



灌浆期开放式增温对不同小麦产量和品质的影响

肖延军¹,单宝雪¹,刘秀坤²,展晓孟¹,刘百川¹,黄金鑫¹,
穆平¹,李豪圣²,刘建军²,高欣²,赵振东²,曹新有²

(1. 青岛农业大学 农学院,山东青岛 266109;2. 山东省农业科学院 作物研究所/小麦玉米国家工程中心/农业部黄淮北部小麦生物学与遗传育种重点实验室/山东省小麦技术创新中心,济南 250100)

摘要 为研究灌浆期开放条件下增温对不同小麦产量及品质的影响,采用开放式红外增温技术,以‘济麦22’和‘济麦44’为材料,于2020—2022年进行灌浆期白天增温来模拟未来气候变暖下温度升高对不同小麦产量及其构成因素和品质(主要是淀粉和蛋白质)的影响。在本试验条件下,增温处理的两种小麦千粒质量和产量均呈现下降趋势,千粒质量下降3.3%~5.7%,产量损失2.0%~5.0%。增温使两个品种的淀粉含量降低1.4%~2.4%,白度降低1.6%~1.8%,面筋指数降低0.4%~3.6%。灌浆期增温处理增加了小麦籽粒蛋白含量,增幅为1.1%~9.6%,沉降值增加0.8%~11.9%。另外增温处理对两种小麦面粉的淀粉糊化特性产生了不同的影响,‘济麦22’面粉的低谷黏度和峰值黏度显著上升,最终黏度、回生值和糊化温度差异不显著;‘济麦44’面粉的低谷黏度、峰值黏度和最终黏度显著下降,回生值和糊化温度差异不显著。综上,在其他生育进程不变的情况下,灌浆期增温将会导致小麦减产,同时小麦籽粒物质组成也将发生复杂的变化,从而影响到小麦的品质。

关键词 灌浆期;开放式增温;冬小麦;产量;品质

2021年中国的平均地表温度比工业化前水平(1850—1900年平均)高 $1.71\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。根据《2021年全球气候状况》(WMO-No. 1290)报道,全球气温并不是每年都在上升,但长期趋势是明确的^[2]。高温对作物的影响是负面的,平均温度的上升会导致小麦、水稻、玉米和大豆的平均产量降低^[3]。由于冬小麦的地理和环境适应性,与其他主要作物相比,冬小麦对全球变暖更敏感^[4]。灌浆期高温在主产麦区常有发生,严重制约着小麦生产。小麦籽粒灌浆期适宜温度为 $20\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5],灌浆期高温会加速植株叶片衰老^[6],缩短籽粒灌浆持续时间^[7],最终导致粒质量下降^[8],产量降低。小麦的多项农艺性状如单株产量、穗粒数、穗粒质量和千粒质量为热胁迫敏感性状,受高温环境影响较大^[9]。小麦旗叶干尖指数是描述叶片持绿性的重要指标,能直观地反映植株生长发育后期的耐高温特性^[10]。

随着经济的发展和人民生活水平的提高,人们对小麦品质的要求也愈来愈高^[11]。小麦品质由基因决定,同时受农艺处理、土壤和气候参数的影响^[12-14]。小麦的加工品质由多项指标共同构成,需要对籽粒、面粉、面团和最终产品的多个性状进行评估,以确定其整体品质^[15]。虽然气候变暖对小麦产量的影响已经得到广泛研究,但对小麦品质的影响研究较少^[16-17]。

灌浆期增温对小麦干物质积累、灌浆特性和产量的影响已有广泛的研究,大多采用塑料大棚(PVC棚)或室内人工气候室进行模拟增温。塑料大棚(PVC棚)容易阻碍空气流通,也会导致空气湿度过高;室内人工气候室提供的环境因子(光照、空气湿度和土壤养分等)与大田条件存在一定差异。因此,上述增温装置往往不能真实地模拟气候变暖情形。气候变暖是由大气层中温室气体反射的长波辐射(主要是红外线)增强而引起

收稿日期:2023-03-17 修回日期:2023-06-26

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1200200);国家小麦产业技术体系(CARS-03-06);山东省自然科学基金(ZR202111220361)。

第一作者:肖延军,男,硕士研究生,从事小麦遗传育种研究。E-mail:441158341@qq.com

通信作者:曹新有,男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail:cxytvs@163.com

赵振东,男,研究员,硕士生导师,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail:zhaozhendong925@163.com

