

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.00302

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

田云录¹ 陈金¹ 邓艾兴² 郑建初³ 张卫建^{1,2,*}

¹ 南京农业大学应用生态研究所, 江苏南京 210095; ² 中国农业科学院作物科学研究所 / 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081; ³ 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014

摘 要: 气候变暖呈现明显的非对称性, 冬春季和夜间的增温趋势显著。参考国外先进的田间开放式增温方法, 2007—2009 年在江苏南京开展了昼夜不同增温对冬小麦籽粒淀粉和蛋白质含量及其组分的影响研究。全天、白天和夜间 3 种增温处理分别显著提前了冬小麦的灌浆期, 并改变了灌浆期高于 32℃ 高温的出现时间和天数, 引起了籽粒中淀粉组分、蛋白质含量及蛋白质组分的明显变化。3 种增温处理中, 冬小麦总淀粉含量差异不显著, 但均显著提高了籽粒中直/支淀粉的比例。其中白天增温的直/支比最高, 两年分别比对照提高 6.9% 和 46.2%。增温处理使籽粒中总蛋白质含量显著降低, 并呈现对照>白天>夜间>全天的趋势。与对照相比, 全天、白天和夜间增温的籽粒蛋白质含量两年平均分别下降 9.1%、5.4%、6.9%。增温处理对籽粒蛋白质组分的影响比较复杂, 但两年结果表明, 白天增温对蛋白质组分的影响趋势一致, 均为清蛋白含量最低、球蛋白含量最高、谷/醇比最低。上述结果表明, 气候变暖不仅将影响作物的生育时期, 而且还直接影响温度高低。增温对冬小麦品质的影响比较复杂, 不同年份及变暖情景之间的增温效应差异显著。

关键词: 气候变暖; 开放式增温; 冬小麦; 籽粒品质; 淀粉; 蛋白质

Effects of Asymmetric Warming on Contents and Components of Starch and Protein in Grains of Winter Wheat under FATI Facility

TIAN Yun-Lu¹, CHEN Jin¹, DENG Ai-Xing², ZHENG Jian-Chu³, and ZHANG Wei-Jian^{1,2,*}

¹ Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ² Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology & Production, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; ³ Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

Abstract: Climate warming presents significantly asymmetric trends with greatly seasonal and diurnal differences, greater temperature elevations existing in the winter-spring season than in the summer-autumn season and at the nighttime than at the daytime. To date, this is till lack of evidence about the effects of asymmetric warming on the quality of winter-wheat grain based on field experiments. Here, we performed field warming experiment under free air temperature increased (FATI) facility to investigate the impacts of asymmetric warming on the contents and components of starch and protein in winter-wheat grain during 2007–2009 in Nanjing, Jiangsu province, China. The results showed that the all-day warming (AW), daytime warming (DW), and nighttime warming (NW) treatments significantly advanced the grain-filling stage and changed the appearance time and days of high temperature above 32℃ in grain-filling stage, consequently resulting in obvious changes of starch component, protein content and protein components. Treatments AW, DW, and NW had no significant impact on the starch content of winter-wheat grain but tended to increase the ratio of amylose content to amylopectin content. The highest values of the ratio of amylose content to amylopectin content existed in the DW plots which were 6.9% and 46.2% higher than those in the control plots in the two years, respectively. The content of grain protein was significantly decreased by warming with the content order of CK > DW > NW > AW. Warming decreased the grain protein contents by 9.1%, 5.4%, and 6.9%, respectively in the AW, DW, and NW treatments on average of the two years. The effects of warming on grain protein components were complicated. However, DW showed a regular impact on protein components. The two-year result showed that the lowest content of albumin and the greatest content of globulin

本研究由国家自然科学基金项目(30771278), 江苏省自然科学基金项目(BK2007159), 教育部新世纪优秀人才资助计划项目(NCET-05-0492)和中国农业科学院院长基金项目资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 张卫建, E-mail: zhangweij@caas.net.cn, Tel: 010-62156856

第一作者联系方式: E-mail: tyunlu@126.com

Received(收稿日期): 2010-07-26; Accepted(接受日期): 2010-10-07.

occurred in the DW plot with the lowest ratio of glutelin content to gliadin content. All these results demonstrate that the effects of asymmetric climate warming on the quality of winter-wheat grain are complicated with significant differences among warming patterns and experimental years.

