

## 氮肥对小麦籽粒淀粉结构和理化性质的调控效应

李双静,赵嘉欣,吕天宇,王茂,马耕,张艳菲,张海艳,王晨阳

(河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心,河南郑州 450002)

**摘要:**为探究不同氮肥施用量对小麦籽粒淀粉结构和理化性质的影响,以强筋小麦品种丰德存麦5号和中筋小麦品种百农207为材料,设置0、180、240和300 kg·hm<sup>-2</sup>(分别记为N0、N180、N240、N300)共4个施氮量水平,测定其籽粒淀粉理化性质与结构特征指标。结果表明,随施氮量的增加,两个品种小麦籽粒淀粉峰值黏度和膨胀势均呈先升后降趋势,淀粉峰值温度、热焓值、支链淀粉B2和B3长链含量、淀粉相对结晶度、淀粉表层有序度、大淀粉颗粒数目百分比均呈先降后升趋势,其中丰德存麦5号的极值均出现在N240处理,百农207的极值均出现在N180处理。丰德存麦5号的N240处理和百农207的N180处理两年度膨胀势较其N0处理的平均增幅分别为36.74%和7.23%,热焓值的平均降幅分别为18.94%和27.43%,淀粉相对结晶度的平均降幅分别为16.29%和9.82%,淀粉表层有序度的平均降幅分别为5.09%和4.21%。综上所述,适量施用氮肥可改善小麦淀粉结构和理化性质。

**关键词:**施氮量;小麦;淀粉结构;淀粉理化性质

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)11-1546-09

## Regulatory Effects of Nitrogen Fertilisers on Starch Structure and Physicochemical Properties in Wheat Grain

LI Shuangjing, ZHAO Jiabin, LÜ Tianyu, WANG Mao, MA Geng,  
ZHANG Yanfei, ZHANG Haiyan, WANG Chenyang

(College of Agronomy, Henan Agricultural University/National Engineering  
Research Center for Wheat, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different nitrogen fertilizer application rates on the starch physicochemical properties and structure of wheat grain, and to analyse the reasons for the differences in the starch physicochemical properties, a strong-gluten variety Fengdecunmai 5 and a medium-gluten variety Bainong 207 were selected as the experimental materials, and set up four nitrogen application rates of 0, 180, 240, and 300 kg·hm<sup>-2</sup> noted as N0, N180, N240, N300 respectively. Starch physicochemical properties and structural characteristics under different nitrogen fertiliser application rates were determined. The results showed that with the increase of nitrogen application rate, the peak viscosity and swelling potential of the two varieties wheat were first rising and then falling, the peak temperature, enthalpy, content of branched starch B2 and B3 long chains, relative crystallinity, degree of surface ordering, number proportion of large starch granules all showed a trend of first declining and then rising. Fengdecunmai 5 and Bainong 207 all the extreme values were N240 and N180 treatment respectively. Compared with the N0 treatment, the N240 treatment of Fengdecunmai 5 and the N180 treatment of Bainong 207 showed an average increase in swelling potential of 36.74% and 7.23%, an average decrease in enthalpy of 18.94% and 27.43%, an average de-

crease in relative crystallinity of 16.29% and 9.82%, and an average decrease in the degree of order of the starch surface layer of 5.09% and 4.21%, respectively. In conclusion, the moderate application of nitrogen fertilizer can improve the starch physicochemical properties and structure of wheat grain.

**Keywords:** Nitrogen application rate; Wheat; Starch structure; Physicochemical properties of starch

淀粉是小麦面粉的主要成分(约占 70%~75%),其含量、组分、直/支比值以及理化性质对面条、馒头等面制品的加工特性和食用品质具有重要影响<sup>[1]</sup>。研究发现,在糊化性质参数中,峰值黏度是影响面条品质的关键指标,与面条柔软度、粘弹性和综合评分之间均显著正相关;膨胀势与面条综合评分呈极显著正相关<sup>[2]</sup>。降低直链淀粉含量可提高面粉膨胀势,在蒸煮过程中减小糊化凝胶硬度,增强其变形能力,从而改善面条的粘弹性和适口性<sup>[3]</sup>。淀粉结构的形成较为复杂,先由 $\alpha$ -1,4 糖苷键连接葡萄糖单元形成淀粉单链,再由 $\alpha$ -1,6 糖苷键连接分支链形成有分支的淀粉分子,相邻的淀粉分支链相互缠绕形成结晶层和无定形层,再交替堆叠形成半晶体生长环,最后形成淀粉颗粒<sup>[4-5]</sup>。淀粉的结构特征决定其理化性质<sup>[6]</sup>。

