

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.31072

研究简报

拔节期渍水对软质小麦淀粉粒度分布与糊化特性的影响

陈娟 杨婷婷 闫素辉 雍玉东 张士雅 李文阳*

安徽科技学院农学院, 安徽凤阳 233100

摘要: 为明确拔节期渍水对软质小麦淀粉粒度分布与糊化特性的影响。在大田条件下, 于 2021—2023 年, 选用软质小麦品种华成麦 1688 和荃麦 725 为试验材料, 设对照(CK)和渍水(WL) 2 种处理, 在小麦拔节期进行连续 10 d 的渍水处理, 研究拔节期渍水对软质小麦淀粉粒度分布及黏度参数的影响及其相互关系。结果表明, 与对照相比, 拔节期渍水胁迫通过降低小麦穗数、穗粒数及千粒重, 从而降低小麦产量, 籽粒湿面筋含量、蛋白质含量显著降低, 淀粉含量显著增加。拔节期渍水胁迫抑制了小麦胚乳 B 淀粉的产生和生长, 使小麦 B 型淀粉粒体积、表面积及数目百分比显著降低, 其中主要影响 2.8~10.0 μm 的淀粉粒; A 型淀粉粒体积、表面积百分比显著增加, 以影响其中 10.0~22.0 μm 的淀粉粒为主, 渍水胁迫对 A 型淀粉粒数目百分比无显著性影响。渍水胁迫后, 面粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值及回升值显著增加。可见, 拔节期渍水胁迫改变了小麦淀粉粒度分布, 通过降低 B 型淀粉粒占比, 增加 A 型淀粉粒占比, 进而增加峰值黏度等黏度参数, 最终影响小麦籽粒品质。

关键词: 小麦; 淀粉粒; 淀粉粒度分布; 糊化特性; 渍水

Effects of waterlogging at jointing stage on starch particle size distribution and pasting properties of soft wheat

CHEN Juan, YANG Ting-Ting, YAN Su-Hui, YONG Yu-Dong, ZHANG Shi-Ya, and LI Wen-Yang*

College of Agronomy, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui, China

Abstract: The objective of this study is to clarify the effect of waterlogging at jointing stage on starch particle size distribution and pasting properties in soft wheat. Under field conditions, from 2021 to 2023, the soft wheat varieties Huachengmai 1688 and Quanmai 725 were selected as the test materials, and two treatments of control (CK) and waterlogging (WL) were conducted. The waterlogging treatment was carried out for 10 consecutive days at jointing stage of wheat to study the effect of waterlogging at jointing stage on the starch particle size distribution and viscosity parameters of soft wheat and their relationship. The results showed that, compared with the control, waterlogging stress at jointing stage reduced wheat yield by reducing spike number, grain number per spike, and 1000-grain weight. The wet gluten content and protein content of grains were significantly reduced, and the starch content was significantly increased. Waterlogging stress at jointing stage inhibited the production and growth of B-type starch in wheat endosperm, and significantly reduced the volume, surface area, and the number percentage of B-type starch granules, mainly affecting 2.8–10.0 μm starch granules. The volume and surface area percentage of A-type starch granules increased significantly, mainly affecting 10.0–22.0 μm starch granules. Waterlogging stress had no significant effect on the percentage of A-type starch granules. After waterlogging stress, the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, breakdown, and setback of wheat increased significantly. In conclusion, waterlogging stress at jointing stage changed the starch particle size distribution of wheat. By reducing the proportion of B-type starch granules,

本研究由安徽省高校协同创新项目(GXXT-2021-089), 安徽省现代农业产业技术体系建设专项(小麦), 安徽自然科学基金项目(1408085MC48)和安徽省科技特派员项目(2023tp035)资助。

This study was supported by the Collaborative Innovation Project of Universities in Anhui province (GXXT-2021-089), the Special Funds for the Construction of Agricultural Research System in Anhui Province (Wheat), the Anhui Natural Science Foundation Project (1408085MC48), and the Sci-tech Commissioner Project in Anhui Province (2023tp035).

* 通信作者(Corresponding author): 李文阳, E-mail: liwy@ahstu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 1160465149@qq.com

Received (收稿日期): 2023-11-26; Accepted (接受日期): 2024-04-02; Published online (网络出版日期): 2024-04-16.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240412.2136.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

increasing the proportion of A-type starch granules and the viscosity parameters such as peak viscosity were increased, and finally the yield and quality of wheat were affected.

Keywords: wheat; starch granules; granule size distribution of starch; pasting properties; waterlogging

江淮地区是我国软质小麦主产区之一,该地区水时空分布不规律,降雨量不集中,强度大,水位超出小麦需求,每年3月至5月份小麦拔节至成熟期降雨频发,易发生渍害^[1-2],渍害成为限制小麦产量的主要因素^[3]。但渍水时期、时长、强度等对小麦产量形成的影响不同,拔节期重度渍水(连续渍水3 d,土表上2 cm水层)处理下小麦产量较对照显著降低^[4],孕穗期渍水(旗叶抽出部分占倒二叶1/3时开始连续渍水35 d)使地上部分干物质显著降低,进而导致成穗率、穗粒数的降低^[5],拔节期和花后渍水分别连续渍水5、10和15 d均显著降低了小麦产量、穗粒数、千粒重,并随渍水时间的延长而降幅增大^[6],灌浆期涝渍害(花后10 d)连续渍水处理7 d后,小麦有效穗数、穗粒数、千粒重和产量均显著降低^[7]。对小麦籽粒品质的影响,张艳菲等^[8]研究认为,花后渍水(花后5 d)处理10 d使小麦蛋白质及其组分含量降低。