Keywords: Climate warming; Free air temperature increased (FATI); Winter wheat; Grain quality; Starch; Protein

气候变暖已是不争的事实, 联合国气候变化政府间专家委员会(IPCC) 2007 年报告显示, 过去 100 年全球平均气温升高 $0.56\sim 0.92^{\circ}\text{C}$ ^[1], 预计在 21 世纪内仍将上升 $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ ^[1-2]。气温在快速递升的同时, 其增幅也呈现明显的非对称性, 即冬春季与夜间的增幅分别显著高于夏秋季和白天^[1-3]。近 50 年我国地表平均气温上升 1.1°C , 高于全球同期平均增温幅度^[4], 并预计到 2050 年再升温 $1.2\sim 2.0^{\circ}\text{C}$, 至 2100 年增幅将达到 $2.2\sim 4.2^{\circ}\text{C}$ 。小麦是世界上最主要的粮食作物之一, 它提供了人类食物总量的 11.1%, 人体所需蛋白质总量的 20.3%, 热量的 18.6%^[5]。小麦籽粒中淀粉约占 65%~70%, 蛋白质约占 7%~18%, 其中直链淀粉和支链淀粉分别占总淀粉的 20%~30%和 70%~80%^[6], 籽粒中淀粉的含量和直/支比与小麦品质的关系密切^[7], 蛋白质含量及其组分的变化也是决定面粉品质类型的最主要指标之一^[8]。温度是影响小麦籽粒品质的重要因素之一^[9-12], 但是至今基于田间增温试验探讨气候变暖对冬小麦籽粒品质影响的相关研究还未见报道。非对称性增温是气候变暖的基本趋势, 研究非对称性增温对小麦籽粒淀粉和蛋白组分的影响, 对未来气候背景下小麦的优质栽培具有重要的理论参考和实践指导意义。

环境因素对小麦品质的影响显著^[9], 尤其是环境温度的变化效应突出^[10-12]。灌浆期高温阻遏了蔗糖向淀粉的转化, 降低籽粒中淀粉含量, 进而影响籽粒的品质特性^[13-15]。Panozzo 等^[16]认为, 当灌浆期温度超过 30°C 时, 直链淀粉含量显著提高。因为支链淀粉含量与小麦淀粉的品质呈正相关^[12], 因此, 灌浆期高温可能降低小麦品质。灌浆期温度变化对籽粒蛋白质的合成也影响显著。以冬小麦为例, 籽粒蛋白质含量与灌浆期日平均气温及昼夜温差均呈正相关^[17]。曹广才等^[18]发现, 春小麦蛋白质含量与抽穗至成熟期间内日均温呈正相关, 但与昼夜温差呈负相关。李向阳等^[19]指出, 小麦灌浆期冠层温度与籽粒中蛋白含量呈正相关, 而且灌浆后期冠层温度影响更大。Blumenthal 和 Beskes^[20]、Stnoe 和 Nicolas^[21]也发现灌浆期高温会增加籽粒的氮含量, 而且蛋白质组分也发生了改变, 谷/醇比有增加的趋势。赵辉等^[22]认为, 灌浆期高温提高了籽粒蛋白质含量, 但降低了

谷/醇比。可见, 环境温度变化对小麦淀粉和蛋白含量及组分的影响显著, 但影响趋势仍不完全清楚。

气候变暖将不仅直接提高作物生长期的温度, 而且也将通过影响作物的生育时期, 而导致高温出现时期和持续时间长短的变化。气候变暖存在显著的昼夜差异, 目前关于非对称性增温对冬小麦品质的影响的认识尚不清楚。而且以往的相关增温试验也主要在人工控制的环境下完成, 设置的增温幅度也往往高于气候变暖的预期温度, 很难全面反映小麦品质对气候变暖的实际响应特征。为此, 作者在参考国外先进的田间增温设施的基础上^[23-24], 在江苏南京建立了我国麦田的开放式增温系统^[25], 对冬小麦进行昼夜不同增温的试验, 研究冬小麦品质对非对称性气候变暖的实际响应, 拟为未来气候背景下作物高产优质栽培和育种提供理论依据和应对技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2007—2009 年在江苏省农业科学院南京试验站($32^{\circ}02' \text{N}$, $118^{\circ}52' \text{E}$, 海拔 11 m)进行。试验站地处亚热带海洋气候区域, 其 2000—2008 年的年平均温度为 16.7°C , 较 20 世纪 80 和 90 年代分别高 1.5°C 和 0.7°C 。该站常年的年降水量在 1 000~1 100 mm 之间, 平均日照时数超过 1 900 h, 无霜期为 237 d。试验小区土壤为棕壤土, 总氮、磷、钾含量分别为 2.52 、 0.60 和 14.0 g kg^{-1} , 土壤有机碳为 8.24 g kg^{-1} 。南京地区小麦播种期在 10 月下旬至 11 月上旬, 收获期在 5 月底至 6 月初, 生育期约 210 d。

