

大气 CO₂ 浓度和氮肥水平对小麦籽粒产量和品质的影响*

崔昊 石祖梁 蔡剑 姜东 曹卫星 戴廷波**

(南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室/江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095)

摘要 应用 FACE 平台,研究了不同氮肥水平下大气 CO₂ 浓度升高对小麦籽粒产量和品质的影响. 结果表明: 大气 CO₂ 浓度升高(FACE)和增施氮肥显著提高了小麦籽粒产量、穗数、穗粒数和生物量. 但 FACE 处理对收获指数无显著影响. FACE 处理显著降低了籽粒蛋白质、醇溶蛋白、谷蛋白、面筋含量和沉降值,显著提高了小麦籽粒淀粉及其组分含量,而氮肥处理具有相反的效应. 面团稳定时间及峰值黏度、最终黏度、反弹值等黏度特征参数在 FACE 和高氮水平下显著增加. 此外,CO₂ 浓度与氮肥水平互作对小麦籽粒产量和生物量有显著的正效应,但对籽粒品质无显著影响. 在未来大气 CO₂ 浓度升高的情况下,维持较高的施氮量有利于提高小麦籽粒产量,改善淀粉糊化特性,缓解小麦品质特性的下降.

关键词 小麦 产量 品质 FACE 氮肥

文章编号 1001-9332(2011)04-0979-06 中图分类号 S512.1 文献标识码 A

Effects of atmospheric CO₂ concentration enhancement and nitrogen application rate on wheat grain yield and quality. CUI Hao, SHI Zu-liang, CAI Jian, JIANG Dong, CAO Wei-xing, DAI Ting-bo (*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China/Jiangsu Province Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(4): 979-984.

Abstract: FACE platform was applied to study the effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on wheat grain yield and quality under two nitrogen (N) application rates. Elevated atmospheric CO₂ concentration and applying N increased the grain yield, spike number, grain number per spike, and biomass significantly, but elevated CO₂ concentration had no significant effects on harvest index (HI). Under elevated CO₂ concentration, there was a significant decrease in the protein, gliadin, glutenin, and gluten contents of the grain and the sedimentation value of the flour, and a significant increase in the starch and its components contents of the grain; under N application, an inverse was observed. The dough stability time and the dough viscosity characteristics, such as peak viscosity, final viscosity, and setback value, increased significantly under elevated CO₂ concentration and high N application rate. The interaction of atmospheric CO₂ concentration and N application rate had significantly positive effects on wheat grain yield and biomass, but less effect on grain quality. Therefore, with elevated atmospheric CO₂ concentration in the future, maintaining a higher N application level would benefit wheat grain yield and paste characteristics, and mitigate the decline of grain quality.

Key words: wheat; yield; quality; FACE; nitrogen fertilizer.

大气 CO₂ 浓度是影响作物生长的一个关键因素,IPCC(2007)指出未来全球 CO₂ 浓度将持续升高,并预测这将可能导致全球气候变暖^[1]. 小麦是

世界上最重要的粮食作物之一,据统计,近 30 年小麦产量年均提高 0.9%,而近 20 年世界对小麦的需求量年均增长 1.6%,小麦丰歉对我国粮食安全至关重要. 小麦也是食品加工业重要的原料之一,小麦品质的优劣对其加工用途起着决定性作用. 因此,明确 CO₂ 浓度升高对小麦产量和品质的调控效应对我国

* 农业部公益性行业科研专项(200803037)和江苏省科技支撑计划项目(BE2009426)资助.

** 通讯作者. E-mail: tingbod@njau.edu.cn
2010-09-10 收稿,2011-01-18 接受.

小麦生产具有重要意义. 但近一个世纪以来, 有关大气 CO_2 浓度倍增对作物影响的研究仅局限在可控气室法、开顶式气室法和相关类似方法, 这些方法有很大的局限性; 而利用开放式空气 CO_2 浓度增高 (free-air carbon dioxide enrichment, FACE) 技术进行研究, 作物对高 CO_2 浓度的响应受其他气象因素的干扰最小, 是研究高 CO_2 浓度对植物影响的最佳手段^[2].

