

信志红,郭建平,谭凯炎,等.不同品性冬小麦籽粒灌浆特性研究[J].气象与环境科学,2019,42(1):18-25.
Xin Zhihong,Guo Jianping,Tan Kaiyan,et al.Study on Grain Filling Characteristics of Different Quality Winter Wheat[J].Meteorological and Environmental Sciences,2019,42(1):18-25.
doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.01.003

不同品性冬小麦籽粒灌浆特性研究

信志红^{1,2},郭建平^{2,3},谭凯炎²,张利华⁴,刘凯文⁵,杨荣光⁶,张颖⁷,孙义⁸

(1.东营市气象局,山东 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.徐州市气象局,江苏 徐州 221009; 5.荆州农业气象试验站,湖北 荆州 434025; 6.泰安市气象局,山东 泰安 271000; 7.温江区气象局,四川 温江 611130; 8.宿州市气象局,安徽 宿州 234000)

摘 要:为揭示冬小麦干物质积累过程的动态变化,利用不同品种冬小麦分期播种的灌浆速率资料,建立了 Logistic 模型,定量分析了不同播期条件下不同品性冬小麦的灌浆特性,并探讨了冬小麦灌浆特性对气象因子的响应情况。结果表明,籽粒灌浆质量与开花后天数的关系符合 Logistic 生长曲线方程。基于 Logistic 模型求算的各次级参数能够较好地表征冬小麦籽粒灌浆特性,半冬性品种较春性品种灌浆高峰期出现时间早;春性品种的粒重渐增期和粒重快增期持续时间一般长于半冬性品种的;半冬性品种的平均活跃灌浆期较春性品种的短;早播和正常播种条件下,春性品种最大和平均灌浆速率均高于半冬性品种的,而迟播条件下春性品种最大和平均灌浆速率均低于半冬性品种的,适期晚播更利于春性品种灌浆和千粒重增加。灌浆特性的变异系数分布总体呈春性品种大于半冬性品种的,表明播期对春性品种的影响更大。不同籽粒灌浆特性对气象因子的响应不同,其中孕穗—成熟期内的平均气温、孕穗—乳熟期内的降水量、播种—乳熟期内的日照时数与冬小麦灌浆特性密切相关,基于灌浆特性与气象因子建立的逐步回归方程决定系数为 0.507~0.875,均通过了 0.01 的显著性检验。

关键词: Logistic 模型;不同播期;冬小麦;灌浆特性;定量分析

中图分类号: S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-7148(2019)01-0018-08

引 言

灌浆期是小麦产量形成的关键时期^[1]。灌浆期内的籽粒灌浆特性主要包含灌浆时间和灌浆速率等^[2-5]。定量分析小麦灌浆过程中干物质积累的动态变化,是揭示小麦产量形成和掌握高产群体调控指标的重要内容^[6-8]。受不同环境因素影响^[9-11],籽粒干质量变化及灌浆速率都存在差异^[12-14]。目前关于籽粒质量与灌浆时间或灌浆速率关系的研究较多。有研究认为,籽粒质量与灌浆速率呈正相关^[3-4],与灌浆持续时间无显著关系,但也有研究认为灌浆持续天数与籽粒质量呈显著正相关^[5]。在关于播期、品种和气象条件对作物籽粒灌浆影响的

研究中,杨沈斌^[15]、郭建茂^[16]等以水稻为例研究了分期播种对水稻群体茎蘖发育和干物质积累的影响。王喜梅等^[17]以高产玉米为研究对象,利用 Logistic 方程对群体籽粒灌浆过程进行了模拟。李苗苗等^[18]研究了夏玉米开花至灌浆期连阴雨天气对植株性状及产量结构的影响。王芳等^[19]分析了近 30 年华北平原冬小麦播种—成熟期有效积温的变化趋势。王春玲等^[20]认为,地温对冬小麦产量有重要影响。在上述研究中,研究者多是从播期、品种或单一气象条件对作物产量的影响进行讨论,而针对不同播期不同品种冬小麦灌浆特性的研究较少,同时关于不同灌浆特性与各生育期内气象因子的相关分析也鲜有报道。Logistic 模型可用于描述作物干物

收稿日期:2018-03-28;修订日期:2018-06-11
基金项目:公益性行业(气象)科研专项重大专项(GYHY201506001-2、GYHY201506001-3)
作者简介:信志红(1973-),女,山东惠民人,副研级高工,学士,从事农业气象应用研究及服务。E-mail:sddyxin@126.com
通讯作者:郭建平(1963-),男,江苏昆山人,研究员,博士,从事农业气象灾害和气候变化影响等研究。E-mail:gjp@cma.gov.cn

质积累的动态变化过程^[21-23],并可基于模型求得得到籽粒灌浆速率等次级特性参数,进而对籽粒灌浆过程进行定量对比分析。本文利用华北、黄淮、江淮和西南冬麦区半冬性和春性冬小麦田间分期播种试验资料,采用 Logistic 模型对冬小麦籽粒灌浆过程进行曲线估计,并在建立不同播期条件下不同品性冬小麦 Logistic 方程基础上,进一步推导出各项籽粒灌浆特性参数,以定量分析冬小麦干物质积累过程的特征,并构建灌浆特性参数与气象因子之间的关系方程,阐明冬小麦籽粒灌浆过程中灌浆特性参数对气象要素的响应机制。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 试验地点及时间

