

网络出版日期:2018-05-09
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20180509.1603.012.html>

糯小麦灌浆期籽粒质量和主要营养物质动态变化

宋归华¹, 马东方¹, 王书平¹, 高德荣², 方正武¹

(1. 长江大学 农学院/主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北荆州 434025;

2. 江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏扬州 225007)

摘 要 为探讨糯小麦灌浆特性及其灌浆期籽粒中主要营养成分的动态变化,在大田条件下,以1个糯小麦新品种(‘长糯麦1号’)和1个非糯对照品种(‘扬麦20’)为试验材料,在花后7 d、14 d、21 d、28 d和35 d测定灌浆过程中籽粒可溶性糖、蛋白质、淀粉质量分数和粒质量等指标。结果表明,‘长糯麦1号’与‘扬麦20’灌浆曲线的趋势基本一致,其渐增期的灌浆速率及渐增期、快增期和缓增期粒质量积累量均显著低于‘扬麦20’。但‘长糯麦1号’可溶性糖降解速率低,成熟籽粒中可溶性糖质量分数高于‘扬麦20’。二者的蛋白质积累动态趋于一致,呈先下降后上升的趋势。‘扬麦20’支链淀粉积累动态与‘长糯麦1号’存在显著差异,其在灌浆初期支链淀粉质量分数迅速增加,于花后28 d达到顶峰,之后呈下降趋势;而‘长糯麦1号’支链淀粉质量分数增长缓慢,在花后21~28 d呈“停滞”状态,于花后35 d达到最大值。成熟期‘长糯麦1号’直链淀粉质量分数接近于零,总淀粉质量分数和粒质量均显著低于‘扬麦20’。综合分析认为,‘长糯麦1号’灌浆、可溶性糖转化、淀粉积累能力明显低于‘扬麦20’。因此,在糯小麦新品种选育中应把灌浆速率、可溶性糖降解转化能力和支链淀粉合成速率的提高作为重点改良方向,以提高糯小麦粒质量,进而为糯小麦育种和生产实践奠定必要的理论依据。

关键词 糯小麦;籽粒灌浆;可溶性糖;淀粉;蛋白质

中图分类号 S512.1;S311

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2018)05-0650-08

普通小麦籽粒胚乳淀粉通常由20%左右直链淀粉和70%左右支链淀粉组成^[1]。控制胚乳直链淀粉合成的关键酶是颗粒结合淀粉合成酶(granule-bound starch synthase, GBSS),也称糯蛋白(Wx蛋白),由Wx基因编码,普通六倍体小麦有3个Wx基因,分别为位于7AS的Wx-A1、4AL的Wx-B1和7DL的Wx-D1^[2-4]。糯小麦由于这3对基因同时缺失,导致其胚乳中直链淀粉质量分数几乎为零,这一特性使其在食品加工、淀粉加工和其他工业上有着重要应用价值^[5-6]。自20世纪90年代开始,糯小麦研究得到国内外众多研究者的重视。1995年,日本研究者Nakamura等^[7]利用人工杂交的方式首次育成六倍体全糯小麦,随后中国农业大学刘广田教授培育了中国首例糯性小麦^[8]。近些年来,国内外在糯小麦遗传育种、品质评价及应用加工方面的研究已取得较大进展^[9-11],而糯小麦与非糯小麦相比仍存

在粒质量低的问题^[12-13]。目前关于灌浆期糯小麦粒质量积累与主要营养成分变化特性的研究较少。

本试验以1个糯小麦新品系为材料,以1个非糯小麦品种为对照,对糯小麦灌浆特性及灌浆期籽粒主要营养成分的动态变化进行研究,旨在探讨糯小麦灌浆规律和主要营养成分的变化特征,以为糯小麦生产及育种提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与田间土壤处理情况

供试材料为糯小麦新品种(‘长糯麦1号’)及非糯对照品种‘扬麦20’(长江中下游麦区区域试验中对照品种)。试验于2015至2017年在湖北省长江大学试验田进行,粘性土壤。前茬大豆收获后机械旋耕2遍,施硝酸磷钾复合肥600 kg·hm⁻²;播种时施呋喃丹30 kg·hm⁻²防治地下害虫;小麦越冬后,追施尿素75 kg·hm⁻²。采

收稿日期:2017-06-28 修回日期:2017-08-18

基金项目:湖北省自然科学基金(2016CFB478);七大作物育种专项(2017YFD0100800)。

第一作者:宋归华,男,硕士研究生,从事作物遗传育种研究。Email:ghsong0229@126.com

通信作者:方正武,男,副教授,主要从事小麦遗传育种研究。Email:fangzhengwu88@163.com

用苯磺隆和骠马进行化学除草,用多菌灵防赤霉病及用粉秀灵防治锈病。各材料基本苗为 $225 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$,行距为 25 cm。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集及籽粒鲜、干质量测定 在开花期各品种选择花期一致,长相、长势、穗型大小基本相同及无病虫害的主茎穗 300 个挂牌标记。于花后 7 d、14 d、21 d、28 d 和 35 d(成熟期)分 5 次取样,每次取样各小区剪 60 穗带回室内,随机分为 3 组作为 3 个重复,手工脱粒、计数并称取籽粒鲜质量,计算千粒鲜质量。经 105 ℃ 杀青 30 min 后于 60 ℃ 烘干至恒量,称取籽粒干质量,计算千粒干质量。所有烘干后的籽粒干燥保存,用于可溶性糖、蛋白质和直、支链淀粉质量分数测定。