小麦籽粒产量和品质形成与植株体内 C/N 代谢平衡密切相关, 而且受外界生态环境和栽培措施的调控. CO_2 浓度和氮肥是影响作物产量和品质形成的重要生态因子. 研究表明, CO_2 浓度升高使小麦籽粒产量和淀粉含量升高^[3], 蛋白质含量下降^[4]. 增施氮肥可以显著提高小麦籽粒产量和蛋白质含量, 降低淀粉含量^[5-7]. 可以推测, 外界 CO_2 浓度升高或施肥通过改变植株体内 C/N 代谢平衡进而调控籽粒蛋白质和淀粉合成. 然而, 有关 CO_2 浓度升高和氮肥互作对籽粒产量和品质特性的调控效应尚无系统研究. 同时, 籽粒蛋白质和淀粉组分含量与面粉糊化特性和粉质特性等加工品质密切相关, 在未来大气 CO_2 浓度升高条件下, 氮肥对籽粒加工品质的影响程度及调控措施还需进一步明确. 为此, 本研究利用 FACE 平台, 通过设置不同的 CO_2 浓度和氮肥水平处理, 研究大气 CO_2 浓度升高和增施氮肥及其互作对小麦籽粒产量和品质的调控效应, 以期评价未来大气 CO_2 浓度升高对小麦生产的影响及采取合理的调控措施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验于 2007—2008 年在江苏省江都市马陵良种场中国 FACE 系统平台 (32° 35' 5" N, 119°42'0" E) 进行. 平台运行系统详见文献^[3]. 该基地年均降水量 980 mm 左右, 年均蒸发量 >1100 mm, 年平均温度 14.9 °C, 年日照时间 >2100 h, 年无霜期 220 d. 土壤类型为下位砂姜土 (中国土壤分类), 耕作方式为水稻-冬小麦轮作. 试验供试土壤理化性质为: 有机碳 18.4 g · kg⁻¹, 全氮 1.45 g · kg⁻¹, 全磷 0.63 g · kg⁻¹, 全钾 14.0 g · kg⁻¹, 速效磷 10.1 mg · kg⁻¹, 速效钾 70.5 mg · kg⁻¹, 砂粒 (2 ~ 0.02 mm) 578.4 g · kg⁻¹, 粉粒 (0.02 ~ 0.002 mm) 285.1 g · kg⁻¹, 粘粒 (<0.002 mm) 136.5 g · kg⁻¹, 容重 1.16 g · cm⁻³, pH 值 7.2.

1.2 试验设计

供试小麦为中筋品种扬麦 14 号. 试验采用裂区设计, 大气 CO_2 浓度为主区, 施 N 量为裂区. CO_2 浓度设对照 (370 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$, CK) 和 FACE (570 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$, F) 2 个水平, 施 N 量设 150 kg · hm⁻² (LN) 和 250 kg · hm⁻² (NN) 2 个水平. 小麦生长季 P₂O₅ 和 K₂O 施用量均为 75 kg · hm⁻². 氮肥基追比为 4 : 6, 追肥分别在分蘖期、拔节期和孕穗期施用, 各占施氮总量的 20%; 磷肥基追比为 6 : 4, 追肥于拔节期施用. 11 月 15 日播种, 密度为 3 × 10⁶ 株 · hm⁻², 行距 20 cm, 3 次重复. 其他管理同当地大田生产.

1.3 测定项目与方法

开花期选择同一天开花的麦穗挂牌标记, 成熟区每小区取单茎 20 个, 分为旗叶 (倒 1 叶)、倒 2 叶、倒 3 叶、其余叶、穗子、茎秆 6 个部分, 于 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒量, 用于生物量、蛋白质及其组分含量和淀粉及其组分含量的测定. 成熟期测产, 测定穗数、穗粒数、千粒重、收获指数等指标, 并收获 2 m² 小麦籽粒, 放置 1 个月后测定籽粒主要品质指标.

全氮含量的测定采用半微量凯氏定氮法^[8]; 蛋白质组分采用连续提取法-半微量凯氏法测定^[9]. 直链淀粉和支链淀粉采用比色法测定^[10], 两者之和即为淀粉含量. 干、湿面筋含量用瑞典 Perten 公司生产的 2200 型面筋仪, 根据 GB 5506—85 标准测定. 沉降值用 GB/T 15685—1995 标准方法测定. 降落值采用瑞典 Perten 公司生产的降落值仪测定. 粉质参数和拉伸参数采用 Brabender 公司生产的粉质仪和拉伸仪测定.