软质小麦籽粒硬度低,筋力低,面粉颗粒小,吸水率低,是制作优质饼干、糕点的主要原材料^[9]。软质小麦籽粒的主要构成部分为淀粉,占籽粒干重的70%,小麦胚乳含有2种淀粉颗粒:A型(>10 μm)和B型(≤10 μm)^[10-11]。淀粉粒度分布是小麦重要性状之一^[12],决定小麦淀粉糊化、回升等性状,进而影响面粉品质^[13]。小麦籽粒发育进程中,肥料、干旱、渍水、光照等环境因素均会对小麦淀粉粒的形成与发育产生影响,进而影响淀粉粒度分布及黏度参数^[14-15]。前人研究表明,灌浆期弱光胁迫、花后渍水胁迫均会导致软质小麦B型淀粉粒占比显著降低,A型淀粉粒占比显著增加,使面粉峰值黏度等糊化参数显著降低^[16-17]。谭植等^[18]研究表明,施用钾肥可显著增加软质小麦B型淀粉粒体积和表面积百分比,A型淀粉粒则显著降低。

目前,由于全球变暖,气象灾害频发,小麦拔节期时常遭受渍水危害,对小麦产量和品质产生不利影响,而淀粉粒度分布是决定品质的重要因素。为此,本试验选择2个软质小麦品种,在拔节期进行渍水处理,模拟持续降雨天气对小麦淀粉粒度分布与糊化特性的影响,以期为小麦抗逆稳产稳质栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于2021—2022年和2022—2023年连续2个生长季在凤阳安徽科技学院种植园内进行,选用软质小麦品种华成麦1688(HC1688)和荃麦725(QM725)为材料。试验设置2个处理:对照(CK)和拔节期渍水处理(WL)。渍水处理从拔节期(3月27日)开始连续渍水10 d,渍水前将小区四周墒沟外围起垄,并使用塑料薄膜在垄上进行覆膜

隔水,正常水分处理和渍水处理小区之间设置3 m隔离带。渍水处理时,使用塑料管向小区处理灌水,用水龙头调节水量,处理期间使水面高于土层3~5 cm,处理结束后及时将水排出。试验地耕层土壤含有机质11.2 g kg⁻¹、速效氮80.2 mg kg⁻¹、速效磷28.6 mg kg⁻¹和速效钾62.3 mg kg⁻¹。小区面积为12 m²(3 m×4 m),行距25 cm,采用裂区随机区组设计,3次重复,施纯N 120 kg hm⁻²、P₂O₅ 90 kg hm⁻²、K₂O 90 kg hm⁻²,磷、钾肥均作为基肥一次性底施,氮肥基追比例为7:3,在拔节期追肥。其他管理措施同当地高产田。

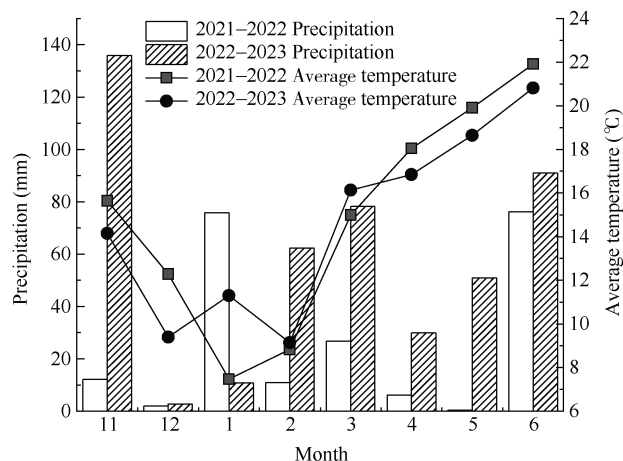


图1 实验点2021—2023小麦生长季温度与降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation during wheat growth season in 2021–2023

1.2 测定项目与方法

1.2.1 产量及构成因素测定 于成熟期,每小区选取具有代表性样方1 m²调查穗数,并随机选择30株小麦调查穗粒数。每小区收获3 m²,晒干脱粒,测定千粒重和产量。

1.2.2 籽粒品质性状测定 成熟期收获的小麦籽粒于冷藏室储存3个月,采用Perten公司的DA 7200近红外分析仪测定籽粒淀粉含量、蛋白质含量、湿面筋含量。

1.2.3 淀粉粒的提取与分析 称取成熟期小麦籽粒3 g,加入25 mL蒸馏水浸泡24 h;采用研钵碾磨后过200目筛,1500×g离心10 min,弃上清液,重复3次;加入25 mL、2 mol L⁻¹的NaCl,旋涡混合,匀浆离心,1500×g离心10 min,弃上清液,重复3次。采用上述的方法,依次加入0.2% NaOH、2% SDS和蒸馏水各25 mL,漩涡混合,1500×g离心,弃上清液,最后加入10 mL丙酮,置于阴凉处风干,贮存于-18°C的冰箱保存。利用美国Beckman Coulter公司LS13320衍射粒度分析仪进行粒径分析。

1.2.4 淀粉黏度参数测定 使用Perten公司的

LABORATORY MILL3100 磨粉。称取 3 g 面粉放入铝盒中, 加入 25 mL 蒸馏水, 置于 starchmaster-2 型快速黏度分析仪测定峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值和回升值。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计分析处理, 采用 Oringin 2021 进行作图, 通过 DPS 软件进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 拔节期渍水对软质小麦产量及其构成因素的影响