1.2.2 灌浆进程的模拟 籽粒增量进程以开花后的时间和相应的千粒干质量为参数,用 Logistic 方程 $W = W_0 / (1 + e^{A+Bt})$ 进行拟合^[14-15],式中 W 为观测时的籽粒质量, t 为开花后时间, A 、 B 为方程对不同品种所确定的参数, W_0 [$\text{g} \cdot (1\ 000 \text{ 粒})^{-1}$] 为拟合理论最高粒质量, e 指自然对数函数的底数。对方程一阶求导,可得籽粒灌浆速率方程,并可得到以下籽粒灌浆特征参数:籽粒生长起始势 $C_0 = W_0 / (1 + e^A)$;籽粒最大灌浆速率出现时间 $T_{\max}(\text{d})$, $T_{\max} = -A/B$;最大灌浆速率 $R_{\max}[\text{g} \cdot (1\ 000 \text{ 粒})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}]$, $R_{\max} = -KB/4$;灌浆持续时间 $T(\text{d})$,为籽粒灌浆持续时间;籽粒平均灌浆速率 $R_{\text{mean}}[\text{g} \cdot (1\ 000 \text{ 粒})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}]$, $R_{\text{mean}} = \text{籽粒增量} / \text{灌浆持续时间}$ 。灌浆速率曲线具有 2 个拐点,对灌浆速率方程一阶求导,可得 2 个拐点在 t 坐标上的值 t_1 和 t_2 ;令 t_3 为达到 96% W_0 时的时间,可得到灌浆过程的 3 个阶段,依次是灌

浆渐增期(T_1)、灌浆快增期(T_2)和灌浆缓增期(T_3),各阶段籽粒增加的粒质量分别为 W_1 、 W_2 和 W_3 ,对应的灌浆速率分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 。

1.2.3 可溶性糖、蛋白质及淀粉质量分数测定 籽粒可溶性糖质量分数的测定采用蒽酮比色法^[16];采用凯氏定氮法测定籽粒中含氮量^[17],再乘以转换系数 5.7 得到籽粒蛋白质质量分数;小麦籽粒中直、支链淀粉质量分数采用双波长分光光度法测定^[18],总淀粉质量分数为直链淀粉和支链淀粉之和。

1.3 数据处理

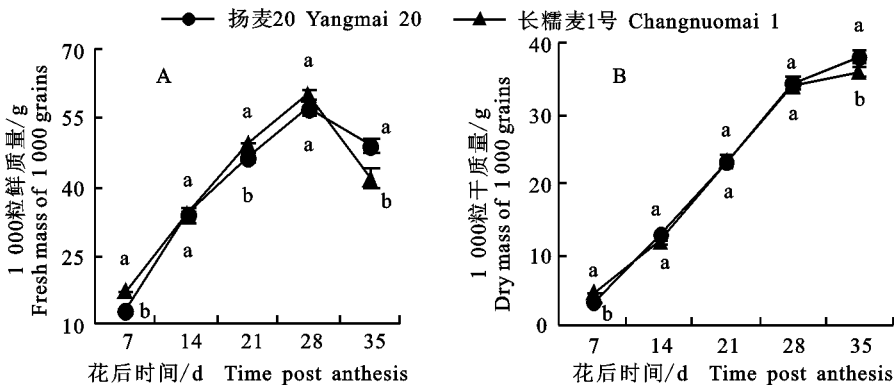
利用 Excel 2010 进行数据整理及图表绘制,用 SPSS 22 软件进行 t 检验分析。

2 结果与分析

2.1 糯小麦灌浆特性

2.1.1 糯小麦籽粒鲜质量和干质量的变化 从图 1-A 可以看出,‘长糯麦 1 号’与‘扬麦 20’灌浆期籽粒鲜质量变化趋势基本一致,呈抛物线型变化:在花后 14 d 内的籽粒形成期,籽粒鲜质量呈直线增长趋势,其主要源于籽粒中水分质量分数的急剧增加;花后 14~28 d,籽粒鲜质量增加较为平稳,为籽粒灌浆过程;花后 28~35 d,进入小麦蜡熟期,籽粒灌浆逐渐停止且含水量下降,导致籽粒鲜质量迅速降低。比较‘长糯麦 1 号’和‘扬麦 20’的鲜质量变化过程发现,花后 7~28 d,‘长糯麦 1 号’籽粒鲜质量高于‘扬麦 20’。进入蜡熟期后,‘长糯麦 1 号’籽粒鲜质量急剧下降,说明其脱水速率高于‘扬麦 20’,进而导致‘长糯麦 1 号’籽粒鲜质量显著低于‘扬麦 20’。

