0.652	0.808	3.25	0.603	0.123	-0.726	0.064	83	0.200
平均灌浆速度	1.26	0.008	0.087	0.33	0.069	-0.543	0.590	0.961	16	0.683

表 5 半冬性小麦灌浆速度与光温因子关系方程

Table 5 Equation of relationship between grain filling rate and meteorological factors of semi-winter wheat

	关系方程	r ²	F	P
灌浆速度	V=5.652-0.313T _{max} +0.055S+0.135T _{min}	0.324	12.629	0.000
平均灌浆速度	V̄=3.220-0.087T̄	0.444	11.199	0.005

统计学意义。从方程的回归系数可以看出,冬小麦灌浆速度与气温因子关系密切,平均最高气温每增加 1℃,灌浆速度可降低 0.313 g·(1000 粒)⁻¹·d⁻¹,平均气温每增加 1℃,平均灌浆速度可降低 0.087 g·(1000 粒)⁻¹·d⁻¹,均与上述相关分析结果一致;而方程中引入的平均最低气温和日照因子效应与简单相关分析不一致,表明各气象因子之间存在的相互关系造成的多个气象要素的协同作用,使气象条件对灌浆速度的影响并不单一,回归分析中在消除其他变量影响的条件下而引入的因子效应或能更真实地反映气象因子对灌浆速度的影响性。

2.5 气象因子对灌浆速度的影响效应

从简单的相关分析结果看,某些气象因子对灌

浆速度的影响并不显著,但不能因此表明该要素对灌浆速度没有影响,因此利用通径分析方法,研究对灌浆速度有显著影响的气象因子及其贡献情况很有必要。对灌浆速度方程中各自变量的偏回归系数进行显著性水平检验,结果表明,显著性均小于 0.05,即选入方程的气象因子与灌浆速度之间存在显著性差异,在此基础上,通过计算进一步得到气象因子对灌浆速度的直接通径系数和间接通径系数(表 6)。

由表 6 可以看出,各气象因子与灌浆速度均为负相关,其相关作用(相关系数绝对值)由大到小依次为最高气温平均值、最低气温平均值、日照时数;最高气温平均值对灌浆速度有直接负效应,与相关分析一致,其直接作用为 -1.049,间接作用为 0.585,表明最高气温平均值主要通过自身的直接作

表 6 半冬性小麦灌浆速度与气象因子的通径分析

Table 6 Path analysis of grain filling rate and meteorological factors of semi-winter wheat

指标	相关系数(r)	直接通径系数	间接通径系数				变量对 r ² 贡献		决策系数	
			T _{max}	S	T _{min}	合计	数值	排序	数值	排序
T _{max}	-0.464	-1.049	—	0.373	0.212	0.585	0.487	1	-0.127	1
S	-0.072	0.644	-0.607	—	-0.109	-0.716	-0.046	2	-0.507	3
T _{min}	-0.279	0.419	-0.531	-0.167	—	-0.698	-0.117	3	-0.409	2

用影响灌浆速度;日照时数和最低气温平均值分别对灌浆速度有直接正效应,其中日照时数的直接作用为 0.644,间接作用为 -0.716,最低气温平均值的直接作用为 0.419,间接作用为 -0.698,均表现为直接正效应因被间接负效应掩盖而使其直接效应与相关表现相反。结合灌浆期内气温观测数据进行分析,各时段的最高气温平均值一般在 24.3~34.8℃,最低气温平均值一般在 11.5~23.5℃,表明最低气温更接近小麦灌浆期最适温度 18~22℃

的范围,利于灌浆速度加快,而最高温度与最适温度偏离较大,对灌浆速度提升有阻碍作用,与上述直接效应的结论相符合。最高气温平均值对回归方程 r² 的总贡献为 0.487,亦是各要素贡献最大值,表明最高气温平均值对灌浆速度的影响最重要,日照时数和最低气温平均值的影响对 r² 的总贡献分别为 -0.046 和 -0.117,对灌浆速度的影响较弱。决策系数均为负值,表明各气象因子对小麦灌浆速度有限制作用,即较高的最高气温平均值和最低气温平