由表 1 可知, 与对照相比, 拔节期渍水显著降低小麦穗数、穗粒数、千粒重, 最终导致产量的降低, 2 年表现一致。2021—2022 年度, 拔节期渍水胁迫下, 两品种穗数分别降低 11.15%和 4.87%, 穗粒数分别降低 14.40%和 17.72%, 千粒重分别降低 16.55%和 10.16%, 产量分别降低 17.15%和 9.44%。2022—2023 年度, 拔节期渍水胁迫下, 两品种穗数分别降低 11.15%和 10.87%, 穗粒数分别降低 12.54%和 17.02%, 千粒重分别降低 15.37%和 13.53%, 产量分别降低 18.02%和 24.79%。说明穗粒数及千粒重的降低是拔节期渍水处理下小麦产量降低的主要原因, 其次为穗数的降低。

2.2 拔节期渍水对软质小麦籽粒品质性状的影响

由表2可知, 拔节期渍水胁迫下小麦湿面筋含量、蛋

白质含量较对照显著降低, 籽粒淀粉含量显著增加, 2 年表现一致。2021—2022年度, 华成麦1688和荃麦725湿面筋含量较对照分别降低12.88%、3.06%; 蛋白质含量分别降低7.43%、7.78%; 淀粉含量分别增加0.79%、0.10%。2022—2022年度, 与对照相比, 渍水胁迫下两品种湿面筋含量、蛋白质含量分别降低4.92%、7.77%; 11.68%、2.92%; 淀粉含量分别增加1.41%、0.56%。说明拔节期渍水胁迫下小麦花前氮素的积累和转运受到影响, 从而导致品质性状发生改变。

2.3 拔节期渍水对软质小麦淀粉粒度分布的影响

2.3.1 对淀粉粒体积分布的影响 由表 3 可知, 与对照相比, 拔节期渍水显著降低两品种 B 型淀粉粒体积百分比, 增加 A 型淀粉粒体积百分比。B 型淀粉粒组中, 渍水胁迫主要降低 2.8~10.0 μm 的淀粉粒体积百分比。与对照相比, 2021—2022 年度两品种 2.8~10.0 μm 的淀粉粒体积百分比分别降低 7.68%和 9.82%, 2022—2023 年度则分别降低 11.16%和 10.64%。A 型淀粉粒组中, 10.0~22.0 μm 的淀粉粒体积百分比显著增加。2021—2022 年度两品种 10.0~22.0 μm 的淀粉粒体积百分比分别增加 4.13%和 5.08%, 2022—2023 年度两品种在 10.0~22.0 μm 的淀粉粒体积百分比分别增加 11.83%和 4.88%。可见, 渍水胁迫不利于小麦 B 型淀粉粒体积的增大。

2.3.2 对淀粉粒表面积分布的影响 由表 4 可知, 与对照相比, 拔节期渍水显著降低 B 型淀粉粒表面积百分

表 1 渍水对小麦产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of waterlogging on yield and its components in wheat

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	穗数 Spike ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg hm^{-2})
2021—2022	CK	华成麦 1688 HC1688	370.67 $\pm$ 14.05	48.80 $\pm$ 2.29	47.19 $\pm$ 3.08	5994.62 $\pm$ 179.24
		荃麦 725 QM725	548.00 $\pm$ 6.93	49.53 $\pm$ 0.25	41.74 $\pm$ 0.81	8375.29 $\pm$ 346.09
	WL	华成麦 1688 HC1688	329.33 $\pm$ 14.05	41.77 $\pm$ 1.35	39.38 $\pm$ 0.80	4966.44 $\pm$ 63.66
		荃麦 725 QM725	521.33 $\pm$ 33.31	40.75 $\pm$ 3.55	37.50 $\pm$ 0.65	7584.62 $\pm$ 587.13
2022—2023	CK	华成麦 1688 HC1688	568.00 $\pm$ 12.00	47.53 $\pm$ 1.86	46.85 $\pm$ 0.85	8730.40 $\pm$ 135.33
		荃麦 725 QM725	662.00 $\pm$ 42.00	51.70 $\pm$ 1.10	47.15 $\pm$ 0.45	8850.07 $\pm$ 148.87
	WL	华成麦 1688 HC1688	480.00 $\pm$ 12.00	41.57 $\pm$ 1.95	39.65 $\pm$ 1.35	7157.44 $\pm$ 138.28
		荃麦 725 QM725	590.00 $\pm$ 46.00	42.90 $\pm$ 0.90	40.77 $\pm$ 1.72	6656.53 $\pm$ 313.47
F 值		年份 Y	142.01**	2.15	13.37**	84.85**
F-value		渍水 W	26.22**	125.09**	118.96**	132.28**
		品种 C	165.77**	5.27*	6.31*	90.41**
		Y $\times$ W	4.27	0.70	0.42	16.08**
		Y $\times$ C	13.78**	2.43	13.82**	122.73**
		W $\times$ C	0.47	1.30	3.49	0.62
		Y $\times$ W $\times$ C	0.34	0.72	1.38	3.12**

CK: 对照; WL: 拔节期渍水处理。Y $\times$ W: 年份 $\times$ 渍水; Y $\times$ C: 年份 $\times$ 品种; W $\times$ C: 渍水 $\times$ 品种; Y $\times$ W $\times$ C: 年份 $\times$ 渍水 $\times$ 品种交互效应。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