氮素是作物生长发育和实现稳产增产所需的重要营养元素之一。其水平可通过调控小麦光合同化物的产生及向籽粒中的分配转运,以及淀粉合成相关酶的活性,从而影响淀粉含量、组分及其理化性质<sup>[7]</sup>。研究发现,随施氮量的增加,小麦籽粒中直链淀粉含量和直/支比下降,有利于改善面条品质<sup>[8]</sup>。大、小淀粉粒及总淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度随施氮量的增加总体呈升高趋势,淀粉糊化性质得到改善<sup>[9]</sup>。施用氮肥降低了小麦淀粉相对结晶度,其糊化峰值温度( $T_p$ )和糊化焓( $\Delta H$ )均低于不施氮处理,使淀粉更易在低温条件下糊化<sup>[10]</sup>。适量施氮还能减少 A、B 型淀粉颗粒中直链淀粉含量,提高淀粉膨胀势和峰值黏度,有利于改善面条品质<sup>[11]</sup>。然而,现有研究多局限于氮肥施用量对小麦淀粉含量和理化性质的影响,尚缺乏对淀粉结构特征变化及其与理化性质关系的解析。本研究以黄淮南片麦区较为广泛种植的强筋小麦品种丰德存麦 5 号和中筋小麦品种百农 207 为材料,探究其淀粉理化性质和结构特征在不同施氮量处理下的变化,并分析二者的内在联系,从淀粉结构方面解析淀粉理化性质差异的形成原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2022—2024 年度在河南省焦作市温县祥云镇高产区(34.92°N, 112.99°E)进行,试验地土壤类型为潮土,播前 0~20 cm 土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量分别为 18.12 g·kg<sup>-1</sup>、1.13 g·kg<sup>-1</sup>、22.36 mg·kg<sup>-1</sup> 和 157.61 mg·kg<sup>-1</sup>。供试材料为强筋小麦品种丰德存麦 5 号和中筋小麦品种百农 207,基本苗均为 375 万株·hm<sup>-2</sup>。试验设置 0 kg·hm<sup>-2</sup>(N0)、180 kg·hm<sup>-2</sup>(N180)、240 kg·hm<sup>-2</sup>(N240)和 300 kg·hm<sup>-2</sup>(N300)共 4 个施氮水平。磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg·hm<sup>-2</sup>)和钾肥(K<sub>2</sub>O 120 kg·hm<sup>-2</sup>)在整地时一次性施入。氮肥为尿素(N 46%),按基追比 1:1 在拔节期追肥。拔节期和开花期各灌水 1 次,每次灌水量为 750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。小区面积 50 m<sup>2</sup>(5 m×10 m),每处理 3 次重复。两年均于 10 月 16 日左右播种,次年 5 月 20 日左右收获,田间管理措施参照当地生产习惯,并严格防治病虫害。

### 1.2 测定项目及方法

#### 1.2.1 淀粉的提取

采用 Li 等<sup>[12]</sup>的方法提取淀粉。

#### 1.2.2 淀粉糊化特性测定

使用快速黏度分析仪(Rapid Visco Analyzer 4500, Perten, Sweden)测定淀粉糊化特性。称取 TCW(Thermal Cycle for Windows)软件计算的相应淀粉倒入小铝罐内,加入 25 mL 的蒸馏水混匀,将其固定在快速黏度分析仪旋转塔上,启动机器进行测定。

#### 1.2.3 淀粉热力学性质测定

采用差示扫描量热仪(Differential Scanning Calorimeter 214, Netzsch, Germany)测定淀粉热力学性质。称取 5 mg 淀粉置于坩锅中,按照淀粉:水=1:2.5 的比例加水,密封后于室温下平衡过夜。测量条件:20 °C 开始,110 °C 结束,升温速率 10 °C·min<sup>-1</sup><sup>[13]</sup>。

#### 1.2.4 面粉膨胀势测定

称取 0.25 g 面粉置于离心管中,加入 5 mL 蒸

馏水混匀,于 70 °C 下水浴震荡 10 min,再于沸水中加热 10 min,冷水冷却后在相对离心力 1 700 × g 条件下离心 4 min,弃去上清液后称重。

膨胀势 = (毛重 - 离心管重) / 干面粉重<sup>[14]</sup>

### 1.2.5 淀粉含量测定

参考何照范<sup>[15]</sup>的方法测定总淀粉与直链淀粉含量,支链淀粉含量 = 总淀粉含量 - 直链淀粉含量。

### 1.2.6 支链淀粉链长分布测定

参考 Zhang 等<sup>[16]</sup>的方法制备脱支淀粉。用 APTS(8-氨基苊-1,3,6-三磺酸三钠盐)标记脱支淀粉和标样麦芽六糖,通过荧光辅助毛细管电泳法(MDQ+FACE)进行测定。

### 1.2.7 淀粉晶体结构测定

使用 X-射线衍射仪(Mini Flex 600, Rigaku, Japan)测定淀粉晶体结构。测量条件:电压 40 kV、电流 20 mA、衍射角(2θ)范围 2~40°、速度 1.2°·min<sup>-1</sup>、步长 0.2°<sup>[17]</sup>,利用 Jade 5.0 软件分析相对结晶度。

### 1.2.8 淀粉表层结构测定

使用傅立叶红外光谱仪(ATR-FTIR 7000, Varian, USA)测定淀粉表层结构。测量条件:波数范围 400~4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率 2 cm<sup>-1</sup>,每点扫描 64 次。在光谱图上取 800~1 200 cm<sup>-1</sup> 区段进行基线校正和解卷积,设置半峰宽 19 cm<sup>-1</sup>,增强因子 1.9<sup>[18]</sup>。

### 1.2.9 淀粉粒度分布测定

使用激光衍射粒度分析仪(Laser Particle Size Analyzer 13320, Beckman Coulter, USA)测定淀粉粒度分布。称取 0.1 g 淀粉,加入 10 mL 蒸馏水振荡混匀,于 4 °C 下放置 1 h,期间每 10 min 晃动 1 次,转移至分散盒中测定<sup>[19]</sup>。

## 1.3 数据处理分析

使用 Excel 2019 和 SPSS 26 进行数据统计分析,使用 Origin 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对小麦籽粒淀粉糊化特性的影响

由表 1 可知,与 N0 处理相比,施氮处理均提高了两个品种淀粉糊化性质参数和膨胀势,降低其淀粉峰值温度和热焓值(百农 207 的 N300 处理除外),两年度结果表现一致。丰德存麦 5 号和