2016年10月—2017年6月,分别在河北固城(115°40'E、39°08'N)、山东泰安(117°09'E、36°10'N)、江苏徐州(117°09'E、34°17'N)、安徽宿州(117°05'E、33°64'N)、湖北荆州(112°09'E、30°21'N)、四川温江(103°52'E、30°45'N)6个农业气象试验站开展了冬小麦区域联合分期播种试验,供试品种均为当地代表性品种,分别为半冬性品种郑麦98、山农18、徐麦33、皖麦52和春性品种郑麦9023、川麦104。试验设4个播期,以当地常年冬小麦实际播种期为界,提前10d播种为第1期(A),正常播种为第2期(B),比正常播期推迟10d播种为第3期(C),推迟20d播种为第4期(D),前后总间隔时间为30d。

1.1.2 试验方法及观测项目

播种方式采用南北方向条播,保持良好的通风透光性,行距统一为20cm;播种量与当地农田保持一致。试验地段要求平整,土壤质地、耕作方式及土壤肥力等均与当地农田一致,田间管理措施与当地管理措施一致,能够满足冬小麦对旱涝灾害和农业病虫害的防御要求等,试验地块不受其他农田小气候影响。考种方法均按《农业气象观测规范》^[24]相关规定进行。选择同批次麦种在不同播期进行播种,并于小麦开花后进行灌浆速率测定。

按照《农业气象观测规范》标准依次观测冬小麦播种到成熟各发育期的普遍期,并于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,从开花后第10d开始每5d取样1次,直到成熟,进行籽粒灌浆质量测定。依照地面气象观测规范,在试验点所在气象站开展同期内气温等各要素的观测工作,计算播种—拔节、拔节—孕穗、孕穗—抽穗、

抽穗—开花、开花—乳熟、乳熟—成熟各发育期的平均气温($\bar{t}$)、降水量(R)、日照时数(S)分布情况。

1.2 资料处理和统计方法

1.2.1 观测资料统计分析

灌浆质量测定时,每次取20穗,数出总粒数,烘干后称重,计算千粒重:

$$\text{千粒重} = \frac{\text{籽粒干重} \times 1000}{\text{籽粒总数}}$$

式中千粒重单位为 $\text{g} \cdot 1000 \text{粒}^{-1}$,取2位小数。各发育期内平均气温为

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

式中 $\bar{t}$ 为气温平均值($^{\circ}\text{C}$,取1位小数), t_i 为第 i 日气温值, n 为统计天数。

1.2.2 Logistic 模型统计方法

采用 Logistic 模型 $Y = k/(1 + ae^{-bx})$ 对小麦籽粒灌浆过程进行拟合^[9-11],得到不同品性小麦分期播种籽粒干物质积累过程与开花后天数关系的曲线估计,进而由 Logistic 模型推导出灌浆速率方程及各次级参数。式中 Y 为灌浆质量, x 为开花后天数, k 为最大生长量, a 、 b 为待定系数。

1.2.3 Logistic 方程次级参数统计方法

对 Logistic 模型求一阶导数得到籽粒灌浆速率方程 $V(x) = dy/dx = kabe^{-bx}/(1 + ae^{-bx})^2$,求算籽粒平均灌浆速率 $\bar{V}$ 和活跃灌浆期 $T = k/\bar{V}$;对此 Logistic 模型求二阶导数并令其等于零,求算达到最大灌浆速率的时间 $T_{\max}$ 和最大灌浆速率 $V_{\max}$;对 Logistic 模型求三阶导数并令其等于零,求算曲线的两个拐点值,即灌浆三阶段的两个节点 $x_1 = -\ln[(2 + \sqrt{3})/a]/b$ 和 $x_2 = -\ln[(2 - \sqrt{3})/a]/b$,则 x_1 之前为灌浆前期(粒重渐增期), $x_1 \sim x_2$ 为灌浆中期(粒重快增期), $x_2 \sim T$ 为灌浆后期(粒重缓增期),各阶段的持续天数和灌浆速率分别用 T_1 、 T_2 、 T_3 和 V_1 、 V_2 、 V_3 表示。

采用公式 $CV = s/\bar{X} \times 100\%$ 计算各次级参数的变异系数。式中 s 为样本标准差, $\bar{X}$ 为样本平均数。

2 结果与分析

2.1 籽粒灌浆过程的 Logistic 模型

分别对各试验处理籽粒灌浆质量与开花后天数进行 Logistic 生长曲线模拟,建立 Logistic 模型(表1),各模型的决定系数 R^2 为0.963~1.000,各参数估计均达到95%置信水平,表明各处理的冬小麦灌浆过程均符合 Logistic 生长规律。