的^[18]。为了真实地模拟全球变暖的机制,即增强的向下红外线辐射,红外线辐射器在试验中逐渐得到应用。该装置是通过安装在样地上方、可以散发红外线辐射的灯管来实现增温的。开放式红外线辐射增温设备由于能够模拟全球变暖的增温机制和日变化,同时对土壤及植被无物理干扰并且不改变小气候状况,逐渐得到学术界认可^[19-20]。本试验利用一套田间开放式增温系统,并以生产上大面积推广应用的中筋小麦品种‘济麦 22’和强筋小麦品种‘济麦 44’为材料进行试验,研究灌浆期增温对冬小麦产量构成和小麦籽粒品质性状,特别是蛋白和淀粉特性的影响,旨在为评估高温对冬小麦的影响提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 大田试验设计与研究方法

1.1.1 试验设计与处理方法 材料于 2021 年和 2022 年 10 月播种,试验采用随机区组设计。试验设置增温(WT; Warming temperature)和自然温度(NT; Natural temperature)两个处理。增温是在小麦扬花后 7 d 通过红外加热装置增温,白天打开,晚上关闭;正常条件即红外加热装置保持关闭。以自然温度为对照。每个处理下放置温度自动记录仪(S20A-2300,徐州法拉电子科技有限公司),在处理期间每隔 30 min 记录冠层温度(图 1,图 2)。试验期间平均温度为 13 °C(2021 年)和 15 °C(2022 年),降水量为 22.1 mm(2021 年)和 13.7 mm(2022 年)。与 NT 处理相比,WT 处理下灌浆期的冠层温度平均提高 2.0 °C(2021 年)和 2.5 °C(2022 年)。

以中筋小麦品种‘济麦 22’和强筋小麦品种

‘济麦 44’为试验材料。每个小区种植面积为 6 m²,种植密度为 300 株·m⁻²,行距 25 cm。每年在播种前施用氮肥(N 240 kg·hm⁻²)、磷肥(P₂O₅ 210 kg·hm⁻²)和钾肥(K₂O 300 kg·hm⁻²)作为基肥,在拔节期和孕穗期再施用氮肥(N 240 kg·hm⁻²)作为追肥。氮肥为尿素(46% N),拔节期灌水,灌水量为 600 m³·hm⁻²。

1.1.2 性状调查 旗叶干尖指数:指旗叶干尖面积占旗叶总叶面积的比例^[10]。共分为 4 个等级: I (0~10%)、II (20%~50%)、III (60%~80%)、IV (90%~100%)。旗叶干尖指数等级越高,表明小麦受高温胁迫越严重。处理第 7 天调查旗叶干尖指数,以每个小区 50%以上旗叶所处的等级作为该小麦旗叶干尖指数。

在小麦成熟期测定 1 m² 内的穗数。在每个小区中心随机选择 30 个穗,测定穗粒数。籽粒收获后在烘箱中烘干 48 h 后测定千粒质量。使用 HGT-1000 谷物容重器(东方衡器,中国)测定籽粒体积质量。

小麦籽粒常温储存两个月后,采用小型试验磨粉机(Brabender,德国)磨制面粉,出粉率约为 60%。籽粒蛋白质和淀粉含量测定使用 Infratec 1241 近红外光谱仪(福斯,丹麦)。采用 WSB-IV 智能白度测定仪(高致精密,中国)测定面粉白度。SDS 沉淀值的测定采用 GB/T 15685-2011 进行。采用 GM2200 面筋仪(Perten,瑞典),按照 GB5506.4-2008 的方法测定干面筋含量和面筋指数。采用 RVA-4 型快速粘度分析仪(Newport,澳大利亚),按照 AACC 22-08.02 的方法测定峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值、回生值和糊化温度。

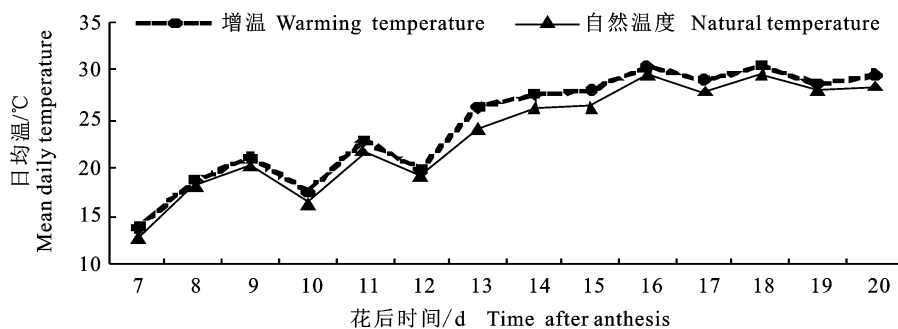


图 1 2021 年灌浆期增温处理与自然对照处理的气温日变化

Fig. 1 Daily variation of air temperature at grain-filling stage between warming treatment and natural control treatment in 2021