均值和较多的日照时数均会抑制灌浆速度的提升;决策系数的排序表明,最高气温平均值对灌浆速度变化的综合决定能力最大,其次为最低气温平均值,日照时数的决策作用最小。

3 结论与讨论

(1) 冬小麦属温凉型长日照作物,播期、品种、环境要素等影响会引起小麦灌浆速度等品质的差异(吴少辉等,2004;张凯等,2006)。本文通过对不同播期条件下 4 个半冬性小麦品种灌浆期试验资料的分析表明,正常播冬小麦灌浆速度波动性最小、千粒重最大,迟播 10 d 冬小麦灌浆速度波动性最大、千粒重最小;华北冬麦区品种郑麦 98 灌浆速度表现最稳定、千粒重最高,而黄淮冬麦区品种皖麦 52 灌浆速度最大;半冬性小麦灌浆持续期为 35~39 d,其中华北麦区品种郑麦 98 灌浆期 39 d 为最长,黄淮麦区品种皖麦 52 灌浆期 35 d 为最短;同品种不同播期处理的灌浆起止日期和日数有趋于一致的倾向性,体现出冬小麦极强的自我调节能力(祝新建等,2013);品种间气象要素值存在显著差异性,表明南北气候差异是导致包括灌浆速度在内的小麦品质不同的主要原因之一。

(2) 本文分析显示,半冬性小麦灌浆速度变化曲线大致呈“M”型,灌浆峰速度值期一般出现在开花后 15~25 d;各播期灌浆速度均呈“慢—快—慢”的变化趋势,迟播冬小麦最大灌浆速度出现时间较对照处理提前,不利于形成较高粒重。冬小麦灌浆速度与气温要素、千粒重相关显著,在试验年高温晴热的气候背景下,超过灌浆适宜温度上限的连续高温使小麦蒸腾量加大,影响了光合作用碳水化合物从源到库的转移,籽粒灌浆受到抑制或终止,因此在冬小麦灌浆过程中努力降低植株温度、克服籽粒灌浆期高温带来的不利影响,对增加粒重有着积极作用。

(3) 多元回归与通径分析表明,气象因子之间存在的交互作用掩盖了单一气象要素对小麦灌浆速度的直接效应。最高气温要素对灌浆速度的作用主要由自身的直接效应决定,而日照时数与最低气温要素因直接效应被间接效应掩盖,其对灌浆速度的作用表现为与间接效应一致。气象因子对回归方程 r^2 的总贡献表明,最高气温平均值对灌浆速度的影响最重要,日照时数和最低气温平均值对灌浆速度

的影响较弱。决策系数分布表明,最高气温平均值和最低气温平均值、日照时数均为灌浆速度的限制因子,其中最高气温平均值对灌浆速度变化的决策作用最大,日照时数的决策作用最小。

分期播种是按一定时间间隔重复播种试验作物的一种农业气象田间试验方法,该方法可充分利用气候资源,通过改变作物不同生育期内的气象条件,实现年内同一作物不同生长条件下的对比(明博等,2013;郭建茂等,2017)。本文利用 2016—2017 年黄淮海麦区半冬性小麦品种分期播种试验资料及同期内气象资料,分析了气象因子对灌浆速度的影响状况。分析过程中发现,分期播种试验中灌浆速度的分布及其与气象因子的关系状况与当年灌浆期的气候年景关系密切,高温晴热年景下温度要素成为提高灌浆速度的限制因子,同时发现如果计算灌浆速度的时间间隔不同,相关的分析结果也会有所差异,用较长时段间隔求算的灌浆速度分析值,可能会掩盖因短期气象条件变化对灌浆速度造成的影响。因此,结合试验研究目的,选择有针对性的气候年景和细化的试验资料对提高分期播种试验成果精度有重要作用。此外,气象要素对小麦灌浆速度的影响存在交互性,本文采用通径分析等方法探讨了气象因子对小麦灌浆速度作用的大小,为更清楚地了解各气象因子对灌浆速度的影响程度和分清各气象因素对小麦灌浆速度所起的真正作用提供了一定的技术参考,但由于籽粒灌浆过程中不确定因素及观测资料时间短等限制,研究结论的普遍性和代表性还有待进一步检验。今后需继续加强气候等环境要素与灌浆特性的定量关系研究,准确掌握环境因子对冬小麦籽粒灌浆的影响程度及机理,为在灌浆期内采取合理调控措施,有效增加粒重,显著提高单位面积籽粒质量等方面提供更翔实的理论依据。

