

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.106

谭凯炎, 周广胜, 任三学, 等. 气候变化可能不会引起我国北方冬小麦营养品质下降 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (3): 282-289

Tan K Y, Zhou G S, Ren S X, et al. Climate change will probably not cause the decline of winter wheat nutritional quality in northern China [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (3): 282-289

## 气候变化可能不会引起我国北方 冬小麦营养品质下降

谭凯炎, 周广胜, 任三学, 耿金剑

中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要:** 为了探索未来气候变化对冬小麦营养品质的影响, 采用开顶式气室与红外辐射器相结合的方法开展了冬小麦生长季增温和 CO<sub>2</sub> 浓度升高的复合影响试验, 在 6 个小麦生长季模拟了 21 世纪中后期两种可能的增温和 CO<sub>2</sub> 浓度升高情景。结果表明, 在生长季增温与 CO<sub>2</sub> 浓度升高情景下, 冬小麦冬后发育期前移, 生育期平均气温较对照的增加幅度远小于生长季增温幅度, 灌浆期遭遇的高温日数减少, 主要生育阶段的平均太阳辐射强度减弱。在增温与 CO<sub>2</sub> 浓度升高复合影响下, 冬小麦籽粒蛋白质含量略有增加, 籽粒淀粉与脂肪含量未显示规律性的变化趋势, 增温对小麦蛋白质含量的综合影响弥补了 CO<sub>2</sub> 浓度升高对籽粒蛋白质含量的负效应。如果不考虑小麦品种变化影响, 预计未来气候变化可能不会导致我国北方冬小麦籽粒营养品质下降。

**关键词:** 气候变暖; CO<sub>2</sub> 浓度; 冬小麦; 蛋白质含量; 淀粉含量; 复合影响

### 引言

全球气候变化深刻影响着世界农业生产<sup>[1]</sup>, 气候变化对农业可持续发展和粮食安全的影响正成为国际社会关注的焦点。IPCC 指出, 在典型浓度路径 RCP8.5 情景下, 到 21 世纪末全球年平均地表温度还将升高 2.6 ~ 4.8 °C<sup>[2]</sup>, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度可能升高到 1000 × 10<sup>-6</sup> 左右<sup>[3]</sup>, 农作物赖以生长发育的光温水气等环境条件将显著改变, 从而将显著影响农作物种植格局和产量, 并可能导致农作物营养品质的变化。

小麦是世界上最主要的粮食作物之一, 提供

了约 1/5 的人体所需蛋白质和热量。小麦籽粒中蛋白质和淀粉是小麦的主要营养组分, 其含量与面粉营养品质和性状密切相关, 它们除受基因型效应控制外在很大程度上还受环境条件和氮肥施用的影响<sup>[4-7]</sup>, 有时环境因子影响甚至大于品种的影响<sup>[6,8-9]</sup>。研究表明, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致小麦籽粒蛋白质含量下降, 降幅最高可达 15%, 同时使小麦籽粒淀粉含量显著增加<sup>[10-14]</sup>, 这种效应在水稻和大麦等作物同样存在<sup>[11,15]</sup>。冬小麦籽粒形成阶段较弱的太阳辐射强度有利于增加蛋白质含量<sup>[16]</sup>。大量研究表明, 小麦生育期增温将导致籽粒蛋白质含量增加, 淀粉和脂肪含量减少<sup>[17-19]</sup>;

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-11-12

资助项目: 国家自然科学基金 (41375118)

作者简介: 谭凯炎, 男, 正研级高工, tanky@cma.gov.cn

但也有试验报道, 增温降低小麦籽粒蛋白质含量, 而对淀粉含量影响不大<sup>[20]</sup>。更多的增温处理试验发现, 灌浆期高温胁迫对小麦籽粒主要营养组成影响显著<sup>[21-23]</sup>。已有报道显示, 在 CO<sub>2</sub> 浓度升高与土壤增温复合处理下, 因源库碳氮代谢改变可能显著降低冬小麦籽粒蛋白质浓度<sup>[24]</sup>, 而 CO<sub>2</sub> 浓度升高与花后增温复合处理则增加了春小麦籽粒总蛋白质含量<sup>[25]</sup>。

