

## 干旱胁迫对小麦不同品种胚乳淀粉结构和理化特性的影响

宋霄君<sup>1,2</sup>, 张敏<sup>1</sup>, 武雪萍<sup>2</sup>, 赵城<sup>1</sup>, 石剑<sup>1</sup>, 张玉春<sup>1</sup>, 刘希伟<sup>1</sup>, 蔡瑞国<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河北科技师范学院生命科技学院, 河北昌黎 066600; <sup>2</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

**摘要:**【目的】全面了解干旱胁迫对小麦不同品种胚乳淀粉组成、粒度分布、糊化特性以及晶体特性的影响, 揭示小麦淀粉结构与理化特性的内在关系。【方法】2013—2015 年度以小麦品种京冬 8 (JD8)、河农 825 (HN825)、冀麦 585 (JM585)、农大 211 (ND211) 为试验材料, 设节水灌溉 (W) 和旱作 (D) 2 种处理, 研究干旱胁迫对小麦胚乳淀粉结构及其理化特性的影响。【结果】干旱胁迫显著抑制了小麦胚乳淀粉的积累, 但对小麦淀粉直/支比的影响不显著。小麦胚乳淀粉粒体积、表面积和数目分布均呈双峰曲线变化, 干旱胁迫对淀粉粒粒度分布的影响因基因型和粒径大小的不同而存在差异, 其中对粒径 < 5 μm 淀粉粒的表面积、数目分布影响最大。干旱胁迫未改变小麦胚乳淀粉的晶体类型, 但显著提高了小麦淀粉的结晶度, 对小麦淀粉 X-衍射图谱中各尖峰强度的影响因品种和衍射角的不同而存在差异。干旱胁迫显著提高了小麦淀粉的低谷黏度和糊化温度, 延长了糊化时间, 但显著降低了小麦淀粉的峰值黏度和稀懈值, 对终结黏度和回生值的影响存在基因型差异。相关分析表明, 小麦胚乳淀粉结晶度与总淀粉和直链淀粉含量呈显著负相关, 与支链淀粉呈显著正相关。总淀粉含量与峰值黏度呈显著正相关。直链淀粉含量与峰值黏度和稀懈值呈显著正相关, 与糊化温度呈显著负相关。支链淀粉含量与糊化特性的相关性不显著, 而淀粉直/支比仅与糊化时间呈显著负相关。小麦胚乳淀粉中粒径 < 5 μm 和 < 10 μm 的淀粉粒体积百分比与终结黏度和回生值均分别呈显著、极显著负相关, 而粒径 > 15 μm 的淀粉粒与终结黏度和回生值均呈显著正相关。小麦淀粉粒体积分布与结晶度的相关性不显著。小麦淀粉糊化峰值黏度和稀懈值与结晶度分别呈极显著和显著负相关, 而糊化温度与结晶度呈显著正相关。【结论】干旱胁迫改变了小麦胚乳淀粉组分、粒度分布、结晶度及其主要糊化参数。小麦胚乳淀粉结构与晶体特性和糊化特性之间均存在明显的相关性, 表明干旱对小麦淀粉结构的影响, 间接影响了其理化特性, 因此, 可以通过调节水分条件来生产一定品质的小麦。

**关键词:** 小麦; 淀粉; 干旱胁迫; 淀粉结构; 晶体特性; 糊化特性

## Effects of Drought Stress on Wheat Endosperm Starch Structure and Physicochemical Properties of Different Varieties

SONG XiaoJun<sup>1,2</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, WU XuePing<sup>2</sup>, ZHAO Cheng<sup>1</sup>, SHI Jian<sup>1</sup>,  
ZHANG YuChun<sup>1</sup>, LIU XiWei<sup>1</sup>, CAI RuiGuo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Life Science and Technology Institute, Hebei Normal University of Science & Technology, Changli 066600, Hebei; <sup>2</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081)

**Abstract:** 【Objective】The objective of this experiment is to study the effects of drought stress on the composition, granule size distribution, pasting properties and crystal properties of wheat endosperm of different varieties, and reveal the intrinsic relationship between the structure and physicochemical properties of wheat starch. 【Method】The wheat cultivars Jingdong8(JD8), Henong825(HN825), Jimai585(JM585) and Nongda211(ND211) were used as the test materials, and irrigated and rainfed treatments

收稿日期: 2016-06-06; 接受日期: 2016-08-17

基金项目: 国家自然科学基金 (31201157)、河北省自然科学基金 (C2015407061)、河北省教育厅优秀青年基金 (Y2012032)、国家科技支撑计划 (2015BAD22B03)、国家重点研发计划 (2016YFD300804)

联系方式: 宋霄君, E-mail: sxj15117957377@163.com. 通信作者蔡瑞国, Tel: 0335-2037496; E-mail: cairuiguo@126.com

were designed in research of the effects of drought stress on wheat endosperm starch structure and physicochemical properties.

**【Result】**Drought stress significantly inhibited the accumulation of starch in wheat endosperm, but it had no significant effect on the Am/Ap ratio of wheat starch. The granule volume, surface area and number distribution of wheat endosperm showed a bimodal curve. The effect of drought stress on starch grain size distribution of wheat endosperm was different due to the difference of genotype and grain size, in which it had a great influence on the surface area and the number distribution of starch granule size  $<5\ \mu\text{m}$ . Drought stress didn't change the crystal type of wheat endosperm starch, but significantly increased the crystallinity of starch, and the effects of drought stress on intensity of X-ray diffraction peak were different due to different cultivars and diffraction angles. Drought stress significantly increased trough viscosity and pasting temperature of starch, prolonged the pasting time, while significantly reduced the peak viscosity and breakdown, and there was a genotypic difference in final viscosity and setback. Correlation analysis showed a that the wheat endosperm starch crystallinity showed significant negative correlation with total starch and Am content, and a significant positive correlation with Ap content. The total starch content showed a significant positive correlation with peak viscosity. The Am content showed a significant positive correlation with peak viscosity and breakdown, and a negative correlation with the pasting temperature. The correlation between the Ap content and pasting parameters was not significant, while the Am/Ap ratio of wheat starch showed a significant negative correlation with the pasting time. The volume of  $<5\ \mu\text{m}$  and  $<10\ \mu\text{m}$  starch granule, respectively, showed a significant and an extreme significant negative correlation with final viscosity and setback, but the starch granule with diameter  $>15\ \mu\text{m}$  was positively correlated with final viscosity and setback. The correlation between granule volume distribution and crystallinity of wheat was not significant. Wheat starch peak viscosity and breakdown, respectively, showed an extremely significant and significant negative correlation with crystallinity, but there was a significant positive correlation between the pasting temperature and crystallinity. **【Conclusion】**Drought stress changed the wheat endosperm starch composition, granule size distribution, crystallinity and pasting parameters. There were significant correlations between wheat endosperm starch structure and physicochemical properties, indicating that the effects of drought stress on the structure of wheat starch, indirectly affected the physicochemical properties, therefore, the cultivation conditions could be adjusted to achieve the purpose of quality wheat production.

**Key words:** wheat; starch; drought stress; starch structure; crystal properties; pasting properties

## 0 引言

**【研究意义】**小麦是中国主要粮食作物。淀粉是小麦籽粒胚乳中的重要组成部分,广泛应用于食品和非食品工业中,是决定小麦品质的主要成分<sup>[1]</sup>。小麦胚乳淀粉品质主要包括淀粉组分、结晶度和糊化特性等<sup>[2]</sup>。研究表明,在小麦胚乳淀粉中,支链淀粉含量、总淀粉含量与结晶度呈正相关,而直链淀粉含量、直/支比与结晶度呈负相关<sup>[3]</sup>。籽粒总淀粉和支链淀粉含量与峰值粘度、低谷粘度和终结粘度等糊化参数间存在显著或极显著相关性<sup>[4]</sup>。随着全球气候变暖、降水减少以及水资源的污染和浪费,中国小麦主产区在小麦生长发育期间干旱频发,严重影响了小麦的产量和品质<sup>[5]</sup>。因此,研究干旱胁迫对小麦淀粉结构和理化特性的影响,以及淀粉结构与理化特性间的相互关系,有助于拓宽对淀粉品质特性的认识,对于了解小麦淀粉品质的内在差异与改良关键技术的研究具有重要意义。**【前人研究进展】**小麦胚乳淀粉包含分子结构和颗粒结构 2 个结构层次<sup>[6]</sup>。小麦淀粉分子由两类淀粉分子组成:直链淀粉和支链淀粉。支链淀粉分子以双螺旋结构形成了淀粉颗粒内的结晶区,直链淀粉分子