1.4 数据处理

采用 SPSS 统计分析软件对数据进行统计分析, 并用 LSD 法对数据进行多重比较.

2 结果与分析

2.1 大气 CO_2 浓度和氮肥水平对小麦籽粒产量及其构成因素的影响

提高 CO_2 浓度和氮肥水平均显著提高了小麦产量和生物量 (表 1). CO_2 浓度对收获指数无显著影响, 表明 FACE 条件下, 生物量的提高是产量增加的重要基础. CO_2 浓度与氮肥水平互作对产量和生物量均有显著影响, 且以 FACE 条件下高氮处理最高, 对照条件下低氮处理最低. 与对照相比, FACE 处理平均产量和生物量分别提高了 17.9% 和

17.7%。其中高氮条件下 FACE 处理较对照产量和生物量分别提高了 20.1% 和 19.6%，而在低氮条件下分别提高了 14.9% 和 15.3%。表明增施氮肥提高了小麦籽粒产量和生物量对 CO₂ 浓度的响应程度。

对产量构成因素的分析表明,提高 CO₂ 浓度和氮肥水平均显著提高了穗数和穗粒数,增施氮肥显著提高了千粒重,而提高 CO₂ 浓度对千粒重无显著影响,提高 CO₂ 浓度和氮肥水平也显著提高了单穗产量。表明高浓度 CO₂ 通过穗数和穗粒数的共同增加显著提高了产量。此外,CO₂ 浓度和氮肥水平互作对穗数有显著调控效应,在高 CO₂ 浓度和高氮处理下最高。与对照相比,FACE 处理平均穗数和穗粒数分别提高了 4.4% 和 11.6%。其中,高氮条件下 FACE 处理较对照穗数和穗粒数分别提高了 5.8% 和 11.9%,低氮条件下分别提高了 2.9% 和 11.3%。表明 CO₂ 浓度对穗粒数的影响大于对穗数的影响,穗粒数的提高对增产的贡献较大。

2.2 大气 CO₂ 浓度和氮肥水平对小麦籽粒蛋白质及其组分的影响

CO₂ 浓度和氮肥水平对蛋白质含量有显著影响,但两者效应相反。提高 CO₂ 浓度显著降低了蛋

白质含量,增施氮肥显著提高了蛋白质含量,从而导致 CO₂ 浓度与氮肥水平互作效应不显著(表 2)。与对照相比,FACE 处理平均蛋白质含量下降了 6.6%。其中高氮处理下降了 9.0%,低氮处理下降了 3.9%。与低氮处理相比,高氮处理的平均蛋白质含量升高了 13.3%,其中 FACE 条件下升高了 10.2%,对照升高了 16.4%。CO₂ 浓度对单穗蛋白质产量无显著影响,而单穗产量的增加导致籽粒蛋白质含量的“稀释效应”。

CO₂ 浓度对不同蛋白质组分影响不一致,CO₂ 浓度升高显著提高了清蛋白含量,显著降低了醇溶蛋白和谷蛋白含量,对球蛋白含量影响不显著。增施氮肥显著提高了蛋白各组分含量。贮藏蛋白(醇溶蛋白+谷蛋白)占总蛋白的比例在 FACE 条件下显著降低,高氮条件下显著升高。表明高 CO₂ 浓度条件下,蛋白质含量下降主要是由贮藏蛋白含量下降引起的。

2.3 大气 CO₂ 浓度和氮肥水平对小麦籽粒淀粉及其组分的影响

CO₂ 浓度和氮肥水平对籽粒总淀粉、直链淀粉和支链淀粉含量均有显著影响,高 CO₂ 浓度显著提

表 1 CO₂ 浓度和氮肥水平对小麦籽粒产量及构成因素的影响

Table 1 Effects of CO₂ concentration and nitrogen rate on wheat grain yield and yield components