目前对于小麦籽粒营养品质在增温与 CO<sub>2</sub> 浓度升高复合影响下的响应规律认知还比较有限。本研究利用持续 6 年模拟两种增温与 CO<sub>2</sub> 浓度升高情景的控制试验数据分析了未来气候变化情景下我国北方冬小麦籽粒营养品质的可能变化趋势, 以增进对气候变化与我国粮食安全的理解, 并为科学应对气候变化提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2010 年 10 月至 2012 年 6 月和 2013 年 10 月至 2017 年 6 月的 6 个冬小麦生长季在中国气象科学研究院固城生态与农业气象试验站 (河北省定兴县, 39° 08' N, 115° 40' E) 的一组 (6 个) 开顶式气室中进行, 每个气室面积 10 m<sup>2</sup>。试验均设 2 个处理, 即气室对照 (CK) 和复合处理 (ECTI), 2010—2011 年每处理 2 个重复, 其余年份每处理 3 个重复。试验模拟了 21 世纪

50—70 年代可能出现的两种增温和 CO<sub>2</sub> 浓度升高情景<sup>[3]</sup>: 其中情景 1 为日平均气温升高 1.5 ~ 2.0 °C, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度达到 560 × 10<sup>-6</sup>; 情景 2 为增温 2.5 ~ 3.0 °C, CO<sub>2</sub> 浓度达到 600 × 10<sup>-6</sup>。增温幅度通过调节红外辐射器功率和改变气室通风能力来控制, 气室 CO<sub>2</sub> 浓度通过红外气体分析仪实时监测及实时调节输气量控制, 详见文献<sup>[26-27]</sup>。各生长季复合处理气室的增温自小麦出苗开始至成熟; 2010—2012 年生长季 CO<sub>2</sub> 浓度升高处理自冬小麦返青开始至成熟, 2013—2017 年生长季 CO<sub>2</sub> 浓度升高处理自出苗开始至成熟, 其中越冬休眠期停止, CO<sub>2</sub> 熏气只在白天进行。处理期间, 复合处理与对照气室的实际温度差异和 CO<sub>2</sub> 浓度如表 1 所示。

### 1.2 试验材料

选用当地常规小麦品种郑麦-98, 属半冬性品种。气室中采用直播, 行距 25 cm, 各试验季对照与复合处理播种量均相同。各年试验的播种量、播种期见表 2, 其中 2014 年和 2015 年复合处理播种日期比对照推迟 12 d, 以模拟应对气候变暖采取的适应措施。根据试验地逐日气温多年平均值, 复合处理推迟 12 d 播种, 此时的多年平均气温叠加情景 2 的增温幅度后与对照播种日的多年平均气温相近, 基本保证冬前有相近的有效积温。每试验季冬小麦均进行 5 次灌溉 (播种后、越冬前、拔节前、孕穗期、灌浆期), 每次分别为对照处理

表 1 冬小麦复合处理与对照气室的日均增温和 CO<sub>2</sub> 浓度

Table 1 Increment of daily mean temperatures in the combined treatment (ECTI) chambers compared with those in the control (CK) chambers, and average CO<sub>2</sub> concentrations in the chambers during the growing season of winter wheat

情景	试验季	生长季日均增温 / °C	CO <sub>2</sub> 浓度 / 10 <sup>-6</sup>	
			对照	复合处理
情景 1	2010/2011	1.7 ± 0.6	391 ± 11	567 ± 28
	2011/2012	1.6 ± 0.5	393 ± 15	564 ± 32
情景 2	2013/2014	2.8 ± 0.5	397 ± 15	612 ± 49
	2014/2015	2.6 ± 0.4	399 ± 13	603 ± 55
	2015/2016	2.5 ± 0.4	401 ± 17	617 ± 59
	2016/2017	2.4 ± 0.5	402 ± 16	609 ± 57

注: 试验季指冬小麦生长季, 从当年 10 月至下一年 6 月。

表2 冬小麦各试验季播种量和播种日期  
Table 2 Sowing date and sowing rate in each experiment season of winter wheat

试验季	播种量/(g/m <sup>2</sup> )	播种日期(日/月)	
		对照	复合处理
2010/2011	23	10/10	10/10
2011/2012	23	09/10	09/10
2013/2014	23	10/10	10/10
2014/2015	23	10/10	22/10
2015/2016	18	10/10	22/10
2016/2017	18	10/10	10/10