以较松散的结构形成了淀粉颗粒的无定形区<sup>[7]</sup>。环境胁迫对小麦胚乳淀粉颗粒结晶区的晶胞结构和微晶排列存在一定影响<sup>[8]</sup>。不同大小的淀粉颗粒晶体结构相似,但晶态和非晶态的两相差异较明显<sup>[9]</sup>。蔡瑞国等<sup>[3]</sup>研究认为小麦胚乳淀粉颗粒的结晶度高低与小麦籽粒直、支链淀粉含量和直/支比有关,同时存在基因型差异。宋建民等<sup>[10]</sup>研究表明直、支链淀粉含量在决定面粉糊化特性方面具有重要作用,直链淀粉含量与各项黏度指标呈极显著负相关,同时支链淀粉含量与 RVA 各项参数的相关性也基本达到显著和极显著水平,但总淀粉含量与各项参数的相关性较差。然而,王晨阳等<sup>[4]</sup>通过对小麦进行花后渍水、高温及其复合胁迫,发现淀粉总含量、支链淀粉含量与主要糊化参数呈显著或极显著正相关,而直链淀粉含量与糊化时间和低谷粘度呈显著和极显著正相关。小麦胚乳淀粉颗粒的形成是一个受发育调节的过程<sup>[11]</sup>,以大小不同的形式存在于籽粒胚乳中。一般认为,成熟小麦胚乳中含 A 型(10—35  $\mu\text{m}$ )和 B 型(1—10.0  $\mu\text{m}$ ) 2 种淀粉颗粒<sup>[12]</sup>,而 GREJAS 等<sup>[13]</sup>将小麦胚乳淀粉颗粒细化为(G<sub>1</sub>  $<1\ \mu\text{m}$ 、G<sub>2</sub> 1—5.0  $\mu\text{m}$ 、G<sub>3</sub> 5.1—10.0  $\mu\text{m}$ 、G<sub>4</sub> 10.1—15.0  $\mu\text{m}$ 、G<sub>5</sub> 15.1—28.0  $\mu\text{m}$ 和 G<sub>6</sub>  $>28.1\ \mu\text{m}$ ) 6 个粒级,不同

大小的淀粉粒中其直链淀粉和支链淀粉含量存在差异<sup>[14]</sup>。小麦胚乳淀粉粒的体积分布、表面积分布和数目分布很大程度上受遗传因素控制,但环境条件对其也有十分显著的影响<sup>[15-17]</sup>。MORRIS 等<sup>[18]</sup>认为环境条件通过影响不同大小淀粉粒的分布,进而影响面粉的糊化特性和膨胀势。【本研究切入点】关于干旱胁迫对不同品种小麦淀粉结构和理化特性的全面分析,以及淀粉结构与理化特性间的内在关系鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究以 4 个小麦品种为材料,以期全面了解干旱胁迫对小麦胚乳淀粉组成、粒度分布、糊化特性以及晶体特性的影响,揭示小麦淀粉结构与理化特性的内在关系,为预测水分条件对小麦淀粉品质的影响提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

于 2013—2015 年在河北科技师范学院昌黎校区农场大田进行。供试材料为京冬 8 (JD8)、河农 825 (HN825)、冀麦 585 (JM585) 和农大 211 (ND211) 4 个小麦品种。供试小麦品种为河北科技师范学院作物栽培课题组通过品种比较试验筛选所得,其中,京冬 8 抗旱性最好,但总产量较低,而河农 825 抗旱性

较差,但总产量最高,冀麦 585 和农大 211 的综合条件居中。试验地土壤类型为砂壤土,试验地耕层 (0—20 cm) 土壤有机质含量为 19.25 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 0.34 g·kg<sup>-1</sup>、水解氮 57.5 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 39 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 75 mg·kg<sup>-1</sup>。分别于 2013 年 10 月 3 日和 2014 年 10 月 2 日播种。基本苗 375 万/hm<sup>2</sup>,小区面积 9 m<sup>2</sup>(3 m×3 m),3 次重复,20 cm 行距,3 叶期定苗。采用裂区设计,主区为水分,副区为品种。分别于 2014 年 6 月 15 日和 2015 年 6 月 14 日收获。

### 1.2 试验设计

试验设节水灌溉 (全生育期内浇越冬水、拔节水和开花水,每个小区每次灌水 50 m<sup>3</sup>,灌水时采用水表控制, W) 和旱作 (全生育期不浇水, D) 2 种处理。在小麦籽粒灌浆期采用烘干称重法测定不同处理下土壤中的含水量值 (表 1)。据昌黎气象台监测数据,该区 2013 和 2014 年度小麦在越冬期、拔节期和开花期的降水量分别为 0.3、7.3 和 89.7 mm 及 4.2、0.2 和 28.6 mm。小麦生育期内及时除草、灭虫,管理方式参考当地高产小麦的技术规程,小麦植株生长状况良好。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 淀粉的提取 参照 PENG 等<sup>[19]</sup>的方法并略作修改提取淀粉。

表 1 小麦籽粒灌浆中期不同土层的含水量

Table 1 Water content of different soil layers at middle grain filling stage of wheat

土层厚度 Soil depth (cm)	土壤含水量 Soil moisture content (%)			
	2013—2014		2014—2015	
	灌溉 W	旱作 D	灌溉 W	旱作 D
0—20	10.67a	6.11b	10.41a	5.92b
20—40	13.52a	7.97b	13.24a	7.75b
40—60	15.08a	11.34b	14.86a	11.02b

每行中不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。W 代表水地, D 代表旱地。下同

In each row, different letters are significantly different at  $P<0.05$ . W means irrigated land, D means dryland. The same as below

1.3.2 籽粒淀粉及其组分含量测定 小麦籽粒总淀粉含量采用蒽酮比色法<sup>[20]</sup>,测定总淀粉占籽粒重的百分比;采用碘-淀粉比色法测定直链淀粉占籽粒重的百分比<sup>[21]</sup>;支链淀粉含量为总淀粉百分比和直链淀粉百分比的差值。

1.3.3 淀粉粒度分布测定 采用 LS13320 型激光衍射粒度分析仪 (美国贝克曼库尔特公司) 进行测定。具体测定参照 ZHANG 等<sup>[14]</sup>的方法并略作修改。

1.3.4 淀粉糊化特性测定 利用 RVA4500 型快速黏

度分析仪 (瑞典波通公司)。取 3.5 g 提纯淀粉,参照 GB/T 24853-2010 方法进行测定。

1.3.5 淀粉晶体特性测定 采用日本理学 D/max2500PC 型粉末 X-射线衍射仪。参照蔡瑞国等<sup>[3]</sup>的方法进行测定。

### 1.4 统计分析

应用 Microsoft Excel、SPSS16.0、Jade 5.0、RVA4500 型快速黏度分析仪自带软件和 LS13 320 型激光衍射粒度分析仪自带软件对所有数据进行统计分析和绘图。