参考文献

- 车少静,智利辉,冯立辉,2005. 气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策[J]. 中国农业气象,26(3):180-183. Che S J, Zhi L H, Feng L H, 2005. Impact of warmer climate on main growing periods of winter wheat and response strategy[J]. Chin J Agrometeorol, 26(3):180-183(in Chinese).
- 崔金梅,朱云集,郭天财,等,2000. 冬小麦粒重形成与生育中期气象条件关系的研究[J]. 麦类作物学报,20(2):28-34. Cui J M, Zhu Y J, Guo T C, et al. 2000. The relationship between the grain weight formation and the meteorological conditions in the middle growth period of winter wheat[J]. J Triticeae Crops, 20(2):28-34(in Chinese).

- 崔秀珍,黄中文,薛香,2013. 试验统计分析[M]. 北京:中国农业科学技术出版社;272. Cui X Z, Huang Z W, Xue X, 2013. Test Statistical Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press;272(in Chinese).
- 傅晓艺,何明琦,史占良,等,2015. 灌浆期高温胁迫对小麦灌浆特性和品质的影响[J]. 麦类作物学报,35(6):867-872. Fu X Y, He M Q, Shi Z L, et al, 2015. Effect of high temperature stress during grain-filling period on wheat grain-filling characteristics and quality[J]. J Triticeae Crops,35(6):867-872(in Chinese).
- 高金成,王润芳,沈玉华,等,2001. 小麦粒重形成的气象条件研究 I 粒乳熟期适宜灌浆的气象条件分析[J]. 中国农业气象,22(3):44-49. Gao J C, Wang R F, Shen Y H, et al, 2001. Study on meteorological conditions of wheat grain weight formation I[J]. Chin J Agrometeorol,22(3):44-49(in Chinese).
- 国家气象局,1993. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京:气象出版社;11. China Meteorological Administration, 1993. Agricultural Meteorological Observations (Volume I)[M]. Beijing: Meteorological Press;11(in Chinese).
- 郭建茂,吴越,杨沈斌,等,2017. 典型高温年不同播期一季稻产量差异及其原因分析[J]. 中国农业气象,38(2):121-130. Guo J M, Wu Y, Yang S B, et al, 2017. Yield differences and its causes for one season rice under different sowing dates in typical high temperature year[J]. Chin J Agrometeorol,38(2):121-130(in Chinese).
- 郭瑞,季书勤,王汉芳,等,2011. 气候变化对河南省中、北部冬小麦播期和越冬的影响[J]. 河南农业科学,40(1):37-40. Guo R, Ji S Q, Wang H F, et al, 2011. Influence of climate change on sowing date and cold resistance in winter in central and northern regions of Henan Province[J]. J Henan Agric Sci,40(1):37-40(in Chinese).
- 郭天财,岳艳军,马冬云,等,2007. 追氮时期对冬小麦籽粒灌浆及淀粉特性的影响[J]. 麦类作物学报,27(5):836-840. Guo T C, Yue Y J, Ma D Y, et al, 2007. Effect of nitrogen fertilizer application at different growth stages on grain filling and starch properties in winter wheat[J]. J Triticeae Crops,27(5):836-840(in Chinese).
- 金善宝,1996. 中国小麦学[M]. 北京:中国农业出版社;97. Jin S B, 1996. Chinese Wheat Science [M]. Beijing: China Agricultural Press;97(in Chinese).
- 刘芳,李炳军,胡丽平,2015. 河南省小麦产量气象影响因素的灰色关联分析[J]. 河南科学,33(1):49-54. Liu F, Li B J, Hu L P, 2015. Grey relational analysis on the wheat yield by meteorological factors in Henan Province[J]. Henan Sci, 33(1):49-54(in Chinese).
