

328-332

小麦, 生育性状, 产量构成因素, 二氧化碳

第16卷第3期
1996年6月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 16, No. 3
Jun., 1996CO₂ 浓度倍增对小麦生育性状和产量构成的影响THE EFFECTS OF CO₂ DOUBLING ON
GROWING AND DEVELOPING CHARACTERS
AND YIELD FOR WHEAT

王修兰 徐师华 李佑祥

Wang Xiulan Xu Shihua Li Youxiang

(中国农业科学院农业气象研究所, 北京, 100081)

(Institute of Agrometeorology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing, China, 100081)

小麦是我国最主要的粮食作物之一。本世纪以来, 大气中 CO₂ 浓度迅速增长, 预计到下个世纪中叶将比工业革命前增长 1 倍, 到下个世纪末达到目前的 2 倍^[1]。有关实验表明, 高浓度 CO₂ 的有利于小麦干物质积累和产量的提高^[2-4]。本文通过 CO₂ 浓度控制实验, 测定了小麦各种生物量的动态变化, 为进一步研究中国华北地区 CO₂ 浓度增加对小麦生育性状及产量的影响提供了科学依据。

1 实验装置和方法

1.1 装置 测量装置由 4 部分组成^[5]: ① 3 个同化箱内置盆栽作物; ② CO₂ 气源及流量计, 可供给设定浓度的 CO₂ 气体; ③ 红外 CO₂ 气体分析仪, 监测 CO₂ 浓度变化, 以便适时补充 CO₂; ④ 温度、湿度、太阳辐射传感器, 测定箱内外环境条件。同化箱为玻璃箱体, 顶部成斜面, 可获取较多的日光, 箱体一侧下部有 3 个小孔: 进气孔、出气孔及备用孔(图 1)。设定浓度的 CO₂ 气体经进气孔送入箱内, 通过距底面约 10 cm 处的蛇形管及其上部的排风扇, 将下沉的 CO₂ 气体不断向上辐散混合均匀。位于作物活动面高度的出气管抽取气样, 经出气孔送至 CO₂ 分析仪检测。备用孔用作测定箱内温、湿、光传感信号通道。

1.2 方法 实验于 1992~1993 年在中国农业科学院农业气象试验站(北京)进行。采用盆栽实验, 盆直径 26 cm、高 30 cm, 土质为砂壤土, 肥水条件为中等水平。CO₂ 处理分别在 3 个同化箱中进行, A 箱浓度 700 μl/l, B 箱 500 μl/l, C 箱 350 μl/l, 另设对照 D 在自然大气条件下(约 350 μl/l), 每个处理 15 盆, 共 60 盆。

供试小麦品种为中麦 3 号, 10 月 4 日播种, 每盆 20 株, 为减少小麦后期在同化箱中遭受高温危害, 促使生育期提前, 2 月 9 日进入同化箱, 3 月 17 日拔节, 并开始 CO₂ 浓度处理直至乳熟终止, 每天 7:00

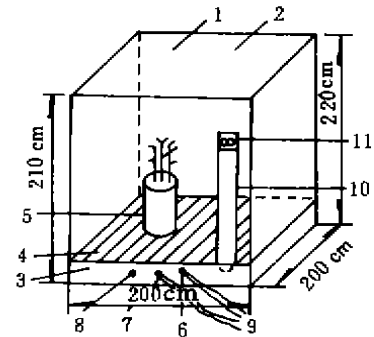


图 1 同化箱结构示意图

Fig. 1 Constitution diagram of assimilation chamber

1. 玻璃材料 2. 铝合金框架 3. 底框架
4. 波纹板 5. 盆栽作物 6. 进气孔
7. 出气孔 8. 备用孔 9. 塑料软管
10. 蛇形软管 11. 排风扇

• 收稿日期: 1994 05 13, 修改稿收到日期: 1996 01 10.

~18:00 按各设定浓度供给 CO₂。

1.3 测量

1.3.1 物候观测 记录不同 CO₂ 浓度下小麦各生育阶段出现的日期。

1.3.2 生物量测量 测定各生育阶段小麦分蘖数、株高、叶面积、根重、茎叶重、穗重等。

1.3.3 产量因子测量 测定各处理的穗数, 子粒数, 干粒重、生物产量和经济产量。

1.3.4 环境因子测量 每个生育阶段连续 2~5 d, 每天 7:00~18:00(每小时 1 次), 测量各处理的空气温度、湿度及光子通量密度。

2 结果与分析

CO₂ 浓度增加, 对小麦生育有明显促进作用, 这种作用在根、茎、叶、穗各器官表现不一, 每个生育阶段对 CO₂ 浓度的反应也有所不同。

2.1 CO₂ 浓度与物候期

CO₂ 浓度增高, 促使生育期相应提前(表 1)。抽穗、开花期 700 μl/l 比 350 μl/l 提前约 3 d, 乳熟期提前 4 d; 500 μl/l 的上述生育期提前 1~2 d, 这与关岛正清研究结果相近^[6]。