## 2 结果

### 2.1 干旱胁迫对小麦淀粉含量的影响

两年分析结果可知(表 2), 小麦总淀粉含量占籽粒重量的 61%—69%。干旱胁迫显著抑制了小麦籽粒

中总淀粉、直链淀粉以及支链淀粉的积累, 但对小麦淀粉直/支比的影响不显著。两年间表现一致。

### 2.2 干旱胁迫对小麦淀粉粒度分布的影响

小麦胚乳淀粉粒体积、表面积和数目分布均呈双峰曲线变化, 但数目分布的小峰可能不太明显(图 1)。

表 2 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉及其组分含量的影响

Table 2 Effect of drought stress on wheat endosperm starch compositions

品种 Cultivar	处理 Treatment	2013-2014					2014-2015						
		总淀粉 Total starch (%)	直链淀粉 Amylose (%)	支链淀粉 Amylopectin (%)	直/支比 Amylose/A mylopectin	千粒重 1000- grain weight (g)	实际产量 Actual yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	总淀粉 Total starch (%)	直链淀粉 Amylose (%)	支链淀粉 Amylopectin (%)	直/支比 Amylose/A mylopectin	千粒重 1000- grain weight (g)	实际产量 Actual yield (kg·hm <sup>-2</sup> )
JD8	W	68.87a	18.84a	50.03a	0.38a	48.86a	8 339.40a	69.14a	18.80a	50.34a	0.37a	48.92a	8 341.50a
	D	63.27b	16.47b	46.80b	0.35a	47.74a	6 756.90b	63.07b	16.20b	46.87b	0.35a	47.73a	6 732.60b
HN825	W	67.55a	19.08a	48.47a	0.39a	40.51b	9 860.55a	66.55a	19.48a	47.07a	0.41a	40.48b	9 860.10a
	D	64.68b	17.43b	47.25a	0.37a	42.20a	7 537.65b	61.68b	17.60b	44.08b	0.40a	42.17a	7 528.55b
ND211	W	68.91a	17.82a	51.09a	0.35a	42.89b	9 334.65a	68.94a	18.73a	50.21a	0.37a	42.90b	9 340.50a
	D	63.65b	15.96b	47.69b	0.33a	48.57a	7 111.50b	61.92b	16.50b	45.42b	0.36a	48.48a	7 108.65b
JM585	W	68.22a	17.95a	50.26a	0.36a	42.95b	9 085.80a	67.32a	17.92a	49.39a	0.36a	42.93b	9 086.00a
	D	61.95b	15.74b	46.21b	0.34a	45.48a	7 329.00b	61.05b	16.20b	44.85b	0.36a	45.42a	7 321.80b

同一品种同一列的不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同

Different letters within column of the same cultivar mean significant difference among treatment at 0.05 probability. The same as below

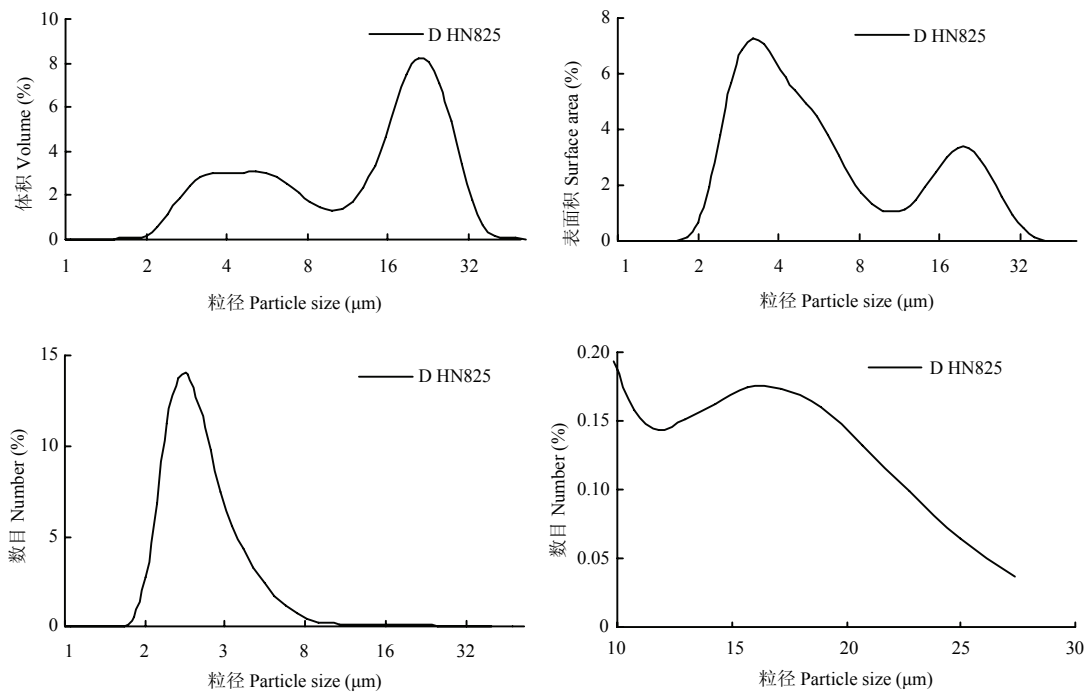


图 1 2013—2014 生长季旱地 HN825 籽粒淀粉的体积、表面积和数目分布图

Fig. 1 Distribution of volume, surface area and number of HN825 grains grown in dryland in 2013-2014 growing season

2.2.1 淀粉粒体积分布 与 JM585 相反, 干旱胁迫显著增大了 JD8 和 HN825 小麦淀粉中粒径  $<5 \mu\text{m}$  和  $<10 \mu\text{m}$  的淀粉粒的体积百分比, 却显著降低了粒径  $>15 \mu\text{m}$  的淀粉粒的体积百分比, 但对 ND211 不同粒径淀粉粒的体积分布影响不显著 (表 3)。旱作栽培条件下, JD8、HN825 和 ND211 的淀粉粒体积分布的平均粒径和中位粒径变小, 而 JM585 的情况正好相反。但干旱胁迫对平均粒径和中位粒径以及粒径为  $5\text{—}10 \mu\text{m}$ 、 $10\text{—}15 \mu\text{m}$  的淀粉粒影响不显著。

2.2.2 淀粉粒表面积分布 分析表明 (表 4), 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉粒表面积分布的影响同体积分布一致。此外, 干旱胁迫对不同粒径淀粉粒表面积分布的影响表现为粒径  $<5 \mu\text{m}$  的淀粉粒最大, 粒径  $<10 \mu\text{m}$  的淀粉粒次之, 粒径  $>15 \mu\text{m}$  的淀粉粒最小。

2.2.3 淀粉粒数目分布 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉粒数目分布的影响存在基因型差异 (表 5), 其中, 干旱胁迫显著促进了 JD8 淀粉中粒径  $<5 \mu\text{m}$  和粒径  $<10$

$\mu\text{m}$  的淀粉粒的积累, 却抑制了粒径  $5\text{—}10 \mu\text{m}$ 、 $10\text{—}15 \mu\text{m}$  和  $>15 \mu\text{m}$  的淀粉粒的产生, 而 JM585 正好相反。干旱胁迫显著增多了 ND211 淀粉中  $5\text{—}10 \mu\text{m}$  和  $10\text{—}15 \mu\text{m}$  的淀粉粒, 但显著降低了  $<5 \mu\text{m}$  的淀粉粒, 对 HN825 的影响不显著。干旱胁迫对不同粒径淀粉粒数目分布的影响表现为粒径  $<5 \mu\text{m}$  的淀粉粒最大, 粒径  $<10 \mu\text{m}$  的淀粉粒次之, 粒径  $>15 \mu\text{m}$  的淀粉粒最小, 这表明干旱胁迫主要影响了小麦籽粒淀粉中小淀粉粒 ( $<5 \mu\text{m}$ ) 的积累。旱作栽培条件下, HN825、ND211 和 JM585 淀粉粒数目分布的平均粒径和中位粒径变大, 而 JD8 的情况正好相反, 但处理间差异不显著。

### 2.3 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉晶体特性的影响

对小麦胚乳淀粉 X-射线衍射图谱进行分析 (图 2), 发现小麦淀粉在衍射角  $2\theta$  为  $15^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $23^\circ$  时有明显的吸收峰, 且在  $2\theta$  为  $17^\circ$  和  $18^\circ$  附近有相连的双峰, 呈谷物淀粉典型的 A 型特征。表明干旱胁迫并没有改变小麦淀粉的晶体类型。干旱胁迫显著

表 3 2014—2015 干旱胁迫对小麦淀粉粒体积分布的影响

Table 3 Effect of drought stress on wheat starch granule volume distribution in 2014-2015 (%)

品种 Cultivar	处理 Treatment	淀粉颗粒粒径百分比					平均粒径 Average diameter ( $\mu\text{m}$ )	中位粒径 Medium diameter ( $\mu\text{m}$ )
		$<5 \mu\text{m}$	$5\text{—}10 \mu\text{m}$	$<10 \mu\text{m}$	$10\text{—}15 \mu\text{m}$	$>15 \mu\text{m}$		
JD8	W	15.73b	15.77a	31.50b	9.30a	59.20a	16.87a	17.96a
	D	21.00a	17.37a	38.37a	7.73a	53.90b	15.51a	16.41a
HN825	W	16.45b	18.60a	35.05b	10.30a	54.65a	15.65a	16.47a
	D	19.83a	18.70a	38.53a	11.10a	50.37b	14.51a	15.11a
ND211	W	18.93a	19.27a	38.20a	9.37a	52.43a	15.51a	15.94a
	D	18.43a	20.77a	39.20a	10.30a	50.50a	14.84a	15.20a
JM585	W	29.17a	17.13a	46.30a	7.30b	46.40b	13.95a	13.06a
	D	20.43b	16.37a	36.80b	10.57a	52.63a	14.83a	15.84a