1.2 试验处理

根据当前中国气候变暖的预测结果及麦田实际情况, 参照 Nijs 等^[24]的方法对其进行改进, 设计了适合于中国温度变化趋势条件下的田间开放式增温系统^[25]。设全天增温(AW)、白天增温(DW)和夜间增温(NW) 3 个增温处理, 以不增温为对照(CK)。全天增温是指冬小麦从播种到收获全生育期内昼夜不间断增温, 白天增温是同期内只在每天的 6:00 到 18:00 增温, 夜间增温则是在每天的 18:00 到次日 6:00 增温。小区随机区组排列, 重复 3 次, 小区面积

为 30 m²。采用温度自动记录仪(ZDR-41, 杭州泽大仪器有限公司)监测田间温度, 在全生育期内每间隔 20 min 自动记录一次, 每 30 d 采集一次温度数据。通过红外热成像仪(ThermaCAM P²⁵)显示, 该系统的有效增温面积为 4 m², 增温效果显著, 全天、白天和夜间增温分别可以使冠层日平均温度升高 1.5℃、0.9℃和 1.1℃, 冬小麦的全生育期平均缩短 11.0、6.5 和 9.0 d^[25]。

1.3 试验材料

选用大面积种植的常规小麦品种扬麦 11, 其春性较强, 抗寒性稍差, 属于中高秆类型, 但抗倒性较强。分别于 2007 年 11 月 15 日和 2008 年 11 月 2 日播种, 待成熟即收获。按照当地高产栽培技术规程进行生产管理, 基肥每平方米施纯氮 22.5 g m⁻²、P₂O₅ 10.5 g m⁻²和 K₂O 12.0 g m⁻², 另外分别在分蘖期和拔节孕穗期追施纯氮 5.22 g m⁻²。

1.4 淀粉和蛋白质含量测定方法及数据处理

在籽粒收获后两个月, 采用 CD1 型仿工业实验磨(CHOPIN, 法国雷诺肖邦公司)磨粉, 精确称取 1 g 面粉用 WZZ-2B 自动旋光仪(上海精密科学仪器有限公司)测定总淀粉含量, 精确称取 0.1 g 面粉, 采用 I-KI 法测定直链淀粉含量^[26], 支链淀粉含量=总淀

粉含量—直链淀粉含量; 精确称取 1 g 面粉, 采用累进提取法^[26]提取蛋白质组分, 并用 GB5511-85 标准微量凯氏定氮法测定各组分和总氮含量, 然后乘以系数 5.7 换算成蛋白质含量。

用 Microsoft Excel 整理数据, 在 SPSS 11.5 中完成统计分析。

2 结果与分析

2.1 昼夜不同增温的升温效应

由于环境温度和生育期的改变, 冬小麦灌浆期冠层出现大于 32℃的高温时间和天数也发生了明显的改变。AW、DW 和 NW 处理区的日平均温度两年分别比 CK 提高了 1.2℃、0.8℃和 1.1℃, 日较差两年分别比 CK 提高了 0.5℃、2.4℃和 -1.7℃(降低 1.7℃)。CK 在灌浆期遇到日最高温大于 32℃的高温时期较早, 而 3 种增温处理在灌浆中后期才开始出现大于 32℃的高温。与 CK 相比, AW、DW 和 NW 处理使冬小麦灌浆期大于 32℃的天数在 2008 年分别减少 5、1 和 8 d, 在 2009 年分别增加 2、6 和 -8 d(减少 8 d)。2009 年由于外界自然气温较高, CK、AW、DW 和 NW 分别使大于 32℃的天数较 2008 年增加 6、13、13 和 6 d(表 1)。

表 1 非对称性增温下冬小麦灌浆期冠层高于 32℃的天数
Table 1 Days of high temperature (>32℃) during grain filling phase of winter-wheat under asymmetric warming trends

播种 Sowing date (month/day)	处理 Treatment	灌浆期大于 32℃天数 Days of high temperature (>32℃) during grain filling				
		前期 Early phase	中期 Middle phase	后期 Late phase	日均温 Daily mean temperature	日较差 Diurnal difference of temperature
11/15 (2007-2008)	不增温对照 CK	0	2	10	18.4	14.7
	全天增温 AW	0	3	4	19.2	15.6
	白天增温 DW	0	4	7	19.0	18.6
	夜间增温 NW	0	2	2	19.2	12.3
11/2 (2008-2009)	不增温对照 CK	3	9	6	17.4	13.3
	全天增温 AW	0	5	15	18.9	13.4
	白天增温 DW	0	8	16	18.3	15.1
	夜间增温 NW	0	3	7	18.8	12.4

CK: natural condition; AW: all-day warming; DW: daytime warming; NW: nighttime warming.