表 1 不同 CO₂ 浓度下小麦的物候期

Table 1 Phenological calendar of wheat in different concentration of CO₂

处理 Treatment (μl/l)	生育阶段 Growth evolution phase			
	拔节 Elongation stage (D/M)	抽穗 Heading time (D/M)	开花 Flowering time (D/M)	乳熟 Milk stage (D/M)
A (700)	17/3	11/4	20/4	9/5
B (500)	17/3	13/4	21/4	11/5
C (350)	17/3	14/4	23/4	13/5
D (CK)	17/3	19/4	26/4	15/5

2.2 CO₂ 浓度与茎叶生长

高 CO₂ 浓度有利新叶早发、分蘖增多、叶面积增大。从拔节期至乳熟期, 不同 CO₂ 浓度相对 350 μl/l 茎叶增长率的动态变化见表 2。表 2 中开始浓度处理(拔节)时 C 箱麦苗长势略好于 A、B 箱, 故拔节期株高、分蘖及叶片数增长率有负值出现。CO₂ 浓度愈高, 茎叶增长愈明显。从拔节至乳熟, 株高(H)、分蘖数(M)、叶片数(N)、最大单叶面积(S)的增长率, 随 CO₂ 处理时间延续而增大, 乳熟阶段达到最大, 700 μl/l 时上述因子的平均增长率分别为: 8.0%、31.3%、19.5%和 6.6%; 500 μl/l 时分别为 5.0%、12.7%、5.5%和 5.0%。从拔节至抽穗增长较快, 开花后明显减慢。

2.3 CO₂ 浓度与干物质积累

CO₂ 浓度增加, 使作物光合作用增强, 干物质积累增加。根、茎、叶、穗各器官对 CO₂ 浓度的反应列于表 3 中。从拔节至收获, 不同 CO₂ 浓度处理的根重(RW)、干物重(DW)、穗重(CW)与冠根比(CR)相对于 350 μl/l 的增长率, 随 CO₂ 浓度升高而加大。CO₂ 浓度为 700 μl/l、500 μl/l 时, RW 分别增长 5.3%~25.8%和 5.3%~12.9%, 开花期增长最大; DW 分别增长 4.8%~32.8%和 3.6%~17.8%, CR 增长 0.6%~10.4%和 -2.0~7.0%, 收获期最高。表明 CO₂ 浓度增加对小麦地上部分干物质积累的贡献大于地下部分。且在生育后期越来越明显。

2.4 CO₂ 浓度与产量形成

CO₂ 浓度高加速小麦生育、干物质积累, 有利于产量形成。浓度对穗的影响显得尤为重要, CO₂ 浓度高下, 穗发育完成早, 低浓度成穗迟, 故在成穗初期, 不同 CO₂ 处理穗重增长率差异较大(表 3), 后期浓度的影响渐弱。从抽穗到收获, 700 μl/l 穗重增长率由 225.0%降至 35.8%, 500 μl/l 由 33.5%降至 14.6%。

表 2 不同 CO₂ 浓度(相对于 350 μl/l)小麦茎叶增长率(%)的动态变化Table 2 The increasing rate (compared 350 μl/l) in different CO₂ concentration

处理 (μl/l) Treatment	生育阶段 Growth evolution phase					
	拔节 Elongation stage (%)	孕穗 Boot stage (%)	抽穗 Heading time (%)	开花 Flowering time (%)	乳熟 Milk stage (%)	
株高 (H)	A (700)	-0.7	6.2	10.2	12.0	12.0
	B (500)	-1.0	4.2	6.2	7.7	7.7
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	-0.1	-6.8	-2.7	4.1	5.5
分蘖数 (M)	A (700)	2.5	20.0	40.0	44.2	50.0
	B (500)	-3.8	6.7	13.3	22.2	25.0
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	1.3	6.7	20.0	33.3	40.0
叶片数 (N)	A (700)	0.0	9.1	22.5	31.5	34.2
	B (500)	-1.2	1.1	3.4	11.1	13.2
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	-1.2	-1.1	13.5	22.2	21.1
叶面积 (S)	A (700)	3.1	7.3	7.5	7.5	7.5
	B (500)	2.5	4.1	5.5	6.5	6.5
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	-1.9	-3.5	-6.0	-3.5	-3.5