表 4 2014—2015 生长季干旱胁迫对小麦淀粉粒表面积分布的影响

Table 4 Effect of drought stress on wheat starch granule surface area distribution in 2014-2015 (%)

品种 Cultivar	处理 Treatment	淀粉颗粒粒径百分比					平均粒径 Average diameter ( $\mu\text{m}$ )	中位粒径 Medium diameter ( $\mu\text{m}$ )
		$<5 \mu\text{m}$	$5\text{—}10 \mu\text{m}$	$<10 \mu\text{m}$	$10\text{—}15 \mu\text{m}$	$>15 \mu\text{m}$		
JD8	W	43.73b	23.17a	66.90b	7.23a	25.87a	9.82a	5.67a
	D	51.20a	22.67a	73.87a	5.27a	20.87b	8.57a	4.91a
HN825	W	44.93b	25.05a	69.98b	7.40a	22.63a	9.02a	5.67a
	D	48.43a	23.73a	72.17a	7.53a	20.30b	8.51a	5.15a
ND211	W	47.20a	25.37a	72.57a	6.63a	20.80a	8.82a	5.25a
	D	45.20a	27.03a	72.23a	7.27a	20.50a	8.77a	5.44a
JM585	W	62.03a	18.87a	80.90a	4.10b	15.00b	7.19a	4.10a
	D	51.07b	20.77a	71.83b	7.13a	21.03a	8.47a	4.89a

表 5 2014—2015 生长季干旱胁迫对小麦淀粉粒数目分布的影响

Table 5 Effect of drought stress on wheat starch granule number distribution in 2014-2015 (%)

品种 Cultivar	处理 Treatment	淀粉颗粒粒径百分比 Percentage of different ranges of starch granule size					平均粒径 Average diameter ( $\mu\text{m}$ )	中位粒径 Medium diameter ( $\mu\text{m}$ )
		<5 $\mu\text{m}$	5—10 $\mu\text{m}$	<10 $\mu\text{m}$	10—15 $\mu\text{m}$	>15 $\mu\text{m}$		
JD8	W	85.60b	12.17a	97.77b	1.00a	1.24a	3.87a	3.26a
	D	87.80a	10.70b	98.50a	0.63b	0.89b	3.71a	3.20a
HN825	W	86.95a	11.15a	98.10a	0.90a	1.01a	3.67a	3.06a
	D	87.07a	11.03a	98.10a	0.89a	0.96a	3.74a	3.18a
ND211	W	85.73a	12.47b	98.20a	0.87b	0.95a	3.83a	3.27a
	D	84.23b	13.73a	97.97a	1.03a	1.02a	3.93a	3.34a
JM585	W	92.10a	7.00b	99.10a	0.40b	0.50b	3.37a	2.98a
	D	89.47b	8.87a	98.33b	0.77a	0.90a	3.54a	3.02a

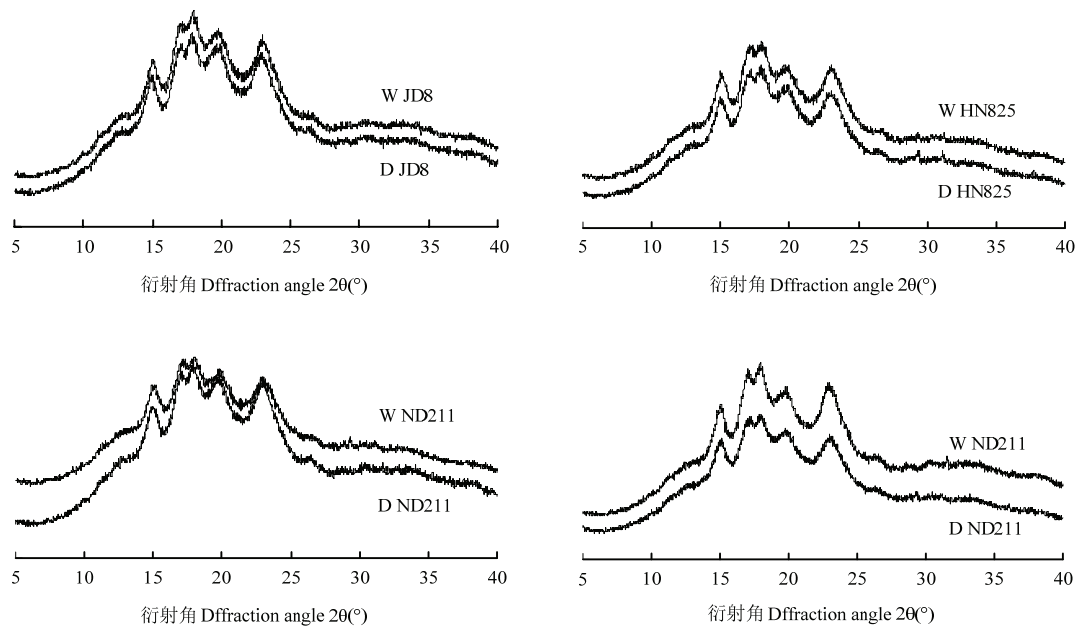


图 2 2013—2014 生长季干旱胁迫对小麦淀粉 X-衍射图谱的影响

Fig. 2 Effect of drought stress on X-ray diffraction spectrum of wheat starch in 2013-2014

提高了小麦淀粉的结晶度, 说明干旱栽培有助于小麦淀粉颗粒内部结晶区的形成。

由表 6 可知, 干旱胁迫对小麦淀粉 X-射线衍射图谱中各尖峰的强度存在明显的调控效应, 2013—2014 年度干旱胁迫显著增加了 JD8 在  $2\theta$  为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $23^\circ$  时的尖峰强度, 降低了  $2\theta$  为  $17^\circ$  和  $18^\circ$  时的尖峰强度, 使 HN825 在  $2\theta$  为  $15^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $18^\circ$  和  $23^\circ$  时的尖峰强度均降低, 但显著增加了  $2\theta$  为  $20^\circ$  时的尖峰强度。干旱胁迫显著增加了 ND211 所有衍射峰的尖峰强度, 却显著降低了 JM585 所有衍射峰的尖峰强度; 2014—2015

年度干旱胁迫对 JD8、ND211 和 JM585 衍射尖峰强度的影响保持一致, 但显著降低了 HN825 所有衍射峰的尖峰强度。这表明干旱胁迫对小麦淀粉 X-衍射图谱中各尖峰强度的影响因品种和衍射角的不同而存在差异。

#### 2.4 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉糊化特性的影响

稀糊值、糊化时间和糊化温度能够很好地反映小麦淀粉粒结构的紧密性和稳定性。由图 3 和表 7 可知, 干旱胁迫显著降低了小麦淀粉 (除 JM585) 的峰值黏度和稀糊值, 并提高了糊化温度, 延长了糊化时间,

表 6 干旱胁迫对小麦淀粉结晶度和 X-衍射图谱尖峰强度的影响

Table 6 Effect of drought stress on crystallinity and intensity of X-ray diffraction peak of wheat starch

品种 Cultivar	处理 Treatment	2013—2014						2014—2015					
		结晶度 Crystallinity (%)	尖峰强度 Intensity of X-ray diffraction peaks (cp)					结晶度 Crystallinity (%)	尖峰强度 Intensity of X-ray diffraction peaks (cp)				
			20=15°	20=17°	20=18°	20=20°	20=23°		20=15°	20=17°	20=18°	20=20°	20=23°
JD8	W	22.26b	578b	895a	973a	651b	751b	21.04b	578b	886a	965a	669b	749b
	D	23.89a	598a	766b	898b	682a	807a	22.28a	590a	764b	898b	695a	844a
HN825	W	22.44b	647a	752a	760a	456b	689a	23.86b	634a	745a	780a	498a	688a
	D	23.70a	573b	718b	738b	497a	601b	24.10a	573b	709b	761b	441b	600b
ND211	W	22.00b	454b	641b	663b	479b	611b	21.58b	443b	641b	663b	476b	590b
	D	23.57a	485a	756a	823a	542a	759a	22.40a	491a	746a	816a	532a	765a
JM585	W	22.64b	685a	970a	1019a	583a	917a	20.91b	675a	970a	1022a	584a	900a
	D	23.29a	519b	718b	720b	452b	619b	21.87a	518b	706b	709b	448b	630b