百农 207 淀粉峰值黏度、最终黏度、稀懈值、反弹值和膨胀势随施氮量的增加均呈先升后降趋势,最大值分别出现在 N240、N180 处理;淀粉峰值温度和热焓值随施氮量的增加整体上均呈先降后升趋势,最小值分别出现在 N240、N180 处理。从变异系数来看,两年度施氮量对淀粉热焓值的影响均大于峰值温度。与 N0 处理相比,2022—2023 和 2023—2024 年度丰德存麦 5 号施氮处理热焓值分别下降 11.52%~23.50%、8.31%~14.38%,百农 207 分别下降 7.58%~21.33%、7.58%~33.53%;丰德存麦 5 号施氮处理膨胀势分别增加 40.66%~57.75%、5.40%~16.31%,百农 207 分别增加 3.77%~5.71%、5.11%~8.75%。这表明适量施用氮肥可提高小麦淀粉峰值黏度和膨胀势,降低其淀粉峰值温度和热焓值。

### 2.2 施氮量对小麦籽粒淀粉含量及其组分的影响

由表 2 可知,丰德存麦 5 号和百农 207 总淀粉含量、直链淀粉含量和直/支比均随施氮量的增加呈先降后升趋势,分别在 N240、N180 处理下最小;施氮处理均显著减少两个品种直链淀粉含量和直/支比(百农 207 的 N300 处理除外),两年度表现一致。2022—2023 和 2023—2024 两个年度丰德存麦 5 号施氮处理的直链淀粉含量较 N0 处理降幅范围分别为 7.18%~19.89%、5.88%~18.21%,百农 207 降幅范围分别为 4.01%~12.66%、6.04%~9.42%。这说明适量施用氮肥可显著减少小麦直链淀粉含量,降低直/支比值。

### 2.3 施氮量对小麦籽粒支链淀粉链长分布的影响

由表 3 可知,施氮处理显著影响两个品种支链淀粉链长分布。丰德存麦 5 号和百农 207 A 链、B1 短链含量和(A+B1)/(B2+B3)比值均随施氮量的增加呈先增后减趋势,B2、B3 长链含量及平均链长均呈先减后增趋势。其中,丰德存麦 5 号和百农 207 分别均在 N240、N180 处理下有最值。从变异系数来看,氮肥施用量对 A 链和 B3 链含量影响较大。与 N0 处理相比,丰德存麦 5 号的 N240 处理 A 链含量增加 5.03%,B3 链含量减少 11.89%;百农 207 的 N180 处理 A 链含量增加 8.16%,B3 链含量减少 18.87%。由此可见,适量施用氮肥可有效降低小麦支链淀粉长链比例,改善其链长分布特征。

表 1 施氮量对小麦淀粉糊化特性的影响

Table 1 Effect of nitrogen fertilization rate on starch pasting properties of wheat grain

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity/cP	稀懈值 Break down/cP	最终黏度 Final viscosity/cP	反弹值 Setback/cP	峰值温度 T <sub>p</sub> /°C	热焐值 ΔH/ (J·g <sup>-1</sup> )	膨胀势 Swelling power
2022—2023	丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	3 441.00a	741.67b	4 087.00a	1 387.67b	63.20a	2.17a	6.32c
		N180	3 474.67a	850.67ab	4 168.00a	1 544.00a	62.85a	1.81ab	8.89b
		N240	3 776.00a	1 061.00a	4 380.00a	1 665.00a	62.80a	1.66b	9.97a
		N300	3 722.00a	877.00ab	4 232.00a	1 387.00b	63.60a	1.92ab	9.13b
		CV/%	—	—	—	—	0.75	12.72	18.36
	百农 207 Bainong 207	N0	3 294.33a	663.67b	3 941.33a	1 310.67a	64.00a	2.11b	9.28ab
		N180	3 656.33a	638.00b	4 334.00a	1 315.67a	63.50a	1.66c	9.81a
		N240	3 631.00a	1 073.00a	4 148.00a	1 590.00a	63.45a	1.95b	9.63ab
		N300	3 495.50a	743.00b	4 166.00a	1 413.50a	63.70a	2.45a	9.22b
		CV/%	—	—	—	—	0.50	15.40	2.98
2023—2024	丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	3 454.00bc	1 076.50b	4 047.50b	1 670.00a	63.10a	3.13a	8.34b
		N180	3 882.50a	1 503.50a	4 092.00b	1 713.00a	61.93b	2.79b	9.47a
		N240	3 967.50a	1 331.50ab	4 347.00a	1 711.00a	61.77b	2.68b	9.70a
		N300	3 682.00b	1 085.00b	4 281.50ab	1 684.00a	62.25b	2.87ab	8.79b
		CV/%	—	—	—	—	1.02	7.29	9.74
	百农 207 Bainong 207	N0	3 508.00b	1 007.00b	4 099.00b	1 591.00b	63.21ab	3.43a	8.80bc
		N180	3 667.00b	1 153.00ab	4 117.00b	1 686.00a	62.95b	2.28b	9.57a
		N240	3 766.00a	1 360.33a	4 275.50a	1 662.00a	62.97b	3.17a	9.25ab
		N300	3 515.00b	662.00c	4 312.50a	1 466.50c	63.50a	3.59a	8.61c
		CV/%	—	—	—	—	0.40	19.52	5.20
F 值 F value	品种 Variety(V)		4.57*	6.75*	0.50	4.79*	27.31***	0.91	9.02**
	处理 Treatment(T)		9.53***	5.81**	6.26**	3.94*	6.37**	2.49	19.06***
	V×T		0.82	0.76	1.41	0.14	1.30	1.52	9.70***

同一品种同列不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著。\* :  $P < 0.05$ ; \*\* :  $P < 0.01$ ; \*\*\* :  $P < 0.001$ 。下表同。

The same varieties of the same column labelled with different lowercase letters indicate that significant differences among treatments at 0.05 level. \* :  $P < 0.05$ ; \*\* :  $P < 0.01$ ; \*\*\* :  $P < 0.001$ . The same in tables 2—5.