CK: control; WL: waterlogging at jointing stage. Y: year; W: waterlogging; C: cultivar; Y $\times$ W: year $\times$ waterlogging; Y $\times$ C: year $\times$ cultivar; W $\times$ C: waterlogging $\times$ cultivar; Y $\times$ W $\times$ C: year $\times$ waterlogging $\times$ cultivar interaction effect. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 2 渍水对小麦籽粒品质性状的影响
Table 2 Effects of waterlogging on wheat grain quality traits

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	湿面筋含量 Wet gluten (%)	蛋白质含量 Protein content (%)	淀粉含量 Starch content (%)
2021–2022	CK	华成麦 1688 HC1688	29.50±1.47	14.33±0.78	68.03±0.78
		荃麦 725 QM725	28.40±0.20	13.55±0.05	69.40±0.05
	WL	华成麦 1688 HC1688	25.70±1.70	12.47±0.30	68.57±0.30
		荃麦 725 QM725	27.53±1.21	12.45±0.35	69.47±0.35
2022–2023	CK	华成麦 1688 HC1688	41.47±0.40	18.45±1.04	65.80±0.20
		荃麦 725 QM725	41.67±0.57	18.38±0.21	66.50±0.17
	WL	华成麦 1688 HC1688	39.43±0.23	17.08±0.49	66.73±0.50
		荃麦 725 QM725	40.07±1.00	16.95±1.24	66.87±0.35
F 值	年份 Y		936.40**	204.43**	216.68**
F-value	渍水 W		24.32**	16.57**	8.55*
	品种 C		0.87	0.01	22.75**
	Y×W		0.38	0.74	1.16
	Y×C		0.01	1.48	4.86*
	W×C		4.00	0.02	2.53
	Y×W×C		2.21	1.99	0.02

处理同表 1。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 3 渍水对小麦淀粉粒体积分布的影响
Table 3 Effect of waterlogging on volume distribution of starch granules in wheat endosperm (%)

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule (μm)					
			0.1–2.8	2.8–10.0	≤10.0	>10.0	10.0–22.0	>22.0
2021–2022	CK	HC1688	11.69±0.01	29.67±1.10	41.16±0.72	58.84±0.72	30.50±0.44	28.70±0.70
		QM725	11.59±0.01	27.50±0.99	39.09±1.28	60.91±1.28	32.65±0.34	29.40±0.99
	WL	HC1688	11.62±0.02	27.39±2.45	40.34±0.74	59.66±0.74	31.76±0.49	28.21±0.75
		QM725	11.52±0.01	24.80±1.67	36.33±1.80	63.67±1.80	34.31±1.34	29.77±0.49
2022–2023	CK	HC1688	11.33±0.01	27.32±0.05	38.66±0.07	61.34±0.07	32.36±0.06	29.04±0.09
		QM725	9.64±0.01	23.40±0.54	32.70±0.07	67.30±0.07	35.05±0.03	32.30±0.09
	WL	HC1688	9.38±0.01	24.27±0.05	33.65±0.08	66.35±0.08	36.19±0.16	29.94±0.19
		QM725	9.33±0.01	20.91±0.86	30.24±1.33	67.76±1.45	36.76±0.30	32.99±1.55
F 值	年份 Y		153.65**	159.72**	254.21**	248.31**	138.78**	113.15**
F-value	渍水 W		19.56**	53.61**	66.16**	64.64**	80.10**	6.83*
	品种 C		12.61**	130.91**	129.2**	126.11**	70.92**	57.09**
	Y×W		15.36**	2.23	8.21*	7.97*	7.66*	1.63
	Y×C		8.13*	2.13	5.80*	5.65*	2.31	22.69**
	W×C		9.22**	0.78	0.20	0.20	3.30	1.26
	Y×W×C		9.14**	5.79*	10.90**	10.66**	7.16*	3.92

处理同表 1。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 4 渍水对小麦淀粉粒表面积分布的影响
Table 4 Effect of waterlogging on surface area distribution of starch granules in wheat endosperm (%)

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule (μm)					
			0.1–2.8	2.8–10.0	≤10.0	>10.0	10.0–22.0	>22.0
2021–2022	CK	HC1688	51.53±1.19	31.86±0.44	83.39±1.26	16.61±0.91	10.99±0.82	5.66±5.84
		QM725	52.99±1.01	29.23±0.69	82.22±0.71	17.78±0.71	11.91±0.53	6.15±5.93
	WL	HC1688	51.28±0.95	28.36±2.75	79.64±3.06	20.36±1.60	14.80±1.74	5.52±5.83
		QM725	52.68±0.45	27.18±1.67	79.86±1.66	20.14±1.46	14.26±1.54	5.78±5.94
2022–2023	CK	HC1688	52.15±0.12	29.97±0.06	82.12±0.06	17.88±0.06	12.04±0.05	5.84±5.87
		QM725	51.56±0.97	27.58±0.04	79.15±1.01	20.85±0.96	14.60±0.02	5.27±6.27

(续表 4)

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule (μm)					
			0.1~2.8	2.8~10.0	≤10.0	>10.0	10.0~22.0	>22.0
F 值	WL	HC1688	48.78±0.19	28.03±1.67	76.81±1.83	23.19±1.64	16.23±1.75	6.84±7.04
		QM725	50.78±0.07	23.86±0.64	74.64±0.64	25.36±1.42	18.40±1.48	6.94±6.91
F-value	年份 Y		16.49**	11.58**	24.13**	36.08**	21.45**	22.68**
	渍水 W		13.55**	28.18**	39.87**	59.62**	49.66**	7.50**
	品种 C		11.01**	23.99**	5.84*	8.73*	6.48*	2.30
	Y×W		7.88*	0.06	2.15	3.22	0.83	8.36*
	Y×C		1.26	1.69	2.75	4.11	4.69*	0.07
	W×C		3.88	0.02	0.76	1.13	0.84	0.29
	Y×W×C		4.26	2.34	0.05	0.08	0.28	0.54