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	施氮量 Nitrogen rate	穗数 Spikes ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	单穗产量 Yield per spike (g)	收获指数 Harvest index
FACE	NN	568.8a	33.8a	45.4a	8730.2a	18851.6a	1.54a	0.463a
	LN	530.0b	27.6c	44.6ab	6529.6c	14304.2b	1.23c	0.457b
CK	NN	537.5b	30.2b	44.8ab	7267.3b	15762.6c	1.35b	0.461ab
	LN	515.0c	24.8d	44.5b	5681.2d	12404.5d	1.10d	0.458ab
F 值	CO ₂	148.55**	59.63**	4.78	316.11**	185.17**	175.00**	0.02
F value	N	260.49**	190.82**	11.79*	848.52**	465.00**	545.95**	7.32*
	CO ₂ ×N	18.36**	1.00	1.83	22.34**	10.52*	5.30	0.95

LN:低氮 Low nitrogen; NN:高氮 High nitrogen. 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

表 2 CO₂ 浓度和氮肥水平对小麦籽粒蛋白质及其组分含量的影响

Table 2 Effects of CO₂ concentration and nitrogen rate on wheat grain protein and protein components

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	施氮量 Nitrogen rate	清蛋白 Albumin content (%)	球蛋白 Globulin content (%)	醇溶蛋白 Gliadin content (%)	谷蛋白 Glutenin content (%)	谷/醇 Glutenin/ gliadin	谷+醇/蛋白质 Glutenin+ gliadin/ protein	蛋白质 Protein content (%)	单穗蛋 白质产量 Protein yield per spike (g)
FACE	NN	2.0a	1.4a	3.3c	3.3b	1.01a	0.58a	11.5b	0.18a
	LN	1.9ab	1.3b	3.0d	2.4d	0.80c	0.51b	10.4c	0.13b
CK	NN	1.8b	1.3ab	3.9a	3.7a	0.93b	0.61a	12.6a	0.17a
	LN	1.7b	1.3b	3.6b	2.9c	0.79c	0.60a	10.8bc	0.12b
F 值	CO ₂	12.45*	1.85	238.52**	53.57**	4.08	18.41**	7.17*	4.88
F value	N	7.21*	6.47*	55.65**	231.48**	74.83**	7.09*	23.67**	384.83**
	CO ₂ ×N	0.83	2.55	0.20	1.46	2.36	5.33	1.50	0.02

表3 CO₂浓度和氮肥水平对小麦籽粒淀粉含量及其组分的影响

Table 3 Effects of CO₂ concentration and nitrogen rate on wheat grain starch and starch components

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	施氮量 Nitrogen rate	总淀粉含量 Starch content (%)	直链淀粉 Amylose content (%)	支链淀粉 Amylopectin content (%)
FACE	NN	68.6b	16.7b	51.9b
	LN	71.7a	17.8a	53.9a
CK	NN	66.1c	16.1c	50.0c
	LN	68.6b	17.2b	51.6ac
<i>F</i> 值	CO ₂	18.87**	16.50**	19.73**
<i>F</i> value	N	22.08**	53.99**	14.86**
	CO ₂ ×N	0.12	0.01	0.19

高了总淀粉、直链淀粉和支链淀粉含量,但增施氮肥的效应相反,从而导致CO₂浓度与氮肥水平互作效应不显著(表3)。与对照相比,FACE处理平均淀粉含量提高了4.2%,其中高氮条件下提高了3.8%,低氮条件下提高了4.6%。

2.4 大气CO₂浓度和氮肥水平对小麦面粉品质特性的影响

CO₂浓度对沉降值、湿面筋含量和吸水率具有显著负效应,而对降落值和稳定时间具有显著正效应(表4)。除降落值外,施氮水平对面粉品质指标均有显著正效应,而CO₂浓度与氮肥水平互作仅对吸

表4 CO₂浓度和氮肥水平对小麦面粉品质特性的影响

Table 4 Effects of CO₂ concentration and nitrogen rate on wheat flour quality traits