表 2 施氮量对小麦籽粒淀粉含量及其组分的影响

Table 2 Effect of nitrogen application rate on starch content and its components of wheat grain

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	总淀粉含量 Total starch/%	直链淀粉含量 Amylose/%	支链淀粉含量 Amylopectin/%	直/支 Amylose/amylopectin
2022—2023	丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	76.26a	22.83a	51.24c	0.43a
		N180	75.21ab	21.19b	54.02b	0.39b
		N240	73.84b	18.29d	55.55ab	0.33c
		N300	76.07a	19.93c	56.14a	0.35c
		CV/%	—	—	—	—
	百农 207 Bainong 207	N0	76.40a	20.46b	55.94a	0.37ab
		N180	74.41a	17.87c	56.54a	0.31c
		N240	75.53a	19.64bc	55.89a	0.35b
		N300	76.36a	21.66a	54.70a	0.40a
		CV/%	—	—	—	—
2023—2024	丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	76.74a	22.62a	54.12b	0.42a
		N180	75.18b	21.29b	53.89b	0.39a
		N240	74.18c	18.50d	55.60a	0.34b
		N300	75.98a	19.94c	56.04a	0.36b
		CV/%	—	—	—	—
	百农 207 Bainong 207	N0	75.95a	20.38b	55.57ab	0.37ab
		N180	74.35a	18.46c	55.89ab	0.32c
		N240	75.44a	19.15c	56.30a	0.34bc
		N300	75.85a	21.70a	54.15b	0.40a
		CV/%	—	—	—	—
F 值 F value	品种 Variety(V)		0.21	19.90***	8.04**	18.72***
	处理 Treatment(T)		13.35***	61.51***	2.93*	35.69***
	V×T		4.61**	63.02***	11.67***	46.80***

表 3 施氮量对小麦籽粒支链淀粉链长分布的影响(2022—2023)

Table 3 Effect of nitrogen fertilization rate on the distribution of amylopectin chain length of wheat grain(2022—2023)

品种 Variety	处理 Treatment	A chain DP 6—12/%	B1 chain DP 13—24/%	B2 chain DP 25—36/%	B3 chain DP>36/%	(A+B1)/ (B2+B3)	Average DP of amylopectin
丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	27.04c	46.11b	14.59a	12.28a	2.73c	21.09a
	N180	27.29b	46.12b	14.50b	12.11b	2.76b	21.00b
	N240	28.40a	46.62a	14.16c	10.82c	3.01a	20.47c
	N300	27.05c	46.12b	14.57a	12.27a	2.73c	21.08a
	CV/%	2.14	0.56	1.27	5.50	4.46	1.31
百农 207 Bainong 207	N0	26.97c	46.18c	14.46b	12.40a	2.71c	21.16a
	N180	29.17a	47.13a	13.64d	10.06c	3.22a	20.08c
	N240	28.17b	47.04b	14.15c	10.64b	3.04b	20.44b
	N300	26.65d	46.03d	14.67a	12.66a	2.69c	21.23a
	CV/%	3.85	1.14	2.86	10.35	8.35	2.50
F 值 F value	品种 Variety(V)	173.01***	3 299.38***	1 064.13***	530.45***	910.22***	456.46***
	处理 Treatment(T)	1 402.99***	2 778.93***	1 260.64***	1 996.02***	2 093.78***	1 655.74***
	V×T	1 055.19***	1 388.06***	1 185.27***	1 071.23***	1 366.96***	1 040.96***

2.4 施氮量对小麦籽粒淀粉晶体结构的影响

不同施氮量下两个品种淀粉 X 衍射图谱(图 1)中,在 2θ 衍射角下的 15°、23°呈现两个强峰,在 17°、18°处呈现连续双峰,为典型的小麦淀粉 A 型晶体,不同施氮量未改变淀粉晶体类型。由表 4 可知,施氮处理均显著降低两个品种淀粉相对结晶度(百农 207 的 N300 处理除

外),两年度表现一致。2022—2023 和 2023—2024 年丰德存麦 5 号的淀粉相对结晶度均在 N240 处理下达到最小值,较 N0 处理分别降低 16.30%、16.27%;百农 207 的淀粉相对结晶度均在 N180 处理下达到最小值,较 N0 处理分别降低 10.03%、9.62%。由此说明,适量施用氮肥可降低两个品种籽粒淀粉相对结晶度。

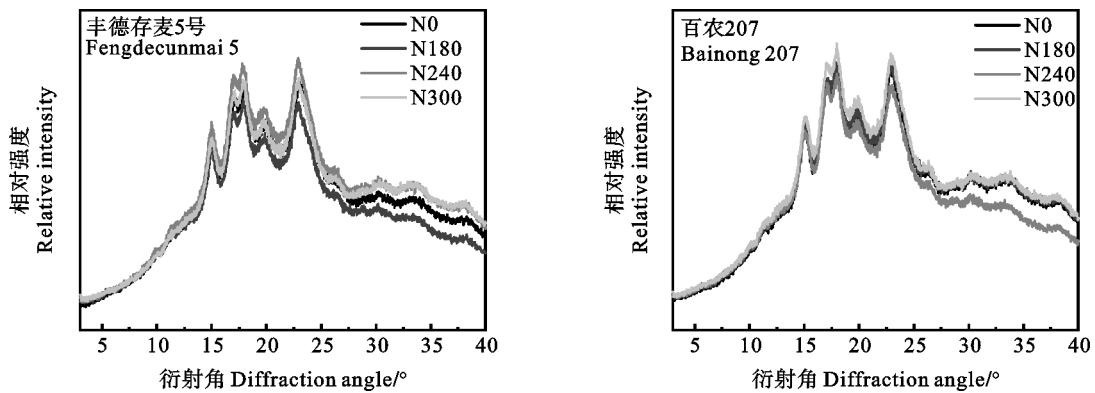


图 1 不同施氮量下小麦籽粒淀粉 X 衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of wheat grain starch under different nitrogen application rates