2.2 冬小麦籽粒淀粉含量及其组分

3 种增温处理均不同程度地改变了总淀粉的含量和淀粉组分, 但淀粉组分的变化更明显(表 2), 其中 DW 处理的直链淀粉含量最高, 支链淀粉含量最低。AW、DW 和 NW 增温处理区千粒重两年平均较 CK 提高了 7.8%、9.2%和 18.1%。不同处理的籽粒淀粉直/支比差异显著, 其中白天增温的最高, 对照

最低。2008 年, 总淀粉含量除 AW 和 NW 处理之间存在显著差异外, 其余各处理间未达显著水平, NW 较 AW 降低 3.0%; DW 处理的籽粒直链淀粉含量较 CK 显著提高 4.2%, 导致直/支比在 DW 处理下也显著高于其他处理, 其中较 CK 和 NW 高 6.9%, 较 AW 高 10.7%。2009 年, AW、DW 和 NW 的总淀粉含量较 CK 分别提高 6.0%、4.5%和 4.2%, 但 3 种处理之

间没有显著差异; 直链淀粉在 3 种增温情景下都呈显著升高趋势, 分别提高 20.8%、36.8%和 23.5%, 其中以 DW 处理直链淀粉含量最高, 且与 AW 和 NW

之间存在显著差异, 分别较二者提高 13.2%和 10.7%。3 种增温处理的直/支比都显著提高, 以 DW 处理提高幅度最大, 达到 46.2%。

表 2 非对称性增温对冬小麦籽粒总淀粉含量和淀粉组分的影响
Table 2 Effects of asymmetric warming on total starch and its components in grains of winter wheat

处理 Treatment	千粒重 1000-grain weight (g)	总淀粉含量 Starch content (%)	直链淀粉含量 Amylose content (%)	支链淀粉含量 Amylopectin content (%)	直/支比 Amylose/amylopectin ratio
2007–2008					
不增温对照 CK	39.29±0.47 d	67.6±0.7 ab	15.2±0.1 b	52.4±0.6 ab	0.29±0.00 b
全天增温 AW	41.23±0.16 c	68.1±0.5 a	14.8±0.4 b	53.3±0.1 a	0.28±0.01 b
白天增温 DW	43.37±0.34 b	67.1±0.9 ab	15.9±0.3 a	51.2±0.7 b	0.31±0.01 a
夜间增温 NW	49.38±0.20 a	66.1±0.3 b	14.8±0.1 b	51.2±0.2 b	0.29±0.00 b
2008–2009					
不增温对照 CK	43.10±0.21 b	63.0±0.3 b	13.2±0.0 c	49.9±0.2 a	0.26±0.00 c
全天增温 AW	47.70±0.04 a	66.8±1.1 a	15.9±0.4 b	50.9±0.6 a	0.31±0.00 b
白天增温 DW	46.52±0.25 a	65.9±0.7 a	18.0±0.1 a	47.8±0.8 b	0.38±0.01 a
夜间增温 NW	47.63±0.18 a	65.7±0.3 a	16.3±0.2 b	49.4±0.2 ab	0.33±0.00 b

数据为 3 次重复的平均值±标准差。同一生长季中, 处理间达显著差异($P<0.05$)用不同字母表示。

Data are shown as means \pm SD of three replicates. In each growing season, values followed by different letters are significantly different among treatments at $P<0.05$. CK: natural condition; AW: all-day warming; DW: daytime warming; NW: nighttime warming.