表 1 春性不同品种冬小麦分期播种籽粒灌浆过程的 Logistic 方程参数、拟合模型及决定系数

品种	播期	<i>k</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>Y</i>	<i>R</i> ²
郑麦 98	B	49.484	53.339	0.188	49.484/(1 + 53.339 × e ^{-0.188x})	0.999
	C	50.121	32.967	0.180	50.121/(1 + 32.967 × e ^{-0.180x})	0.998
	D	47.603	61.081	0.213	47.603/(1 + 61.081 × e ^{-0.213x})	0.996
山农 18	A	42.420	15.199	0.161	42.420/(1 + 15.199 × e ^{-0.161x})	0.985
	B	54.706	29.029	0.146	54.706/(1 + 29.029 × e ^{-0.146x})	0.993
	C	43.684	17.819	0.181	43.684/(1 + 17.819 × e ^{-0.181x})	0.963
	D	46.082	24.588	0.178	46.082/(1 + 24.588 × e ^{-0.178x})	0.966
皖麦 52	A	51.108	27.781	0.156	51.108/(1 + 27.781 × e ^{-0.156x})	0.982
	B	46.841	13.032	0.135	46.841/(1 + 13.032 × e ^{-0.135x})	0.963
	C	44.289	38.240	0.205	44.289/(1 + 38.240 × e ^{-0.205x})	0.997
	D	43.989	11.566	0.126	43.989/(1 + 11.566 × e ^{-0.126x})	0.966
徐麦 33	A	48.100	44.349	0.199	48.100/(1 + 44.349 × e ^{-0.199x})	0.990
	B	50.276	32.790	0.168	50.276/(1 + 32.790 × e ^{-0.168x})	1.000
	C	48.171	27.104	0.186	48.171/(1 + 27.104 × e ^{-0.186x})	0.999
	D	48.816	39.278	0.200	48.816/(1 + 39.278 × e ^{-0.200x})	0.997
郑麦 9023	A	41.857	38149.575	0.457	41.857/(1 + 38149.575 × e ^{-0.457x})	0.984
	B	40.720	79.382	0.213	40.720/(1 + 79.382 × e ^{-0.213x})	0.995
	C	46.643	28.138	0.158	46.643/(1 + 28.138 × e ^{-0.158x})	0.984
	D	43.519	26.109	0.172	43.519/(1 + 26.109 × e ^{-0.172x})	0.993
川麦 104	A	54.632	58.521	0.153	54.632/(1 + 58.521 × e ^{-0.153x})	0.998
	B	70.307	35.352	0.119	70.307/(1 + 35.352 × e ^{-0.119x})	0.992
	C	70.055	26.191	0.103	70.055/(1 + 26.191 × e ^{-0.103x})	0.982
	D	47.904	39.034	0.146	47.904/(1 + 39.034 × e ^{-0.146x})	0.995

注:*k* 为最大灌浆质量(g·1000 粒⁻¹),*a*、*b* 为系数,*Y* 为灌浆质量(g·1000 粒⁻¹);郑麦 98A 播期处理资料缺省。下同

利用 Logistic 模型对不同品种冬小麦分期播种的灌浆过程进行拟合,并与实测值进行对比(图 1)。半冬性品种和春性品种模拟值与实测值的平均误差分别为1.07 g·1000粒⁻¹和1.33 g·1000粒⁻¹,A、B、C、D 处理模拟值与实测值误差范围分别为0.63 ~ 1.75 g·1000粒⁻¹、0.15 ~ 1.83 g·1000粒⁻¹、0.26 ~ 1.90 g·1000粒⁻¹、0.59 ~ 2.04 g·1000粒⁻¹。

2.2 籽粒灌浆过程特性分析

在 Logistic 模型 $Y = k / (1 + ae^{-bx})$ 中,当 *x* 趋近于 1 时,*Y* 趋近于 *k*,*k* 可以用来表示冬小麦灌浆质量的最大累积值,而 *a*、*b* 共同决定着最大灌浆速率出现的时间,*k*、*b* 共同决定着灌浆最大速率。由图 1 可以看出,各处理灌浆质量的变化均呈 Logistic 曲线分布,灌浆时间因播期和品种不同一般为 30 ~ 45 d,灌浆质量一般与灌浆时间呈正相关。由图 1(a)~(d)所示的半冬性品种中,不同播期处理冬小麦均呈现前期质量增速快,中后期质量增速放缓的趋势。其中,郑麦 98 各播期灌浆质量峰值出现在开花后 40 ~ 45 d,呈 C 处理灌浆质量峰值 > B > D 的分布,D 处理灌浆时间短于其他播期处理的;山农 18 各播期灌浆质量峰值均出现在开花后 35 d,呈 B 处理灌浆质量峰值 > C > D > A 的分布;皖麦 52 各播期灌

浆质量峰值均出现在开花后 35 d,质量峰值呈 A > C > B > D 的排序;徐麦 33 各播期灌浆质量峰值出现在开花后 35 ~ 40 d,质量峰值呈 D > C > B > A 的排序,早播和正常播小麦灌浆时间短于迟播小麦的。由图 1(e)~(f)所示春性品种中,除郑麦 9023 早播 10 d 处理灌浆质量增速前期平缓,中期陡然加快,后期增速放慢外,其他播期处理的灌浆质量均呈前中期增速快后期放缓的趋势。其中,郑麦 9023 各播期灌浆质量峰值出现在开花后 30 ~ 35 d,质量峰值呈 C > A > B > D 的分布,D 处理灌浆时间短于其他播期处理的;川麦 104 各播期灌浆质量峰值出现在开花后 40 ~ 45 d,质量峰值呈 B > A > C > D 的分布,B 和 C 处理灌浆时间短于其他两播期处理的。

2.3 Logistic 模型的次级参数及不同品种冬小麦分期播种籽粒灌浆特性

在冬小麦灌浆过程 Logistic 生长曲线模拟基础上,对各品种冬小麦不同播期条件下的最大灌浆速率及其出现时间,平均灌浆速率及活跃灌浆期,粒重渐增期、快增期和缓增期的持续天数及各期灌浆速率等次级特征参数进行求算(表 2)。不同播期处理的籽粒最大灌浆速率表现有差异,A 和 B 处理时春性品种一般高于半冬性品种的,而 C 和 D 处理时半