100 mm、复合处理 120 mm。灌溉和降水保证了对照和复合处理气室的小麦不受水分胁迫。气室土壤为典型褐土，试验期间 0 ~ 30 cm 土层平均有机质含量为 12.1 g/kg，全氮含量为 1.03 g/kg，有效磷含量为 30.38 mg/kg，速效钾含量为 109.9 mg/kg。播种时，施底肥磷酸二铵 (N16:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>45) 60 g/m<sup>2</sup>，返青后追施尿素和磷酸二铵各 25 g/m<sup>2</sup>。各气室的其他管理措施均相同。

### 1.3 观测内容与方法

自冬小麦出苗后，按照农业气象观测规范进行发育期观测。小麦成熟后，将每个气室 2 m<sup>2</sup> 考种区小麦单独收割风干，每个气室各留取 1 kg 籽粒样用于籽粒营养组成分析。籽粒营养组成委托北京市农林科学院植物营养与资源研究所分析：采用微量凯氏定氮法 (GB5511—85 标准) 测定总

氮含量，然后乘以系数 5.7 换算成蛋白质含量；采用淀粉酶法 (GB2905—1982 标准) 测定粗淀粉含量；采用索氏提取法 (GB/T 14772—2008 标准) 测定粗脂肪含量。籽粒氨基酸含量委托青岛科创质量检测有限公司分析：采用 AccQ-Tag 高效液相色谱法测定<sup>[28]</sup>。冬小麦生育期每日总辐射数据取自离气室组 50 m 的自动气象站。

### 1.4 数据处理

采用 EXCEL 软件进行数据分析处理和作图，用 SPSS 统计软件进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候变暖对冬小麦发育期和生育阶段温光条件的影响

生长在复合处理气室中的冬小麦冬后各发育期均明显提前 (表 3)，主要由越冬期缩短返青期提前所致，当增温幅度达到 2.4℃ 以上时，冬后生育期前移了 13 ~ 19 d。3 个重要发育日期提前的天数基本接近，表明冬小麦冬后生长发育速率较少受到生长季增温的影响。

分析对照和复合处理冬小麦整个生育过程的平均温度发现 (表 4)，生长在复合处理气室中的冬小麦全生育期日平均气温较对照的升高幅度远小于生长季增温幅度，在情景 1 下平均升高幅度为 0.6 ~ 0.7℃，情景 2 下升高 0.8 ~ 1.4℃，这主要是因为增温导致冬小麦冬后发育期大幅前移

表3 各试验季对照与复合处理的冬小麦返青、开花和成熟日期  
Table 3 Dates of reviving, flowering and ripening of winter wheat in CK and ECTI chambers

试验季	日/月					
	返青日期		开花日期		成熟日期	
	对照	复合处理	对照	复合处理	对照	复合处理
2010/2011	05/03	22/02	10/05	27/04	16/06	09/06
2011/2012	08/03	03/03	06/05	29/04	13/06	08/06
2013/2014	02/03	17/02	28/04	11/04	11/06	27/05
2014/2015	27/02	09/02	30/04	16/04	09/06	26/05
2015/2016	25/02	06/02	28/04	13/04	07/06	21/05
2016/2017	24/02	10/02	29/04	15/04	04/06	20/05

表 4 对照与复合处理的冬小麦生育期温光条件对比

Table 4 Comparison of temperature, solar radiation and high temperature days under CK and ECTI during growing period of winter wheat

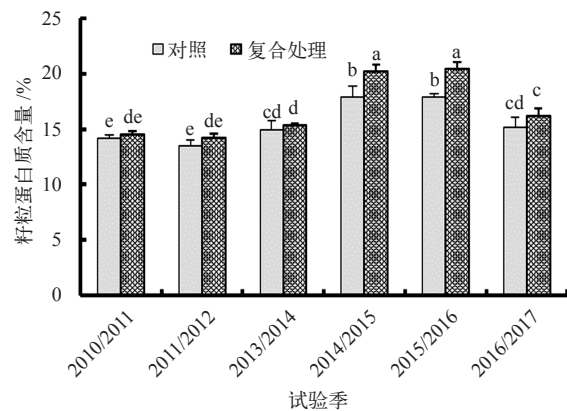
试验季	全生育期平均气温 / $^{\circ}\text{C}$		返青至成熟日平均总辐射 / ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )		开花至成熟最高气温 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 天数 /d	
	对照	复合处理	对照	复合处理	对照	复合处理
2010/2011	6.0	6.7	20.6	19.9	18	17
2011/2012	5.9	6.5	20.1	19.6	20	21
2013/2014	7.2	8.6	22.4	21.3	17	9
2014/2015	6.7	7.8			12	11
2015/2016	6.1	6.9	20.8	18.7	19	12
2016/2017	7.8	9.0	21.3	19.5	26	23