从籽粒干质量变化曲线来看(图 1-B),‘扬麦



图中同一横坐标值上不同小写字母表示达到 0.05 水平显著差异,下同 Different lowercase letters on the same abscissa value show significant difference at 0.05 level, the same below

图 1 糯小麦籽粒鲜质量和干质量变化曲线

Fig. 1 The cure of grain fresh mass and grain dry mass of waxy wheat

20’与‘长糯麦 1 号’籽粒干质量均呈“S”型曲线增长;花后 14 d 内籽粒干质量增长缓慢;在花后 14~28 d 灌浆中期,籽粒干质量增长速度最快,千粒干质量急剧增加;花后 28 d 以后,籽粒干质量增长又趋于缓慢,直至籽粒成熟,最终‘长糯麦 1 号’籽粒干质量显著低于‘扬麦 20’。

2.1.2 糯小麦籽粒灌浆 Logistic 方程拟合参数

将 2 种小麦籽粒灌浆干物质积累过程以 Logistic 方程 $W = W_0 / (1 + e^{A+Bx})$ 进行拟合。由表 1 可知,‘扬麦 20’和‘长糯麦 1 号’灌浆拟合方程的决定系数(R^2)分别为 0.997 6 和 0.997 0,均达到极显著水平,说明所建立的方程能较好地反映 2 种小麦籽粒的灌浆进程,可以利用 Logistic 方程对其籽粒灌浆过程进行分析。

对 2 个小麦品种灌浆参数的比较发现(表

1),‘长糯麦 1 号’理论最高粒质量 W_0 。显著低于‘扬麦 20’。‘长糯麦 1 号’灌浆起始势 C_0 、最大灌浆速率出现时间 T_{max} 、最大灌浆速率 R_{max} 、灌浆持续时间 T 及平均灌浆速率 R_{mean} 均低于‘扬麦 20’,但差异不显著,说明这些参数的差异不是‘长糯麦 1 号’粒质量低于‘扬麦 20’的主要原因。

根据 Logistic 方程二阶求导后的参数可将小麦灌浆过程分为 3 个阶段:渐增期、快增期和缓增期(表 2)。在小麦籽粒灌浆的 3 个阶段中,‘长糯麦 1 号’各阶段灌浆时间都较短,但与‘扬麦 20’无显著差异。在小麦籽粒灌浆渐增期,‘长糯麦 1 号’ R_1 显著低于‘扬麦 20’,‘长糯麦 1 号’快增期和缓增期灌浆速率与‘扬麦 20’差异不显著。‘长糯麦 1 号’在 3 个灌浆阶段积累的粒质量均显著小于‘扬麦 20’。

表 1 小麦籽粒灌浆初级参数的差异

Table 1 Variations of grain filling primary parameters of wheat

品种	Variety	R^2	A	B	W_0	C_0	T_{max}	R_{max}	T	R_{mean}
扬麦 20	Yangmai 20	0.997 6	3.47	-0.18	40.30 a	1.22 a	18.90 a	1.85 a	36.21 a	1.11 a
长糯麦 1 号	Changnuomai 1	0.997 0	3.49	-0.19	38.07 b	1.13 a	18.27 a	1.82 a	34.93 a	1.09 a

注:同列不同小写字母表示达到 0.05 水平显著差异,下同。 R^2 :拟合方程的决定系数; A 和 B :Logistic 方程 $W = W_0 / (1 + e^{A+Bx})$ 对不同品种所确定的参数; W_0 [g · (1 000 粒)⁻¹]:方程拟合最高粒质量; C_0 :籽粒生长起始势; T_{max} (d):籽粒最大灌浆速率出现时间; R_{max} [g · (1 000 粒)⁻¹ · d⁻¹]:最大灌浆速率; T (d):籽粒灌浆持续时间; R_{mean} [g · (1 000 粒)⁻¹ · d⁻¹]:籽粒增量/灌浆持续时间。

Note: Different lowercase letters in the same column show significant difference at 0.05 level, the same as below. R^2 : Coefficient of determination; A and B : Parameters in logistic equation $W = W_0 / (1 + e^{A+Bx})$; W_0 [g · (1 000 grains)⁻¹]: Theoretical grain mass; C_0 : Initial grain-filling potential; T_{max} (d): Days reaching the maximum grain-filling rate; R_{max} [g · (1 000 grains)⁻¹ · d⁻¹]: Maximum grain-filling rate; T (d): grain-filling time; R_{mean} [g · (1 000 grains)⁻¹ · d⁻¹]: Mean grain-filling rate.