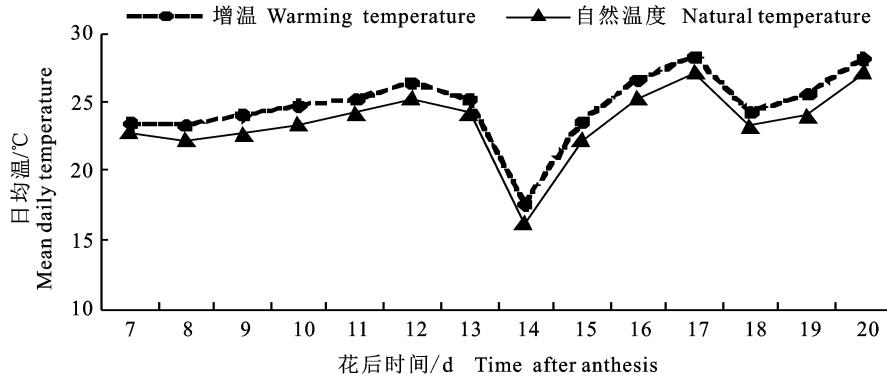


图 2 2022 年灌浆期增温处理与自然对照处理的气温日变化
 Fig. 2 Daily variation of air temperature at grain-filling stage between warming treatment and natural control treatment in 2022

表 1 不同处理下小麦旗叶干尖指数

Table 1 Flag leaf senescence scale under different treatments

年度 Year	材料 Cultivar	处理 Treatment	旗叶干尖指数 Flag leaf senescence scale
2021	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	Ⅲ
		自然温度 NT	Ⅱ
2021	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	Ⅲ
		自然温度 NT	Ⅱ
2022	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	Ⅲ
		自然温度 NT	Ⅱ
2022	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	Ⅳ
		自然温度 NT	Ⅲ

1.2 数据分析

数据采用 Excel 2019 处理和绘图,用 SPSS 分析软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 灌浆期增温对小麦产量的影响

由表 1 可知,WT 处理下的两个品种旗叶干尖指数大于 NT 处理,说明增温加快叶片衰老,导致灌浆时间缩短。由表 2 可知,增温对两个品种小麦的穗数和穗粒数没有影响,但显著降低了千粒质量,两个品种两年试验结果一致。原因是开花期小麦穗数和穗粒数已基本确定,灌浆期增温主要影响千粒质量。与 NT 处理相比,‘济麦 22’的千粒质量降低幅度为 5.7%(2021 年)和 3.3%(2022 年);‘济麦 44’的千粒质量降低幅度为 3.8%(2021 年)和 4.7%(2022 年)。体积质量方面,‘济麦 22’在 WT 处理较 NT 处理在 2021 年没有显著差异,但在 2022 年降低了 0.4%;‘济麦 44’的 WT 处理在两年均出现降低,‘济麦 44’的降低幅度为 0.9%(2021 年)和 0.6%(2022 年)。与各自 NT 处理相比,‘济麦 22’的产量降低

5.0%(2021 年)和 2.0%(2022 年);‘济麦 44’的产量两年均降低 3.3%。

2.2 灌浆期增温对小麦品质的影响

‘济麦 22’和‘济麦 44’两个小麦品种表现出不同的品质参数范围,这可能与它们的面筋强度不同有关(表 3)。在 WT 处理下‘济麦 22’的淀粉含量较 NT 处理均出现降低,降低幅度为 2.3%(2021 年)和 2.4%(2022 年);‘济麦 44’的淀粉含量降低 1.4%(2021 年)和 1.9%(2022 年)。与各自 NT 处理相比,‘济麦 22’的蛋白质含量增加 9.6%(2021 年)和 4.2%(2022 年);‘济麦 44’的蛋白质含量增加 3.0%(2021 年)和 1.1%(2022 年)。WT 处理降低了两个品种的白度,两个品种两年的试验结果一致,因为白度与蛋白含量负相关。沉降值方面,在 WT 处理下‘济麦 22’的沉降值较 NT 处理均出现增加,增加幅度为 11.9%(2021 年)和 10.1%(2022 年);‘济麦 44’的淀粉含量增加 2.5%(2021 年)和 0.8%(2022 年)。两个品种的干面筋含量与各自 NT 处理相比无显著差异,两年的表现一致。但在面筋指数方面,两个品种表现不同,与各自 NT 处理

相比,‘济麦 22’的面筋指数有提高,‘济麦 44’的面筋指数则出现降低。说明灌浆期增温对不同品种小麦的面筋指数影响不同,本试验中筋小麦的面筋指数提高,强筋小麦则是降低。