注: 2014/2015 试验季期间因辐射仪器维修导致数据缺失。

到较冷的时段。实际上生长季增温仅导致冬小麦冬前和越冬阶段的平均温度明显升高, 而冬后各生育阶段的平均温度并没有升高<sup>[27]</sup>。表 4 也给出了与籽粒蛋白质积累密切相关的灌浆期日最高气温超过  $32^{\circ}\text{C}$  日数和生育期太阳辐射对比情况。由于复合处理冬小麦冬后发育日期提前, 除 2012 年外其他各年复合处理冬小麦在灌浆期遇到日最高气温超过  $32^{\circ}\text{C}$  的日数均少于对照冬小麦, 尤其 2014 年和 2016 年减少幅度达  $1/3 \sim 1/2$ ; 同时, 冬小麦从返青至成熟阶段平均接收的太阳辐射减弱, 在情景 2 下降低幅度达  $5\% \sim 10\%$ 。

## 2.2 复合处理对小麦籽粒蛋白质含量的影响

生长季增温与  $\text{CO}_2$  浓度升高复合处理下冬小麦籽粒蛋白质含量的变化趋势在各试验季基本一致, 各年复合处理小麦籽粒蛋白质含量均高于对照, 增加幅度为  $0.4\% \sim 2.5\%$  (图 1), 其中 2014/2015 和 2015/2016 两个试验季达到 0.01 的显著性检验, 而其他试验季未通过显著性检验。因此, 全生育期增温与大气  $\text{CO}_2$  浓度升高复合处理不会导致冬小麦籽粒蛋白质含量下降。从图 1 中同时可看出, 冬小麦籽粒蛋白质含量的年际波动较大, 6 年中对照小麦籽粒蛋白质含量在  $13.5\% \sim 18.0\%$  间变化, 标准差达到 1.9%, 说明年际间气候年型及其他条件对籽粒蛋白质含量的影响甚至超过试验所模拟的  $\text{CO}_2$  浓度升高与增温



注: 柱上不同小写字母表示差异达到 0.01 的显著性水平, 下同。

图 1 对照和复合处理下冬小麦籽粒蛋白质含量

Fig. 1 The protein content in grains of winter wheat from CK and ECTI. Each bar represents the mean + standard deviation. Different lowercase letters over the bars represent significant differences ( $P < 0.01$ ), the same below

的复合影响。

## 2.3 复合处理对小麦籽粒氨基酸含量的影响

为了进一步了解增温和  $\text{CO}_2$  浓度升高对冬小麦籽粒蛋白质品质的影响, 2017 年分析测定了取样籽粒的 7 种必须氨基酸含量和 8 种非必须氨基酸含量。如图 2 所示, 复合处理与对照小麦的总氨基酸含量差异不显著, 复合处理籽粒的总氨基酸含量略高于对照, 这与当年复合处理蛋白质含量变化特征一致。冬小麦总氨基酸含量略有增加, 主要是由非必须氨基酸总含量略有增加所致, 而

必需氨基酸总含量几乎没有变化。因只有一年分析数据，尚不足以反映籽粒氨基酸含量对气候变化的响应规律。

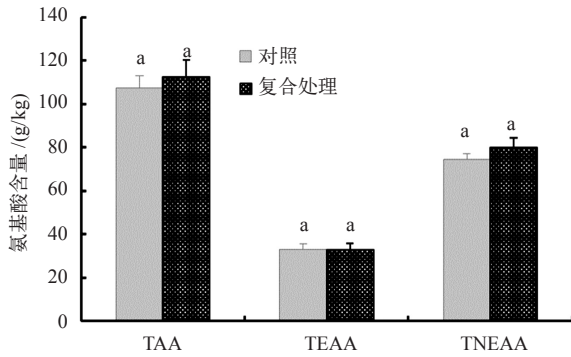


图2 对照和复合处理下冬小麦籽粒氨基酸总量 (TAA)、必需氨基酸总量 (TEAA) 和非必需氨基酸总量 (TNEAA)