处理同表 1。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

比, 增加 A 型淀粉粒面积百分比。B 型淀粉粒组中, 渍水胁迫主要降低 2.8~10.0 μm 的淀粉粒面积百分比, 两品种 2.8~10.0 μm 的淀粉粒面积百分比在 2021—2022 年度分别降低 10.99%和 7.01%, 2022—2023 年度分别降低 6.47%和 13.49%。A 型淀粉粒组中, 主要增加 10.0~22.0 μm 的淀粉粒面积百分比, 2021—2022 年度在 10.0~22.0 μm 的面积百分比分别增加 34.66%和 19.73%, 2022—2023 年度分别增加 34.80%和 26.03%。可见, 拔节期渍水胁迫不利于 B 型淀粉粒表面积的增加。

2.3.3 对数目分布的影响 由表 5 可以看出, 拔节期渍水胁迫对小麦 B 型淀粉粒数目百分比具有显著影响, 使 B 型淀粉粒数目百分比显著减少, 主要影响 0.1~2.8 μm 的淀粉粒组, 对 A 型淀粉粒数目百分比无显著影响, 且 B 型淀粉粒的数目占比为 99.86%~99.90%, 其中 0.1~2.8 μm

的淀粉粒数目占比为 97.29%~97.82%。说明小麦胚乳绝大部分是由 0.1~2.8 μm 的 B 型淀粉粒构成。

2.4 拔节期渍水对软质小麦糊化特性的影响

由表6可知, 与对照相比, 拔节期渍水胁迫使小麦峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值及回升值显著上升, 两品种趋势一致。与对照相比, 2021—2022年度两品种峰值黏度分别增加7.00%和3.00%; 低谷黏度分别增加5.95%和5.70%; 最终黏度分别增加4.38%和3.05%; 稀懈值分别增加27.12%和10.76%; 回升值分别增加4.99%和2.51%。2022—2023年度两品种峰值黏度分别增加4.84%和7.36%; 低谷黏度分别增加3.87%和5.96%; 最终黏度分别增加2.72%和9.19%; 稀懈值分别增加49.81%和16.58%; 回升值分别增加3.13%和15.29%。说明拔节期渍水通过增加黏度参数, 从而影响面粉的糊化性能。

表 5 渍水对小麦淀粉粒数目分布的影响

Table 5 Effect of waterlogging on number distribution of starch granules in wheat endosperm (%)

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule (μm)			
			0.1~2.8	2.8~10.0	≤10.0	>10.0
2021—2022	CK	HC1688	97.37±0.04	2.52±0.04	99.90±0.01	0.10±0.01
		QM725	97.62±0.06	2.28±0.06	99.90±0.01	0.10±0.01
	WL	HC1688	97.29±0.07	2.60±0.07	99.89±0.00	0.11±0.00
		QM725	97.53±0.10	2.36±0.10	99.89±0.01	0.11±0.01
2022—2023	CK	HC1688	97.59±0.01	2.29±0.03	99.88±0.03	0.13±0.01
		QM725	97.82±0.02	2.05±0.02	99.87±0.00	0.13±0.00
	WL	HC1688	97.58±0.06	2.28±0.05	99.86±0.01	0.13±0.01
		QM725	97.78±0.09	2.09±0.06	99.87±0.12	0.13±0.01
F 值	年份 Y		96.88**	134.03**	1.70	87.11**
F-value	渍水 W		5.09*	4.83*	0.08	1.78
	品种 C		88.98**	100.77**	0.01	0.44
	Y×W		1.87	2.15	0.00	0.44
	Y×C		0.38	0.43	0.00	0.00
	W×C		0.17	0.43	0.08	1.78
	Y×W×C		0.12	0.26	0.03	0.44

处理同表 1。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 6 渍水对糊化特性的影响
Table 6 Effect of waterlogging on pasting properties (cP)

年份 Year	处理 Treatment	品种 Cultivar	峰值黏度 Peak viscosity	低谷黏度 Trough viscosity	最终黏度 Final viscosity	稀懈值 Breakdown	回升值 Setback
2021–2022	CK	HC1688	1089.67±25.74	929.83±24.61	1956.00±31.22	142.25±7.25	1006.25±31.75
		QM725	1567.50±18.50	1043.83±35.97	2044.67±92.38	495.00±22.00	1057.50±35.50
	WL	HC1688	1166.00±19.00	985.17±36.38	2041.67±72.06	180.83±19.33	1056.50±46.77
		QM725	1614.50±7.50	1103.33±57.95	2107.00±118.42	548.25±8.75	1084.00±91.00
2022–2023	CK	HC1688	819.00±14.00	685.50±6.50	1292.50±5.50	133.50±20.50	607.00±12.00
		QM725	1241.33±48.34	848.00±37.00	1475.67±77.31	380.00±29.00	627.67±55.59
	WL	HC1688	858.67±23.18	712.00±27.84	1327.67±33.98	200.00±70.49	626.00±23.00
		QM725	1332.67±20.40	898.50±25.50	1611.33±40.82	443.00±12.00	723.25±20.25
F 值		年份 Y	794.95**	244.62**	422.84**	17.07**	422.82**
F-value	渍水 W		36.56**	10.68**	7.21*	19.00**	5.90*
		品种 C	1877.53**	98.01**	27.33**	567.40**	6.23*
		Y×W	0.03	0.42	0.04	0.55	0.23
	Y×C		0.51	3.96	6.94*	20.63**	0.25
		W×C	0.28	0.23	0.42	0.05	0.45
		Y×W×C	3.71	0.11	1.09	0.13	1.62