表 3 不同 CO₂ 浓度(相对于 350 μl/l)小麦干物质增长率(%)的动态变化Table 3 The increasing rate (compared 350 μl/l) in different CO₂ concentration for wheat dry weight

处理 (μl/l) Treatment	生育阶段 Growth evolution phase						
	拔节期 Elongation stage (%)	孕穗期 Boot stage (%)	抽穗期 Heading time	开花期 Flowering time (%)	乳熟期 Milk stage (%)	收获期 Harvest stage (%)	
根重 (RW)	A (700)	5.3	20.7	25.0	25.8	23.1	21.0
	B (500)	5.3	10.3	12.5	12.9	11.5	10.5
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	0.0	0.0	3.1	3.2	3.8	5.3
干物重 (DM)	A (700)	4.8	24.8	30.3	31.5	32.7	32.8
	B (500)	3.6	11.1	15.7	16.6	17.6	17.8
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	-1.2	-1.2	-1.5	2.5	3.2	3.4
冠根比 (CR)	A (700)	0.6	1.3	5.0	5.5	8.8	10.4
	B (500)	-2.0	0.9	3.3	3.4	6.2	7.0
	C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)	-1.5	-1.6	-1.9	-0.6	-0.5	-1.8
穗重 (CW)	A (700)			225.0	48.7	45.3	35.8
	B (500)			33.5	28.2	17.0	14.6
	C (350)			0.0	0.0	0.0	0.0
	D (CK)			—	-5.1	5.7	8.9

此外, CO₂ 浓度对产量因素构成也有明显影响。表 4 为 700 μl/l 相对于 350 μl/l 各产量因子增长率。由表 4 可见, 单株穗数、子粒数及产量皆随 CO₂ 浓度上升而增加。浓度为 700 μl/l 时的经济产量、生物产

量、千粒重分别增长 36.1%、32.3%和 8.6%；浓度为 500 $\mu\text{l/l}$ 时，分别增长 17.2%、15.7%和 4.6%。经济产量增长率略高于生物产量，700 $\mu\text{l/l}$ 和 500 $\mu\text{l/l}$ 两浓度下的收获指数分别增长 2.9%和 1.3%。说明高 CO₂ 浓度增加了养分的积累和增强向籽粒输送的能力，促进穗粒形成，为提高产量提供了物质基础。

综上所述，由于 CO₂ 浓度增加，加大了叶片内外 CO₂ 浓度梯度和向叶片内部扩散速度，提高了同化速率，加速了光合产物的形成和输送，从而促进了小麦生长、发育和干物质积累，提高了产量；同时，CO₂ 浓度上升，减小了气孔导度^[7,8]，抑制了小麦蒸腾，提高了水分利用率，有利增产。这些已在本实验研究中得以证实，700 $\mu\text{l/l}$ 比 350 $\mu\text{l/l}$ 的光合速率平均增长 30.7%，蒸腾系数下降 7.6%^{*}。CO₂ 浓度增加引起的生理特性变化，为小麦生育和产量的增长提供了理论依据。

表 4 不同 CO₂ 浓度(相对 350 $\mu\text{l/l}$)小麦产量因子的增长率(%)

Table 4 The increasing rate (compared 350 $\mu\text{l/l}$) in different CO₂ concentration for wheat yield factors

处理 Treatment ($\mu\text{l/l}$)	穗数/株 CN (%)	粒数/株 KN (%)	生物量 BW (%)	产量 YW (%)	千粒重 KW (%)	收获指数 HL (%)
A (700)	34.8	27.3	32.3	36.1	8.6	2.9
B (500)	12.1	13.4	15.7	17.2	4.6	1.3
C (350)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D (CK)	-4.0	10.4	3.7	6.6	3.9	2.9

