基于 CTGC 试验系统下面包小麦主要品质性状的研究

白莉萍^{1,2} 全乘风² 林而达^{2*} 卢志光³ 饶敏杰²

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(2 中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081) (3 中国农业大学资环学院, 北京 100094)

摘要 当前, 全球气候变化背景下, CO₂ 浓度升高和气候变暖可能已经并将持续对小麦 (*Triticum aestivum*) 品质产生影响。为此依据自行设计的模拟气候变化的试验装置系统 (CTGC)¹⁾, 研究大田条件下 CO₂ 浓度和温度增加对面包小麦主要品质性状的交互作用。结果表明: 在 433.3 ~ 610.2 μmol·mol⁻¹ 范围内, CO₂ 浓度增加对面包小麦的籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值的影响不利; 增温 (+2 °C 多) 表现为有利。当 CO₂ 浓度从 433.3 μmol·mol⁻¹ 逐渐增加到 551.5 μmol·mol⁻¹ 且温度增幅逐渐为 +2 °C 时, CO₂ 和温度对面包小麦的籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值的交互作用表现为增加; 而当 CO₂ 浓度增幅较大 (达到 610.2 μmol·mol⁻¹), 温度增幅不大 (白天平均温度仅增加 2 °C 多) 时, 交互作用则表现为减少。此外, CO₂ 浓度增加使面包小麦的 α-淀粉酶活性降低, 温度上升则使之提高, 两因素的交互作用则表现为 α-淀粉酶活性提高。

关键词 CO₂ 浓度和温度升高 面包小麦 品质性状 CO₂ 浓度和温度梯度模拟装置 (CTGC) 全球气候变化

QUALITY CHARACTERISTICS OF BREAD WHEAT GROWN UNDER ELEVATED CO₂ AND TEMPERATURE

BAI Li-Ping^{1,2} TONG Cheng-Feng² LIN Er-Da^{2*} LU Zhi-Guang³ and RAO Min-Jie²

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 Institute of Agriculture Meteorology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

(3 Institute of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract Elevated CO₂ concentrations and temperatures under global climate change scenarios projected for coming decades could impact bread wheat (*Triticum aestivum*) quality. Hence, there is a need to understand the effects of these environmental factors on crop quality. The objective of this study was to experimentally test the effects of elevated CO₂, temperature, and their interactions on wheat grain quality characteristics relevant to its processing, including grain protein content, wet gluten content, sedimentation value, and falling number (alpha-amylase activity). Bread wheat ('Liaochun 10') was field grown in CO₂ and temperature gradient chamber (CTGC) and ambient controlled temperature gradient chamber (TGC). The results indicated that elevated CO₂ concentrations (433.3 to 610.2 μmol·mol⁻¹) had negative effects on grain protein content, wet gluten content and sedimentation value of bread wheat, but gradual temperature increases (2 °C range) had positive effects on these three main quality characteristics. The interaction between gradual increases in CO₂ levels from 433.3 to 551.5 μmol·mol⁻¹ and temperature increases (+2 °C range) showed a similar benefit on grain protein content, wet gluten content and sedimentation value of bread wheat, but when CO₂ concentrations approached 610.2 μmol·mol⁻¹ and mean daytime temperature increased more than 2 °C, the interaction of CO₂ and temperature had a negative effect on the three bread wheat quality characteristics. In addition, under CO₂ concentrations of 433.3 – 610.2 μmol·mol⁻¹ and gradually increasing temperatures, CO₂ enrichment reduced alpha-amylase activity of bread wheat whereas elevated temperatures and the interaction of elevated CO₂ and temperature enhanced alpha-amylase activity of bread wheat.

Key words Elevated CO₂, Temperature, Bread wheat, Quality characteristics, CO₂ and temperature gradient

收稿日期: 2004-06-14 接受日期: 2004-11-24

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043404, G1999043407)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: lined@ami.ac.cn

E-mail of the first author: bailiping@ibcas.ac.cn

1) 全乘风 (2001). 半开放棚式农田 CO₂ 及温度梯度实验系统. 中国农业科学院农业气象研究所研究学报.