处理同表 1。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

前人研究表明, 拔节期渍水胁迫 21 d, 使小麦产量较对照降低 15%, 且产量的降低主要是千粒重的降低导致的^[19]。Arguello 等^[20]研究表明, 分蘖后期渍水胁迫 28 d, 稻茬小麦平均产量降低 34%, 主要原因是千粒重、穗数和生物量的下降。开花期渍水处理 6 d 和 9 d 下, 小麦千粒重和穗粒数均显著降低, 从而影响小麦产量^[21]。说明小麦不同阶段的渍水胁迫均会对小麦产量造成影响, 但随着处理阶段和时长的不同存在差异。本研究表明, 拔节期渍水胁迫下 2 个软质小麦穗数、穗粒数和千粒重显著降低, 从而导致产量的降低。拔节期遭受渍水胁迫会严重影响库容的形成, 进而影响库强, 抑制了碳氮代谢相关酶的活性及其它生理指标, 最终导致小麦产量的降低。

小麦籽粒品质受到多种因素的制约, 其中水分是主要限制因素之一, 渍水通过影响小麦籽粒贮藏物质及其组分的含量来改变籽粒品质^[7]。研究表明, 花后渍水显著降低籽粒蛋白质积累量、蛋白质含量, 湿面筋含量和淀粉含量^[22–23]。说明, 不同胁迫处理下均会对小麦品质形成产生影响, 但不同处理间存在差异。本研究表明, 拔节期渍水胁迫下小麦湿面筋含量、蛋白质含量显著降低, 与前人研究结果一致; 但淀粉含量显著上升。拔节期渍水胁迫下, 小麦根系活力受到抑制, 吸收能力降低, 物质转运能力下降, 影响了叶片中的氮素向籽粒中运转, 最终导致籽粒中蛋白质含量和湿面筋含量的降低。渍水胁迫对籽粒蛋白质含量和湿面筋含量的影响大于对淀粉合成的影响, 因此导致粒重降低, 籽粒淀粉含量相对增加。

小麦生长后期以籽粒形成为中心, 籽粒的主要成分为淀粉, 而淀粉粒度分布是决定小麦品质的重要因素之一, 环境因素亦会对小麦淀粉粒度分布产生影响^[24–25]。拔节期低温胁迫 6 d 显著降低小麦胚乳 B 型淀粉粒占比, 增加 A 型淀粉粒占比, 而全生育期的无灌溉则造成小麦 B 型淀粉粒的体积、表面积百分比增加^[26–27]。说明拔节期低温胁迫处理不利于小麦 B 型淀粉粒的产生和形成, 而干旱胁迫则不利于 A 型淀粉粒的形成。本研究表明, 拔节期渍水胁迫显著降低软质小麦籽粒中 B 型淀粉粒体积、表面积及数目百分比, 增加 A 型淀粉粒体积、表面积百分比, 且对 B 型淀粉粒中 2.8~10.0 μm、A 型淀粉粒中 10.0~22.0 μm 的淀粉粒组影响较大。可见渍水胁迫后光合产物可能优先供给淀粉粒个体体积的增加, 说明拔节期渍水胁迫对 B 型淀粉粒的产生和生长较 A 型淀粉粒影响大。

淀粉的糊化特性决定面制品的口感和外观, 受环境和基因型互作的影响^[28]。研究发现, 花后高温胁迫(38℃处理 4 d)下弱筋小麦品种峰值黏度等糊化参数显著降低, 花后渍水(花后 7 d 至成熟期)则显著降低小麦峰值黏度和低谷黏度^[17,29]。说明花后高温和渍水胁迫均不利于小麦糊化参数的提高, 进而影响小麦品质。前人研究发现, 稀懈值等糊化参数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^[30]。本研究表明, 拔节期渍水胁迫, 使小麦峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值和回升值显著增加, 且 2 个品种对渍水的响应表现一致。本试验中渍水胁迫使软质小麦 B 型淀粉粒比例显著降低, 进而影响小麦糊化特性, 即显著增加淀粉峰值黏度等黏度参数。