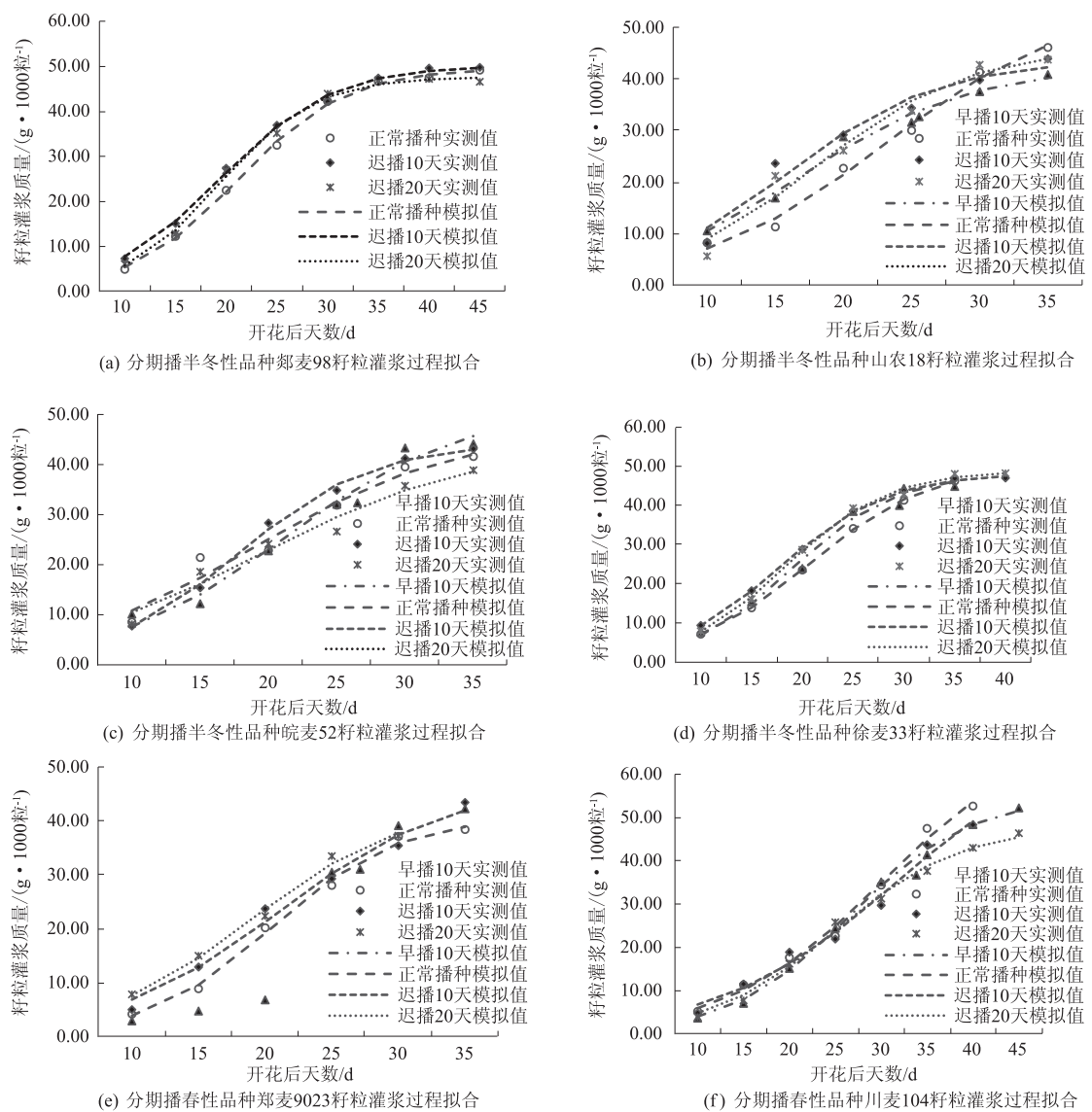


图 1 不同品种冬小麦分期播种灌浆过程的 Logistic 模型拟合情况

冬性品种一般高于春性品种的,且迟播春性品种最大灌浆速率减小。半冬性品种各播期的灌浆高峰期一般出现在开花后 18 ~ 21 d,而春性品种灌浆高峰期最晚可出现在开花后 32 d,即半冬性品种较春性品种灌浆高峰期出现时间早;对同一播期条件下不同品种冬小麦灌浆高峰期出现时间进行排序,发现 A、C、D 处理均为:半冬性品种山农 18 出现时间最早,春性品种郑麦 9023 出现次迟,B 处理为半冬性品种皖麦 52 出现时间最早,任一播期处理均为春性品种川麦 104 灌浆高峰期出现时间最迟,郑麦 98 和徐麦 33 灌浆高峰期出现时间无明显规律。平均灌浆速率的分布与最大灌浆速率表现相似,A 和 B 处理时半冬性品种小于春性品种的,C 和 D 处理时半冬性品种大于春性品种的。各播期处理中,半冬性品种的活跃灌浆期一般为 28 ~ 48 d,B 的持续时

间 > D > A > C 的,春性品种的活跃灌浆期一般为 28 ~ 58 d,C 的持续时间 > B > D > A 的,表明适期晚播更利于春性品种灌浆和千粒重增加。粒重渐增期速率、快增期速率和缓增期速率分布中,不同播期处理均以粒重快增期速率为最大;从粒重渐增期和粒重快增期持续时间来看,春性品种一般长于半冬性品种的,而不同播期处理下各灌浆阶段的持续时间无明显规律。

另对各品种不同播期处理下灌浆特性参数变异情况进行统计分析可知(表 2),除灌浆高峰期和粒重缓增期灌浆速率两项参数的最大变异系数为半冬性品种外,其他参数的最大变异系数均为春性品种,而各参数的最小变异系数均属半冬性品种,说明不同播期对春性品种的影响更大。对各品种不同参数的变异系数平均值进行比较发现,半冬性品种中最

大灌浆峰值期变异次小,最大灌浆速率和粒重快增期灌浆速率变异次小,变异最大的是灌浆缓增期持续时间;春性品种中亦为最大灌浆峰值期变异最小,灌浆渐增期持续时间变异次小,变异最大的亦为灌浆缓增期持续时间。表明不同播期对各品种籽粒灌浆缓增期的持续时间影响较大,而对最大灌浆峰值期出现时间影响较小。