表 2 不同处理下小麦的农艺性状及产量构成因素

Table 2 Agronomic characters and yield components of wheat under different treatments

年度 Year	材料 Cultivar	处理 Treatment	穗数/m ⁻² Spike number	穗粒数 Grain number per spike	千粒质量 Thousand-kernel weight	体积质量/ (g·L ⁻¹) Volumic mass	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield
2021	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	474.0±8.5 a	30.7±0.8 a	48.3±0.3 c	760.0±1.7 c	7 028.5 b
		自然温度 NT	468.0±39.6 a	30.9±0.8 a	51.2±0.3 a	759.0±1.0 c	7 396.9 a
	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	460.0±17.0 b	25.8±0.6 b	48.8±0.1 c	770.0±1.0 b	5 779.0 d
		自然温度 NT	454.0±19.8 ab	26±0.6 b	50.7±0.3 b	777.0±1.0 a	5 974.4 c
2022	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	502.0±19.8 a	31.0±1.0 a	50.5±0.3 b	756.3±0.5 d	7 867.3 b
		自然温度 NT	494.0±8.5 a	31.1±0.8 a	52.2±0.3 a	759.3±1.5 c	8 028.3 a
	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	500.0±5.7 a	27.2±0.9 b	48.8±0.7 c	771.0±1.0 b	6 625.4 c
		自然温度 NT	494.0±8.5 a	27.1±0.9 b	51.2±0.5 ab	775.7±1.5 a	6 854.3 b

注:数值表示“平均值±标准差”,同列数值后不同小写字母表示同一年份处理或品种间在 0.05 水平差异显著,下同。

Note: Values indicate “mean±standard deviation”, different lowercase letters after values within the same columns indicate significant differences between treatments in the same year or cultivars at the 0.05 level, the same as in tables 3 and 4.

表 3 增温对小麦淀粉含量、蛋白含量、白度、沉降值、干面筋含量和面筋指数的影响

Table 3 Effects of warming on starch content, protein content, whiteness, sedimentation volume, dry gluten content, and gluten index of wheat

年度 Year	材料 Cultivar	处理 Treatment	淀粉含量/% Starch content	蛋白含量/% Protein content	白度/% Whiteness	沉降值/g Sedimentation value	干面筋含量/% Dry gluten content	面筋指数/% Gluten index
2021	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	57.0±0.1 b	15.0±0.1 c	76.1±0.2 b	62.1±0.1 c	12.7±0.5 a	67.7±0.4 c
		自然温度 NT	58.4±0.5 a	13.7±0.2 e	77.3±0.2 a	55.5±0.1 d	13.5±0.9 a	62.8±1.0 d
	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	56.2±0.4 b	16.6±0.1 a	73.2±0.3 d	84.6±0.1 a	10.9±0.2 b	87.1±1.8 b
		自然温度 NT	57.0±0.1 ab	16.1±0.2 b	74.4±0.2 c	82.5±0.1 b	11.2±0.7 b	96.8±0.6 a
2022	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	57.1±0.3 b	14.5±0.3 d	77.2±0.1 b	62.1±0.1 c	12.7±0.5 a	67.7±0.4 c
		自然温度 NT	58.6±0.6 a	13.9±0.2 e	78.4±0.1 a	56.4±0.1 d	13.6±0.7 a	62.7±0.1 d
	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	56.6±0.2 b	16.1±0.3 b	73.1±0.2 d	84.6±0.1 a	11.0±0.4 b	87.4±2.0 b
		自然温度 NT	57.6±0.5 ab	15.9±0.3 b	74.5±0.3 c	83.9±0.1 b	11.5±0.6 b	95.1±3.6 a

灌浆期增温对两个品种小麦面粉的淀粉糊化特性产生了不同的影响(表 4)。WT 处理下‘济麦 22’面粉的低谷黏度较 NT 处理两年均出现显著增加,分别增加 10.1%(2021 年)和 6.2%(2022 年);‘济麦 44’面粉的低谷黏度则在 2021 年降低了 7.7%,2022 年差异不显著。‘济麦 22’面粉的峰值黏度在灌浆期增温处理较对照在 2021 年增加了 16.6%,2022 年则无显著差异;‘济麦 44’面粉的峰值黏度在 2021 年降低了 14.8%,2022 年差异不显著。‘济麦 22’面粉的最终黏度在两年均无显著差异,而‘济麦 44’在 2021 年降低了 8.6%,2022 年差异不显著。两个品种