2.3 冬小麦籽粒蛋白质含量及其组分

3 种增温处理均改变了冬小麦面粉中的总蛋白质含量, 两年结果均呈现 $AW<NW<DW<CK$ 的趋势(图 1)。2008 年, AW、DW 和 NW 处理的总蛋白质含量分别较 CK 降低 11.4%、8.3%和 8.8%, 处理间差异显著; 2009 年则分别较 CK 降低 6.3%、2.0%和 4.5%, 但处理间差异不显著。

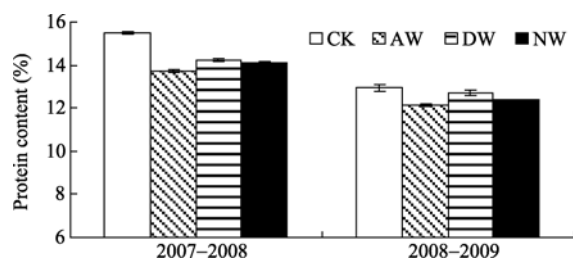


图 1 非对称性增温对冬小麦籽粒蛋白质含量的影响

Fig. 1 Effects of asymmetric warming on the protein contents of winter-wheat grain under FATI facility

CK: 不增温对照; AW: 全天增温; DW: 白天增温;

NW: 夜间增温。

CK: natural condition; AW: all-day warming; DW: daytime warming; NW: nighttime warming.

增温处理显著改变籽粒蛋白质组分, 且影响较为复杂。AW 和 DW 处理下面粉中清蛋白含量显著下降, 两年平均降幅分别为 7.3%和 11.5%; 各处理球蛋白含量较 CK 均呈现增加趋势, 两年平均增幅分别为 11.6%(AW)、26.9%(DW)和 15.0%(NW)。2008

年, 醇溶蛋白和谷蛋白含量呈下降趋势, AW、DW 和 NW 处理下籽粒中醇溶蛋白含量分别降低 13.3%、0.6%和 8.1%, 且 3 个处理之间差异显著; 谷蛋白在 DW 和 NW 处理条件下显著降低, 降低幅度分别为 26.8%和 23.1%。谷/醇比在 AW 处理较 CK 提高 19.3%, DW 和 NW 处理较 CK 分别降低 26.3%和 16.4%, 3 个处理与 CK 均有显著差异; 而 2009 年, 醇溶蛋白和谷蛋白含量在各处理下都为增加趋势, 且与 CK 间差异达到显著水平, 其中醇溶蛋白增幅分别为 5.0%、30.6%和 17.3%; 谷蛋白分别增加 15.1%、14.1%和 42.1%。谷/醇比在各处理间也存在显著差异, AW 处理较 CK 降低 13.7%, DW 和 NW 处理分别增加 7.6%和 21.2%(表 3)。但是两年结果均显示, DW 处理的籽粒清蛋白含量最低, 球蛋白含量最高, 谷/醇比最低。

3 讨论

3.1 昼夜不同增温对麦田生态系统的影响

AW、DW 和 NW 处理可以显著地提高冬小麦冠层温度, 平均增温幅度在 0.9~1.7℃之间。两年结果显示, 3 种增温处理明显改变了冬小麦的生育期, 致使灌浆期提前, 故而灌浆期日最高温度大于 32℃的天数和出现时期也发生了改变。在环境背景气温较低的年份(2007—2008 年), 增温区小麦避开灌浆中

表 3 非对称性增温对冬小麦籽粒蛋白质组分的影响
Table 3 Effects of asymmetric warming on protein components in grains of winter wheat under FATI facility

处理 Treatment	清蛋白含量 Albumin content (%)	球蛋白含量 Globulin content (%)	醇溶蛋白含量 Gliadin content (%)	谷蛋白含量 Glutenin content (%)	谷/醇比 Glu/gli ratio
2007–2008					
不增温对照 CK	2.21±0.04 a	0.55±0.00 a	3.13±0.03 a	2.86±0.00 a	0.91±0.01 b
全天增温 AW	2.06±0.01 b	0.58±0.00 a	2.72±0.08 c	2.96±0.04 a	1.09±0.02 a
白天增温 DW	2.01±0.05 b	0.67±0.08 a	3.11±0.04 a	2.10±0.05 b	0.67±0.01 d
夜间增温 NW	2.26±0.03 a	0.61±0.02 a	2.88±0.03 b	2.20±0.02 b	0.76±0.01 c
2008–2009					
不增温对照 CK	3.00±0.02 a	0.64±0.01 c	3.26±0.03 c	2.48±0.01 c	0.76±0.01 c
全天增温 AW	2.77±0.06 b	0.74±0.01 b	3.42±0.00 c	2.85±0.04 b	0.82±0.01 b
白天增温 DW	2.59±0.02 c	0.84±0.02 a	4.26±0.04 a	2.82±0.04 b	0.65±0.00 d
夜间增温 NW	2.96±0.01 a	0.75±0.01 b	3.83±0.02 b	3.52±0.03 a	0.92±0.01 a

数据为 3 次重复的平均值±标准差。同一生长季中, 处理间达显著差异($P<0.05$)用不同字母表示。

Data are shown as means±SD of three replicates. In each growing season, values followed by different letters are significantly different among treatments at $P < 0.05$. CK: natural condition; AW: all-day warming; DW: daytime warming; NW: nighttime warming.