表 2 小麦籽粒不同灌浆阶段特征参数的差异

Table 2 Variations of grain filling parameters in different period of wheat

品种	Variety	T_1	T_2	T_3	R_1	R_2	R_3	W_1	W_2	W_3
扬麦 20	Yangmai 20	11.73 a	14.35 a	10.14 a	0.73 a	1.62 a	0.68 a	8.52 a	23.27 a	6.90 a
长糯麦 1 号	Changnuomai 1	11.37 a	13.80 a	9.75 a	0.71 b	1.59 a	0.67 a	8.04 b	21.98 b	6.52 b

注: T_1 (d):灌浆渐增期; T_2 (d):灌浆快增期; T_3 (d):灌浆缓增期; R_1 [g · (1 000 粒)⁻¹ · d⁻¹]:渐增期灌浆速率; R_2 [g · (1 000 粒)⁻¹ · d⁻¹]:快增期灌浆速率; R_3 [g · (1 000 粒)⁻¹ · d⁻¹]:缓增期灌浆速率; W_1 [g · (1 000 粒)⁻¹]:渐增期增加的千粒质量; W_2 [g · (1 000 粒)⁻¹]:快增期增加的千粒质量; W_3 [g · (1 000 粒)⁻¹]:缓增期增加的千粒质量。

Note: T_1 (d): Grain-filling pyramid period; T_2 (d): Grain-filling fast increasing period; T_3 (d): Grain-filling slowly increase period; R_1 [g · (1 000 grains)⁻¹ · d⁻¹]: Grain-filling rate in T_1 phase; R_2 [g · (1 000 grains)⁻¹ · d⁻¹]: Grain-filling rate in T_2 phase; R_3 [g · (1 000 grains)⁻¹ · d⁻¹]: Grain-filling rate in T_3 phase; W_1 [g · (1 000 grains)⁻¹]: Grain mass accumulation in T_1 phase; W_2 [g · (1 000 grains)⁻¹]: Grain mass accumulation in T_2 phase; W_3 [g · (1 000 grains)⁻¹]: Grain mass accumulation in T_3 phase.

2.2 糯小麦籽粒可溶性糖降解及蛋白质积累动态

‘长糯麦 1 号’和‘扬麦 20’籽粒可溶性糖质量分数变化趋势基本一致,均表现为随花后时间的延长可溶性糖质量分数逐渐降低(图 2-A)。(‘长糯麦 1 号’和‘扬麦 20’在花后 7~14 d,可溶性糖质量分数急剧下降,在 14 d 后可溶性糖质量

分数下降速度减缓。在花后 7 d,‘长糯麦 1 号’籽粒中可溶性糖质量分数显著低于‘扬麦 20’,但从花后 14 d 至小麦成熟,‘长糯麦 1 号’籽粒中可溶性糖质量分数显著高于‘扬麦 20’。

‘长糯麦 1 号’及‘扬麦 20’籽粒中蛋白质积累动态均呈“V”形曲线(图 2-B):花后 7~21 d,蛋

白质质量分数急剧下降;花后 21~35 d 蛋白质质量分数快速回升,但 2 种小麦籽粒蛋白质质量分数下降和回升速度不同。‘扬麦 20’籽粒蛋白质质量分数在花后 7~14 d 急剧下降,花后 14~21 d 缓慢下降,花后 21~35 d 蛋白质质量分数逐渐升高;‘长糯麦 1 号’在花后 14~21 d 蛋白质

量分数急剧下降,花后 21~28 d 呈直线增加。在籽粒灌浆初期,‘长糯麦 1 号’籽粒蛋白质质量分数显著低于‘扬麦 20’,但由于‘长糯麦 1 号’在灌浆后期蛋白质质量分数回升速度快,成熟期‘长糯麦 1 号’籽粒蛋白质质量分数显著高于‘扬麦 20’。

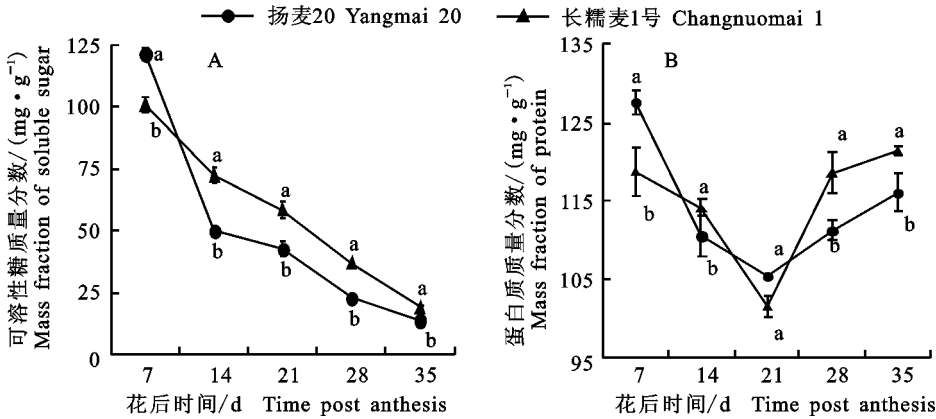


图 2 籽粒中可溶性糖及蛋白质质量分数变化

Fig. 2 Dynamic changes of mass fraction of soluble sugar and protein in grains

2.3 糯小麦籽粒淀粉积累动态

2.3.1 灌浆期直链淀粉、支链淀粉及总淀粉积累动态 由图 3-A 可知,在整个灌浆时期‘长糯麦 1 号’籽粒中直链淀粉质量分数一直处于极低水平,接近于零,与‘扬麦 20’直链淀粉质量分数差异显著。‘扬麦 20’在花后 7~21 d 直链淀粉质量分数快速增加,花后 21 d 至成熟期缓慢增长。

