

自由大气 CO₂ 浓度升高对夏大豆生长与产量的影响

郝兴宇^{1,2}, 林而达^{2,*}, 杨锦忠^{1,3,*}, 居 辉², 马占云², 韩 雪², 王贺然², 杨万深⁴

(1. 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801;

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081;

3. 青岛农业大学, 山东青岛 266109; 4. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: IPCC 报告指出到本世纪中期全球大气 CO₂ 浓度将比目前的浓度增加 50%。CO₂ 浓度升高将影响大豆的生长及产量。有关大气 CO₂ 浓度对大豆影响的研究大多在温室或开顶式气室中进行的, 利用 FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 系统对大豆生长发育受 CO₂ 浓度升高影响的试验首次在中国进行, FACE 圈中心的 CO₂ 浓度维持在 (550 ± 60) μmol·mol⁻¹, 对照浓度 (389 ± 40) μmol·mol⁻¹。这是继美国 SoyFACE 之后世界第二个利用 FACE 系统对大豆生长发育进行的研究, 研究表明: 大气 CO₂ 浓度升高提高了两个大豆品种全生育期的叶、茎、荚重及地上部分总重, 收获后地上部分总干重平均提高 52.30%; 大豆叶面积对 CO₂ 浓度升高的响应存在品种差异, 中黄 35 促进叶面积增加而中黄 13 抑制叶面积的增加。CO₂ 浓度升高使鼓粒期大豆比叶重增加, 中黄 35 比叶重增加 23.08% 到达显著水平。CO₂ 浓度升高使大豆节数、分枝数、茎粗提高, 特别是茎粗收获期中黄 35 增加 7.18%, 中黄 13 增加 26.33%, 均到达显著或极显著水平; 大气 CO₂ 浓度升高使两个品种产量平均增加 30.93%, 产量的增加主要是由于 CO₂ 浓度升高提高了大豆单株荚数和百粒重。大气 CO₂ 浓度升高对大豆各器官占地上部分重量的比例影响不明显, 对大豆收获指数的影响未达显著水平。大气 CO₂ 浓度升高对大豆的影响品种差异明显。结论与美国 SoyFACE 的研究结果基本一致, 如 FACE 系统下大豆生物量、产量都较对照增高, 但变化幅度较 SoyFACE 的结果高。

关键词: 夏大豆; CO₂ 浓度升高; FACE; 气候变化; 生物量; 生长; 产量

文章编号: 1000-0933(2009)09-4595-09 中图分类号: Q142, Q948, S16, S314 文献标识码: A

Effects of free air CO₂ enrichment (FACE) on growth and yield of summer soybean

HAO Xing-Yu^{1,2}, LIN Er-Da^{2,*}, YANG Jin-Zhong^{1,3,*}, JU Hui², MA Zhan-Yun², HAN Xue², WANG He-Ran², YANG Wan-Shen⁴

1 College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

4 the Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4595 ~ 4603.

Abstract: The Intergovernmental Panel on Climate Change projects that atmospheric [CO₂] will reach 550ppm by 2050. Elevation of [CO₂] will invariably influence soybean growth and yield. Recently soybean response to elevated [CO₂] have been mostly researched in chambers and enclosures. This is the first FACE (Free air CO₂ enrichment) study of soybean in china, The CO₂ regimes investigated were ambient ((389 ± 40) μmol·mol⁻¹) and FACE ((550 ± 60) μmol·mol⁻¹). This is the second such study in the world after American SoyFACE. Results showed that the weight of leaf, stem, pop and the