后期出现日最高温度大于 32℃的概率将增大。在环境背景温度较高的年份(2008—2009 年), 由于增温处理使灌浆期提前, 故降低了在灌浆前期遇到高温的机率, 但是在 AW 和 DW 处理下灌浆中后期出现日最高温大于 32℃的天数增加, 分别增加 2 d 和 7 d。可见, 气候变暖情景下, 冬小麦灌浆期及其不同阶段遇到高温的机率变化复杂, 但总体而言全天增温和白天增温下灌浆前期出现高温的机率显著下降, 夜间增温下全生育期出现高温的机率显著下降。

3.2 昼夜不同增温对淀粉含量及组分的影响

淀粉占小麦籽粒的绝大部分, 而且淀粉含量与直/支比会显著影响小麦品质^[7,27-28]。本研究表明, 总淀粉含量受增温影响不显著, 但与灌浆中期出现 32℃的天数呈负相关($r = -0.71$), 淀粉组分受增温影响明显, 直/支比在增温条件下基本呈升高趋势, 且与灌浆中期和后期出现 32℃的天数均呈正相关, 相关系数分别为 $r = 0.23$ 和 $r = 0.69$ 。Panozzo 和 Eagles^[10]发现直链淀粉含量和灌浆期大于 30℃的天数呈正相关; 本研究与之相似, 但与灌浆后期 32℃的天数相关性更大, $r = 0.68$ 。另外, 本研究结果还显示, DW 增温处理条件下大于 32℃的天数在 3 个增温处理中最多, 直链淀粉含量最高, 直/支比也最高; 2009 年 CK 处理无论总淀粉、直链淀粉还是直/支比在所有处理中都最低, 但灌浆期大于 32℃的高温天数却不是最少, 其原因可能是 CK 区小麦在灌浆前期出现了 3 d 大于 32℃的高温。上述结果表明, 淀粉组分受温度影响较为复杂, 不仅和灌浆期高温天数有关, 而且和灌浆期不同阶段高温出现时期有关,

还有可能与昼夜温差有关。

3.3 昼夜不同增温对蛋白质含量及组分的影响

灌浆期适度增温有利于蛋白质的积累^[20], 但是高于 32℃则会造成蛋白质含量随温度升高而下降^[29-30]。在本研究中, AW、DW 和 NW 处理都明显降低了冬小麦籽粒中的总蛋白质含量, 两年平均较 CK 分别降低 8.9%、5.2%和 6.7%。同时, AW、NW 和 DW 的灌浆期分别比 CK 提前 14.0、11.5 和 9.5 d^[25]。可以看出, 灌浆期提前天数越多, 小麦籽粒蛋白质含量下降越大, 灌浆期提前可能是造成蛋白质含量下降的主要原因。另外, 在 3 种增温处理条件下, 随着灌浆期大于 32℃天数的增加, 蛋白质含量呈现增加的趋势, 这间接反映了灌浆后期适当高温将有助于蛋白质的积累。总之, 小麦籽粒中蛋白质含量既受生育期提前的影响, 也受外界环境因素的影响, 对增温的响应较为复杂。

本研究发现, 蛋白质组分受增温的影响比较复杂, 但与灌浆期出现大于 32℃的天数之间存在一定的相关性。其中清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白与灌浆中期和灌浆后期大于 32℃的天数均呈正相关, 相关系数分别为 0.57、0.52、0.52 (灌浆中期)和 0.31、0.67、0.74 (灌浆后期)。谷/醇比与灌浆中期和灌浆后期大于 32℃的天数均呈负相关, 相关系数分别为-0.53 和-0.34, 这与前人研究一致^[22,31], 而且灌浆中后期的高温天气有助于谷/醇比的提高, 出现较早则对谷/醇比提高不利。AW 和 DW 处理的清蛋白含量下降幅度较 NW 处理大, 可能是夜间温度升高导致昼夜温差缩小的缘故。球蛋白和醇溶蛋白含量在增温条

件下都显著呈现 $DW > NW > AW$ 趋势,说明在灌浆期提前的条件下,灌浆中后期高温有助于球蛋白和醇溶蛋白的合成积累,而且昼夜温差较大的情况下更有利。两年试验结果显示, DW 增温处理对蛋白质组分的影响趋势最明显,表现为清蛋白含量最低,醇溶蛋白含量最高,谷/醇比最低。总体而言,蛋白质组分既受灌浆期提前的影响,也受灌浆期大于 32°C 天数及出现时间和昼夜温差的影响。