- 刘丰明,陈明灿,郭香凤,等,1997. 高产小麦粒重形成的灌浆特性分析[J]. 麦类作物,17(6):38-41. Liu F M, Chen M C, Guo X F, et al, 1997. Grain filling characteristics analysis of high yield wheat grain weight [J]. Tritical Crops, 17(6):38-41(in Chinese).
- 马体顺,马青荣,杨光仙,等,2006. 气候生态因子对冬小麦千粒重的影响[J]. 河南气象,(3):56-57. Ma T S, Ma Q R, Yang G X, et al, 2006. Study on climate-ecological factor effect on thousand-seed weight of winter wheat[J]. Meteor J Henan, (3):56-57(in Chinese).
- 明博,朱金城,陶洪斌,等,2013. 黑龙江流域玉米不同生育阶段气象因子对产量性状的影响[J]. 作物学报,39(5):919-927. Ming B, Zhu J C, Tao H B, et al, 2013. Effects of meteorological factors at different growth stages on yield traits of maize (Zea mays L.) in Heilonggang Basin[J]. Acta Agronom Sin, 39(5):919-927(in Chinese).
- 曲曼丽,王军,1984. 冬小麦穗粒形成与气候条件的关系 2. 北京地区冬小麦籽粒重形成与温度条件的关系[J]. 北京农业大学学报,10(4):421-427. Qu M L, Wang J, 1984. The relationship between climatic conditions and the formation of spikelet and kernels of winter wheat[J]. Acta Agric Univ Pekinensis, 10(4):421-427(in Chinese).
- 田展,梁卓然,史军,等,2013. 近 50 年气候变化对中国小麦生产潜力的影响分析[J]. 中国农学通报,29(9):61-69. Tian Z, Liang Z R, Shi J, et al, 2013. Analysis of impact on China wheat potential productivity of climate change during 1961-2010[J]. Chin Agric Sci Bull,29(9):61-69(in Chinese).
- 王婷,柴守玺,2008. 不同播种密度对西北绿洲冬小麦灌浆特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报,43(5):33-40. Wang T, Chai S X, 2008. Effect of different density on winter-wheat filling characters in the northwest oasis[J]. J Gansu Agric Univ, 43(5):33-40(in Chinese).
- 魏瑞江,张文宗,李二杰,2007. 河北省冬小麦生育期气象条件定量评价模型[J]. 中国农业气象,28(4):367-370. Wei R J, Zhang W Z, Li E J, 2007. A quantitative evaluation model of meteorological factors during growing period of winter wheat in Hebei Province[J]. Chin J Agrometeorol,28(4):367-370(in Chinese).
- 温红霞,高岭巍,马飞,等,2008. 播期对不同基因型冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,43(5):41-44. Wen H X, Gao L W, Ma F, et al, 2008. Influences of sowing date on grain filling characteristics and yield of winter wheat with different genotypes[J]. J Gansu Agric Univ, 43(5):41-44(in Chinese).
- 吴少辉,高海涛,张学品,等,2004. 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,24(4):105-107. Wu S H, Gao H T, Zhang X P, et al, 2004. Effect of sowing date on grain filling characters in different wheat varieties [J]. J Triticeae Crops,24(4):105-107(in Chinese).
- 夏国军,崔金梅,郭天财,等,2003. 小麦灌浆期间温度与千粒重关系的研究[J]. 河南农业大学学报,37(3):213-216. Xia G J, Cui J M, Guo T C, et al, 2003. Study on relationship between temperature and the grain weight in the grain filling period of winter wheat[J]. J Henan Agric Univ, 37(3):213-216(in Chinese).
- 阴卫军,刘霞,倪大鹏,等,2005. 播期对优质小麦籽粒灌浆特性及产量构成的影响[J]. 山东农业科学,(5):16-18, 22. Yin W J, Liu X, Ni D P, et al, 2005. Effect of sowing time on grain filling characteristics and grain yield components of high quality wheat cultivars[J]. Shandong Agric Sci, (5):16-18, 22(in Chinese).