小麦面粉的回生值无显著差异,两年的试验结果一致。灌浆期增温会提高中筋小麦的淀粉糊化特性,对强筋小麦则是降低。增温对糊化温度的影响较小。各处理的糊化温度为 64.8~66.3℃,处理间的差异均不显著。两个品种在 2022 年的淀粉糊化特性相关参数大多没有表现出明显的差异,这可能是由于当年灌浆期的温度较为适宜。2021 年仅有 2 d(花后第 9 和 11 天)在最佳温度范围(20~24℃);而 2022 年有 8 d 在最佳温度范围,并且连续性适宜温度天数多,这可能有利于淀粉的合成与积累。

表 4 增温对小麦淀粉糊化特性的影响
Table 4 Effect of warming on pasting characteristics of wheat starch

年度 Year	材料 Cultivar	处理 Treatment	低谷黏度/cP Trough viscosity	峰值黏度/cP Peak viscosity	最终黏度/cP Final viscosity	回生值/cP Setback	糊化温度/℃ Pasting temperature
2021	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	1 683.0±37.7 c	2 226.3±247.0 ab	3 059.0±67.6 bcd	1 376.0±44.4 ab	65.0±0.8 a
		自然温度 NT	1 528.0±77.1 d	1 908.7±329.2 cd	2 838.7±102.6 d	1 310.7±26.4 ab	65.6±0.4 a
	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	1 845.0±65.3 b	2 239.0±327.4 bcd	3 106.3±199.6 bcd	1 261.3±135.2 ab	65.7±0.5 a
		自然温度 NT	1 999.7±56.9 a	2 628.3±84.3 a	3 400.3±27.5 a	1 400.7±30.7 a	66.3±1.5 a
2022	济麦 22 Jimai 22	增温 WT	1 707.0±7.1 c	2 002.5±30.4 bcd	3 013.0±58.0 bcd	1 306.0±65.1 ab	65.6±0.7 a
		自然温度 NT	1 607.5±2.1 cd	1 876.0±93.3 d	2 924.5±210.0 cd	1 317.0±212.1 ab	64.8±0.5 a
	济麦 44 Jimai 44	增温 WT	2 029.0±14.1 a	2 360.5±7.8 bc	3 186.5±88.4 abc	1 157.5±102.5 b	65.7±0.6 a
		自然温度 NT	2 080.5±12.0 a	2 414.5±55.9 ab	3 239.0±183.8 ab	1 158.5±171.8 b	65.6±0.5 a

3 讨论

3.1 灌浆期增温对小麦产量的影响

到 2050 年,全球人口预计将达到 98 亿,将需要大约 1.98 亿吨额外的小麦谷物来养活不断增长的人口^[21]。增温处理主要通过降低缓增期最大灌浆速率和平均灌浆速率显著降低而降低粒质量^[22-24],导致小麦减产。陶源等^[25]在小麦花后进行高温处理,发现小麦旗叶 SPAD 值显著降低。冯波等^[6]在灌浆期对小麦进行高温胁迫处理,发现小麦穗、旗叶、穗下节间和旗叶鞘等器官的叶绿素含量均降低。本研究中同样发现两个小麦品种在增温后旗叶干尖指数均增大,表明叶片持绿性下降,加速叶片衰老,缩短籽粒灌浆时间。卞小波等^[19]认为,开花期小麦穗数已确定,花后增温主要降低穗粒数和千粒质量。本研究中,增温后的穗数和穗粒数变化差异均不显著,但降低了千粒质量。灌浆期小麦穗粒数确定,因此穗粒数变化差异不显著,这与李咏等^[26]的结果一致。千粒质量和体积质量是品种评价的重要指标,对高温反应敏感,结合这两个指标可以对小麦材料耐热性进行更全面的评价^[27]。本试验结果表明,WT 处理和 NT 处理下体积质量和千粒质量差异极显著,可能是由于灌浆期增温处理使小麦生理活动受到抑制,降低籽粒灌浆速率,缩短灌浆持续时间,使千粒质量和产量下降。

3.2 灌浆期增温对小麦品质的影响

90%的小麦被人类以各种形式消费,如面包、馒头、面条和饼干^[28]。随着人们生活质量的提高,小麦的营养品质和加工品质越来越受到重视。在中国小麦产区遭受高温天气的情况频发,目前高温已成为影响小麦面粉品质的重要因子之一。