chamber (CTGC), Global climate change

由于人类活动影响的加剧,以“大气 CO_2 浓度升高”为标志的全球气候变化日趋受到国际社会的严重关注。 CO_2 浓度升高以及气候变暖等必将影响作物的生理过程,继而影响作物品质。近几年,模拟气候变化对作物生长发育和产量影响的试验研究急剧增加,而且模拟试验装置主要有以下几类:封闭式气室 (Imai *et al.*, 1985)、开顶式气室 (Open-top chambers, OTC) (王春乙等, 1997)、半开放式 (Temperature gradient chambers, TGC) (Horie *et al.*, 1995) 及开放式系统 (Free air CO_2 enrichment, FACE) (Hendrey & Kimball, 1994)。封闭及开顶式气室可节省成本,但其最大缺陷是空间小,盆栽作物的根系生长空间有限。而 FACE 内风、湿、温、光与自然农业环境相差甚小,更接近自然生态环境,但其不足之处是尺度大,耗资多, CO_2 浓度分布难以均匀,尤其不能提供一个可同时控制几个环境因素的生长环境。相对而言,TGC 系统有能力在大田条件下组合 CO_2 、温度及其它环境因子对植物的综合影响,且成本小,但其仅有 2 个 CO_2 水平,不足以真实地反映未来趋势。总之,模拟试验普遍存在以下不足:1) 仅考虑两个 CO_2 浓度水平(当前和倍增),难以揭示作物对未来 CO_2 浓度增加过程的实际响应;2) 多为盆栽,限制作物根的生长空间;3) 全球变化下,温度与 CO_2 浓度伴随增加,仅考虑 CO_2 浓度增加对作物的影响已显得不够;4) 对品质关注较少。

目前,我国就气候变化对农作物产量的影响已有一些研究,但对农产品品质影响的研究仍然缺乏方法、试验和模拟,而提高农产品品质的要求又愈发迫切。为此,我们在 TGC 系统的基础上,自行设计 CO_2 浓度和温度递增模拟系统 (CO_2 and temperature gradient chamber, CTGC),并以温度递增系统 (Temperature gradient chamber, TGC) 作为对照,以面包小麦 (*Triticum aestivum*) ‘辽春 10 号’为例,重点研究大田条件下 CO_2 浓度与温度升高对主要品质性状的交互作用,从而为全球气候变化对其它植物(如牧草等)的影响研究提供方法和技术借鉴。

1 材料和方法

1.1 试验材料和方法

试验场所在中国农业科学院农业气象研究所试验站,供试土壤为粘壤土,并选用极具典型的高蛋白含量面包小麦品种‘辽春 10 号’(其主要技术指标

与经济指标都已超过我国和欧美发达国家面包小麦标准)。试验采取大田栽培,在 CTGC 与 TGC 大棚里分别种植(7 个小区,小区面积为 2.5 m^2)。播种量均为 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 且拌药下种。施肥量:纯 N 为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N:P = 2:1),纯 P 为 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机肥(由猪粪、秸秆和锯末组合的堆肥,含有机质 38.63%,全 N $25.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 P $20.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和全 K $21.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $45\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施肥方式:底肥 N 占 60%;追肥 N 占 40%。灌水方式:底水和三叶期水均为 $825 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,三叶期后则酌情灌水。作物水肥供应充足均匀(按小区进行),田间水分与土壤养分和病虫杂草管理一致,以及增加 CO_2 浓度前的生长环境和情况均为一致。

1.2 试验模拟系统的设计

试验装置采用塑膜大棚结构见图 1(仪器全部经鉴定符合标准),共有两个大棚(CTGC 和 TGC)。大棚长为 22 m、宽 4.5 m、高 2.5 m,出入口处用纱网隔离,以便新鲜空气进入。大棚进气端(图的右方,为入口)与排气端(图的左方,为出口)两端分别留有 3 m 左右的空地,一则用于缓冲作用,另则可以安装鼓风机以及 4 台风扇。棚两侧种植保护行,并留有空地用于安装 CO_2 释放管道,即各装有一根直径 100 mm 的 PVC 塑料管,上面钻有间隔 50 cm、直径为 5 mm 的小孔,一端封死,从另一端用鼓风机向内送风,让 CO_2 气流从小孔喷出,在风扇的抽动下,与进入棚内的新鲜空气充分混合,并向排气端移动。 CO_2 红外分析仪监测入口与出口两端 CO_2 浓度,通过数据采集控制器传送给计算机,从而给出所需指令先后开闭 5 个电磁阀。系统可每分钟采集数据用于调整 CO_2 的释放量,以此维持一个从入口到出口较为稳定的 CO_2 浓度梯度。除了 CO_2 释放装置外,TGC 的其它设置均与 CTGC 相同。