表 2 不同品种冬小麦分期播种籽粒灌浆特性参数及其变异系数

品种	郑麦 98				山农 18				皖麦 52			
	变幅	均值	标准差	变异系数/%	变幅	均值	标准差	变异系数/%	变幅	均值	标准差	变异系数/%
$V_{\max}$	2.26 ~ 2.53	2.37	0.14	5.91	1.71 ~ 2.05	1.94	0.15	7.73	1.39 ~ 2.27	1.81	0.40	22.10
$T_{\max}$	19.00 ~ 21.00	19.67	1.15	5.85	16.00 ~ 23.00	18.50	3.11	16.81	18.00 ~ 21.00	19.25	1.26	6.55
V_1	0.73 ~ 0.87	0.79	0.07	8.86	0.82 ~ 1.08	0.97	0.11	11.34	0.80 ~ 1.07	0.94	0.14	14.98
T_1	12.00 ~ 14.00	13.00	1.00	7.69	9.00 ~ 14.00	10.75	2.36	21.95	9.00 ~ 13.00	10.50	1.91	18.19
V_2	1.97 ~ 2.24	2.08	0.14	6.73	1.50 ~ 1.82	1.71	0.14	8.19	1.21 ~ 1.98	1.58	0.35	22.15
T_2	12.00 ~ 15.00	13.67	1.53	11.19	14.00 ~ 18.00	15.50	1.91	12.32	13.00 ~ 21.00	17.75	3.59	20.23
V_3	1.03 ~ 1.48	1.25	0.23	18.40	0.62 ~ 0.88	0.78	0.12	15.38	0.45 ~ 1.13	0.74	0.32	43.24
T_3	3.00 ~ 6.00	4.33	1.53	35.33	9.00 ~ 12.00	10.00	1.41	14.10	5.00 ~ 18.00	11.75	6.24	53.11
$\bar{V}$	1.50 ~ 1.69	1.58	0.10	6.33	1.14 ~ 1.37	1.29	0.10	7.75	0.92 ~ 1.51	1.20	0.27	22.50
T	28.00 ~ 33.00	31.00	2.65	8.55	33.00 ~ 41.00	36.25	3.59	9.90	29.00 ~ 48.00	40.00	8.45	21.13

品种	徐麦 33				郑麦 9023				川麦 104			
	变幅	均值	标准差	变异系数/%	变幅	均值	标准差	变异系数/%	变幅	均值	标准差	变异系数/%
$V_{\max}$	2.11 ~ 2.44	2.30	0.15	6.52	1.84 ~ 4.78	2.67	1.42	53.18	1.75 ~ 2.09	1.93	0.18	9.33
$T_{\max}$	18.00 ~ 21.00	19.00	1.41	7.42	19.00 ~ 23.00	21.00	1.63	7.76	25.00 ~ 32.00	28.50	3.11	10.91
V_1	0.79 ~ 0.97	0.87	0.08	9.20	0.41 ~ 0.80	0.64	0.18	28.13	0.63 ~ 0.79	0.71	0.09	12.68
T_1	11.00 ~ 13.00	12.00	0.82	6.83	11.00 ~ 20.00	14.50	3.87	26.69	16.00 ~ 19.00	18.00	1.41	7.83
V_2	1.84 ~ 2.15	2.01	0.13	6.47	1.62 ~ 4.15	2.32	1.23	53.02	1.53 ~ 1.84	1.70	0.16	9.41
T_2	13.00 ~ 16.00	14.25	1.26	8.84	6.00 ~ 16.00	12.75	4.72	37.02	17.00 ~ 25.00	20.50	3.70	18.05
V_3	0.93 ~ 1.19	1.07	0.14	13.08	0.77 ~ 1.31	0.97	0.30	30.93	0.79 ~ 1.18	0.95	0.17	17.89
T_3	4.00 ~ 7.00	5.75	1.50	26.09	1.00 ~ 9.00	6.00	4.36	72.67	4.00 ~ 14.00	8.75	4.27	48.80
$\bar{V}$	1.41 ~ 1.63	1.53	0.10	6.54	1.23 ~ 3.19	1.78	0.95	53.37	1.17 ~ 1.39	1.29	0.12	9.30
T	30.00 ~ 36.00	32.00	2.83	8.84	13.00 ~ 38.00	28.50	11.15	39.12	39.00 ~ 58.00	47.25	8.88	18.79

注:郑麦98、山农18、皖麦52为半冬性,徐麦33、郑麦9023、川麦104为春性; $V_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 表示最大灌浆速率($\text{g}\cdot1000\text{粒}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)及其出现时间(d), V_1 、 T_1 、 V_2 、 T_2 、 V_3 、 T_3 分别表示粒重渐增期、快增期、缓增期的灌浆速率($\text{g}\cdot1000\text{粒}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)、持续时间(d), $\bar{V}$ 和 T 表示平均灌浆速率($\text{g}\cdot1000\text{粒}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)和活跃灌浆期(d)。下同

2.4 不同品种冬小麦分期播种籽粒灌浆特性对气象因子的响应

选择冬小麦各生育期内的气象因子与冬小麦籽粒灌浆特性因子进行相关性分析发现,不同籽粒灌浆特性对各生育期的气象因子响应不同(表3)。从气温与灌浆特性的相关性来看,最大灌浆质量与孕穗—成熟各期内平均气温负相关显著($P<0.05$),最大灌浆速率出现时间和粒重渐增期持续时间与各生育期内的平均气温均相关极显著($P<0.01$),活跃灌浆期、粒重快增期持续时间均与孕穗—抽穗期平均气温负相关极显著,粒重渐增期灌浆速率与拔节—孕穗、抽穗—开花、开花—乳熟期平均气温正相关极显著,表明冬小麦发育后期即孕穗—成熟期内各期平均气温是影响灌浆特性的主要气温因子。从降水量与灌浆特性的相关性来看,最大灌浆速率、平