基金项目: 中澳政府气候变化合作资助项目(00xx-0506-Norton); 国家科技支撑计划课题资助项目

收稿日期: 2009-02-22; 修订日期: 2009-05-15

致谢: 在试验过程中, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所的全乘风、魏强、巫国栋负责了设备安装及维护, 高霁、杨宗鹏、李迎春等同学协助完成了试验的测试工作, 在此表示感谢。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lined@ami.ac.cn; Jzyang@qau.edu.cn

above-ground biomass increased with Elevation of $[\text{CO}_2]$, the mean above-ground biomass of two varieties in FACE significantly increased by about 52.30% compared to these grown in ambient air at harvest. The leaf area of Zhonghuang35 increased with Elevation of $[\text{CO}_2]$, whereas leaf area of Zhonghuang13 decreased. The specific leaf weight of two soybean cultivars increased at the stage of filling pod in FACE, and significantly increased by 23.08% in Zhonghuang35. Plant node number, branch number, and stem diameter were increased in FACE, the stem diameter of cultivars Zhonghuang35 and Zhonghuang13 significantly increased by 7.18%, 26.33% respectively at harvest. Because of the increase in pod number per plant and the mass of individual seeds, the average yield was increased by 30.93% in FACE. The average harvest index wasn't significantly affected by elevated $[\text{CO}_2]$. Proportion allocation of leaf, stem and pod biomass to above-ground over the growing season was also not significant. The effect of FACE on soybean significantly varied between two soybean cultivars. Our main conclusion is consistent with the results of SoyFACE studies, such as the increase in yield and biomass and the decrease in harvest index with elevated $[\text{CO}_2]$, but with larger effects than those found in the SoyFACE studies.

Key Words: summer soybean; elevated $[\text{CO}_2]$; FACE; global climate change; biomass; plant growth; yield

IPCC 报告指出到本世纪中期全球大气 CO_2 浓度将比目前的浓度增加 50%^[1]。 CO_2 浓度升高有利于植物生长及作物产量提高^[2,3]。以往的研究表明: CO_2 浓度加倍将使 C_3 作物产量平均增加 33%^[4]。但这些研究很多都是在保护性环境下进行的,如温室或开顶式气室(open top chamber),由于其空气湿度、温度和辐射等方面与自然条件有较大的差异,用温室和开顶式气室观测到的变化未必都是 CO_2 浓度变化的结果,未必都与自然条件下植物对高浓度 CO_2 的适应完全相同^[5,6]。自由大气 CO_2 富集系统(free air CO_2 enrichment, FACE)的方法 and 设施应运而生,这种系统可以在不改变农田小气候的情况下保持高 CO_2 浓度,并可以提供足够的土地面积以满足小区试验设计的需要^[7]。目前,各国学者已经应用 FACE 系统对水稻、小麦等 C_3 作物进行了研究^[8,9],世界上仅美国利用 FACE 系统对大豆进行了研究^[10]。我国学者也利用 FACE 系统对小麦、水稻进行了研究^[11-13],但对大豆的研究仅限于温室或开顶室的研究^[14-16]。大豆是世界及我国主要的油料作物,也是我国人民主要的食品原料之一。由于 CO_2 的肥效作用,未来随着 CO_2 浓度的升高对大豆的生长发育可能产生促进作用,这可能会提高大豆的生物量及产量。利用 FACE 系统开展 CO_2 浓度升高对大豆影响的研究将使我们更加清楚未来情景下大豆生产的情况,以提前采取措施保证我国的食物、油料安全。本研究在我国首次利用 FACE 系统对北方夏大豆的生产进行了相关研究,拟了解未来气候变化情景下,大气 CO_2 浓度升高对夏大豆生长及产量的影响。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

中国农业科学研究院昌平实验基地位于北京市昌平南部(北纬 40.13°, 东经 116.14°),京昌公路的西侧。土壤类型属褐潮土,耕作方式冬小麦-大豆轮作。土壤有机质 17.11g/kg,全氮 10.37g/kg,全磷 1.12 g/kg,全钾 14.19 g/kg,碱解氮含量 82.05mg/kg,速效磷 49.14mg/kg,速效钾 92.10 mg/kg,pH 值 8.28。