由图 3-B 可知,‘长糯麦 1 号’支链淀粉质量分数于花后 7~21 d 快速增长,花后 21~28 d 进入“停滞”阶段,花后 28 d 以后支链淀粉质量分数

再次增加。‘扬麦 20’支链淀粉质量分数积累曲线呈抛物线形状:花后 7~14 d 支链淀粉质量分数急剧增加,花后 14~28 d 缓慢增加,花后 28 d 支链淀粉质量分数呈下降趋势。‘长糯麦 1 号’与‘扬麦 20’在花后 7~28 d 支链淀粉质量分数差异显著,在成熟期(花后 35 d)无显著差异。总淀粉质量分数积累动态与支链淀粉质量分数积累趋势相似(图 3-C),但整个灌浆过程中,‘长糯麦 1 号’籽粒总淀粉质量分数均显著低于‘扬麦 20’。

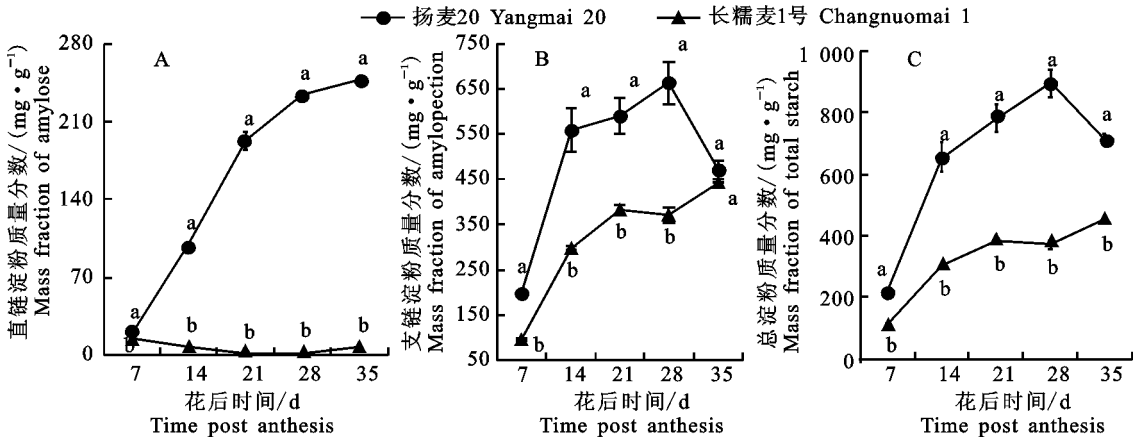


图 3 籽粒中直链淀粉、支链淀粉及总淀粉积累动态

Fig. 3 Dynamic change of amylose, amylopectin and total starch accumulation in grains

2.3.2 成熟期籽粒直链淀粉、支链淀粉、总淀粉质量分数及籽粒干质量 由表 3 可知,成熟期‘长糯麦 1 号’籽粒直链淀粉质量分数极低,为 $6.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,而‘扬麦 20’直链淀粉质量分数为

$248.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,2 个品种间差异显著。‘长糯麦 1 号’成熟期籽粒支链淀粉、总淀粉质量分数和籽粒干质量均小于‘扬麦 20’,且总淀粉质量分数和籽粒干质量差异显著。

表 3 小麦籽粒成熟期淀粉质量分数及籽粒干质量

Table 3 Starch mass fraction and 1 000 grains dry mass in grains at wheat maturity

品种 Variety	直链淀粉质量分数/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Mass fraction of amylose	支链淀粉质量分数 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Mass fraction of amylopectin	总淀粉质量分数/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Mass fraction of total starch	籽粒干质量/ [$\text{g} \cdot (1\,000 \text{ 粒}^{-1})$] 1 000-grain dry mass/ [$\text{g} \cdot (1\,000 \text{ grains}^{-1})$]
扬麦 20 Yangmai 20	248.22 a	469.72 a	717.93 a	38.16 a
长糯麦 1 号 Changnuomai 1	6.92 b	443.37 a	450.28 b	35.91 b