温度递增梯度主要通过调节棚内的通风量来实现。新鲜空气进入试验大棚后,在日光照射下逐渐升温,计算机通过数据采集控制器监测棚入口和出口两端的温度传感器,根据温度差和预定设计的温度梯度数值计算通风量大小,并通过数据采集控制器将控制电压传送给可控硅电机功率调节器,通过调节风扇转速来改变通风量。

夜间时,系统停止 CO_2 释放和风扇的转动。此时揭膜以保持棚内的自然通风。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 CO₂ 浓度和温度等环境因素测定

除大棚入口与出口两端各留出约 3 m 的缓冲地带外,其余依次等距布置 4 个样点,邻近两个样点均间隔 5 m,每个样点放置 1 个 CO₂ 浓度采样管和 1 个温度传感器。系统每分钟采集 1 次温度(表 1),而 CO₂ 浓度的测定具体为:CTGC 的出、入口采样点约每分钟测定 1 次(每样本测定 35 s),中间两个采样点每隔 1 h 测定 1 次,TGC 则间隔 2 h 测定 1 次。在小麦

开花期开始释放 CO₂ 气体,一直持续到蜡熟末期,每日早 7:30~8:00 和晚 16:30~17:00 连续在试验大棚里释放 CO₂ 气体。所得环境参数均为多日平均值,且在 CTGC 系统内,CO₂ 浓度的时空分布特征基本上是一个较为均匀且连续稳定的梯度变化,即单位距离内这个变化梯度基本接近一个恒定值,即 CO₂ 浓度平均增加梯度约为 11.8 μmol·mol⁻¹·m⁻¹ (表 1)。

图 1 试验装置 CTGC 原理
Fig.1 Schematic drawing of CO₂ and temperature gradient chamber
1. 通风风扇 Ventilators (25 m³·min⁻¹, 4 台 Four) 2. 可控硅电机功率调节器 The power adjuster of electrical machine (Controlled silicon) 3. 鼓风机 Blower (10 m³·min⁻¹, 2 台 Two) 4. 送风管道 PVC pipes 5~6. 气体采样管 Gas sampling pipes (5 mm×7 mm, 50 m) 7. CO₂ 分析仪 Infrared CO₂ analyzer (ASSA-1610) 8. 高压气瓶 Liquid CO₂ cylinders (5 只 Five) 9. 电磁阀 Electromagnetism valve (6 mm 通径 Pathway/1MP, 5 只 Five) 10. 送气管道 CO₂ injection pipe (8 mm, 50 m) 11. 数据采集控制器 Data collection controller 12. 太阳总辐射传感器 Solar radiation sensor (热电 Thermoelectricity) 13~14. 温度传感器 Temperature sensor (Pt-100, 4 只 Four) 15. 中央计算机 Personal computer 16. 减压阀 Decompression valve (25 MP/1MP, 5 只 Five)

表 1 CO₂ 浓度和温度增加对面包小麦主要品质性状的影响
Table 1 Effects of CO₂ levels and temperature increasing on main quality characteristics of bread wheat

项目 Treatment	CO ₂ 浓度 CO ₂ levels (μmol·mol ⁻¹)	9:00~16:00 平均气温 MT(°C)	最高气温 TT(°C)	籽粒蛋白含量 Grain protein (%)	湿面筋含量 Wet gluten (%)	沉降值 Sedimentation value (ml)	降落值 Falling number (s)
CO ₂ 和温度递增大棚 CTGC	433.3	20.8	23.2	18.51	47.7	65.3	377
	491.2	21.4	24.1	18.67	52.7	66.3	363
	551.5	22.8	26.0	18.98	53.4	69.1	345
	610.2	23.5	26.8	18.69	53.0	66.1	322
均值 Mean values	521.6	22.1	25.0	18.71	51.7	66.7	352
温度递增大棚 TGC	408	21.2	23.8	19.22	53.0	66.5	352
	408	22.1	24.7	19.30	55.0	67.3	324
	408	22.5	25.2	19.78	56.0	70.9	286
	408	23.2	26.3	19.18	54.2	70.1	280
均值 Mean values	408	22.3	25.0	19.37	54.6	68.7	311

分析结果以 14% 湿基表示;数据均为每个样品重复测定的平均值 The results on a 14% moisture basis; the average of sample in duplicate or more analysis; MT: Mean temperature of 9:00–16:00 at day; TT: Top temperature; CTGC: CO₂ and temperature gradient chamber; TGC: Temperature gradient chamber