蛋白质含量是影响小麦粉营养品质和加工品质的重要因素^[29]。有研究表明,在 32℃ 以内,蛋白质含量随气温的升高而逐渐增加,但是超过 32℃ 时,蛋白质含量反而会降低。冯波等^[11]认为灌浆期高温胁迫对不同品种小麦蛋白质含量影响不一致。李睿琼等^[30]认为,灌浆期高温胁迫会抑制小麦籽粒淀粉的积累,不同耐热能力的品种对高温胁迫的响应存在差异。本试验中增温提高了两个小麦品种的籽粒蛋白含量,降低了淀粉含量。这可能是由于增温加速了叶片衰老,灌浆持续时间缩短,降低了籽粒中淀粉和蛋白质的总体产量,但对淀粉降低幅度大于蛋白质,导致蛋白含量相对提高。两个小麦品种增温处理后的干面筋含量变化差异不显著,‘济麦 22’的面筋指数增加,‘济麦 44’的面筋指数降低,这则可能与两个品种的面筋强度不同有关。小麦的商业价值由面粉的加工品质决定^[31],但增温对面粉加工品质的影响研究较少。面粉糊化特性是重要的品质参数,与面包或面条的感官评分显著相关^[32]。曹彩云等^[33]认为高温胁迫对耐热性强的品种的峰值黏度、最低黏度、最终黏度、回生值和稀懈值等面粉相关指标影响较小。王晨阳等^[34]的研究表明花后短暂高温胁迫会显著影响淀粉的黏度特性,但在不同时期、不同胁迫水平和不同品种间差异显著。李永庚等^[35]的研究发现,籽粒灌浆前期高温会提高面粉峰值黏度,灌浆中后期高温则会降低峰值黏度;而王晨阳等^[34]的试验则发现‘豫麦 34’在花后 5 d 高温胁迫其低谷黏度显著下降,花后 25 d 高温胁迫低谷黏度有增大趋势。在本研究中增温处理提高了‘济麦 22’面粉的低谷黏度、峰值黏度和最终黏度,而‘济麦 44’面粉低谷黏度、峰值黏度和最终黏度出现下降,这与刘怡辰

等^[36]的结果一致。热胁迫条件下不同品种的淀粉糊化参数差异性可能与其淀粉组成、A/B 淀粉比例和直/支比的变化有密切关系。两年的结果有部分差异,可能与年度间灌浆期的气候差异有关^[8],因此气候年度间的灌浆期增温对不同小麦品质的影响还有待进一步研究。

参考文献 Reference:

- [1] FAO. Food and agriculture organization of the united nations (FAO)[J/OL]. <https://www.fao.org/faostat/en/>. 2022
- [2] WMO. The state of the global climate 2021[J/OL]. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>. 2022
- [3] ZHAO C, LIU B, PIAO S, *et al.* Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [4] PRASAD P V V, BHEEMANAHALLI R, JAGADISH S V K. Field crops and the fear of heat stress—Opportunities, challenges and future directions[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200: 114-121.
- [5] 解树斌, 曹新有, 刘建军, 等. 高温与干热风对小麦的影响及其防控措施[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(3): 126-131.
- XIE SH B, CAO X Y, LIU J J, *et al.* Effects of high-temperature and hot-dry wind on wheat and preventative measures[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(3): 126-131.
- [6] 冯波, 李升东, 李华伟, 等. 灌浆初期高温胁迫对不同耐热性小麦品种形态和产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(3): 451-461.
- FENG B, LI SH D, LI H W, *et al.* Effect of high temperature stress at early grain-filling stage on plant morphology and grain yield of different heat-resistant varieties of wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(3): 451-461.
- [7] WANG X, HOU L, LU Y, *et al.* Metabolic adaptation of wheat grain contributes to a stable filling rate under heat stress[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2018, 69(22): 5531-5545.
- [8] 刘万代, 常明娟, 史校艳, 等. 花后高温胁迫对小麦灌浆特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(5): 581-588.
- LIU W D, CHANG M J, SHI X Y, *et al.* High temperature stress after anthesis on grain filling characteristics and yield[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(5): 581-588.
- [9] 陈希勇, 孙其信, 孙长征. 春小麦耐热性表现及其评价[J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(1): 43-49.
- CHEN X Y, SUN Q X, SUN CH ZH. Performance and evaluation of spring wheat heat tolerance[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 43-49.
- [10] 刘秀坤, 王克森, 翟胜男, 等. 小麦灌浆期耐高温性状 QTL 定位与分析[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(11): 1-10.
- LIU X K, WANG K S, ZHAI SH N, *et al.* Mapping and analysis of QTLs for high temperature tolerance traits of wheat during grain filling stage[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(11): 1-10.
- [11] 冯波, 曹芳, 李升东, 等. 灌浆期高温胁迫对不同品种小麦蛋白组分及面团揉混特性的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(3): 642-649.
- FENG B, CAO F, LI SH D, *et al.* Effects of high temperature stress during grain-filling stages on protein components and dough mixing properties in different wheat cultivars[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(3): 642-649.
- [12] BÉKÉS F. New aspects in quality related wheat research: 1. Challenges and achievements[J]. *Cereal Research Communications*, 2012, 40(2): 159-184.
- [13] HERNÁNDEZ-ESPINOSA N, MONDAL S, AUTRIQUE E, *et al.* Milling, processing and end-use quality traits of CIMM-YT spring bread wheat germplasm under drought and heat stress[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 104-112.
- [14] PETERSON C J, GRAYBOSCH RA, SHELTON D R, *et al.* Baking quality of hard winter wheat: response of cultivars to environment in the great plains[J]. *Euphytica*, 1998, 100: 157-162.
- [15] BATTENFIELD S D, GUZMAN C, GAYNOR R C, *et al.* Genomic selection for processing and end-use quality traits in the CIMMYT spring bread wheat breeding program[J]. *Plant Genome*, 2016, 9(2): doi: 10.3835/plantgenome.2016.01.0005
- [16] HADDAD L, HAWKES C, WEBB P, *et al.* A new global research agenda for food[J]. *Nature*, 2016, 540(7631): 30-32.
- [17] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 非对称性增温对冬小麦籽粒淀粉和蛋白质含量及其组分的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(2): 302-308.
- TIAN Y L, CHEN J, DENG A X, *et al.* Effects of asymmetric warming on contents and components of starch and protein in grains of winter wheat under FATI facility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 302-308.
- [18] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 262-271.
- NIU SH L, HAN X G, MA K P, *et al.* Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 262-271.
- [19] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 等. 花后开放式增温对小麦产量及品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8): 1489-1498.
- BIAN X B, CHEN D D, WANG Q SH, *et al.* Effects of different day and night temperature enhancements on wheat grain yield and quality after anthesis under free air controlled condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012,