2.5 施氮量对小麦籽粒淀粉表层结构的影响

不同施氮量下两个品种淀粉 ATR-FTIR 图谱如图 2 所示,其吸收峰位置一致,但相对吸光度值有差异。1 047/1 022 cm<sup>-1</sup> 的比值大小反映淀粉表层结构有序度高低,1 022/995 cm<sup>-1</sup> 的比值大小反映淀粉表层非晶体含量相对比例多少。由表 4 可知,与 N0 处理相比,施氮处理均降低丰德存麦 5 号 1 047/1 022 cm<sup>-1</sup> 的比值,提高其 1 022/995 cm<sup>-1</sup> 的比值。2022—2023 和 2023—2024 年丰德存麦 5

号的不同处理间差异显著,1 047/1 022 cm<sup>-1</sup> 的比值均在 N240 处理下降至最小值,较 N0 处理分别降低 4.12%、6.06%;1 022/995 cm<sup>-1</sup> 的比值均在 N240 处理下增至最大值,较 N0 处理分别提高 11.39%、20.27%。百农 207 的 N180 处理 1 047/1 022 cm<sup>-1</sup> 的比值较 N0 处理分别显著降低 4.21%、4.21%;1 022/995 cm<sup>-1</sup> 的比值较 N0 处理分别显著提高 12.20%、12.19%。这说明适量施用氮肥可降低小麦籽粒淀粉表层结构有序度。

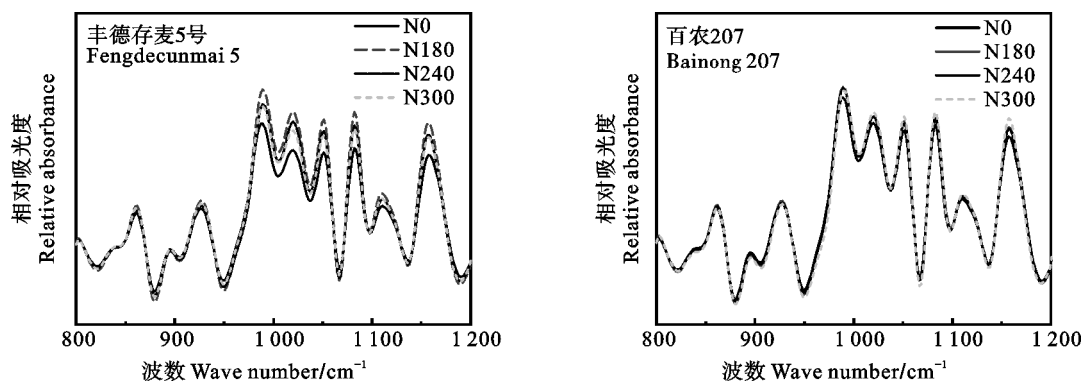


图 2 不同施氮量下小麦籽粒淀粉 ATR-FTIR 图谱

Fig. 2 ATR-FTIR patterns of wheat grain starch under different nitrogen application rates

表 4 施氮量对小麦籽粒淀粉相对结晶度和红外比例的影响

Table 4 Effect of nitrogen application rate on the relative crystallinity and infrared ratio of wheat grain starch

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	相对结晶度 Relatively crystallinity	红外比例 Infrared ratio	
				1 047/1 022 cm <sup>-1</sup>	1 022/995 cm <sup>-1</sup>
2022—2023	丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	33.75a	0.97a	0.79d
		N180	28.63c	0.94c	0.86b
		N240	28.25c	0.93d	0.88a
		N300	31.46b	0.96b	0.83c
		CV/%	7.89	2.04	4.32
	百农 207 Bainong 207	N0	31.71ab	0.95b	0.82bc
		N180	28.53b	0.91c	0.92a
		N240	28.81b	0.94b	0.83b
		N300	34.25a	0.96a	0.81c
		CV/%	8.61	1.97	5.47
2023—2024	丰德存麦 5 号 Fengdecunmai 5	N0	33.62a	0.99a	0.74d
		N180	28.72c	0.94c	0.86b
		N240	28.15c	0.93d	0.89a
		N300	31.06b	0.97b	0.83c
		CV/%	7.49	2.93	6.79
	百农 207 Bainong 207	N0	31.69b	0.95b	0.82b
		N180	28.64c	0.91d	0.92a
		N240	28.84c	0.94c	0.82b
		N300	35.21a	0.96a	0.83b
		CV/%	9.44	2.07	5.44
	品种 Variety(V)		6.75 *	59.94 ***	13.86 **
F 值 F value	处理 Treatment(T)		161.07 ***	147.43 ***	117.04 ***
	V×T		33.77 ***	84.77 ***	56.00 ***

### 2.6 施氮量对小麦籽粒淀粉粒度分布的影响

由表 5 可知,与 N0 处理相比,两个年度丰德存麦 5 号(N240、N300)和百农 207(N180、N240)施氮处理 >9.8 μm 和 2.0~9.8 μm 的淀粉粒数目分布百分比均降低,<2.0 μm 淀粉粒数目分布百分比均增加。两个年度丰德存麦 5 号均在 N240 处理下、百农 207 均在 N180 处理下有最