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	施氮量 Nitrogen rate	吸水率 Absorption rate (%)	湿面筋 Wet gluten (%)	沉降值 Sedimentation value (ml)	降落值 Falling value (s)	稳定时间 Stability time (min)
FACE	NN	56.9b	30.1b	57.22b	364.7a	5.1a
	LN	54.3d	24.3c	44.35d	368.3a	4.8ab
CK	NN	57.9a	34.1a	61.70a	357.5a	4.7b
	LN	55.5c	28.0b	51.65c	339.2b	4.1c
<i>F</i> 值	CO ₂	81.00**	55.57**	21.76**	12.59*	72.60**
<i>F</i> value	N	469.44**	132.71**	82.29**	2.05	38.40**
	CO ₂ ×N	93.44**	0.03	1.24	4.62	5.40

表5 CO₂浓度和氮肥水平对小麦糊化特性的影响

Table 5 Effects of CO₂ concentration and nitrogen rate on wheat paste traits

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	施氮量 Nitrogen rate	峰值黏度 Peak (cp)	低谷黏度 Trough (cp)	稀懈值 Break down (cp)	最终黏度 Final visc (cp)	反弹值 Setback (cp)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
FACE	NN	3422a	2177a	1236a	3811a	1650a	83.92c
	LN	3179b	2092b	1147bc	3700b	1641a	85.62ab
CK	NN	3138b	2019c	1217ab	3559c	1557b	84.77bc
	LN	2983c	1965c	1089c	3511c	1548b	86.02a
<i>F</i> 值	CO ₂	29.65**	52.74**	4.64	64.28**	96.05**	6.28*
<i>F</i> value	N	20.39**	12.55*	37.17**	8.26*	0.85	34.97**
	CO ₂ ×N	0.99	0.62	1.16	1.31	0.00	0.81

水率有显著影响,其中以对照条件下高氮处理最高。与对照相比,FACE处理平均湿面筋含量和沉降值分别降低了12.4%和10.4%,其中在高氮条件下湿面筋含量和沉降值分别下降了11.6%和7.3%;在低氮条件下分别下降了13.4%和14.1%。与对照相比,FACE处理平均降落值和稳定时间分别升高了5.2%和12.5%,其中高氮条件下降落值和稳定时间分别升高了2.0%和8.5%,低氮条件下分别升高了8.6%和17.1%。表明CO₂浓度升高条件下维持较高的施氮水平有利于缓解湿面筋含量和沉降值的降低,增加面粉的吸水率和面团稳定时间。

2.5 大气CO₂浓度和氮肥水平对小麦糊化特性的影响

由表5可以看出,CO₂浓度升高显著提高了小麦峰值黏度、低谷黏度、最终黏度和反弹值,显著降低了糊化温度,对稀懈值没有显著影响。增施氮肥显著提高了峰值黏度、低谷黏度、稀懈值和最终黏度,显著降低了糊化温度,对反弹值没有显著影响。CO₂浓度与氮肥水平互作效应不显著。表明CO₂浓度和氮肥水平均显著影响了淀粉的糊化特性。与对照相比,FACE处理峰值黏度、低谷黏度和最终黏度分别提高了7.8%、7.2%和6.3%,糊化温度降低了0.8%。进一步分析表明,在高氮条件下,FACE处理

较对照的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度分别提高了 9.1%、7.8% 和 7.1%, 糊化温度降低了 1.0%; 而在低氮条件下, 峰值黏度、低谷黏度和最终黏度分别提高了 6.6%、6.5% 和 5.4%, 糊化温度降低了 0.5%。表明 FACE 条件下增施氮肥有利于提高小麦淀粉的黏度。

3 讨 论

CO₂ 浓度和氮肥水平的升高显著提高了小麦籽粒产量, 且高氮水平下增产较多, 产量及其构成因素的变化趋势与前人^[3-4, 11-12]研究结果一致。但产量构成因素对增产的贡献与前人研究结果不尽相同。杨连新等^[3]认为, 穗数的提高是 FACE 条件下增产的关键; Amthor^[11]综合前人的研究认为, CO₂ 浓度升高, 单位面积穗数、每穗粒数均提高, 但不同试验中, 两产量因素对产量提高的贡献并不一致。本研究结果表明, 穗粒数和单位面积穗数的增加对增产都有贡献, 但穗粒数的贡献较大, 这可能是由于本研究的种植密度较高, 穗数的增加空间较小所致。CO₂ 浓度升高对千粒重影响不大, 这与前人的研究结果^[3-4, 11-12]一致。根据小麦穗粒数形成过程推测, 穗粒数随 CO₂ 浓度升高而上升的主要原因可能有两点: 1) CO₂ 浓度上升导致小麦旗叶净光合作用和叶面积增加, 小麦干物质积累量增加^[13], 减少了小花退化过程中的竞争, 从而减少小花退化; 2) Zhu 等^[14]研究表明, FACE 条件下, 穗光合大幅度提高, 可能直接减少了小花退化过程中的竞争, 减少了小花退化, 具体原因还有待进一步证明。杨连新等^[3]认为, 小麦穗数显著增加主要是由于 CO₂ 浓度升高使小麦分蘖发生速度加快, 分蘖数和分蘖成穗率显著增加。