- 袁志发,周静芋,郭满才,等,2001. 决策系数——通径分析中的决策指标[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),29(5):131-133. Yuan Z F,Zhou J Y,Guo M C,et al,2001. Decision coefficient—the decision index of path analysis[J]. J Northwest Sci-Tech Univ Agric For,29(5):131-133(in Chinese).
- 张聪聪,陈效民,张勇,等,2013. 气象因子对太湖地区旱作农田土壤水分动态的影响[J]. 中国农业科学,46(21):4454-4463. Zhang C C,Chen X M,Zhang Y,et al,2013. Influence of meteorological factors on soil moisture dynamics of upland soil in Taihu Lake Region[J]. Sci Agric Sin,46(21):4454-4463(in Chinese).
- 张凯,任健,全胜利,等,2006. 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,26(5):122-125. Zhang K, Ren J, Tong S L,et al,2006. Study on the adjustment of grouting characteristics of winter wheat seed by soil water controlling[J]. J Triticeae Crops,26(5):122-125(in Chinese).
- 张明捷,王运行,赵桂芳,等,2009. 濮阳冬小麦生育期气候变化及其对小麦产量的影响[J]. 中国农业气象,30(2):223-229. Zhang M J,Wang Y X,Zhao G F,et al,2009. Climate change during winter wheat growing period and its impacts on winter wheat yield in Puyang of Henan Province[J]. Chin J Agrometeorol,30(2):223-229(in Chinese).
- 张晓龙,1982. 小麦品种籽粒灌浆研究[J]. 作物学报,8(2):87-93. Zhang X L,1982. Study on the grain filling of wheat[J]. Acta Agronom Sin,8(2):87-93(in Chinese).
- 张雪松,闫艺兰,胡正华,2017. 不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析[J]. 中国农业气象,38(4):201-210. Zhang X S,Yan Y L,Hu Z H,2017. Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland[J]. Chin J Agrometeorol,38(4):201-210(in Chinese).
- 赵益新,陈巨东,2007. 通径分析模型及其在生态因子决定程度研究中的应用[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),30(1):120-123. Zhao Y X,Chen J D,2007. The path analysis model and application in research of decision degree of ecological factors[J]. J Sichuan Norm Univ (Nat Sci),30(1):120-123(in Chinese).
- 中国气象局,2003. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社:35. China Meteorological Administration,2003. Ground-based Meteorological Observations[M]. Beijing: Meteorological Press:35 (in Chinese).
- 周强,李生荣,庞启华,等,2003. 四川盆地小麦品种间杂种 F1 代粒重与灌浆性状的关系[J]. 麦类作物学报,23(4):23-27. Zhou Q, Li S R, Pang Q H, et al,2003. Relationship between kernel weight and grain filling characters of hybrid F1 of wheat varieties in Sichuan Basin[J]. J Triticeae Crops,23(4):23-27(in Chinese).
- 周竹青,朱旭彤,1999. 不同粒重小麦品种(系)籽粒灌浆特性分析[J]. 华中农业大学学报,18(2):107-110. Zhou Z Q,Zhu X T,1999. Analysis on the grain filling characteristics of wheat varieties with different kernel weight[J]. J Huazhong Agric Univ,18(2):107-110(in Chinese).
- 祝新建,袁文良,祝妍妍,2013. 分期播种对豫北不同小麦品种产量因素结构的影响分析[J]. 中国农学通报,29(24):95-100. Zhu X J,Yuan W L,Zhu Y Y,2013. Analysis of yield formation of high quality wheat in different seeding time in northern Henan[J]. Chin Agric Sci Bull,29(24):95-100(in Chinese).
- Dias A S,Lidon F C,2009. Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis [J]. J Agron Crop Sci,195(2):137-147.
- Kobata T,Palta J A,Tanaka T,et al,2018. Responses of grain filling in spring wheat and temperate-zone rice to temperature: similarities and differences[J]. Field Crops Res,215:187-199.
- Liang W X,Zhang Z C,Wen X X,et al,2017. Effect of non-structural carbohydrate accumulation in the stem pre-anthesis on grain filling of wheat inferior grain[J]. Field Crops Res,211:66-76.
- Liu Y,Liang H Y,Lü X K,et al,2016. Effect of polyamines on the grain filling of wheat under drought stress[J]. Plant Physiol Biochem,100:113-129.
- Zhang F Y,Li L H,Ahmad S,et al,2014. Using path analysis to identify the influence of climatic factors on spring peak flow dominated by snowmelt in an alpine watershed[J]. J Mt Sci,11(4):990-1000.