值,且与 N0 处理差异显著。与 N0 处理相比,2022—2023 和 2023—2024 年丰德存麦 5 号 >9.8 μm 的淀粉粒数目占比降幅范围分别为 21.43%~64.29%、0.07%~91.67%;百农 207 降幅范围分别为 50.00%~75.00%、33.33%~66.67%。综上所述,适量施用氮肥可降低小麦 >9.8 μm 的淀粉粒数目占比。

表5 施氮量对小麦籽粒淀粉粒度分布的影响  
Table 5 Effect of nitrogen application rate on wheat grain starch particle size distribution

W年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	粒径分布 Starch size distribution/%										
			<2.0 μm			2.0~9.8 μm			>9.8 μm				
			体积 Volume	表面积 Surface area	数目 Number	体积 Volume	表面积 Surface area	数目 Number	体积 Volume	表面积 Surface area	数目 Number		
2022—2023	丰德存麦5号 Fengdecunmai 5	N0	4.65c	39.76ab	96.69b	10.77d	24.33d	3.18a	84.57a	35.91a	0.14a		
		N180	5.22b	39.15b	96.56b	15.91b	30.22a	3.33a	78.87c	30.63b	0.11a		
		N240	5.57a	42.85a	98.40a	18.16a	30.27a	1.55b	76.28d	26.88c	0.05b		
		N300	5.11b	41.38ab	97.50ab	13.74c	26.39b	2.40ab	80.26b	31.19b	0.10a		
		CV/%	6.99	5.00	0.97	19.58	9.88	34.60	3.97	11.07		38.29	
		-----											
		2023—2024	丰德存麦5号 Fengdecunmai 5	N0	5.46b	45.58d	99.03b	15.32bc	26.49a	0.94a	75.43a	27.86a	0.04a
				N180	6.29a	52.00a	99.76a	14.54c	24.58b	0.23b	75.84a	23.42c	0.01b
				N240	6.01a	50.03b	99.56a	16.30ab	24.26b	0.42b	77.69a	25.72b	0.02b
				N300	5.91a	47.47c	98.94b	17.87a	23.86b	1.01a	79.55a	28.67a	0.05a
CV/%	6.10			5.48	0.41	9.28	4.61	59.52	3.42	8.38		64.54	
-----													
2023—2024	丰德存麦5号 Fengdecunmai 5			N0	5.08c	42.47b	97.32b	10.76d	22.84c	2.57b	84.16a	34.69a	0.12a
				N180	5.38b	39.93b	96.48c	15.48b	29.51a	3.41a	79.14c	30.56b	0.12a
				N240	6.01a	52.84a	99.84a	19.63a	25.92b	0.15c	74.36d	21.24c	0.01b
				N300	5.31b	42.43b	97.66b	13.88c	25.90b	2.25b	80.81b	31.67b	0.10a
		CV/%	6.82	12.08	1.37	22.47	10.00	61.94	4.66	17.92		60.05	
		-----											
		2023—2024	丰德存麦5号 Fengdecunmai 5	N0	5.51c	45.83c	99.11b	15.64bc	26.61a	0.86a	75.06a	27.48ab	0.03a
				N180	6.48a	54.25a	99.81a	18.07a	23.59b	0.18b	75.45a	22.16c	0.01b
				N240	6.09ab	47.84bc	99.52b	16.59ab	24.22b	0.46ab	77.31a	25.48b	0.02ab
				N300	5.93bc	50.30ab	98.99b	14.57c	23.64b	0.96a	79.50a	28.52a	0.04a
CV/%	6.98			7.47	0.42	9.77	6.16	65.31	3.42	10.66		70.31	
-----													
F值 F value	品种 Variety(V)				117.76***	82.12***	163.32***	42.07***	44.07***	162.84***	40.89***	107.86***	154.03***
	处理 Treatment(T)				29.68***	10.99***	18.22***	111.06***	7.94***	17.98***	16.66***	55.39***	24.02***
	V×T				7.48***	11.43***	18.38***	53.99***	30.25***	18.38***	29.17***	28.27***	17.60***

### 3 讨论

淀粉合成需要多种酶的协同作用。腺苷二磷酸葡萄糖(ADPG)在颗粒结合型淀粉合成酶(GBSS)的作用下合成直链淀粉;而在淀粉合成酶(SSS)、淀粉分支酶(SBE)和去分支酶(DBE)共同催化下合成支链淀粉<sup>[20]</sup>。本研究中,适量施氮能增加小麦支链淀粉中 A、B1 短链含量、降低 B2、B3 长链含量,进而引起淀粉相对结晶度和表层有序度下降、大淀粉颗粒数目减少,这与 Zhu 等<sup>[21]</sup>和 Xiong 等<sup>[22]</sup>在水稻中的研究结果一致。Yang 等<sup>[23]</sup>提出,高氮素穗肥水平下粳稻支链淀粉 A 短链含量减少,B2 和 B3 长链含量增多,并通过 Wu-Gilbert 链长分布模型拟合指出,氮素通过抑制 SBE 活性和增强 SSS 活性改变支链淀粉链长分布。这表明氮肥可通过调控淀粉合成相关酶的活性改变支链淀粉的链长分布。