1.3.2 主要品质性状测定及方法

在样点处取样,测定项目有:磨粉(用瑞典 BUHLER 实验磨, AACC 26-20 法)、籽粒蛋白含量(半微量凯氏法, GB 2905-82)、Zeleny 沉降值(德国 Brabender 公司制造的沉降仪, AACC 56-61A 常量法)、湿面筋含量(瑞典 Falling number 公司的 Glutomatic System 2200 型洗面筋仪测定, GB/T14608-93)以及降落值(瑞典 Falling number 公司的 FN 仪 1800 型, AACC 58-61B)。以上品质测定均在农业部谷物品质监督检验测试中心(中国农业科学院作物研究所)进行。

2 结果与分析

CTGC 与 TGC 相比,‘辽春 10 号’的籽粒蛋白质含量、面粉湿面筋含量及沉降值均值明显减少(表 1),说明 CO₂ 浓度增加对以上品质性状影响不利;而 TGC 里,这 3 项品质性状基本呈现上升趋势,但随温度继续增加,趋势又转而下降,可见增温对 3 项品质有利,但有其一定的适宜范围。

温度和 CO₂ 浓度同步增加对籽粒蛋白质含量、面粉湿面筋含量及沉降值有交互作用。在 CTGC 中,CO₂ 浓度从 433.3 μmol·mol⁻¹ 逐渐增至 551.5 μmol·mol⁻¹,且温度增加幅度逐渐为 +2 ℃ 时,温度和 CO₂ 对 3 项品质性状的交互作用表现为增加;而当 CO₂ 浓度增至 610.2 μmol·mol⁻¹ 而温度仅增加 +2 ℃ 多时,这些品质又呈现下降趋势,交互作用为减少。

降落值(Falling number, FN)可显示 α-淀粉酶活性的大小,即 FN 小,α-淀粉酶活性就强。对面包粉而言, FN < 200 s、FN = 200 ~ 300 s 及 > 300 s, 分别表示酶活性过强、正常及过低。那末,CTGC 与 TGC 相比,‘辽春 10 号’的降落值均值高出 41 s,表明 CO₂ 浓度增加提高 FN,即降低 α-淀粉酶活性(表 1)。而在 TGC 里,降落值随温度升高而逐渐降低,即增温会增加 α-淀粉酶活性,且使‘辽春 10 号’趋向面包粉的适宜范围,从而改善食品质量。CTGC 中,随温度和 CO₂ 浓度协同增加,降落值呈现下降趋势,说明温度与 CO₂ 的交互作用表现为 α-淀粉酶活性提高,其中温度上升对 α-淀粉酶活性的影响可能起更大作用。

3 结论与讨论

有研究表明 CO₂ 浓度增加对小麦品质影响不大(Tester *et al.*, 1995)。但基于 CTGC (对照 TGC)系统的结果表明,在 433.3 ~ 610.2 μmol·mol⁻¹ 范围内,

CO₂ 浓度增加将对面包小麦的主要品质性状影响不利,这与 Blumenthal 等(1996)、Monje 和 Bugbee(1998) 及 Kimball 等(2001)的结论不悖;而增温(白天平均温度增加幅度为 +2 ℃)的影响则为有利,此与 Randall 和 Moss(1990)和 Wrigley 等(1994)的研究结果一致。本研究进一步表明,CO₂ 浓度和温度增加将对面包小麦品质产生交互作用。即温度与 CO₂ 增加对籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值的交互作用表现为先增加后减少,即两因素的影响可能呈正负作用且此消彼长,也就是说 CO₂ 浓度升高将可能部分抵消因温度升高而产生的有利影响;而增温则对高 CO₂ 水平的不利影响具有一定的补偿作用。此外,温度和 CO₂ 浓度增加的交互作用表现为 α-淀粉酶活性提高,说明 CO₂ 浓度和温度增加的交互作用因品质性状不同而表现有别。

尽管 CTGC 试验系统较以往已大为改进,尤其与普遍使用的 OTC 相比具有以下特点:1)下垫面为农田作物,入口一端采用纱网隔离,形成一个相对半开放的环境;2)可提供一个同时控制几个因素的试验环境,特别能够形成 CO₂ 浓度和温度梯度;3)可研究 CO₂ 与温度的协同作用;4)系统实行自动化控制。但是,本研究仍处在探索阶段,加之一些客观条件的限制,使得在有限的模拟试验大棚空间里无法设置重复,采样和实测量较少,获得的分析数据亦不多,以至于在定量模型分析方面仍显得较为薄弱。因此,本试验所得出的一些结论尚待进一步考证。