Fig. 2 The contents of total amino acids (TAA), total essential amino acids (TEAA) and total non-essential amino acids (TNEAA) in winter wheat grain from CK and ECTI

### 2.4 复合处理对小麦籽粒淀粉含量和脂肪含量的影响

在6个试验季，复合处理小麦总淀粉含量与对照的差异在-2.2%~2.3%之间，大部分未通过显著性检验 (图3a)。对照小麦籽粒总淀粉含量的年际变化范围较大，为57%~72%。籽粒脂肪含量对复合处理的响应在试验中没有显示出规律性特征 (图3b)，2015/2016试验季复合处理下冬小麦脂肪含量显著增加，但其他年份里或增或减，

均未通过显著性检验。年际间冬小麦籽粒脂肪含量在0.9%~2.1%范围内变化，波动幅度大于处理间的差异。结果表明，试验设定的两种增温与CO<sub>2</sub>浓度升高情景均没有导致冬小麦籽粒淀粉和脂肪含量发生趋势性变化。

### 3 结论与讨论

模拟的两种气候变化情景多年试验结果表明，冬小麦生长季增温与大气CO<sub>2</sub>浓度升高复合作用可能不会引起华北冬小麦籽粒蛋白质含量降低，或可能有所提高，同时籽粒淀粉与脂肪含量受增温与CO<sub>2</sub>浓度升高复合作用的影响不明显。因此，未来气候变暖和CO<sub>2</sub>浓度升高可能不会导致华北冬小麦籽粒主要营养品质下降。

籽粒蛋白质含量是籽粒营养品质的主要指标，CO<sub>2</sub>浓度升高处理普遍使小麦籽粒蛋白质含量降低。这主要是因为高CO<sub>2</sub>浓度促进了小麦碳水化合物的生产和积累，大幅度提高了籽粒产量，从而使籽粒中蛋白质浓度遭到稀释而相对降低<sup>[29]</sup>，当土壤氮水平较高时，CO<sub>2</sub>浓度升高对蛋白质含量的效应便减小<sup>[11]</sup>。本研究的复合试验产量结果显示，冬小麦生长季大幅度增温导致晚霜冻害加重，穗粒数减少，籽粒产量下降<sup>[27]</sup>，籽粒蛋白质浓度不但没有被稀释，还可能因浓缩而相应提高。同时，已有研究显示，冬小麦籽粒形成阶段较弱

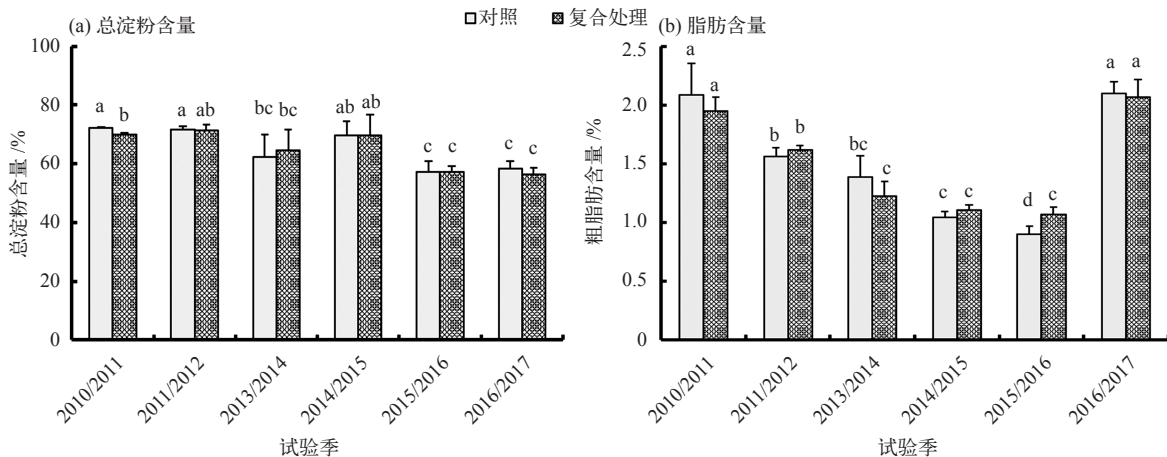


图3 对照和复合处理下冬小麦籽粒总淀粉 (a) 和脂肪 (b) 含量

Fig. 3 The total starch content (a) and the fat content (b) in grains of winter wheat from CK and ECTI