支链淀粉侧链聚集成簇,相邻长侧链相互缠绕形成更稳定的双螺旋结构,构成有序结晶区,支链淀粉长侧链含量越高,淀粉相对结晶度和表层有序度越高<sup>[24]</sup>。而直链淀粉形成单螺旋结构嵌于支链淀粉簇中,和短支链淀粉共同构成无定形区<sup>[25]</sup>。淀粉相对结晶度和表层有序度越低,代表淀粉结构稳定性越差,大淀粉颗粒越易分解为小颗粒<sup>[26]</sup>。此外,大淀粉颗粒主要在籽粒灌浆过程的早期阶段形成,而中小淀粉颗粒集中在籽粒灌浆过程的后期阶段形成<sup>[26]</sup>。施用氮肥会延长谷物籽粒灌浆期,提高淀粉降解酶和  $\alpha$ -淀粉酶的活性,造成大淀粉颗粒表面出现较多孔洞并裂解转化为小淀粉颗粒<sup>[27]</sup>。因此,施用氮肥减少大淀粉颗粒数目还可能与其延长籽粒灌浆期、提高籽粒灌浆后期淀粉降解酶和  $\alpha$ -淀粉酶活性有关。

淀粉在水中吸收热量发生变化,反映淀粉热力学、糊化、膨胀势等性质。糊化过程中双螺旋结构的解离需消耗能量,其大小由热焓值表征。支链淀粉长链相较于短链能形成不易解离、更稳定的双螺旋结构和晶体结构,因此其含量越高,淀粉热焓值越大<sup>[28]</sup>。本研究中适量施用氮肥后,小麦支链淀粉长链含量减少,淀粉峰值温度和热焓值降低,有利于淀粉低温糊化、保持冷冻稳定性<sup>[29]</sup>。

本研究发现,适量施用氮肥能提高淀粉膨胀势和峰值黏度,与 Zhang 等<sup>[30]</sup>研究结果一致,主要与淀粉晶体稳定性和表层有序性下降有关。当淀粉的结晶区稳定性和表层有序度降低时,其分

子间的排列变得更为松散,双螺旋结构的致密性减弱,从而为水分子提供了更多的结合位点和渗透通道和,有利于水分的快速吸附与扩散,淀粉膨胀势升高<sup>[31-32]</sup>。而具有高膨胀势的淀粉,有助于增加小麦粉食品的软弹性、咀嚼性和保水性<sup>[33]</sup>。此外,邓丽丽<sup>[34]</sup>研究表明,直链淀粉长链会与支链淀粉团簇结构结合,限制淀粉非结晶区域的水合作用,从而抑制淀粉颗粒吸水膨胀。本研究中施氮导致直链淀粉含量下降,可能进一步促进了淀粉膨胀势升高。总而言之,当维持淀粉颗粒结构的内部结合力减弱,淀粉膨胀势升高。在糊化过程中,淀粉颗粒便能吸收更多水分、与逸出的直链淀粉形成更稳定的凝胶结构,进而提高淀粉峰值黏度<sup>[35]</sup>。因此,适量施氮通过减少支链淀粉长链含量降低峰值温度和热焓值,并通过弱化结晶度和有序度提高膨胀势和黏度,进而改善淀粉理化性质。

#### 参考文献:

- [1] 应欣,贺伟,郭庆彬,等. 小麦粉组成对面团水分迁移及制品品质影响的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(6): 12.  
YING X, HE W, GUO Q B, et al. Effects of wheat flour composition on dough moisture migration and product quality [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(6): 12.
- [2] 唐忠艳,陈刘明,张雯婷,等. 小麦淀粉的理化特性及其对面粉加工品质的影响[J]. 耕作与栽培, 2025, 45(2): 88.  
TANG Z Y, CHEN L M, ZHANG W T, et al. Physicochemical properties of wheat starch and its effect on flour processing quality [J]. *Tillage and Cultivation*, 2025, 45(2): 88.
- [3] 邓丽丽,张艳,张剑,等. 不同品种小麦粉的理化性质与北方馒头品质关系的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 48.  
DENG L L, ZHANG Y, ZHANG J, et al. Relationship between physicochemical properties of wheat flour from different cultivars and quality of north Chinese steamed bread [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(4): 48.
- [4] SUN X X, SUN Z Z, SALEH A S M, et al. Understanding the granule, growth ring, blocklets, crystalline and molecular structure of normal and waxy wheat A- and B- starch granules [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107034.
- [5] 蒋岩,赵灿,陈越,等. 氮素穗肥对粳米淀粉特性和结构的影响及其与食用特征的关系[J]. 作物学报, 2023, 49(1): 201.  
JIANG Y, ZHAO C, CHEN Y, et al. Effects of nitrogen panicle fertilizer application on physicochemical properties and fine structure of Japonica rice starch and its relationship with eating quality [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(1): 201.
- [6] WANG Y, CHEN L, YANG T Y, et al. A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106543.
- [7] 蔡文璐,李可,简超群,等. 施氮量对小麦籽粒淀粉粒的效应[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(7): 824.  
CAI W L, LI K, JIAN C Q, et al. Effect of nitrogen rates on the starch granule size distribution in wheat kernels [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(7): 824.