由于农业受影响的对象均为生物体,对全球气候变化的反应只能用模拟气候变化的实验方法来考证,而且全球气候变化影响研究的历程亦是模拟气候变化试验装置系统方法逐渐完善的过程。故而,今后试验模拟系统方法需要进一步改进的有:1)需要研究一种较为理想的降温设备。目前塑料大棚通用的降温措施有遮阴网、湿帘以及人工喷水等,但遮阴网影响光照,而湿帘易增加空气湿度;2)研究对象需要更多的生长空间,则棚长至少 35 m 以上。如此既可设置重复也能多点采样,并能形成范围较大的 CO₂ 和温度梯度;3)若只靠太阳自然加热,则阴天难以保证。可采用加热器风炉来保证阴天以及夜间的温度梯度;4)若条件许可,用两台 CO₂ 浓度测定仪同时测定入口与出口的 CO₂ 浓度,由此维持一个更为稳定的 CO₂ 浓度梯度;5)为了对照试验有代表性,最好选空旷地方,即对照 CO₂ 浓度与当前值相当。

另外,本试验过程中,因 CO₂ 消耗大,仅在小麦开花至成熟期(影响作物品质的关键期)通 CO₂ 气

体,对作物前期生长参数的影响则被忽略。而且,目前对温度与 CO₂ 交互作用的生理生化机制尚不清楚,加之农作物的生长、发育以及产量、品质的形成由多种环境因素共同影响所至,如 N 素供应不足,CO₂ 浓度增加引起的植物氮含量减少趋势可能会加剧。因此,在条件许可下,今后可进行全生育期的 CO₂ 浓度增加处理,深入研究温度与 CO₂ 互作效应的生理生化机制,开展 CO₂ 浓度增加、温度增加以及水分和营养供应等对作物品质的综合因素影响研究,并且进行多年多品种的试验研究,以完善试验数据的采集,从而为建立适用于我国气候生物模型提供大量可靠的实验数据。

参 考 文 献

Blumenthal C, Rawson HM, Mckenzie E, Gras PW, Barlow EWR, Wrigley CW (1996). Changes in wheat grain quality due to doubling the level of atmospheric CO₂. *Cereal Chemistry*, 73, 762 – 766.

Hendrey GR, Kimball BA (1994). The FACE program. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 3 – 14.

Horie T, Nakagawa H, Nakano J, Hamotani K, Kim HY (1995). Temperature gradient chambers for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. *Plant, Cell and Environment*, 18, 1064 – 1069.

Imai K, Colman DF, Yanagisawa T (1985). Increase of atmospher-

ic partial pressure of carbon dioxide and growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Japanese Journal of Crop Science*, 54, 413 – 418.

Kimball BA, Morris CF, Pinter PJ, Wall GW, Hunsaker DJ, Adamsen FJ, LaMorte RL, Leavitt SW, Thompson TL, Matthias AD, Brooks TJ (2001). Elevated CO₂, drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality. *New Phytologist*, 150, 295 – 303.

Monje O, Bugbee B (1998). Adaptation to high CO₂ concentration in an optimal environment: radiation capture, canopy quantum yield and carbon use efficiency. *Plant, Cell and Environment*, 21, 315 – 324.

Randall PJ, Moss HJ (1990). Some effects of temperature regimes during grain filling on wheat quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, 41, 603 – 617.

Tester RF, Morrison WR, Ellis RH, Pigott JR, Batts GR, Wheeler TR, Morison JIL, Hadley P, Ledward DA (1995). Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide levels on some physicochemical properties of wheat starch. *Journal of Cereal Science*, 22, 63 – 71.

Wang CY(王春乙), Pan YR(潘亚茹), Bai YM(白月明), Wen M(温民) (1997). The experiment study of effects doubled CO₂ concentration on several main crops in China. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 55, 86 – 94. (in Chinese with English abstract)

Wrigley CW, Blumenthal C, Gras PW, Barlow EWR (1994). Temperature variation during grain filling and changes in wheat-grain quality. *Australian Journal of Plant Physiology*, 21, 875 – 885.

责任编辑: 骆世明 责任编辑: 张丽赫