的太阳辐射强度有利于增加蛋白质含量<sup>[16]</sup>, 而灌浆阶段 >32 °C 的高温胁迫或日平均气温高于 25 °C 则会引起蛋白质含量下降<sup>[5,30]</sup>。本研究试验中, 生长在复合处理气室的冬小麦冬后发育期向较冷时段前移, 冬小麦全生育期平均气温较对照的实际升幅远小于增温幅度, 冬后主要生育阶段的平均气温甚至低于对照<sup>[27]</sup>。因此, 冬小麦开花至成熟阶段遭遇 >32 °C 高温的日数少于对照, 同时其主要生育阶段的平均太阳辐射强度也低于对照, 复合处理下冬小麦生育期气象条件有利于籽粒蛋白质积累。本试验表明, 华北冬小麦生长季增温对其蛋白质含量的综合影响可能弥补了 CO<sub>2</sub> 浓度升高对蛋白质含量的负效应。已有研究表明, 适当晚播有利于增加小麦籽粒蛋白质含量<sup>[31]</sup>。在本研究 2014/2015 和 2015/2016 的 2 个试验季, 复合处理播期推迟可能也是籽粒蛋白质含量显著高于对照的部分原因, 未来气候变暖情景下, 冬小麦播期必然推迟, 推迟播种效应也属于增温的一种间接影响。冬小麦生长季增温和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦淀粉含量也有着相反的影响效应<sup>[13,17]</sup>, 复合处理试验中小麦淀粉含量没有明显变化也可能表明, 两者相互抵消了对淀粉含量的影响。需要指出的是, 本研究仅从复合处理引起冬小麦发育期及生育阶段温光条件改变和冬小麦籽粒营养品质变化实证数据来分析生长季增温与 CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦籽粒营养品质的可能影响, 对于复合处理下小麦籽粒形成的生理生化过程并没有进行观测研究, 特别是由于试验条件限制, 本试验中只使用了一个冬小麦品种, 其代表性有所局限, 未来需要开展更多的试验研究。

在本研究的 6 个试验季中, 冬小麦籽粒蛋白质、淀粉及脂肪含量年际差异均较大, 甚至超过处理间差异, 这可能与各生长季环境条件差异密切相关。6 个生长季中对照冬小麦全生育期平均气温在 5.9 ~ 7.8 °C 间波动, 最大相差 1.9 °C, 其中某些生育过程温度差异可能更加显著, 而各生长季复合处理与对照全生育期平均气温差异为 0.6 ~ 1.4 °C (表 4), 同时, 年际间日照等天气条件、土壤肥力也存在差异。根据燕丽等<sup>[9]</sup>的研究,

小麦蛋白质含量和淀粉含量等品质性状的年际间差异均达到显著水平, 可见, 气候变化对小麦品质的影响可能小于年际间环境条件变化的影响。

本研究试验中, 复合处理气室每次灌溉量多于对照, 主要考虑到复合处理蒸散量大于对照, 需要补偿一些供水量以消除土壤水分条件差异。现有研究均表明<sup>[5]</sup>, 降水量与籽粒蛋白质含量呈极显著负相关, 降水量多使蛋白质含量降低与冲刷根部硝酸盐导致氮素供应不足以及降水过多影响光合作用有关。因此, 灌溉量略有增加不致于改变复合处理对籽粒蛋白质的影响效应方向。在本试验中, 随增温幅度增加, 小麦产量对两种情景的响应发生了转折<sup>[26-27]</sup>, 但小麦籽粒营养品质响应基本一致, 这说明未来气候变化对小麦品质的影响可能要小于对产量的影响。增温处理对小麦产量和品质的影响效应在不同地域表现出不同甚至相反结果<sup>[19-20]</sup>。因此, 本研究的复合影响结果仅反映了试验地区冬小麦籽粒营养的响应特征。■