3 讨 论

3.1 糯小麦籽粒灌浆参数

本试验中,糯小麦(‘长糯麦 1 号’)和非糯小麦对照品种(‘扬麦 20’)籽粒灌浆进程均呈“慢—快—慢”的生长规律,利用 Logistic 方程拟合的灌浆方程可靠性高,能够较好地反应籽粒灌浆进程。本研究结果表明,‘长糯麦 1 号’大部分灌浆参数与‘扬麦 20’相近,仅渐增期灌浆速率 R_1 及 3 个阶段粒质量积累量 W_1 、 W_2 和 W_3 差异显著。目前关于糯小麦灌浆特性的研究尚未见报道,本研究仅探讨了一个糯小麦品种的灌浆特性,关于多个糯小麦品种的灌浆特性的比较及温度、光照、栽培措施等对糯小麦灌浆进程的影响还需多年多点的试验性研究,从而进一步探索糯小麦灌浆的规律及受环境因素影响的效应。

3.2 糯小麦籽粒可溶性糖降解、淀粉和蛋白质积累

本研究结果表明,‘长糯麦 1 号’籽粒可溶性糖质量分数在花后 7 d 低于‘扬麦 20’,在花后 35 d 较‘扬麦 20’略高,且‘长糯麦 1 号’在灌浆过程中籽粒可溶性糖降解速率较慢,成熟期籽粒淀粉质量分数较低,说明由于 GBSS 的缺失导致糯小麦将同化物可溶性糖转化为淀粉的能力降低,这与前人研究结果一致^[19-20]。

此外,在整个灌浆过程中,‘长糯麦 1 号’与‘扬麦 20’蛋白质质量分数均呈“高一低—高”的变化趋势,表明‘长糯麦 1 号’与‘扬麦 20’在蛋白质积累上差异不显著。糯小麦缺失 GBSS 仅影响到淀粉合成的代谢过程,而对糯小麦氮代谢过程无显著影响^[20]。

前人研究结果表明,非糯小麦籽粒灌浆过程中直链淀粉质量分数先快速增加然后缓慢增加直至籽粒成熟^[21-23],糯小麦籽粒直链淀粉积累量几

乎为零,明显低于非糯小麦^[24-25],这与本研究结果一致。同时,本研究结果表明,灌浆过程中‘扬麦 20’籽粒支链淀粉质量分数先迅速上升然后缓慢上升,于花后 28 d 达到峰值,灌浆后期‘扬麦 20’籽粒支链淀粉质量分数呈下降趋势。而前人研究结果表明^[21,25],非糯小麦籽粒中支链淀粉积累在整个灌浆过程呈“慢—快—慢”的增加趋势,至成熟期支链淀粉质量分数达最大值,这与本研究结果不一致。这一结果的差异可能是由于‘扬麦 20’在灌浆后期连续遭遇高温天气,降低了支链淀粉合成速率,而高温对直链淀粉的合成影响较小^[26-27],导致支链淀粉的比重略有下降。本研究 中‘长糯麦 1 号’支链淀粉质量分数在花后 21~28 d 处于相对“停滞”状态,花后 28~35 d 继续增长,这与高德荣等^[19]研究结果一致。本研究结果表明,由于‘长糯麦 1 号’直链淀粉积累量几乎为零,支链淀粉积累量低于‘扬麦 20’,导致‘长糯麦 1 号’成熟期籽粒淀粉质量分数和粒质量都显著低于‘扬麦 20’,这与李春燕^[28]和王华君等^[29]研究结果一致,与倪静等^[20]研究结果存在差异,这一差异可能是由于供试品种遗传背景不同及环境差异所致。

本研究描述了糯小麦可溶性糖、淀粉和蛋白质在灌浆进程中的质量分数变化,后续将对糯小麦灌浆过程中糖降解、淀粉积累相关酶活性及基因表达情况进行分析,进一步揭示糯小麦淀粉积累和粒质量形成的影响因素。

参考文献 Reference:

[1] PREISS J. Biology and molecular biology of starch synthesis and its regulation[J]. *Oxford Surveys of Plant Molecular & Cell Biology*,1991,19(20):5880-5883.

[2] CHAO S,SHARP P J,WORLAND A J,*et al.* RFLP-based genetic maps of wheat homoeologous group 7 chromosomes