均灌浆速率、粒重渐增期灌浆速率、粒重快增期灌浆速率均与孕穗—抽穗期降水量相关显著,与抽穗—开花期降水量相关极显著,最大灌浆速率出现时间、粒重渐增期持续时间分别与抽穗—开花期降水量正相关显著、正相关极显著,粒重渐增期灌浆速率与开花—乳熟期降水量负相关显著,表明孕穗—乳熟期内各期的降水量对冬小麦灌浆特性有重要作用。从日照时数与灌浆特性的相关性来看,最大灌浆速率、平均灌浆速率、活跃灌浆期、粒重快增期灌浆速率及持续时间与拔节—孕穗期日照时数相关极显著,最大灌浆速率出现时间和粒重渐增期持续时间均与播种—拔节、孕穗—抽穗、开花—乳熟期日照时数负相关极显著,与抽穗—开花期日照时数负相关显著,表明播种—乳熟期内大部分时段的光照条件均是影响冬小麦灌浆特性的重要因子。

表 3 冬小麦各发育期气象因子与灌浆特性参数相关性统计

特性参数 气象因子	k	$V_{\max}$	$T_{\max}$	$\bar{V}$	T	V_1	T_1	V_2	T_2	V_3	T_3
$\bar{t}_1$	0.331	0.020	0.625 **	0.021	0.285	-0.367	0.550 **	0.016	0.292	-0.171	0.112
$\bar{t}_2$	-0.353	-0.292	-0.685 **	-0.293	-0.115	0.603 **	-0.727 **	-0.289	-0.131	-0.087	0.047
$\bar{t}_3$	-0.675 **	0.111	-0.857 **	0.111	-0.529 **	0.384	-0.709 **	0.107	-0.523 *	0.018	-0.089
$\bar{t}_4$	-0.467 *	-0.317	-0.775 **	-0.316	-0.150	0.590 **	-0.844 **	-0.322	-0.123	-0.078	0.030
$\bar{t}_5$	-0.535 **	-0.033	-0.794 **	-0.034	-0.315	0.555 **	-0.757 **	-0.036	-0.306	-0.145	0.123
$\bar{t}_6$	-0.447 *	-0.024	-0.623 **	-0.026	-0.218	0.507 *	-0.605 **	-0.028	-0.210	-0.208	0.201
R_1	-0.369	0.217	-0.367	0.220	-0.309	0.076	-0.275	0.205	-0.260	-0.186	0.066
R_2	-0.191	0.068	0.034	0.072	-0.095	-0.264	0.079	0.063	-0.087	-0.181	0.008
R_3	-0.323	0.429 *	0.084	0.429 *	-0.319	-0.469 *	0.246	0.417 *	-0.285	-0.048	-0.019
R_4	0.023	0.721 **	0.462 *	0.721 **	-0.314	-0.754 **	0.730 **	0.718 **	-0.316	0.143	-0.167
R_5	-0.264	0.233	0.157	0.236	-0.143	-0.468 *	0.238	0.223	-0.119	-0.234	0.085
R_6	0.037	-0.145	0.130	-0.142	0.158	-0.099	0.066	-0.142	0.143	-0.196	0.121
S_1	-0.303	-0.051	-0.664 **	-0.053	-0.286	0.478 *	-0.605 **	-0.047	-0.294	0.193	-0.138
S_2	-0.250	0.586 **	-0.113	0.589 **	-0.591 **	-0.463 *	0.197	0.581 **	-0.558 **	0.458 *	-0.520 *
S_3	-0.324	-0.013	-0.681 **	-0.015	-0.311	0.457 *	-0.605 **	-0.009	-0.312	0.185	-0.125
S_4	-0.324	0.000	-0.474 *	-0.003	-0.248	0.244	-0.417 *	0.000	-0.236	0.188	-0.102
S_5	-0.396	-0.106	-0.702 **	-0.107	-0.207	0.594 **	-0.713 **	-0.109	-0.196	-0.162	0.135
S_6	-0.074	0.108	-0.251	0.108	-0.264	-0.011	-0.131	0.113	-0.266	0.401	-0.350

注: $\bar{t}_1$ 、 R_1 、 S_1 , $\bar{t}_2$ 、 R_2 、 S_2 , $\bar{t}_3$ 、 R_3 、 S_3 , $\bar{t}_4$ 、 R_4 、 S_4 , $\bar{t}_5$ 、 R_5 、 S_5 , $\bar{t}_6$ 、 R_6 、 S_6 分别表示播种—拔节,拔节—孕穗,孕穗—抽穗,抽穗—开花,开花—乳熟,乳熟—成熟期内的平均气温(℃)、降水量(mm)、日照时数(h);*、**分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。下同