#### 参考文献

- [1] 谢立勇, 李悦, 徐玉秀, 等. 气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10 (4): 235-239. Xie L Y, Li Y, Xu Y X, *et al.* Updated understanding on the impacts of climate change on food production and food security [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10 (4): 235-239 (in Chinese)
- [2] 董思言, 高学杰. 长期气候变化: IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10 (1): 56-59. Dong S Y, Gao X J. Long-term climate change: interpretation of IPCC fifth assessment report [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10 (1): 56-59 (in Chinese)
- [3] Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, *et al.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 [J]. *Climatic Change*, 2011, 109: 213-241
- [4] 何凤丽, 田纪春, 陈建省, 等. 基因型和环境对小麦籽粒粗淀粉含量的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (2): 169-172. He F L, Tian J C, Chen J S, *et al.* Effects of genotypes and environment on starch content in wheat [J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2009, 40 (2): 169-172 (in Chinese)
- [5] 关二旗, 魏益民, 张波. 小麦籽粒品质与基因型及环境条件的关系[J]. 麦类作物学报, 2010, 30 (5): 963-969. Guan E Q, Wei Y M, Zhang B. Relationships between wheat kernel quality and genotype as well as environmental conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30 (5): 963-969 (in Chinese)

- [6] Rozbicki J, Ceglińska A, Gozdowski D, *et al.* Influence of the cultivar, environment and management on the grain yield and bread-making quality in winter wheat [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 61: 126-132
- [7] Studnicki M, Wijata M, Sobczyński G, *et al.* Effect of genotype, environment and crop management on yield and quality traits in spring wheat [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 72: 30-37
- [8] Kaya Y, Akcura M. Effects of genotype and environment on grain yield and quality traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Food Science and Technology (Campinas)*, 2014, 34 (2): 386-393
- [9] 燕丽, 王志忠, 郑文寅, 等. 基因型和环境对安徽小麦品质性状的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2016, 36 (11): 1497-1501. Yan L, Wang Z Z, Zheng W Y, *et al.* Effect of genotypes and environments on wheat quality in Anhui province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36 (11): 1497-1501 (in Chinese)
- [10] 白莉萍, 全乘风, 林而达, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对冬小麦品质性状的影响 [J]. *自然科学进展*, 2004, 14 (1): 111-115. Bai L P, Tong C F, Lin E D, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on quality traits of winter wheat [J]. *Natural Science Progress*, 2004, 14 (1): 111-115 (in Chinese)
- [11] Taub D R, Miller B, Allen H. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the protein concentration of food crops: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 565-575
- [12] Högy P, Wieser H, Koehler P, *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO<sub>2</sub> enrichment experiment [J]. *Plant Biology*, 2009, 11: 60-69
- [13] Uprety D C, Sen S, Dwivedi N. Rising atmospheric carbon dioxide on grain quality in crop plants [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2010, 16 (3): 215-227
- [14] Fares C, Menga V, Badeck F, *et al.* Increasing atmospheric CO<sub>2</sub> modifies durum wheat grain quality and pasta cooking quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 69: 245-251
- [15] 周晓冬, 赖上坤, 周娟, 等. 开放式空气中 CO<sub>2</sub> 浓度增高 (FACE) 对常规粳稻蛋白质和氨基酸含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (7): 1264-1270. Zhou X D, Lai S K, Zhou J, *et al.* The impact of free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on protein and amino acids concentration of conventional japonica rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (7): 1264-1270 (in Chinese)
- [16] 曹卫星, 郭文善, 王龙俊, 等. 小麦品质生理生态及调优技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 289-300. Cao W X, Guo W S, Wang L J, *et al.* Wheat quality ecology and tuning technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 289-300 (in Chinese)
- [17] Tester R F, Morrison W R, Ellis R H, *et al.* Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide levels on some physicochemical properties of wheat starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 22: 63-71
- [18] 苗建利, 王晨阳, 郭天财, 等. 高温与干旱互作对两种筋力小麦品种籽粒淀粉及其组分含量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2008, 28 (2): 254-259. Miao J L, Wang C Y, Guo T C, *et al.* Effects of post-anthesis interactions of high temperature and drought stresses on content and drought stresses on content and composition of grain starch in two wheat cultivars with different gluten strength [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28 (2): 254-259 (in Chinese)
- [19] Xiao G J, Zhang Q, Zhang F J, *et al.* Warming influences the yield and water use efficiency of winter wheat in the semiarid regions of Northwest China [J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 129-135
- [20] 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 (in Chinese)
- [21] Spiertz J H J, Hamer R J, Xu H, *et al.* Heat stress in wheat (*Triticum aestivum* L.): effects on grain growth and quality traits [J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 89-95
- [22] Moldestad A, Hoel B, Böcker U, *et al.* Temperature variations during grain filling obtained in growth tunnel experiments and its influence on protein content, polymer build-up and gluten viscoelastic properties in wheat [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60 (2): 406-413
- [23] 傅晓艺, 何明琦, 史占良, 等. 灌浆期高温胁迫对小麦灌浆特性和品质的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2015, 35 (6): 867-872. Fu X Y, He M Q, Shi Z L, *et al.* Effect of high temperature stress during grain filling period on wheat grain filling characteristics and quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 35 (6): 867-872 (in Chinese)
- [24] Li X N, Jiang D, Liu F L. Dynamics of amino acid carbon and nitrogen and relationship with grain protein in wheat under elevated CO<sub>2</sub> and soil warming [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 132: 121-129
- [25] Zhang X X, Shi Z Q, Jiang D, *et al.* Independent and combined effects of elevated CO<sub>2</sub> and post-anthesis heat stress on protein quantity and quality in spring wheat grains [J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 524-530
- [26] Tan K Y, Fang S B, Zhou G S, *et al.* Responses of irrigated winter wheat yield in North China to increased temperature and elevated CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29 (4): 691-702
- [27] Tan K Y, Zhou G S, Lv X M, *et al.* Combined effects of elevated temperature and CO<sub>2</sub> enhance threat from low temperature hazard to winter wheat growth in North China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4336. DOI: 10.1038/s41598-018-22559-4
- [28] 韩粉丽, 韩飞, 李爱科, 等. AccQ-Tag 柱前衍生反相高效液相色谱法测定谷物及食糜中氨基酸含量 [J]. *食品科学*, 2018, 39 (4): 165-170. Han F L, Han F, Li A K, *et al.* Determination of amino acid contents in cereals and ileal digesta by reversed-phase high performance liquid chromatography with AccQ-Tag pre-column derivatization method [J]. *Food Sciences*, 2018, 39 (4): 165-170 (in Chinese)
- [29] Fernando N, Panozzo J, Tausz M, *et al.* Elevated CO<sub>2</sub> alters grain quality of two bread wheat cultivars grown under different environmental conditions [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 185: 24-33
- [30] Marion C, Christophe D, Muriel V M, *et al.* Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a