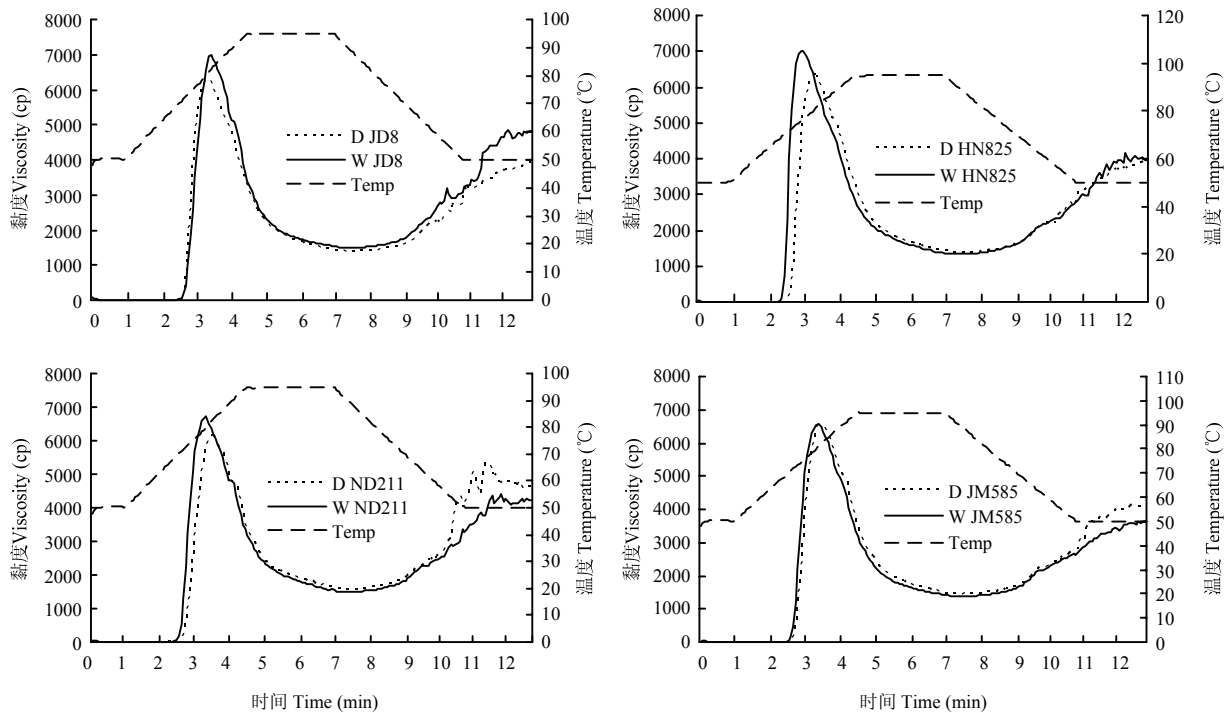


图 3 2013—2014 生长季干旱胁迫对小麦淀粉 RVA 图谱的影响

Fig. 3 Effect of drought stress on RVA profile of wheat starch in 2013-2014 growing season

这说明干旱胁迫使得小麦淀粉颗粒结构发育更加紧密。其中旱地栽培条件下的 JD8 的糊化时间最长,说明其淀粉颗粒结构最紧密,用来破坏其结构的能量最大,相应的糊化温度也就最高。干旱胁迫提高了小麦淀粉糊化的低谷黏度,但对终结黏度和回生值的影响存在基因型差异。干旱胁迫提高了 HN825、ND211 和

JM585 的终结黏度和回生值,却显著降低了 JD8 的终结黏度和回生值。回生值的减小意味着干旱栽培改良了 JD8 小麦淀粉糊的抗老化性。

## 2.5 干旱胁迫下小麦胚乳淀粉结构与糊化特性和结晶度的相关分析

小麦胚乳淀粉糊化特性与淀粉结构及淀粉结晶度

表 7 2014—2015 生长季干旱胁迫对小麦淀粉糊化特性的影响

Table 7 Effect of drought stress on pasting properties of wheat starch in 2014-2015

品种 Cultivar	处理 Treatment	峰值黏度 PV (cp)	低谷黏度 MV (cp)	稀懈值 Breakdown (cp)	终结黏度 FV (cp)	回生值 Setback (cp)	糊化时间 PT (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
JD8	W	6971a	1486a	5485a	4857a	3371a	3.64a	69.80a
	D	6153b	1501a	4653b	4339b	2839b	3.80a	70.90a
HN825	W	7024a	1346a	5679a	4102a	2757a	3.13a	68.15a
	D	6386b	1356a	5031b	4186a	2830a	3.47a	69.75a
ND211	W	6787a	1511a	5276a	4358a	2847a	3.50a	68.98a
	D	6332b	1587a	4745b	4567a	2980a	3.67a	70.20a
JM585	W	6641a	1384a	5257a	3693a	2309a	3.53a	69.38a
	D	6625a	1406a	5220a	4128a	2722a	3.60a	69.75a

密切相关(表 8)。其中,小麦胚乳淀粉中粒径 $<5\ \mu\text{m}$ 的淀粉粒体积百分比与终结黏度和回生值分别呈显著、极显著负相关,粒径 $<10\ \mu\text{m}$ 的淀粉粒相关性分析与其一致。而粒径 $>15\ \mu\text{m}$ 的淀粉粒与终结黏度和回生值均呈显著正相关,平均粒径和中位粒径与终结黏度和回生值的相关性同粒径 $>15\ \mu\text{m}$ 的淀粉粒基本一致,唯一不同的是中位粒径与回生值的相关性达到了极显著水平。结晶度与淀粉粒体积分布的相关性不显著。

总淀粉含量与峰值黏度呈显著正相关。直链淀

粉含量与峰值黏度和稀懈值呈显著正相关,与糊化温度呈显著负相关。与之相反,淀粉结晶度与峰值黏度和稀懈值分别呈极显著和显著负相关,却与糊化温度呈显著正相关。而淀粉直支比仅与糊化时间呈显著负相关,支链淀粉含量与糊化特性的相关性不显著。小麦胚乳淀粉结晶度分别与总淀粉和直链淀粉含量呈极显著、显著负相关,与支链淀粉呈显著正相关,表明直链淀粉含量的减少有利于淀粉结晶度的提高,而较高的结晶度对应需要较高的糊化温度。

表 8 小麦淀粉粒体积分布、淀粉含量与理化特性的相关性分析

Table 8 Correlation analysis of grain volume distribution, starch content and starch physicochemical properties

参数 Parameter	峰值黏度 PV (cp)	低谷黏度 MV (cp)	稀懈值 Breakdown (cp)	终结黏度 FV (cp)	回生值 Setback (cp)	糊化时间 PT (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)	结晶度 Crystallinity
$<5\ \mu\text{m}$	-0.323	-0.249	-0.226	-0.775*	-0.837**	0.188	0.141	0.139
5—10 $\mu\text{m}$	-0.287	0.347	-0.342	0.039	-0.056	-0.203	-0.129	0.167
$<10\ \mu\text{m}$	-0.431	-0.109	-0.356	-0.749*	-0.847**	0.106	0.089	0.202
10—15 $\mu\text{m}$	0.14	-0.159	0.164	0.254	0.345	-0.385	-0.264	0.135
$>15\ \mu\text{m}$	0.434	0.181	0.341	0.750*	0.828*	0.022	-0.003	-0.277
平均粒径 Average diameter	0.476	0.304	0.348	0.785*	0.833*	0.035	-0.041	-0.415
中位粒径 Medium diameter	0.342	0.245	0.244	0.786*	0.852**	0.049	0.04	-0.198
总淀粉含量 Total starch	0.727*	0.019	0.641	0.119	0.134	-0.280	-0.507	-0.911**
直链淀粉含量 Amylose	0.738*	-0.335	0.739*	0.017	0.119	-0.659	-0.717*	-0.770*
支链淀粉含量 Amylopectin	0.567	0.266	0.437	0.167	0.118	0.047	-0.253	0.822*
直/支比 Amylose/Amylopectin	0.442	-0.583	0.538	-0.117	0.035	-0.778*	-0.636	-0.320
结晶度 Crystallinity	-0.894**	0.088	-0.817*	-0.05	-0.085	0.473	0.727*	1