将冬小麦各籽粒灌浆特性因子作因变量,各生育期内气象因子作自变量,选用逐步回归法建立多元线性最优回归方程(表 4),各方程判别系数 R^2 为

0.507~0.875,且均通过 0.01 的显著性检验,表明主要灌浆特性参数与所选气象因子有显著的相关关系。

表 4 冬小麦灌浆特性参数与气象因子的关系方程及其检验

特性参数	关系方程	R^2	F	P
k	$k = 82.488 - 2.010 \bar{t}_3 - 0.083R_5$	0.599	14.956	0.000
$V_{\max}$	$V_{\max} = 0.976 + 0.048R_4 + 0.001S_1$	0.799	39.770	0.000
$T_{\max}$	$T_{\max} = 39.612 - 1.252 \bar{t}_3$	0.734	57.894	0.000
$\bar{V}$	$\bar{V} = 0.651 + 0.032R_4 + 0.001S_1$	0.797	39.330	0.000
T	$T = 84.206 - 0.119S_2 - 2.568 \bar{t}_3 - 0.258R_4 + 0.036R_1$	0.755	13.856	0.000
V_1	$V_1 = 0.412 - 0.007R_4 + 0.020 \bar{t}_6$	0.651	18.639	0.000
T_1	$T_1 = 39.030 - 0.673 \bar{t}_4 + 0.022S_2 - 0.672 \bar{t}_6 - 0.032R_6$	0.875	31.453	0.000
V_2	$V_2 = 0.863 + 0.041R_4 + 0.001S_1$	0.798	39.600	0.000
T_2	$T_2 = 33.858 - 1.118 \bar{t}_3 - 0.164R_4$	0.626	16.723	0.000
V_3	$V_3 = 0.626 + 0.007S_2 - 0.002R_1 - 0.003R_6$	0.697	13.826	0.000
T_3	$T_3 = 14.611 - 0.101S_2 + 0.029R_1$	0.507	9.782	0.001

3 结论与讨论

3.1 结 论

(1)冬小麦籽粒灌浆过程可以采用 Logistic 方程模拟,灌浆时间因播期和品种不同一般为 30~45 d,灌浆质量一般与灌浆时间呈正相关。半冬性品种平均活跃灌浆期短于春性品种的;早播和正常播种时半冬性品种的灌浆速率小于春性品种的,迟播处理时半冬性品种的灌浆速率大于春性品种的;适当晚播更利于春性品种灌浆和千粒重增加。

(2)不同播期处理的籽粒最大灌浆速率存在差

异。迟播春性品种最大灌浆速率减小,半冬性品种一般较春性品种灌浆高峰期出现时间早。半冬性品种平均活跃灌浆期短于春性品种的。播期对春性品种的影响大于对半冬性品种的影响,不同播期对各品种籽粒灌浆缓增期的持续时间影响较大,而对最大灌浆峰值出现时间影响较小。春性品种的粒重渐增期和粒重快增期持续时间均长于半冬性品种的,而不同播期处理下各品种灌浆阶段的持续时间无明显规律。

(3)不同籽粒灌浆特性对各生育期的气象因子响应不同。冬小麦发育后期即孕穗—成熟期内各期

平均气温是影响灌浆特性的主要气象因子,表明气温对灌浆特性的影响有滞后性。孕穗—乳熟期内各期降水量对冬小麦灌浆特性有重要作用,其中孕穗—开花期降水量偏多,有利于提高灌浆快增期的灌浆速率,进而提高粒重,但对渐增期灌浆速率提高有抑制作用,“库容”形成时间或因此延长。小麦生长季播种—乳熟期内大部分时段的日照时数与灌浆特性相关,其中最大灌浆速率出现时间和粒重渐增期持续时间与各期内日照时数负相关。

3.2 讨 论

(1)在使用 Logistic 方程模拟作物生长过程中,如能注意到其意义和适用范围,则更切实际^[17]。本文在用 Logistic 方程描述冬小麦灌浆质量随开花后天数变化的基础上,进一步求算表征生长规律的各个特征参数,用于定量分析籽粒灌浆特性。该方法为今后冬小麦籽粒灌浆特性的推算或采取一定措施改进冬小麦生产方式提供了一定的技术参考,但由于观测资料时间短及籽粒灌浆过程中其他不定因素等影响,模型方程的适用性和可靠性还有待进一步检验和完善。另外,灌浆特性对其他气候因子的响应^[25-27]也有待进一步探讨分析。

(2)冬小麦干物质积累过程与品种特性、生长环境和栽培耕作技术等密切相关^[28-31]。张晓龙^[4]认为,小麦粒重快增期阶段的干物质积累速度快,积累量大,提高这一阶段物质积累速率、延长这一阶段的持续时间均可提高粒重。研究表明,播期对不同品种冬小麦灌浆特性有着重要影响,不同播期冬小麦籽粒质量变化及灌浆速度都存在差异。在冬小麦生长过程中,可采取适当调整播期如对春性小麦适期晚播等措施,改善籽粒灌浆期内的光温水条件,调节灌浆速率和时间,以达到增加干物质积累和提高籽粒质量的目的,通过增加粒重实现高产。

参考文献

[1] 吴诗光,陈龙,殷贵鸿,等. 灌浆期干旱对高产小麦某些生理生化特性的影响[J]. 河南农业科学,2001(9):6-7.
[2] 阴卫军,刘霞,倪大鹏,等. 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,2005(5):16-18,22.
[3] 周竹青,朱旭彤. 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,1999,18(2):107-110.
[4] 张晓龙. 小麦品种籽粒灌浆的研究[J]. 作物学报,1982,8(2):87-92.
[5] 刘丰明,陈明灿,郭香凤,等. 高产小麦粒重形成的灌浆特性分析[J]. 麦类作物,1997,17(6):38-41.
[6] 周强,李生荣,庞启华,等. 四川盆地小麦品种间杂种 F_1 代粒重与灌浆性状的关系[J]. 麦类作物学报,2003,23(4):23-27.