2.5 CO₂、温、光条件对生育产量的影响

实验期间的温光环境条件列于表 5， T 、 P 为各生育期 2~5 d 白天(7:00~18:00)平均气温和光量子通量密度， T_m 、 P_m 为其最高值。A、B、C 箱内环境条件基本一致，箱外代表对照 D。表 5 可见，箱内光照约为箱外的 1/2，箱内白天气温比箱外平均高 7℃左右，日均气温高 4.9℃。通常小麦生育期适宜温度为 12~24℃，生育期最高温度 28~35℃^[6]。表 5 表明，自抽穗开始，箱内平均气温几乎接近小麦生育上限温度，出现 40℃以上的高温影响小麦正常生育，而箱外温光条件比箱内更适宜小麦生育。尽管处理 C 和对照 D 都处于常量(约 350 $\mu\text{l/l}$)CO₂ 浓度水平，因受光温条件的限制(箱内光照较弱、温度偏高)，抽穗以后的干物重、根重以及生物产量和经济产量(表 3、4)处理 C 低于对照 D。然而 CO₂ 浓度较高的 A、B 处理在较高温度和较弱光照的不利条件下，其生物量和产量增长率都高于对照(表 1~4)。这进一步说明，CO₂ 浓度高对生长后期较高温度的不利影响有明显的减弱作用，并能提高抵御短期 40℃高温胁迫的能力。从而证实了 CO₂ 浓度倍增可以改善小麦生育与环境条件的关系，提高了小麦对气温增高的适应能力，在未来大气中 CO₂ 浓度倍增及其温室效应可引起的增温对小麦的不利影响，将受到一定程度的调节和缓解。

表 5 同化箱内外光温条件

Table 5 Temperature and light condition in chamber and out chamber

生育阶段 Growth eveluting phase	箱内 In chamber				箱外 Out chamber			
	T	T_m	P	P_m	T	T_m	P	P_m
	(°C)		($\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$)		(°C)		($\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$)	
拔节期 Elongating stage	22.5	31.6	150	473	15.7	20.4	320	833
孕穗期 Boot stage	27.3	35.7	292	577	20.2	24.3	446	885
抽穗期 Heading time	31.2	44.9	203	551	23.9	32.7	371	851
开花期 Flowering stage	29.6	36.2	153	334	22.6	28.1	257	630
乳熟期 Milk stage	31.7	36.4	271	354	24.9	30.0	402	691

* 王修兰、徐师华、李佑祥、崔读昌。小麦对 CO₂ 浓度倍增的生理反应(作物学报, 1996 年, 待发表)。

3 结论与讨论

- 3.1 CO₂ 浓度增高加速了小麦生长和发育。物候期提前, 从抽穗期至乳熟期 700 μl/l 比 350 μl/l 提前了 3~4 d, 500 μl/l 提前 1~2 d。
- 3.2 CO₂ 浓度增高有利于小麦茎叶生长, 新叶早发, 分蘖和叶片增多, 叶面积指数加大, 株高增长。从拔节至乳熟, 随着 CO₂ 浓度处理时间的延续; 其增长率逐渐加大。
- 3.3 CO₂ 浓度增高促进小麦各器官的干物质积累增加。这种作用表现为穗>茎叶>根。地上部分(植冠)比地下部分(根)更明显。
- 3.4 CO₂ 浓度升高有利产量形成, 加速养分向籽粒输送。单株穗数、成穗率、千粒重、生物产量、经济产量和收获指数随 CO₂ 浓度增加而提高, 700 μl/l 比 350 μl/l 增产 36.1%, 50 μl/l 增产 17.2%。
- 3.5 CO₂ 浓度升高, 增强了小麦抵抗短期高温及弱光胁迫的能力, 缓解了气温升高对作物的不利影响。

参 考 文 献

- 1 John Houghton, Bert Bolm. *IPCC supplement scientific assesment of climate change*. IPCC, Cambridge University Press 1992, 10~19
- 2 Rogers H Gifford, Hans lambers and Jams I L Monson. Respiration of crop species under CO₂ enrichment, *Physiol. Plant*, 1986, **63**: 351~356
- 3 Boln Warrick, Doos Jager, *The greenhouse effect climatic change and ecosystems*, SCOPE, Printed in Great Britain. 1986, 393~399
- 4 Jennifer D. Cnre, Basil Acock. Crop responses to carbon dioxide doubling: A Literature Survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, **38**: 127~145
- 5 王修兰, 徐师华, 李佑祥. 植物群体光合速率测定装置与方法. 农业工程学报, 1993, (4): 62~66
- 6 矢岛正清. 关于 CO₂ 对作物生长、产量的影响的研究, 气象科技, 1992, (6): 84~89
- 7 Yoshio Inoue, Bruce A, Kimball, *et al.* Stomatal behaviour and relationship between photosynthesis and transpiration in field-grown cotton as affected by CO₂ enrichment, *Japan Jour. Crop Sci.* 1990, **59**(3): 510~517
- 8 Katsu Imai Manami Okamoto Saro, Effects of temperature on CO₂ dependence of gas exchanges in C₃ and C₄ plants, *Japan Jour. Crop Sci.* 1991, **60**(1): 139~145
- 9 程纯枢主编. 中国农业百科全书. 农业气象卷. 北京: 农业出版社. 1986, 344