\*在 0.05 水平上显著相关; \*\*在 0.01 水平上极显著相关

\* means significantly at the 0.05 level; \*\*means extreme significantly at the 0.01 level



### 3 讨论

#### 3.1 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉结构的影响

小麦胚乳淀粉可分为 2 个结构层次,即分子结构和颗粒结构<sup>[6]</sup>。小麦淀粉由两类淀粉分子组成:直链淀粉(amylose, Am)和支链淀粉(amylopectin, Ap)。Am 是线型高聚  $\alpha$ -1,4 葡萄糖苷;Ap 是高度支化分子,在  $\alpha$ -1,4 葡萄糖苷上连有  $\alpha$ -1,6 糖苷键分支。环境条件和栽培措施对小麦籽粒中 Am、Ap 含量及 Am/Ap 比值存在明显影响<sup>[22]</sup>。前人关于干旱胁迫对小麦胚乳淀粉及其组分含量的研究存在差异。ZHANG 等<sup>[14]</sup>认为干旱胁迫明显降低了小麦胚乳总淀粉、Am 以及 Ap 含量,但对 Am/Ap 的影响存在基因型差异。而 LU 等<sup>[23]</sup>在研究了花后干旱、高温及其复合胁迫对小麦淀粉的影响后发现,干旱胁迫虽然显著降低了小麦总淀粉和 Ap 含量,但提高了 Am 含量和 Am/Ap 比值,同时他认为淀粉的减少是小麦粒重降低的直接因素。本研究表明,干旱胁迫显著抑制了小麦籽粒中总淀粉、直链淀粉以及支链淀粉的积累,但对小麦淀粉直/支比的影响不显著。

淀粉的颗粒结构指的是淀粉粒,淀粉粒以大小不同的形式存在于籽粒胚乳中,其分布特征也存在差异<sup>[24-25]</sup>。小麦淀粉粒度的体积分布、表面积分布和数目分布,不仅受其本身的遗传基因控制,而且受环境条件的影响。尤其是在小麦籽粒灌浆期间,环境条件的作用大于基因型的作用<sup>[26]</sup>。蔡瑞国等<sup>[27]</sup>通过对小麦挑旗后不同阶段弱光对其胚乳淀粉粒度分布特征的影响研究发现,小麦胚乳淀粉粒数目分布呈单峰曲线,体积和表面积分布成双峰曲线变化。ZHANG 等<sup>[14]</sup>研究认为干旱胁迫减少了小淀粉粒的积累,却提高了大淀粉粒的含量。同时干旱胁迫对小麦胚乳淀粉粒体积分布的中位粒径影响显著,但对数目分布的中位粒径影响不显著。而戴忠民等<sup>[28-29]</sup>研究发现小麦花后 14—21 d 干旱处理,显著增加了小麦胚乳小淀粉粒的数目,却抑制了 A 型淀粉粒的积累,同时干旱胁迫下淀粉粒的平均粒径小于对照处理。

本研究表明,小麦胚乳淀粉粒体积、表面积和数目分布均呈双峰曲线,这与蔡瑞国等<sup>[3]</sup>的研究不太一致。干旱胁迫对小麦胚乳淀粉粒度分布的影响存在基因型差异,其中对体积分布和表面积分布的影响一致。干旱胁迫显著增大了 JD8 和 HN825 小麦淀粉中粒径  $<5\ \mu\text{m}$  和  $<10\ \mu\text{m}$  的淀粉粒的体积、表面积百分比,却显著降低了粒径  $>15\ \mu\text{m}$  的淀粉粒的体积、表面积百分比,而 JM585 正好相反,干旱对 ND211 不同粒径淀粉粒的影响不显著。小麦淀粉粒的总面积主要取

决于粒径  $<10\ \mu\text{m}$  的淀粉粒,但干旱胁迫对粒径  $<5\ \mu\text{m}$  淀粉粒的表面积百分比影响最大。小麦胚乳淀粉粒数目主要由粒径  $<5\ \mu\text{m}$  的淀粉粒组成,同时干旱胁迫对其积累的影响也最大。干旱胁迫对 HN825 胚乳淀粉粒数目分布的影响不显著,但显著促进了 JD8 淀粉中粒径  $<5\ \mu\text{m}$  和粒径  $<10\ \mu\text{m}$  的淀粉粒的积累,抑制了粒径 5—10  $\mu\text{m}$ 、10—15  $\mu\text{m}$  和  $>15\ \mu\text{m}$  的淀粉粒的产生,而 JM585 和 ND211 正好相反,这表明干旱胁迫对小麦胚乳淀粉粒数目分布的影响因品种和粒径大小的不同而存在差异。

#### 3.2 干旱胁迫对小麦胚乳淀粉理化特性的影响

小麦胚乳淀粉粒包含结晶区和无定形区,结晶区主要由 Ap 的 A 链和外 B 链以双螺旋结构形成,结构较为紧密,不易被外力和化学试剂破坏;无定形区主要由 Am 以松散的结构组成,容易受外力和化学试剂作用<sup>[30-31]</sup>。X-衍射图谱是淀粉粒结构状况的“指纹”<sup>[32]</sup>,而淀粉粒内结晶区的层状结构决定了 X-衍射图谱中各衍射峰的位置和强度<sup>[33]</sup>。王钰等<sup>[8]</sup>研究认为高温胁迫通过改变淀粉结晶区内支链淀粉在形成双螺旋结构时  $\alpha$ -1,6 糖苷键上葡萄糖基间的夹角改变了小麦面粉的结晶度。李诚等<sup>[5]</sup>研究发现干旱胁迫降低了小麦淀粉粒的相对结晶度。这些均表明栽培条件对小麦胚乳淀粉结晶度存在影响。本文研究表明,干旱胁迫未改变小麦胚乳淀粉的晶体类型,呈谷物淀粉典型的 A 型特征,但显著提高了小麦淀粉的结晶度,这与李诚等<sup>[5]</sup>的研究结果不一致。干旱胁迫对小麦淀粉 X-衍射图谱中各尖峰强度的影响因品种和衍射角的不同而存在差异,其中,2013—2014 年度干旱胁迫显著增加了 JD8 在  $2\theta$  为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $23^\circ$  时的尖峰强度,降低了  $2\theta$  为  $17^\circ$  和  $18^\circ$  时的尖峰强度,使 HN825 在  $2\theta$  为  $15^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $18^\circ$  和  $23^\circ$  时的尖峰强度均降低,但显著增加了  $2\theta$  为  $20^\circ$  时的尖峰强度。干旱胁迫显著增加了 ND211 所有衍射峰的尖峰强度,却显著降低了 JM585 所有衍射峰的尖峰强度;而 2014—2015 年度干旱胁迫对 JD8、ND211 和 JM585 衍射尖峰强度的影响保持一致,但显著降低了 HN825 所有衍射峰的尖峰强度。

稀懈值、糊化时间和糊化温度能够很好地反映小麦胚乳淀粉粒晶体结构的紧密性和稳定性<sup>[34-35]</sup>。干旱胁迫显著降低了小麦淀粉(除 JM585)的峰值黏度和稀懈值,并提高了糊化温度,延长了糊化时间,这说明干旱胁迫使得小麦淀粉粒晶体结构发育更加紧密。干旱胁迫提高了小麦淀粉糊化的低谷黏度,但对终结黏度和回生值的影响存在基因型差异。干旱胁迫提高了 HN825、

ND211 和 JM585 的终结黏度和回生值, 却显著降低了 JD8 的终结黏度和回生值。回生值的减小意味着干旱胁迫改良了 JD8 小麦淀粉糊的抗老化性。淀粉糊化特征参数之间存在明显的相关性。其中, 小麦籽粒淀粉峰值黏度与稀懈值呈极显著正相关, 与糊化温度呈显著负相关。而稀懈值与糊化时间和糊化温度之间分别呈显著和极显著负相关。此外, 终结黏度与回生值之间, 以及糊化时间与糊化温度之间均呈极显著正相关。