- [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1989, 78(4): 495-504.
- [3] CLARK J R, ROBERTSON M, AINSWORTH C C. Nucleotide sequence of a wheat (*Triticum aestivum* L.) cDNA clone encoding the waxy protein[J]. *Plant Molecular Biology*, 1991, 16(6): 1099-1101.
- [4] NAKAMURA T, YAMAMORI M, HIRANO H, *et al.* Identification of three Wx proteins in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Biochemical Genetics*, 1993, 31(1): 75.
- [5] 何中虎. 糯小麦的研究概况[J]. 作物杂志, 1999(2): 7-9.
HE ZH H. Research situation of waxy wheat[J]. *Crops*, 1999(2): 7-9.
- [6] 游新勇, 张国权, 王国泽. 糯小麦及其淀粉的研究和利用概况[J]. 粮食与饲料工业, 2011, 12(6): 7-10.
YOU X Y, ZHANG G Q, WANG G Z. Research and utilization situation of waxy wheat and its starch[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2011, 12(6): 7-10.
- [7] NAKAMURA T, YAMAMORI M, HIRANO H, *et al.* Production of waxy (amylose-free) wheats[J]. *Molecular Genetics and Genomics*, 1995, 248(3): 253-259.
- [8] 尤明山. 我国糯性小麦首创成功[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(2): 7.
YOU M SH. The first waxy wheat in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Thechnology*, 2000, 2(2): 7.
- [9] GRAYBOSCH R A. Waxy wheats: origin, properties, and prospects[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1998, 9(4): 135-142.
- [10] 周文春, 赵寅槐. 糯小麦的遗传、选育和应用前景[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 118-123.
ZHOU W CH, ZHAO Y H. Genetics, selection and prospects of waxy wheat[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2000, 16(2): 118-123.
- [11] SHEVKANI K, SINGH N, BAJAJ R, *et al.* Wheat starch production, structure, functionality and applications-a review[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2017, 52(1): 38-58.
- [12] 郭俊良, 张 敏, 刘希伟, 等. 氮肥用量对糯小麦和普通小麦干物质积累和产量影响的比较研究[J]. 华北农学报, 2014, 29(增刊): 292-298.
GUO J L, ZHANG M, LIU X W, *et al.* Comparative study on the effect of nitrogen rate on dry matter accumulation and grain yield between waxy and common wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(Supp): 292-298.
- [13] 訾 妍. 糯小麦高产群体形成生理与密肥调控技术研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2015.
ZI Y. Physiological mechanism of high-yielding population and regulation techniques with plant density and nitrogen application in waxy wheat[D]. Yangzhou Jiangsu: Yangzhou University, 2015.
- [14] DARROCH B A, BAKER R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. *Crop Science*, 1990, 30(3): 525-529.
- [15] 莫惠栋. 农业试验统计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992.
MO H D. Statistics of Agricultural Experiments[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1992.
- [16] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1990.
ZHANG ZH L. Experimental Guidance in Plant Physiology[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [17] 中华人民共和国农业部种植业管理司. 植株全氮含量测定-自动定氮仪法: NY/T2419-2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
Department of Plant Management, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of Total Nitrogen Content of Plant-Automatic Nitrogen Determination Method: NY/T2419-2013[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [18] 田纪春. 谷物品质测试理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TIAN J CH. Theory and Method of Grain Quality Testing[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [19] 高德荣, 郭文善, 程顺和, 等. 糯小麦籽粒糖降解和淀粉积累特性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1890-1897.
GAO D R, GUO W SH, CHENG SH H, *et al.* Characteristics of sugar degradation and starch accumulation in waxy wheat garins after anthesis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1890-1897.
- [20] 倪 静, 徐智斌, 王 涛. 糯小麦灌浆期籽粒糖类、淀粉及蛋白质的动态研究[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 509-514.
NI J, XU ZH B, WANG T. Dynamic changes of grain sugar, starch, protein contents during grain filling stage in waxy wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(3): 509-514.
- [21] 方先文, 姜 东, 戴廷波, 等. 小麦淀粉组分的积累规律[J]. 江苏农业学报, 2002, 18(3): 139-142.
FANG X W, JIANG D, DAI T B, *et al.* Accumulation regularity of starch components in wheat varieties[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2002, 18(3): 139-142.
- [22] 王文静, 高桂立, 罗 毅, 等. 三个不同品质类型冬小麦品种籽粒淀粉积累动态及其有关酶的活性变化[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1305-1309.
WANG W J, GAO G L, LUO Y, *et al.* Dynamic changes of starch accumulation and enzymes relating to starch synthesis in the grain of three winter cultivars with different quality types[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(10):

1305-1309.

[23] 曹颖妮,胡卫国,王根平,等. 糯性和非糯性小麦灌浆期胚乳直/支链淀粉积累及其相关酶活性研究[J]. 西北植物学报,2010,30(10):1995-2001.

CAO Y N,HU W G,WANG G P,*et al.* Dynamic changes of starch accumulation and enzymes relating to starch biosynthesis of kernel during grain filling in waxy and non-waxy winter wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*,2010,30(10):1995-2001.

[24] 谭彩霞,封超年,郭文善,等. 不同小麦品种籽粒淀粉合成酶基因的表达及其与淀粉积累的关系[J]. 麦类作物学报,2011,31(6):1063-1070.

TAN C X,FENG CH N,GUO W SH,*et al.* Difference in expression of starch synthase gene and starch synthesis in the grains of diffent wheat cultivars[J]. *Journal of Triticeae Crops*,2011,31(6):1063-1070.

[25] 谭彩霞,封超年,郭文善,等. 不同类型小麦品种籽粒蔗糖含量变化与淀粉积累特征的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2011,32(3):47-51.

TAN C X,FENG CH N,GUO W SH,*et al.* Study on the characteristics of sucrose and starch accumulation in grains of different types wheat cultivars[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*,2011,32(3):47-51.