- mixed-model approach [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29 (4): 565-574
- [31] 杨桂霞, 赵广才, 许轲, 等. 播期和密度对冬小麦籽粒产量和营养品质及生理指标的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2010, 30 (4): 687-692.
- Yang G X, Zhao G C, Xu K, *et al.* Effect of sowing date and density on grain yield and nutrition quality and physiological index of winter wheat [J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 30 (4): 687-692 (in Chinese)

## Climate change will probably not cause the decline of winter wheat nutritional quality in northern China

TAN Kai-Yan, ZHOU Guang-Sheng, REN San-Xue, GENG Jin-Jian

*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

**Abstract:** In order to explore impacts of future climate change on main nutritional ingredient in grains of winter wheat, a six-year manipulation experiment of interactive temperature and CO<sub>2</sub> concentration was conducted using the open top chambers and infrared radiators during entire growth period of winter wheat, two scenarios of temperature increase and CO<sub>2</sub> concentration elevation predicted for the middle and late periods of the 21st century were simulated. The results showed that the protein content in grains of winter wheat slightly increased under combined impact of increased temperature and CO<sub>2</sub> concentration during entire growing season. It is likely that the comprehensive impacts of temperature increase have compensated the negative effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on protein content of wheat. Meanwhile, the starch and fat contents in grains of winter wheat were most likely unaffected by the combined effect. It is expected that climate change will probably not cause the decline of main nutritional quality of winter wheat in northern China.

**Keywords:** Climate warming; CO<sub>2</sub> concentration; Winter wheat; Protein content; Starch content; Combined impact