小麦胚乳淀粉的糊化经历了无定形区吸水膨胀、小分子聚合物溶出、结晶区逐渐消失、大分子聚合物溶出以及淀粉颗粒破裂的过程<sup>[36]</sup>。这表明小麦淀粉糊化特性与结晶度之间存在必然的联系。相关性分析表明, 小麦淀粉糊化峰值黏度和稀懈值与结晶度分别呈极显著和显著负相关, 而糊化温度与结晶度呈显著正相关。这表明含较低稀懈值的小麦淀粉, 其淀粉颗粒的结构可能更紧密, 结晶度更高, 对热和剪切力的抵抗作用更强, 从而所需要的糊化温度就更高。

### 3.3 小麦胚乳淀粉结构与理化特性之间的内在联系

小麦胚乳淀粉粒因物理结构和直链分子含量的差异而对淀粉的糊化特性和结晶度有显著影响<sup>[37-39]</sup>。李春燕等<sup>[39]</sup>研究认为直链淀粉含量、直/支比、破损淀粉含量对淀粉黏度特性有重要的影响, 而结晶度对黏度特性影响不显著。VERWIMP 等<sup>[40]</sup>通过比较小麦和黑麦发现, 小麦的 A 型淀粉粒和平均粒径低于黑麦, 导致了小麦淀粉的糊化温度和峰值黏度高于黑麦, 而终结黏度低于黑麦。而 PETERSON 等<sup>[37]</sup>研究发现小麦淀粉的糊化黏度、凝沉性呈显著负相关, 淀粉粒粒径越大, 这种负相关性越明显, 淀粉粒粒径越小, 尤其是粒径  $< 5 \mu\text{m}$  的淀粉粒, 与糊化时间的负相关性越明显。本研究表明, 小麦胚乳淀粉结晶度与直链淀粉含量呈显著负相关, 同时与淀粉糊化特性间存在显著关系。小麦胚乳淀粉中粒径  $< 5 \mu\text{m}$  和  $< 10 \mu\text{m}$  的淀粉粒体积百分比与终结黏度和回生值均分别呈显著、极显著负相关, 而粒径  $> 15 \mu\text{m}$  的淀粉粒与终结黏度和回生值均呈显著正相关。这表明干旱胁迫对小麦淀粉粒体积分布的影响, 间接影响到的是淀粉糊化的终结黏度和回生值。平均粒径和中位粒径与终结黏度和回生值的相关性同粒径  $> 15 \mu\text{m}$  的淀粉粒基本一致, 唯一不同的是中位粒径与回生值的相关性达到了极显著水平。也有研究表明, 小麦胚乳淀粉粒内的蛋白质通过争夺水分影响淀粉的糊化特性, 具体尚待进一步研究<sup>[41]</sup>。小麦胚乳淀粉糊化特性与淀粉含量也密切相关。其中, 总淀粉含量与峰值黏度呈显著正相关。直

链淀粉含量与峰值黏度和稀懈值呈显著正相关, 与糊化温度呈显著负相关。淀粉直支比仅与糊化时间呈显著负相关, 而支链淀粉含量与糊化特性的相关性不显著。所以, 小麦胚乳淀粉结构与理化特性之间均存在密切联系。主要表现为小麦胚乳淀粉分子结构和颗粒结构的差异影响了淀粉的晶体特性和糊化特性, 从而影响了小麦淀粉的品质, 进一步决定了小麦淀粉的在食品和非食品方面的应用性能。因此, 在农业生产中可以通过调节水分条件来达到生产特殊品质小麦的目的。

## 4 结论

干旱胁迫显著抑制了小麦胚乳淀粉的积累, 但对小麦胚乳淀粉粒度分布的影响因基因型和粒径大小的不同而存在差异, 其中, 对粒径  $< 5 \mu\text{m}$  淀粉粒的表面积、数目分布影响最大。干旱胁迫显著降低了小麦淀粉的峰值黏度和稀懈值, 并提高了其低谷黏度、终结黏度和回生值。干旱胁迫对直链淀粉积累的抑制, 使得小麦淀粉的结晶度显著增加, 从而提高了其糊化温度, 延长了糊化时间。干旱胁迫对小麦淀粉粒体积分布的影响, 间接影响到的是淀粉糊化的终结黏度和回生值, 进而影响到淀粉糊抗老化性能的改良。小麦胚乳淀粉结构与晶体特性及糊化特性之间均存在明显的相关性, 表明干旱对小麦胚乳淀粉分子结构和颗粒结构的影响, 间接影响了其晶体特性和糊化特性, 从而影响了小麦淀粉的品质, 进一步决定了小麦淀粉在食品和非食品方面的应用性能。因此, 在农业生产中可以通过调节水分条件来达到生产一定淀粉品质小麦的目的。

## References

- [1] 阎俊, 张勇, 何中虎. 小麦品种糊化特性研究. 中国农业科学, 2001, 34(1): 1-4.  
YAN J, ZHANG Y, HE Z H. Investigation on paste property of Chinese wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] JANE J L, CHEN J F. Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on paste properties of starch. *Cereal Chemistry*, 1992, 69(1): 60-65.
- [3] 蔡瑞国, 张敏, 韩婷, 谢新宇, 徐彩龙, 顾锋. 种植密度对小麦籽粒淀粉含量和晶体特性的影响. 麦类作物学报, 2013, 34(1): 78-83.  
CAI R G, ZHANG M, HAN T, XIE X Y, XU C L, GU F. Effect of plant density crystal property starch content and wheat grain. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 34(1): 78-83. (in Chinese)
- [4] 王晨阳, 张艳菲, 卢红芳, 赵君霞, 马耕, 马冬云, 朱云集, 郭天财, 马英, 姜玉梅. 花后渍水、高温及其复合胁迫对小麦籽粒淀粉

- 组成与糊化特性的影响. 中国农业科学, 2015, 48(4): 813-820.
- WANG C Y, ZHANG Y F, LU H F, ZHAO J X, MA G, MA D Y, ZHU Y J, GUO T C, MA Y, JIANG Y M. Effects of post-anthesis waterlogging, high temperature and their combination on starch compositions and pasting properties in wheat grains. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 813-820. (in Chinese)
- [5] 李诚, 张润琪, 付凯勇, 李春艳. 花后干旱对小麦胚乳淀粉粒发育和理化特性的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1284-1290.
- LI C, ZHANG R Q, FU K Y, LI C Y. Effect of drought post anthesis on the development and physicochemical characteristics of starch granule in wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(9): 1284-1290. (in Chinese)
- [6] 曹龙奎, 李凤林. 淀粉颗粒的结构. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
- CAO L K, LI F L. *The Structure of Starch Granules*. Beijing: China Light Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [7] RINDLAV-WESTLING A, STADING M, GATENHOLM P. Crystallinity and morphology in films of starch, amylose and amylopectin blends. *Biomacromolecules*, 2002, 3(1): 84-91.
- [8] 王珏, 封超年, 郭文善, 朱新开, 李春燕, 彭永欣. 花后高温胁迫对小麦籽粒淀粉积累及晶体特性的影响. 麦类作物学报, 2008, 28(2): 260-265.
- WANG J, FENG C N, GUO W S, ZHU X K, LI C Y, PENG Y X. Effects of high temperature starch traits of grain after anthesis on in wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(2): 260-265. (in Chinese)
- [9] TANG H, MITSUNAGA T, KAWAMURA Y. Molecular arrangement in blocklets and starch granule architecture. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63(4): 555-560.
- [10] 宋健民, 刘爱峰, 李豪圣, 戴双, 刘建军, 赵振东, 刘广田. 小麦籽粒淀粉理化特性与面条品质关系研究. 中国农业科学, 2008, 41(1): 272-279.
- SONG J M, LIU A F, LI H S, DAI S, LIU J J, ZHAO Z D, LIU G T. Relationship between starch physicochemical properties of wheat grain and noodle quality. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 272-279. (in Chinese)
- [11] HURKMAN W J, MCCUE K F, ALTENBACH S B, KORN A, TANAKA C K, KOTHARI K M, JOHNSON E L, BECHTEL D B, WILSON J D, ANDERSON O D, DUPONT F M. Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosynthesis in developing wheat endosperm. *Plant Science*, 2003, 164: 873-881.
- [12] KIM H S, HUHER K C. Channels within soft wheat starch A-and B-type granules. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 159-172.
- [13] GREJAS G, FAUCHER B, BERIRAND D, GUIBERT D, LEROY P, BRANLARD G. Genetic analysis of the size of endosperm starch granules in a mapped segregating wheat population. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35: 103-107.
- [14] ZHANG T, WANG Z, YIN Y, CAI R, YAN S, LI W. Starch content and granule size distribution in grains of wheat in relation to post-anthesis water deficits. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 196: 1-8.
- [15] 徐云姬, 李银银, 钱希昉, 王志琴, 杨建昌. 三种禾谷类作物强、弱勢粒淀粉粒形态与粒度分布的比较. 作物学报, 2016, 42(1): 70-81.
- XU Y J, LI Y Y, QIAN X Y, WANG Z Q, YANG J C. Comparison of starch granule morphology and size distribution in superior and inferior grains of three cereal crops. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 70-81. (in Chinese)
- [16] 戴忠民, 尹燕枰, 郑世英, 蔡瑞国, 顾锋, 闫素辉, 李文阳, 王振林. 不同供水条件对小麦强、弱勢籽粒中淀粉粒度分布的影响. 生态学报, 2009, 29(12): 6534-6543.
- DAI Z M, YIN Y P, ZHENG S Y, CAI R G, GU F, YAN S H, LI W Y, WANG Z L. Effect of water regime on starch granule size distribution in superior and inferior grains of wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6534-6543. (in Chinese)
- [17] PENG D L, CAI T, YIN Y P, YANG W B, NI Y L, YANG D Q, WANG Z L. Exogenous application of abscisic acid or gibberellin acid has different effects on starch granule size distribution in grains of wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12: 1551-1559.
- [18] MORRIS C F, SHACKLEY B J, KING G E, KIDWELL K K. Genotypic and environmental variation for flour swelling volume in wheat. *Cereal Chemistry*, 1997, 74: 16-21.
- [19] PENG M, GAO M, ESM A A, HUCL P, CHIBBAR R N. Separation and characterization of A-and B-type starch granules in wheat endosperm. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(3): 375-379.
- [20] MANDAL D, TUDU S, MITRA S R, DE G C. Effect of common packing materials on keeping quality of sugarcane jaggery during monsoon season. *Sugar Tech*, 2006, 8(2/3): 137-142.
- [21] 陆国权, 唐忠厚, 黄华宏. 不同施钾水平甘薯直链淀粉含量和糊化特性的基因型差异. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 280-283.
- LU G Q, TANG Z H, HUANG H H. Genotype variation in amylose content and starch pasting properties of sweetpotato storage at two K levels. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(5): 280-283. (in Chinese)
- [22] 蔡瑞国, 尹燕枰, 张敏, 戴忠民, 严美玲, 付国占, 贺明荣, 王振林. 氮素水平对藁城 8901 和山农 1391 籽粒品质的调控效应. 作物学报, 2007, 33(2): 304-310.