[7] 赵薇,李贞,王谦,等. 冬小麦灌浆期旗叶光曲线及叶绿素荧光参数研究[J]. 气象与环境科学,2017,40(1):64-72.
[8] Yan D C, Zhu Y, Wang S H, et al. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice[J]. Plant Prod Sci,2006,9(2):93-105.
[9] 韩雪,叶芝祥,孙凌,等. 川东北地区大春季农业气候资源的年代际变化特征分析[J]. 高原山地气象研究,2009,29(4):34-39.
[10] 王胜,王毅荣. 甘肃春小麦产量时空分布及其气候响应[J]. 干旱气象,2013,31(2):298-302.
[11] 余会康,阮翠冰,陈小英,等. 气候变化对闽东粮食产量影响分析[J]. 气象与环境科学,2016,39(4):62-67.
[12] 温红霞,高岭巍,马飞,等. 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,2008,43(5):41-44.
[13] 刘海红,于志青,毕建杰,等. 干旱与灌溉处理对冬小麦冠层内光分布的影响[J]. 气象与环境科学,2016,39(3):38-43.
[14] 段晓风,刘静,张晓煜,等. 基于旱灾指数的宁夏小麦产量分析[J]. 干旱气象,2012,30(1):71-76.
[15] 杨沈斌,陈德,王萌萌,等. ORYZA2000 模型与水稻群体茎蘖动态模型的耦合[J]. 中国农业气象,2016,37(4):422-430.
[16] 郭建茂,吴越,杨沈斌,等. 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,2017,38(2):121-130.
[17] 王喜梅,王克如,王楷,等. 播期对高产玉米(15000 kg/hm²)群体籽粒灌浆特征的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2013,31(5):556-560.
[18] 李苗苗,张艳玲. 夏玉米开花至灌浆期连阴雨天气对植株性状及产量结构的影响[J]. 气象与环境科学,2014,37(1):88-92.
[19] 王芳,刘宏举,邹定荣,等. 近 30 年华北平原冬小麦有效积温的变化[J]. 气象与环境科学,2017,40(2):20-27.
[20] 王春玲,申双和,王润元,等. 中原地区地温对冬小麦发育期、生长量和产量的影响[J]. 干旱气象,2012,30(1):66-70.
[21] 崔秀珍,黄中文,薛香,等. 试验统计分析[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2013:242-244.
[22] 韩占江,邵庆炉,吴玉娥,等. 小麦籽粒灌浆参数变异及粒重的相关性分析[J]. 种子,2008,27(6):27-30.
[23] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. 农业气象,1986(1):14-19.
[24] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京:气象出版社,1993:31.
[25] 方文松,王秀萍,成林. 郑州地区冬小麦水分利用效率变化及其气温变化响应[J]. 气象与环境科学,2015,38(2):1-6.
[26] 丁旭,赖欣,范广洲. 中国不同气候区土壤湿度特征及其气候响应[J]. 高原山地气象研究,2016,36(4):28-35.
[27] 李海花,侯彦琴,李新建,等. 1980-2011 年阿勒泰市光热资源变化对春小麦发育期的影响[J]. 沙漠与绿洲气象,2014,8(6):60-65.
[28] 单新兰,苏占胜,张智,等. 宁夏山区春季降水对冬小麦生长的影响[J]. 干旱气象,2012,30(3):426-431.
[29] 余卫东. 冬小麦拔节期灌溉防霜冻效果研究[J]. 气象与环境科学,2018,41(2):11-17.
[30] 李元华,王文,张梅,等. 河北省冬小麦生育期热量资源变化分析[J]. 干旱气象,2013,31(1):49-55.
[31] 张杰,冯晓,臧贺藏,等. 河南省冬小麦生产水足迹时空特征分析[J]. 气象与环境科学,2017,40(2):33-38.

Study on Grain Filling Characteristics of Different Quality Winter Wheat

Xin Zhihong^{1,2}, Guo Jianping^{2,3}, Tan Kaiyan², Zhang Lihua⁴,
Liu Kaiwen⁵, Yang Rongguang⁶, Zhang Ying⁷, Sun Yi⁸

- (1. Dongying Meteorological Office, Dongying 257091 , China ;
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 , China ;
3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters , NUIST, Nanjing 210044 , China ;
4. Xuzhou Meteorological Office, Xuzhou 221009 , China ;
5. Jingzhou Agro-meteorological Trial Station, Jingzhou 434025 , China ;
6. Tai' an Meteorological Office, Tai' an 271000 , China ;
7. Wenjiang Meteorological Office, Wenjiang 611130 , China ;
8. Suzhou Meteorological Office, Suzhou 234000 , China)

Abstract: In order to reveal the dynamic changes of winter wheat dry matter accumulation, using different varieties of winter wheat sowing grain filling rate data, a Logistic model was established to quantitatively analyze the grain filling characteristics of different varieties winter wheat under different sowing dates. The response of winter wheat grain filling characteristics to temperature was also discussed. The results showed that the relationship between grain filling quality and days after flowering accorded with Logistic growth curve equation. The secondary parameters based on Logistic model can better characterize the grain filling characteristics of winter wheat, semi-winter varieties than the spring varieties filling peak appeared early, the duration of increasing grain weight and rapid increase in grain weight period of the spring varieties were generally longer than that of the semi-winter varieties; the average active filling period was shorter of semi-winter varieties than spring varieties. Under the conditions of early sowing and normal sowing, the maximum and average filling rate of spring varieties was higher than that of semi-winter varieties, the maximum and average filling rate of semi-winter varieties under late sowing conditions was higher than that of the spring varieties. Suitable late sowing is more conducive to grain filling and 1000-grain weight increase in spring varieties. The variation coefficient of grain filling characteristics showed that the spring varieties were more than the semi-winter varieties, indicating that the sowing date had a greater impact on the spring varieties. Different grain filling characteristics have different responses to meteorological factors. The average temperature during the booting-maturation period, the precipitation during the booting-milk ripening period, and the sunshine duration during the sowing-milk ripening period are closely related to the grain filling characteristics of winter wheat. The gradual regression equation established by the filling characteristics and meteorological factors has a coefficient of determination between 0.507 and 0.875, and both pass the significance test of 0.01 level.

Key words: Logistic equation; different sowing time; winter wheat; grain filling characteristics; quantitative analysis