- [8]王晨阳,马冬云,郭天财,等.不同水、氮处理对小麦淀粉组成及特性的影响[J].作物学报,2004,30(8):846.  
WANG C Y, MA D Y, GUO T C, *et al.* Effects of different irrigation and nitrogen application regimes on starch components and paste properties of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(8): 846.
- [9]马冬云,郭天财,王晨阳,等.施氮水平对小麦籽粒淀粉粒度分布及淀粉粒糊化特性的影响[J].西北农业学报,2010,19(11):43.  
MA D Y, GUO T C, WANG C Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application rate on starch granule size distribution and starch pasting properties in wheat (*Triticum aestivum* L.) grain [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(11): 43.
- [10]TONG J Y, WANG S J, HE Z H, *et al.* Effects of reduced nitrogen fertilization and irrigation on structure and physicochemical properties of starch in two bread wheat cultivars [J]. *Agriculture*, 2021, 11(1): 12.
- [11]宋健民,刘爱峰,李豪圣,等.小麦籽粒淀粉理化特性与面条品质关系研究[J].中国农业科学,2008,41(1):272.  
SONG J M, LIU A F, LI H S, *et al.* Relationship between starch physicochemical properties of wheat grain and noodle quality [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 272.
- [12]LI C L, DHITAL S, GILBERT R G, *et al.* High-amylose wheat starch; Structural basis for water absorption and pasting properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 245: 116557.
- [13]HU Q, LIU Q Y, JIANG W Q, *et al.* Effects of mid-stage nitrogen application timing on the morphological structure and physicochemical properties of Japonica rice starch [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(6): 2465.
- [14]张燕.小麦新品种鑫华麦818籽粒淀粉粒的超微观察及其面食制品的评价[D].郑州:河南农业大学,2019:6.  
ZHANG Y. Ultrastructure observation of starch granules and evaluation of pasta products in a new wheat cultivar 'Xinhuamai 818' [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019: 6.
- [15]何照范.粮油籽粒品质及其分析技术[M].北京:农业出版社,1985:290.  
HE Z F. Grain quality of grain and oil and its analysis technology [M]. Beijing: Agriculture Press, 1985: 290.
- [16]ZHANG Z W, LI E P, FAN X Y, *et al.* The effects of the chain-length distributions of starch molecules on rheological and thermal properties of wheat flour paste [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105563.
- [17]雍明玲,叶苗,张雨,等.不同食味水稻品种稻米淀粉结构与理化特性及其对氮素响应的差异[J].中国水稻科学,2024,38(1):59.  
YONG M L, YE M, ZHANG Y, *et al.* Rice starch structure and physicochemical properties of good taste Japonica rice varieties and their regulations by nitrogen [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(1): 59.
- [18]LIU X N, XU Z K, LIU X X, *et al.* Lamellar structure changes in rice starch during  $\alpha$ -amylase hydrolysis: Effect of starch granule surface and channel proteins [J]. *Food Bioscience*, 2024, 61: 104502.
- [19]许倍铭,冯健超,郝紫瑞,等.种植密度对不同小麦品种籽粒淀粉含量及其特性的影响[J].麦类作物学报,2022,42(9):1111.  
XU B M, FENG J C, HAO Z R, *et al.* Effect of planting density on starch content and characteristics of wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(9): 1111.
- [20]HUANG L C, TAN H Y, ZHANG C Q, *et al.* Starch biosynthesis in cereal endosperms: An updated review over the last decade [J]. *Plant Communications*, 2021, 2(5): 100237.
- [21]ZHU D W, ZHANG H C, GUO B W, *et al.* Effects of nitrogen level on structure and physicochemical properties of rice starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 525.
- [22]XIONG R Y, TAN X M, YANG T T, *et al.* Starch multiscale structure and physicochemical property alterations in high-quality indica rice quality and cooked rice texture under different nitrogen panicle fertilizer applications [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 252: 126455.
- [23]YANG X Y, BI J G, GILBERT R G, *et al.* Amylopectin chain length distribution in grains of Japonica rice as affected by nitrogen fertilizer and genotype [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 71: 230.
- [24]王洪露.不同氮肥水平对糜子籽粒蛋白质及淀粉调控效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023:42.  
WANG H L. Study on the effects of different nitrogen fertilizer levels on the regulation of protein and starch in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023: 42.
- [25]LI H T, DHITAL S, FLANAGAN B M, *et al.* High-amylose wheat and maize starches have distinctly different granule organization and annealing behaviour: A key role for chain mobility [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105820.
- [26]SHI P W, ZHAO Y T, QIN F, *et al.* Understanding the multi-scale structure and physicochemical properties of millet starch with varied amylose content [J]. *Food Chemistry*, 2023, 410: 135422.
- [27]HUANG J W, PAN Y P, CHEN H F, *et al.* Physicochemical mechanisms involved in the improvement of grain-filling, rice quality mediated by related enzyme activities in the ratoon cultivation system [J]. *Field Crops Research*, 2020, 258: 107962.
- [28]CHI C D, LI X X, HUANG S X, *et al.* Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 154.
- [29]LI J, SHEN C K, GE B Q, *et al.* Preparation and application of potato flour with low gelatinization degree using flash drying [J]. *Drying Technology*, 2018, 36(3): 375.
- [30]ZHANG Y, WANG L. Impact of crystalline structure and surface order on the swelling properties of starch granules [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 190: 1.
- [31]LIANG D Y, LIU Q, LUOL, *et al.* The effect of maltose on structural, physicochemical, and digestive properties of lentil starch under electron beam irradiation [J]. *Foods*, 2024, 13(16): 2544.
- [32]ZHANG H, CHENG L, LI Z F, *et al.* Study on the effect and mechanism of gelatinization-retrogradation pretreatment on the digestibility of potato flour [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 314: 143453.
- [33]LI X, ZHANG Y, WANG L. Effects of starch swelling power on the texture and water retention of wheat flour-based foods [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 55(6): 2106.
- [34]邓丽丽.小麦淀粉分子结构基础与冷冻馒头品质关系的研究[D].郑州:河南农业大学,2023:4.  
DENG L L. Study on the relationship between molecular-structure basis of wheat starch and quality of frozen steamed bread [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023: 4.
- [35]LI H, GILBERT R G. Impact of starch granule structure on swelling and pasting properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(2): 1490.