- CAI R G, YIN Y P, ZHANG M, DAI Z M, YAN M L, FU G Z, HE M R, WANG Z L. Effects of nitrogen application rate on grain quality in wheat cultivars GC8901 and SN1391. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2): 304-310. (in Chinese)
- [23] LU H F, WANG C Y, GUO T C, XIE Y X, FENG W, LI S Y. Starch composition and its granules distribution in wheat grains in relation to post-anthesis high temperature and drought stress treatment. *Starch/Stärke*, 2014, 66: 419-428.
- [24] PAUL C. The structure of starch. *Nature*, 1997, 389: 338-339.
- [25] TESTER R F, KARKALAS J, QI X. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. *Worlds Poultry Science Journal*, 2004, 60: 186-195.
- [26] PANOZZO J F, EAGLES H A. Cultivars and environmental effects on quality characters in wheat: I. Starch. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1998, 49: 757-766.
- [27] 蔡瑞国, 尹燕杆, 赵发茂, 张敏, 张体彬, 梁太波, 顾锋, 戴忠民, 王振林. 强筋小麦胚乳淀粉粒度分布特征及其对弱光的响应. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1308-1316.
- CAI R G, YIN Y P, ZHAO F M, ZHANG M, ZHANG T B, LIANG T B, GU F, DAI Z M, WANG Z L. Size distribution of starch granules in strong-gluten wheat endosperm under low light environment. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(5): 1308-1316. (in Chinese)
- [28] DAI Z M. Starch granule size distribution in grains at different positions on the spike of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Starch/Stärke*, 2009, 61: 582-589.
- [29] 戴忠民, 王振林, 高凤菊, 李文阳, 闫素辉, 蔡瑞国, 张敏, 尹燕杆. 两种供水条件下两穗型小麦品种籽粒淀粉积累及相关酶活性的变化特征. *作物学报*, 2007, 33(4): 682-685.
- DAI Z M, WANG Z L, GAO F J, LI W Y, YAN S H, CAI R G, ZHANG M, YIN Y P. Characterization of starch accumulation and activities of enzymes involved in starch synthesis in grains of wheat cultivars differing in spike types field-grown in irrigation and rainfed conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 682-685. (in Chinese)
- [30] 陈福泉, 张本山, 卢海凤, 赵永青, 张向阳. X 射线衍射在淀粉颗粒结晶度研究中的应用. *食品科学*, 2010, 31(3): 284-287.
- CHEN F Q, ZHANG B S, LU H F, ZHAO Y Q, ZHANG X Y. A review of application of X ray diffraction in crystal structure determination of starch granules. *Food Science*, 2010, 31(3): 284-287. (in Chinese)
- [31] CHEETHAM N W H, TAO L. Variation in crystalline type with amylase content in maize starch granules: An X-ray powder diffraction study. *Carbohydrate Polymer*, 1998, 36: 277-284.
- [32] FUJITA S, YAMAMOTO H, SUGIMOTO Y, MORITA N, YAMAMORI M. Thermal and crystalline properties of waxy wheat (*Triticum aestivum* L.) starch. *Journal of Cereal Science*, 1998, 27(1): 1-5.
- [33] MYERS A M, MORELL M K, JAMES M G, BALL S G. Recent progress toward understanding biosynthesis of the amylopectin crystal. *Plant Physiology*, 2000, 122: 989-997.
- [34] 韩文芳, 熊善柏, 李江涛, 赵思明, 莫紫梅. 糯米淀粉的晶体性质和糊化特性. *中国粮油学报*, 2015, 30(8): 48-53.
- HAN W F, XIONG S B, LI J T, ZHAO S M, MO Z M. The glutinous rice starch crystal properties and pasting properties. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(8): 48-53. (in Chinese)
- [35] 王晨阳, 苗建利, 张美微, 马冬云, 冯伟, 谢迎新, 郭天财. 高温、干旱及其互作对两个筋力小麦品种淀粉糊化特性的影响. *生态学报*, 2014, 34(17): 4882-4890.
- WANG C Y, MIAO J L, ZHANG M W, MA D Y, FENG W, XIE Y X, GUO T C. Effects of post-anthesis high temperature, drought stress and their interaction on the starch pasting properties of two wheat cultivars with different gluten strength. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4882-4890. (in Chinese)
- [36] 彭凯, 吴薇, 龙蕾, 王顺喜. 非淀粉成分对淀粉糊化特性的影响. *粮食与饲料工业*, 2015, 12(5): 41-44.
- PENG K, WU W, LONG L, WANG S X. Effect of non-starch components on the starch pasting properties. *Cereal & Feed Industry*, 2015, 12(5): 41-44. (in Chinese)
- [37] PETERSON D G, FULCHER R G. Variation in Minnesota HRS wheats: Starch granule size distribution. *Food Research International*, 2001, 34(4): 357-363.
- [38] WHATTAM J, CORNELL H J. Distribution and composition of lipids in starch fractions from wheat flour. *Starch-Stärke*, 1991, 43(4): 152-156.
- [39] 李春燕, 封超年, 王亚雷, 张容, 郭文善, 朱新开, 彭永欣. 不同小麦品种支链淀粉链长分配及其与淀粉理化特性的关系. *作物学报*, 2007, 33(8): 1240-1245.
- LI C Y, FENG C N, WANG Y L, ZHANG R, GUO W S, ZHU X K, PENG Y X. Chain length distribution of debranched amylopectin and its relationship with physicochemical properties of starch in different wheat cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(8): 1240-1245. (in Chinese)
- [40] VERWIMP T, VANDEPUTTE G E, MARRANT K, DELCOUR J A. Isolation and characterisation of rye starch. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39(1): 85-90.
- [41] MOHAMED A A, RAYAS-DUARTE P. The effect of mixing and wheat protein/gluten on the gelatinization of wheat starch. *Food Chemistry*, 2003, 81(4): 533-545.

(责任编辑 李莉)