4 结论

FATI 系统下田间非对称性增温试验发现,全天、白天和夜间增温处理,可以使冠层温度平均提高 1.2°C ,并明显使冬小麦的灌浆期提前,灌浆期大于 32°C 高温的出现时期和天数也发生了明显改变,并进一步影响小麦籽粒中淀粉组分、蛋白质含量和蛋白质组分。全天、白天和夜间 3 种增温情景下,冬小麦总淀粉含量差异不显著,但直/支比明显提高,其中白天增温的直/支比最高,两年分别比对照提高 6.9%和 46.2%。增温处理使籽粒中总蛋白质含量显著降低,并呈现 $CK > DW > NW > AW$ 的趋势。与对照相比,全天、白天和夜间增温的籽粒蛋白质含量两年平均分别下降 8.9%、5.2%和 6.7%。增温处理对籽粒蛋白质组分的影响比较复杂,但白天增温对蛋白质组分的影响趋势一致。白天增温下,清蛋白含量最低,球蛋白含量最高,谷/醇比最低。试验结果表明,气候变暖对冬小麦品质的影响比较复杂,其机制尚需进一步研究。

References

- [1] IPCC. Climate Change (2007). Synthesis Report: Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch>
- [2] Li C-Y(李崇银), Weng H-Y(翁衡毅), Gao X-Q(高晓清), Zhong M(钟敏). Initial investigation of another possible reason to cause global warming. *Chin J Atmospheric Sci* (大气科学), 2003, 27(5): 789–797 (in Chinese with English abstract)
- [3] Yan M-H(闫敏华), Chen P-Q(陈泮勤), Deng W(邓伟), Liang L-Q(梁丽乔). Further understanding of the Sanjiang Plain warming: changes in maximum and minimum air temperature. *Ecol Environ* (生态环境), 2005, 14(2): 151–156 (in Chinese with English abstract)
- [4] Ren G-Y(任国玉), Xu M-Z(徐铭志), Chu Z-Y(初子莹), Guo J(郭军), Li Q-X(李庆祥), Liu X-N(刘小宁), Wang Y(王颖). Changes of surface air temperature in China during 1951–2004. *Climatic Environ Res* (气候与环境研究), 2005, 10(4): 717–727 (in Chinese with English abstract)
- [5] Xu Z-F(徐兆飞), Zhang H-Y(张惠叶), Zhang D-Y(张定一). Wheat Quality and Improvement (小麦品质及其改良). Beijing: China Meteorological Press, 2000 (in Chinese)
- [6] Rahman S, Kosar-Hashemi B, Samuel M S, Hill A, Abbott D C, Skerritt J H, Preiss J, Appels R, Morell M K. The major proteins of wheat endosperm starch granules. *Aust J Plant Physiol*, 1995, 22: 793–803
- [7] Yan J(阎俊), He Z-H(何中虎). Effects of genotype, environment and G×E interaction on starch quality traits of wheat grown in Yellow and Huai River Valley. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2001, 21(2): 14–19 (in Chinese with English abstract)
- [8] Keeling P L, Bacon P J, Holt D C. Elevated temperature reduces starch deposition in wheat endosperm by reducing the activity of soluble starch synthase. *Planta*, 1993, 191: 342–348
- [9] Jenner C F. Starch synthesis in the kernel of wheat under high temperature conditions. *Aust J Plant Physiol*, 1994, 21: 791–806
- [10] Panozzo J F, Eagles H A. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat: I. Starch. *Aust J Plant Physiol*, 1998, 49: 757–766
- [11] Breseghello F, Finney P L, Gaines C, Andrews L, Tanaka J, Penner G, Sorrells M E. Genetic loci related to kernel quality differences between a soft and a hard wheat cultivar. *Crop Sci*, 2005, 45: 1685–1695
- [12] Davies J, Berzonsky W A. Evaluation of spring wheat quality traits and genotypes for production of Cantonese Asian noodles. *Crop Sci*, 2003, 43: 1313–1319
- [13] Ma D-Y(马冬云), Guo T-C(郭天财), Wang C-Y(王晨阳), Zhu Y-J(朱云集), Wang H-C(王化岑). Investigation on starch pasting properties of winter wheat in different sites. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 2004, 19(4): 59–61 (in Chinese)
- [14] Zhao C(赵春), Ning T-Y(宁堂原), Jiao N-Y(焦念元), Han B(韩宾), Li Z-J(李增嘉). Effects of genotype and environment on protein and starch quality of wheat grain. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, 16(7): 1257–1260 (in Chinese with English abstract)
- [15] Tian Z-H(田志会), Sun Y(孙彦), Guo Y-Q(郭玉琴). Effects of main ecological factors on nutrition and baking quality of wheat. *J Beijing Agric Coll* (北京农学院学报), 2000, 15(2): 67–71 (in Chinese with English abstract)
- [16] Souza E J, Martin J M, Guttieri M J, O'Brien K M, Habernicht D K, Lanning S P, McLean R, Carlson G R, Talbert L E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. *Crop Sci*, 2004, 44: 425–432
- [17] Wu D-B(吴东兵), Cao G-C(曹广才), Wang X-F(王秀芳), Qiang X-L(强小林), Li M(李萌). Relationship between growing process & climatic conditions and the quality of grain of autumn sown wheat. *J Hebei Agric Sci* (河北农业科学), 2003, 7(1): 5–10 (in Chinese with English abstract)
- [18] Cao G-C(曹广才), Wu D-B(吴东兵), Chen H-Q(陈贺芹), Qiang