[26] 同素辉. 小麦胚乳淀粉合成、粒度分布特征及对花后高温的响应[D]. 山东泰安:山东农业大学,2009.

YAN S H. Starch synthesis and granule size distribution of developing wheat endosperm in response to post anthesis high temperature[D]. Tai'an Shandong:Shandong Agricultural University,2009.

[27] RICK M,JOHN M. Effects of environmental temperature on structure and gelatinization properties of wheat starch[J]. *Cereal Chemistry*,2007,80(4):476-480.

[28] 李春燕. 小麦籽粒淀粉形成的理化基础及其对氮肥的响应机制[D]. 江苏扬州:扬州大学,2006.

LI CH Y. Physicochemical bases of starch development in wheat grains and its response mechanism to nitrogen fertilizer[D]. Yangzhou Jiangsu:Yangzhou University,2006.

[29] 王华君,张文明,姚大年,等. 糯小麦及非糯普通小麦若干农艺和品质性状的比较研究[J]. 安徽农业大学学报,2006,33(2):248-251.

WANG H J,ZHANG W M,YAO D N,*et al.* Some agronomy and quality in waxy and common wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*,2006,33(2):248-251.

Dynamic Changes of Grain Mass and Mass Fraction of Main Nutritional Components in Grains of Waxy Wheat

SONG Guihua¹,MA Dongfang¹,WANG Shuping¹,
GAO Derong² and FANG Zhengwu¹

(1. Hubei Center for Collaborative Innovation of Grain Industry,College of Agriculture,Yangtze University,Jingzhou Hubei 434025,China; 2. Lixiahe Institute of Agricultural Sciences,Yangzhou Jiangsu 225007,China)

Abstract The objective of this study was to understand the characteristics of grain filling and dynamic changes of mass fraction of nutritional components in grains of waxy wheat, and to provide some reference for the breeding and production of waxy wheat. One waxy wheat variety(‘Changnuomai 1’) and one check variety(‘Yangmai 20’) were planted over two cropping seasons in experimental field of Agricultural College of Yangtze University. Grain mass ,mass fraction of soluble sugar, protein and starch of two varieties were determined in different phase of grain filling. The results suggested that grain-filling rate in T_1 phase(R_1), Grain mass accumulation in T_1 phase(W_1), grain mass accumulation in T_2 phase(W_2) and Grain mass accumulation in T_3 phase(W_3) in ‘Changnuomai 1’ were significantly lower than ‘Yangmai 20’. During grain filling period, the mass fraction of protein showed similar dynamic changes between waxy and non-waxy wheat, however, mass fraction of soluble sugar, amylose and amylopectin showed remarkable different dynamic changes between ‘Changnuomai 1’ and ‘Yangmai 20’. Comparing with ‘Yangmai 20’, ‘Changnuomai 1’ had lower soluble sugar degradation rate and higher mass fraction of soluble sugar in mature grain. The mass fraction of amylopectin in ‘Yangmai 20’ increased rapidly at early stage of grain filling and reached the maximum value at 28 d after anthesis and then decreased. The amylopectin accumulation rate of ‘Changnuomai 1’ was slower than

‘Yangmai 20’, and mass fraction of amylopectin of ‘Changnuomai 1’ reached the maximum value at 35 d after anthesis. However, ‘Changnuomai 1’ had a stagnate phase of amylopectin mass fraction increase during 21—28 d after anthesis. Grain dry mass ,mass fraction of amylose and total starch of mature seeds of ‘Changnuomai 1’ were obviously lower than ‘Yangmai 20’. In conclusion,grain filling characteristic,soluble sugar degradation and starch accumulation had greatly difference between waxy wheat and ‘Yangmai 20’. Therefore,rate of grain filling,efficiency of soluble sugar degradation and transformation and synthetic rate of amylopectin should be paid more attention to in waxy wheat breeding to improve grain mass.

Key words Waxy wheat; Grain filling; Soluble sugar; Starch; Protein

Received 2017-06-28 **Returned** 2017-08-18

Foundation item Nature Science Foundation of Hubei Province (No. 2016CFB478); Special Fund for Breeding of Seven Main Crops(No. 2017YFD0100800).

First author SONG Guihua,male,master student. Research area: crop genetics and breeding. E-mail: ghsong0229@126.com

Corresponding author FANG Zhengwu,male,associate professor. Research area: wheat genetics and breeding. E-mail:fangzhengwu88@163.com

(责任编辑:潘学燕 Responsible editor: PAN Xueyan)



常见废弃量名称与标准量名称对照表

废弃量名称	标准量名称
比重	体积质量,[质量]密度,相对体积质量,相对密度
绝对温度,开氏温度	热力学温度
比热	质量热容,比热容
电流强度	电流
电量	电荷[量]
分子量	相对分子质量,分子质量
重量百分数,重量百分浓度	质量分数
体积百分数,体积百分浓度	体积分数
摩尔浓度,当量浓度	物质的量浓度,浓度
粒子剂量	粒子注量
放射性强度,放射性	[放射性]活度