References

- [1] 马博闻, 李庆, 蔡剑, 周琴, 黄梅, 戴廷波, 王笑, 姜东. 花前渍水锻炼调控花后小麦耐渍性的生理机制研究. 作物学报, 2022, 48: 151–164.
Ma B W, Li Q, Cai J, Zhou Q, Huang M, Dai T B, Wang X, Jiang D. Physiological mechanisms of pre-anthesis waterlogging priming on waterlogging stress tolerance under post-anthesis in wheat. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 151–164 (in Chinese with English abstract).
- [2] Wang X, Huang M, Zhou Q, Cai J, Dai T B. Physiological and proteomic mechanisms of waterlogging priming improve tolerance to waterlogging stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environ Exp Bot*, 2016, 132: 175–182.
- [3] Singh S P, Setter T L. Effect of waterlogging on element concentrations, growth and yield of wheat varieties under farmer's sodic field conditions. *Natl Acad Sci India Proc: Biol Sci*, 2017, 87: 513–520.
- [4] 王美玲, 蒋文月, 葛雨洋, 朱新开, 李春燕, 朱敏, 郭文善, 丁锦峰. 拔节期不同程度渍水对小麦根系生长和籽粒产量的影响. 华北农学报, 2023, 38(4): 83–90.
Wang M L, Jiang W Y, Ge Y Y, Zhu X K, Li C Y, Zhu M, Guo W S, Ding J F. Effects of different degrees of waterlogging at stem-elongation stage on root growth and grain yield in wheat. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2023, 38(4): 83–90 (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴元奇, 李朝苏, 樊高琼, 吴晓丽, 汤永禄. 渍水对四川小麦生理性状及产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26: 1162–1170.
Wu Y Q, Li Z S, Fan G Q, Wu X L, Tang Y L. Effect of waterlogging on physical traits and yield of wheat in Sichuan, China. *Chin J App Ecol*, 2015, 26: 1162–1170 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丁锦峰, 苏盛楠, 梁鹏, 江孟孟, 郑丽洁, 汪先鹏, 李春燕, 朱新开, 郭文善. 拔节期和花后渍水对小麦产量、干物质及氮素积累和转运的影响. 麦类作物学报, 2017, 37: 1473–1479.
Ding J F, Su S N, Liang P, Jiang M M, Zheng L J, Wang X P, Li C Y, Zhu X K, Guo W S. Effects of waterlogging at jointing or after anthesis on grain yield and accumulation and remobilization of dry matter and nitrogen in wheat. *J Triticeae Crops*, 2017, 37: 1473–1479 (in Chinese with English abstract).
- [7] 向永玲, 方正武, 赵记伍, 高德荣, 张晓, 王晓玲. 灌浆期涝渍害对弱筋小麦籽粒产量及品质的影响. 麦类作物学报, 2020, 40: 730–736.
Xiang Y L, Fang Z W, Zhao J W, Gao D R, Zhang X, Wang X L. Effect of waterlogging at grain filling stage on grain yield and quality of weak gluten wheat. *J Triticeae Crops*, 2020, 40: 730–736 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张艳菲, 王晨阳, 马冬云, 卢红芳, 朱云集, 谢迎新, 郭天财. 花后渍水、高温及其复合胁迫对小麦籽粒蛋白质含量和面粉白度的影响. 作物学报, 2014, 40: 1102–1108.
Zhang Y F, Wang C Y, Ma D Y, Lu H F, Zhu Y J, Xie Y X, Guo T C. Effects of waterlogging, high temperature and their interaction after anthesis on grain protein components and flour color in wheat. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1102–1108 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘丰, 蒋佳丽, 周琴, 蔡剑, 王笑, 黄梅, 仲迎鑫, 戴廷波, 曹卫星, 姜东. 美国软麦籽粒品质变化趋势及对我国弱筋小麦标准达标度分析. 中国农业科学, 2022, 55: 3723–3737.
Liu F, Jiang J L, Zhou Q, Cai J, Wang X, Huang M, Zhong Y X, Dai T B, Cao W X, Jiang D. The variation trend of grain quality of soft wheat in the United States and the analysis of the standard of weak gluten wheat in China. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 3723–3737 (in Chinese with English abstract).
- [10] 付立冬, 贺江, 闫素辉, 许峰, 邵庆勤, 张从宇, 李文阳. 灌浆期淹水对小麦籽粒胚乳淀粉粒度分布的影响. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32: 67–71.
Fu L D, He J, Yan S H, Xu F, Shao Q Q, Zhang C Y, Li W Y. Effects of water-logging on starch granule size distribution in wheat grain during grain filling. *J Liaocheng Univ (Nat Sci)*, 2019, 32: 67–71 (in Chinese with English abstract).
- [11] Liu P, Guo W, Jiang Z, Little C R. Effects of high temperature after anthesis on starch granules in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Agric Sci*, 2011, 149: 159–169.
- [12] 李文阳, 尹燕桦, 闫素辉, 戴忠民, 李勇, 梁太波, 耿庆辉, 王振林. 小麦花后弱光对籽粒淀粉积累和相关酶活性的影响. 作物学报, 2008, 34: 632–640.
Li W Y, Yin Y P, Yan S H, Dai Z M, Li Y, Liang T B, Geng Q H, Wang Z L. Effect of shading after anthesis on starch accumulation and activities of the related enzymes in wheat grain. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 632–640 (in Chinese with English abstract).
- [13] 蔡瑞国, 张敏, 朱桓, 武宝悦, 李彦生, 王振林. 糯小麦籽粒淀粉粒度分布特征. 麦类作物学报, 2010, 30: 254–258.
Cai R G, Zhang M, Zhu H, Wu B Y, Li Y S, Wang Z L. Starch granule size distribution in grains of waxy wheat. *J Triticeae Crops*, 2010, 30: 254–258 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张敏, 赵城, 刘希伟, 宋霄君, 张玉春, 杨敏, 周齐齐, 蔡瑞国. 施氮量对糯小麦和非糯小麦籽粒淀粉组分与理化特性的影响. 麦类作物学报, 2017, 37: 786–793.
Zhang M, Zhao C, Liu X W, Song X J, Zhang Y C, Yang M, Zhou Q Q, Cai R G. Effect of nitrogen rate on starch composition and physicochemical properties of waxy and non-waxy wheat. *J Triticeae Crops*, 2017, 37: 786–793 (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵佳蓉, 马宏亮, 吴东明, 刘琼, 樊高琼. 遮阴时期对不同小麦品种淀粉组成结构及淀粉品质的影响. 核农学报, 2023, 37: 1056–1066.
Zhao J R, Ma H L, Wu D M, Liu Q, Fan G Q. Effects of Shading stage on the starch component and starch quality of different wheat cultivar. *Acta Agric Nucl Sin*, 2023, 37: 1056–1066 (in Chinese with English abstract).
- [16] 袁建新, 李文阳, 李瑞, 谭植, 魏鹏, 袁雅妮, 闫素辉. 灌浆期遮阴对小麦胚乳淀粉粒度分布及糊化特性的影响. 麦类作物学报, 2020, 40: 220–226.
Yuan J X, Li W Y, Li R, Tan Z, Wei P, Yuan Y N, Yan S H. Effect of shading at grain filling stage on particle size distribution and pasting properties of wheat endosperm starch. *J Triticeae Crops*, 2020, 40: 220–226 (in Chinese with English abstract).
- [17] Zhou Q, Huang M, Huang X, Liu J, Wang X, Cai J, Dai T B, Cao W X, Jiang D. Effect of post-anthesis waterlogging on biosynthesis and granule size distribution of starch in wheat grains. *Plant Physiol Biochem*, 2018, 35: 222–228.
- [18] 谭植, 李瑞, 吴培金, 杨兵兵, 袁建新, 李文阳. 钾肥对弱筋