淀粉在小麦籽粒中所占比例较大, 与品质关系密切。本研究表明, CO₂ 浓度升高, 淀粉含量升高, 这与 Högy 等^[4]的研究结果一致。Högy 等^[4]认为, FACE 条件下导致小麦籽粒淀粉含量升高的主要原因是净光合速率上升, 更多的碳水化合物从源转移到了库。但也有研究表明, CO₂ 浓度升高, 小麦旗叶早衰, 这可能降低了叶片光合对籽粒中淀粉含量的贡献^[15]。Zhu 等^[14]认为, FACE 条件下, 小麦穗光合大幅度上升, 形成了库限制, 减少了叶片中光合产物向籽粒的输送。据此推测, 小麦籽粒淀粉含量的升高也可能是由于穗光合产物增加引起的。淀粉及其组分含量的变化会影响淀粉的糊化特性, 峰值黏度是衡量淀粉糊化特性的重要指标^[16-19]。本研究中, CO₂

浓度升高和氮肥水平升高条件下, 小麦淀粉的高峰黏度、低谷黏度、最终黏度升高, 糊化温度降低, 说明 CO₂ 浓度和氮肥水平升高均有利于提高小麦淀粉黏度。

CO₂ 浓度升高条件下, 小麦籽粒蛋白质含量下降, 作为贮藏蛋白的谷蛋白、醇溶蛋白含量的下降是蛋白质含量下降的主要原因。Kimball 等^[20]测定了小麦籽粒中的 N 含量, 发现在土壤 N 和水分充足时, CO₂ 浓度升高氮收获量上升, 但由于产量上升幅度大于 N 收获量上升幅度, 籽粒蛋白质含量下降; Porteous 等^[21]研究表明, 在低氮水平下, CO₂ 浓度升高对籽粒中全 N 含量无显著影响; 在高氮水平下, CO₂ 浓度升高显著提高了籽粒中全 N 含量。本研究表明, CO₂ 浓度升高对小麦单穗蛋白质产量有一定影响, 在低氮水平下差异显著, 在高氮水平下无显著差异。CO₂ 浓度升高虽然提高了单穗蛋白质产量, 但由于单穗产量升高幅度更大, 所以蛋白质含量仍然表现为下降趋势。可见, 高 CO₂ 浓度下, 籽粒蛋白质含量降低可能是由于单穗产量增加导致的穗内氮稀释造成的。小麦籽粒中醇溶蛋白和谷蛋白是构成面筋的主体^[22], 沉降值是反映面筋数量和质量的综合指标。本研究表明, 高 CO₂ 浓度下, 湿面筋含量和沉降值下降, 可能是由于醇溶蛋白和谷蛋白含量下降导致的。高 CO₂ 浓度下稳定时间上升, 这可能是由于谷蛋白含量下降幅度小于醇溶蛋白下降幅度, 导致谷/醇上升^[23]。这说明 CO₂ 浓度升高使小麦籽粒品质特性下降, 但维持较高的施氮水平有利于缓解这一变化。

致 谢 中国科学院南京土壤研究所朱建国研究员提供了 FACE 研究平台, 并在试验过程中给予大力支持, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Pachauri RK, Resisinger A, *et al.* Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: IPCC, 2008
- [2] Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, *et al.* Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 2006, **312**: 1918–1921
- [3] Yang L-X (杨连新), Li S-F (李世峰), Wang Y-L (王余龙), *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation of wheat. *Chinese Journal of*

- Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(1): 75–80 (in Chinese)
- [4] Högy P, Fangmeier A. Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, 2008, **48**: 580–591
- [5] Shen J-H (沈建辉), Jiang D (姜东), Dai T-B (戴廷波), *et al.* Effects of fertilizer levels on photosynthetic characteristics of flag leaf and contents of protein and yield in grain in specialty wheat. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2003, **26**(1): 1–5 (in Chinese)
- [6] Dai T-B (戴廷波), Sun C-F (孙传范), Jing Q (荆奇), *et al.* Regulation of nitrogen rates and dressing ratios on grain quality in wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2005, **31**(2): 248–253 (in Chinese)
- [7] Zhang X-M (张兴梅), He S-P (何淑平), Wang W-L (王伟利), *et al.* Effect of different nitrogen level on nitrogen metabolic characteristic, grain yield and quality of strong gluten spring wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2006, **26**(5): 130–133 (in Chinese)
- [8] Li H-S (李合生). Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [9] Shanghai Plant Physiology Association (上海市植物生理学会). Handbook of Plant Physiology Experiment. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 1999: 143 (in Chinese)
- [10] Dai S (戴双), Cheng D-G (程敦公), Li H-S (李豪圣), *et al.* Simultaneous and rapid spectrophotometric determination of amylase, amylopectin, and total starch in wheat grain. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2008, **28**(3): 442–447 (in Chinese)
- [11] Amthor JS. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: Review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Research*, 2001, **73**: 1–34
- [12] Wu DX, Wang GX, Bai YF, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, **104**: 493–507
- [13] Kimball BA, Zhu J-G (朱建国), Cheng L (程磊), *et al.* Responses of agricultural crops to free-air enrichment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(10): 1323–1338 (in Chinese)
- [14] Zhu CW, Zhu JG, Zeng Q, *et al.* Elevated CO₂ accelerates flag leaf senescence in wheat due to eat photosynthesis which causes greater nitrogen grain sink capacity and carbon grain sink limitation. *Functional Plant Biology*, 2009, **36**: 291–299
- [15] Liao Y (廖轶), Chen G-Y (陈根云), Zhang D-Y (张道允), *et al.* Non-stomatal acclimation of leaf photosynthesis to free-air CO₂ enrichment (FACE) in winter wheat. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学学报), 2003, **29**(6): 494–500 (in Chinese)
- [16] Zhang Y (张勇), He Z-H (何中虎). Investigation on paste property of spring-sown Chinese wheat. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2002, **35**(5): 471–475 (in Chinese)
- [17] Sharma R, Sissonst MI, Rathjen AI, *et al.* The null-4A allele at the waxy locus in durum wheat affects pasta cooking quality. *Journal of Cereal Science*, 2002, **35**: 287–297
- [18] Li C-Y (李春燕), Feng C-N (封超年), Wang Y-L (王亚雷), *et al.* Differences and correlations of starch physicochemical properties among different wheat cultivars. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(7): 1129–1134 (in Chinese)
- [19] Liang L (梁灵), Wei Y-M (魏益民), Shi J-L (师俊玲), *et al.* Study on the grain paste property of Guanzhong wheat varieties. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association* (中国粮油学报), 2003, **18**(2): 21–24 (in Chinese)
- [20] Kimball BA, Morris CE, Pinter PJ Jr, *et al.* Elevated CO₂ drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality. *New Phytologist*, 2001, **150**: 295–303
- [21] Porteous F, Hill J, Balls AS, *et al.* Effect of free air carbon dioxide enrichment (FACE) on the chemical composition and nutritive value of wheat grain and straw. *Animal Feed Science and Technology*, 2009, **149**: 322–332
- [22] Wang Y-F (王月福), Yu Z-W (于振文), Li S-X (李尚霞), *et al.* Effects of nitrogen application amount on content of protein components and processing quality of wheat grain. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2002, **35**(9): 1071–1078 (in Chinese)
- [23] Shi Y (石玉), Zhang Y-L (张永丽), Yu Z-W (于振文). Contents of grain protein components and their relationships to processing quality in wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2009, **35**(7): 1306–1312 (in Chinese)

作者简介 崔昊,男,1986年生,硕士研究生.主要从事小麦生理生态研究. E-mail: cuihaonjau@yahoo.com.cn

责任编辑 张凤丽