- 45(8):1489-1498.
- [20] 杨陶陶,邹积祥,伍龙梅,等. 开放式增温对华南双季稻稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 66-77.
YANG T T, ZOU J X, WU L M, *et al.* Effect of free air temperature increase on grain quality of double-cropping rice in South China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(1): 66-77.
- [21] YADAV M R, CHOUDHARY M, SINGH J, *et al.* Impacts, tolerance, adaptation, and mitigation of heat stress on wheat under changing climates[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(5): 2838-1870.
- [22] 封超年,郭文善,施劲松,等. 小麦花后高温对籽粒胚乳细胞发育及粒重的影响[J]. 作物学报, 2000, 26(4): 399-405.
FENG CH N, GUO W SH, SHI J S, *et al.* Effect of high temperature after anthesis on endosperm cell development and grain weight in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(4): 399-405.
- [23] 谭凯炎,杨晓光,任三学,等. 高温胁迫对华北地区冬小麦灌浆及产量的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6355-6361.
TAN K Y, YANG X G, REN S X, *et al.* Impact of high temperature stress at the grain-filling stage on winter wheat yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6355-6361.
- [24] 刘霞,穆春华,尹燕秤,等. 花后高温、弱光及其双重胁迫对小麦籽粒内源激素含量与增重进程的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 677-681.
LIU X, MU CH H, YIN Y P, *et al.* Effects of high temperature and shading stress after anthesis on endogenous hormone contents and filling process in wheat grain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 677-681.
- [25] 陶源,赵凯敏,代存虎,等. 花后短暂高低温胁迫对小麦产量形成的影响及减灾调控[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(12): 1557-1566.
TAO Y, ZHAO K M, DAI C H, *et al.* Effects of short-term low or high temperature stress after anthesis on yield formation and its regulation of disaster mitigation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(12): 1557-1566.
- [26] 李咏,赵云,张辉,等. 花后高温对小麦农艺性状及面粉品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(11): 1482-1488.
LI Y, ZHAO Y, ZHANG H, *et al.* Effect of high temperature after anthesis on agronomic characteristics and flour quality of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(11): 1482-1488.
- [27] 李召锋,张东海,王竹琼,等. 新疆春小麦品种耐热性评价[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1497-1502.
LI ZH F, ZHANG D M, WANG ZH Q, *et al.* Analysis and evaluation the heat resistance of spring wheat cultivars in Xinji-ang[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(11): 1497-1502.
- [28] KUKTAITE R, RAVEL C. Wheat gluten protein structure and function: Is there anything new under the sun? [J]. *Wheat Quality for Improving Processing and Human Health*, 2020, 2: 9-19.
- [29] ASSENG S, MARTRE P, MAIORANO A, *et al.* Climate change impact and adaptation for wheat protein[J]. *Global Change Biology*, 2018, 25(1): 155-173.
- [30] 李睿琼,侯立江,卢云泽,等. 灌浆期高温对不同耐热性小麦籽粒淀粉积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2): 196-202.
LI R Q, HOU L J, LU Y Z, *et al.* Effect of high temperature at filling stage on starch accumulation of wheat with different heat tolerance[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2): 196-202.
- [31] LIN Z, CHANG X, WANG D, *et al.* Long-term fertilization effects on processing quality of wheat grain in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2015, 174: 55-60.
- [32] ZI Y, SHEN H, DAI S Y, *et al.* Comparison of starch physicochemical properties of wheat cultivars differing in bread and noodle-making quality[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 78-86.
- [33] 曹彩云,党红凯,郑春莲,等. 灌浆中后期高温对小麦黏度的影响及品种耐热性研究[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(11): 1351-1360.
CAO C Y, DANG H K, ZHENG CH L, *et al.* Impact of high temperature during late grain filling stage on viscosity and heat resistance of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(11): 1351-1360.
- [34] 王晨阳,苗建利,张美微,等. 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[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4882-4890.
WANG CH Y, MIAO J L, ZHANG M W, *et al.* Effects of post-anthesis high temperature, drought stress and their interaction on the starch pasting properties of two wheat cultivars with different gluten strength[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4882-4890.
- [35] 李永庚,于振文,张秀杰,等. 小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 361-366.
LI Y G, YU ZH W, ZHANG X J, *et al.* Response of yield and quality of wheat to heat stress at different grain filling stages[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3): 361-366.
- [36] 刘怡辰,仵妮平, H. 3. T, 等. 不同小麦品种面粉品质性状对花期高温响应及耐热性评价[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(3): 541-550.
LIU Y CH, WU N P, H. 3. T, *et al.* Responses of flour quality characters of different wheat varieties to high temperature during flowering and species heat resistance evaluation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(3): 541-550.