- X-L(强小林), Dong M(冬梅), Kou H(寇峰), Wang J-L(王建林), Hou L-B(侯立白), Li M(李萌). Relationship between temperature, sunshine and quality of spring-sowing wheat. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2004, 37(5): 663–669 (in Chinese with English abstract)
- [19] Li X-Y(李向阳), Zhu Y-J(朱云集), Guo T-C(郭天财). Preliminary analysis on the relationship between wheat canopy temperature and yield with quality in filling stage in different genotypes. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2004, 24(2): 88–91 (in Chinese with English abstract)
- [20] Blumenthal C S, Bekes F, Batey I L, Wrigley C W, Moss H J, Mares D J, Barlow E W R. Interpretation of grain quality results from wheat variety trials with reference to higher temperature stress. *Aust J Agric Res*, 1991, 42: 325–334
- [21] Stone P J, Nicolas M E. Wheat cultivars vary widely in their response of grain yield and quality of short periods of post-anthesis heat stress. *Aust J Plant Physiol*, 1994, 21: 887–900
- [22] Zhao H(赵辉), Jing Q(荆奇), Dai T-B(戴廷波), Jiang D(姜东), Cao W-X(曹卫星). Effects of post-anthesis high temperature and water stress on activities of key regulatory enzymes involved in protein formation in two wheat cultivars. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(12): 2021–2027 (in Chinese with English abstract)
- [23] Niu S L, Wan S Q. Warming changes plant competitive hierarchy in a temperate steppe in northern China. *J Plant Ecol*, 2008, 1: 103–110
- [24] Nijs I, Kockelbergh F, Teughels H. Free air temperature increase (FATI): a new tool to study global warming effects on plants in the field. *Plant, Cell & Environ*, 1996, 19: 495–502
- [25] Tian Y-L(田云录), Zheng J-C(郑建初), Zhang B(张彬), Chen J(陈金), Dong W-J(董文军), Yang F(杨飞), Zhang W-J(张卫建). System design of free air temperature increased (FATI) for upland with three diurnal warming scenarios and their effects on winter-wheat growth and yield. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2010, 43(18): 3724–3731 (in Chinese with English abstract)
- [26] Shanghai Plant Physiology Association (上海植物生理学会). Modern Laboratory Manual of Plant Physiology (现代植物生理学实验手册). Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [27] Sasaki T, Yasui T, Matsuki J, Satake T. Comparison of physical properties of wheat starch gels with different amylase content. *Cereal Chem*, 2002, 79: 861–866
- [28] Mu P-Y(穆培源), He Z-H(何中虎), Xu Z-H(徐兆华), Wang D-S(王德森), Zhang Y(张艳), Xia X-C(夏先春). Waxy protein identification and starch pasting properties of CIMMYT wheat lines. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(7): 1071–1075 (in Chinese with English abstract)
- [29] Smika D E, Greb B W. Protein content of winter wheat grain as related to soil and climatic factors in the semiarid Central Great Plains. *Agron J*, 1973, 65: 433–436
- [30] Wrigley C W, Blumenthal C, Gras P W, Barlow E W R. Temperature variation during grain filling and changes in wheat grain quality. *Aust J Plant Physiol*, 1994, 21: 875–885
- [31] Blumenthal C, Bekes F, Gras P W, Barlow E W R, Wrigley C W. Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality. *Cereal Chem*, 1995, 72: 539–544