- 小麦淀粉粒度分布与黏度参数的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46: 507–512.
- Tan Z, Li R, Wu P J, Yang B B, Yuan J X, Li W Y. Effect of potassium on starch granules size distribution and viscosity parameters or weak gluten wheat. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci)*, 2020, 46: 507–512 (in Chinese with English abstract).
- [19] Araki H, Hamada A, Hossain M A, Takahashi T. Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling. *Field Crops Res*, 2012, 137: 27–36.
- [20] Arguello M N, Mason R E, Roberts T L, Subramanian N, AcuNA A, Addison C K, Lozada D N, Miller G R, Lazada D N, Miller R G, Gbur E. Performance of soft red winter wheat subjected to field soil waterlogging: grain yield and yield components. *Field Crops Res*, 2016, 194: 57–64.
- [21] 王孟昌, 侯君佑, 盖盼盼, 耿兵婕, 黄正来, 张文静, 樊永惠, 马尚宇. 花后渍水对小麦根系抗氧化酶活性、旗叶光合特性及产量的影响. 安徽农业大学学报, 2023, 50: 8–11.
- Wang M C, Hou J Y, Gai P P, Geng B J, Huang Z L, Zhang W J, Fan Y H, Ma S Y. Effects of post-anthesis waterlogging on root antioxidant enzyme activities, flag leaf photosynthetic characteristics and yield of wheat. *J Anhui Agric Univ*, 2023, 50: 8–11 (in Chinese with English abstract).
- [22] 吴进东, 李金才, 陈云波, 陈存武, 朱旺生. 花后短暂高温渍水逆境对冬小麦籽粒品质的影响. 核农学报, 2015, 23: 2006–2012.
- Wu J D, Li J C, Chen Y B, Chen C W, Zhu W S. Effects of transient high temperature and waterlogging after anthesis on grain quality of winter wheat. *Acta Agric Nucl Sin*, 2015, 23: 2006–2012 (in Chinese with English abstract).
- [23] 姜东, 谢祝捷, 曹卫星, 戴廷波, 荆奇. 花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响. 作物学报, 2004, 30: 175–82.
- Jiang D, Xie Z J, Cao W X, Dai T B, Jing Q. Effects of post-anthesis drought and waterlogging on photosynthetic characteristics, assimilates transportation in winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 175–182 (in Chinese with English abstract).
- [24] Zhang W J, Wang B B, Zhang A M, Zhou Q R, Li Y, Li L Y, Ma S Y, Fan Y H, Huang Z L. Exogenous 6-benzylaminopurine enhances waterlogging and shading-tolerance after anthesis by improving grain starch accumulation and grain filling. *Plant Sci*, 2022, 27: 1–10.
- [25] Li W Y, Yan S H, Yin Y P, Wang Z L. Starch granule size distribution in wheat grain in relation to shading after anthesis. *J Agric Sci*, 2010, 148: 183–189.
- [26] 谭植, 闫素辉, 刘良柏, 王平信, 刘飞, 邵庆勤, 许峰, 张从宇, 李文阳. 拔节期低温对小麦穗花发育与籽粒淀粉粒分布的影响. 西北农业学报, 2021, 30: 637–644.
- Tan Z, Yan S H, Liu L B, Wang P X, Liu F, Shao Q Q, Xu F, Zhang C Y, Li W Y. Effect of low temperature at jointing stage on spikelet and floret development and starch granule size distribution of wheat. *Acta Agric Boreali-occident Sin*, 2021, 30: 637–644 (in Chinese with English abstract).
- [27] 戴忠民, 尹燕桦, 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、弱势籽粒中淀粉粒度分布的影响. 生态学报, 2009, 29: 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 Ecol Sin*, 2009, 29: 6534–6543 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张美微, 王晨阳, 贺德先, 马冬云. 环境和氮磷肥对强筋小麦品种郑麦 9023 淀粉糊化特性的影响. 麦类作物学报, 2010, 30: 905–909.
- Zhang M W, Wang C Y, He D X, Ma D Y. Effects of location and different ratios of nitrogen and phosphorus fertilizers on starch pasting properties of strong-gluten wheat cultivar Zhengmai 9023. *J Triticeae Crops*, 2010, 30: 905–909 (in Chinese with English abstract).
- [29] 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: 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 Ecol Sin*, 2014, 34: 4882–4890 (in Chinese with English abstract).
- [30] 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. Crystallinity and pasting properties of glutinous rice starches. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2015, 30(8): 48–53 (in Chinese with English abstract).