Effects of Open High Temperature at Filling Stage on Yield and Quality of Different Wheat Cultivars

XIAO Yanjun¹, SHAN Baoxue¹, LIU Xiukun², ZHAN Xiaomeng¹,
LIU Baichuan¹, HUANG Jinxin¹, MU Ping¹, LI Haosheng²,
LIU Jianjun², GAO Xin², ZHAO Zhendong² and CAO Xinyou²

(1. College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 2. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center for Wheat & Maize/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Improvement in North Yellow River & Huaihe River Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Shandong Provincial Technology Innovation Center for Wheat, Jinan 250100, China)

Abstract To investigate the effects of warming temperature on the yield and quality of different wheat cultivars under open conditions during grain filling stage, an open infrared warming technology was used to warm the daytime temperature during the filling period from 2020 to 2022. Using ‘Jimai 22’ and ‘Jimai 44’ as materials, the effects of warming temperature on the yield components and quality were explored, specifically, the properties of gluten and starch of wheat grain and flour across the different wheat cultivars under future climate warming. Under experimental conditions, thousand-kernel weight and yield of the two wheat cultivars showed a downward trend under warming temperature at filling stage. The thousand-kernel weight decreased by 3.3%–5.7% and there was a yield loss of 2.0%–5.0%. Warming temperature reduced starch content by 1.4%–2.4%, whiteness by 1.6%–1.8%, and gluten index by 0.4%–3.6% in both cultivars. Additionally, warming temperature increased grain protein content by 1.1%–9.6%. SDS sedimentation value of the two wheat cultivars increased by 0.8%–11.9% under warming condition. Furthermore, warming temperature had different effects on pasting characteristics of the two wheat flours. Trough viscosity and peak viscosity of ‘Jimai22’ flour increased significantly, while there was no significant difference in final viscosity, setback and pasting temperature. Trough viscosity, peak viscosity, and final viscosity of ‘Jimai 44’ flour decreased significantly, with no difference appearing in setback and pasting temperature. In conclusion, warming temperature during grain filling stage leads to reduction of wheat yield when other growth processes remain unchanged, and the grain composition also undergoes complex changes, which affects the quality of wheat.

Key words Grain filling stage; Open warming; Winter wheat; Yield; Quality

Received 2023-03-17 **Returned** 2023-06-26

Foundation item National Key Research and Development Program(No. 2022YFD1200200); National Wheat Industry Technology System (No. CARS-03-06); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR202111220361).

First author XIAO Yanjun, male, master student. Research area: genetic breeding of wheat. E-mail: 441158341@qq.com

Corresponding author CAO Xinyou, male, Ph. D, research fellow, master supervisor. Research area: genetic breeding of wheat. E-mail: cxytvs@163.com

ZHAO Zhendong, male, research fellow, master supervisor. Research area: genetic breeding of wheat. E-mail: zhaozhendong925@163.com

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)