1.2 miniFACE 实验系统构成

CO_2 气体供应装置由 15t 容积的 CO_2 储液罐、水浴气化装置、压力调节及送气管道组成。控制系统由主控计算机、电源箱、放气管及 CO_2 采样分析系统组成(图 1)。每个 FACE 圈的对边距为 4m,由 8 根释放 CO_2 气体管带围成的八角形,每根放气管长度为 1.66m,材料为塑料灌溉管,放气管面向圈内一面有很多孔径约 1mm 小气孔,放气管高度可随作物生长调节,保持作物冠层上有足够高的 CO_2 浓度和气体扩散空间。圈中心放置 CO_2 气体检测箱,检测 CO_2 浓度装置采用了芬兰 Vaisala CO_2 传感器,同时监测温湿风等气象指标。采样管高度可随作物生长高度调节。本实验中有 6 个 FACE 圈,2 个大气圈(有圈但不放气,有检测器监测 CO_2 浓度),

4 个无圈大气对照(无圈,无 CO₂检测器)。

1.3 系统控制

为了控制 FACE 实验圈的浓度,考虑风向和风速是必须的(图 1)。在每个 FACE 圈中心 2.5m 高度上都安装了一组测定风向和风速的传感器,当无风时,FACE 圈的 8 根释放管同时向圈内释放 CO₂。有风时,根据风向,上风向的 3 根放气管开放,释放 CO₂ 气体。中心 CO₂传感器检测到 CO₂ 浓度后传给计算机,计算机根据 PID 方程的结算结果,控制分气装置和每个释放管上的电磁阀的开合度以调节 CO₂ 气体的释放量。

1.4 田间实验设计

供试材料为夏大豆(2 个品种)前茬为冬小麦。设定 CO₂浓度处理为大气 CO₂浓度((389 ± 40) μmol·mol⁻¹)与 FACE((550 ± 60) μmol·mol⁻¹)2 个水平,FACE 圈通气时间从 6 月 28 号开始到 10 月 7 号收获时结束,每日通气时间为 6:30 ~ 18:30,夜间不通气。2008 年 6 月 20 日播种的夏大豆采用了中黄 35 和中黄 13 两个品种,中黄 35 夏播平均生育期 102d,株高 78.0cm,有效分枝 0.9 个。中黄 13 夏播生育期 105 ~ 108d,株高 50 ~ 70cm,有效分枝 3 ~ 5 个。种植密度 1.4 万株·666.7m⁻²,施氮量设常规氮 N(11.8 kg·hm⁻¹)和低氮 N(4.8 kg·hm⁻¹)两个水平,三裂区试验设计,主处理为 CO₂浓度与施氮量组合,副处理为品种,3 次重复。P₂O₅(16.5 kg·hm⁻¹)和 K₂O(45 kg·hm⁻¹)的施量各小区相同,全部做底肥。

1.5 测定内容与方法

1.5.1 生物量及形态指标测定

在夏大豆主要的生育期(分枝期:播后 44d;花荚期:中黄 35 为播后 58d,中黄 13 为播后 69d;鼓粒期:播后 85d)每小区每个品种分别取有代表性的植株 5 株,去根后放入冰箱,当天分批取出测量其形态指标(株高、节数、分枝数、茎粗、荚数),然后分出叶、茎、荚不同器官,置 60℃ 烘干 72h,称重。在鼓粒期进行了功能叶比叶重测量,方法为用 1.5cm 直径的打孔器在每株倒数第 3 片功能叶上均匀打 40 个 1.5cm 直径的孔,然后烘干 72h,称重,计算单位面积叶片重量。

收获时(播后 109d)每小区每个品种取 50cm 样段两行,并收集行内残叶,选取 5 株进行考种,测量形态指标及各器官干重。最后,考种样本和其余样本合并进行测产。

叶面积测量方法采用哈尔滨市光学仪器厂生产扫描式活体面积测量仪(SHY-150 型)对大豆各个生育期(分枝期、开花期、花荚期、盛荚期、鼓粒期)大豆倒数第 2、3 片功能叶进行测量,每小区定株观察 5 株。

1.5.2 统计分析方法

以 Excel 进行数据处理和图表绘制,以 SAS 统计软件进行 CO₂处理的显著性分析。FACE 和 CK 平均值分别为 6 个 FACE 圈和 6 个对照的平均值。

2 结果与分析

2.1 CO₂浓度升高对夏大豆形态指标的影响

CO₂浓度升高对夏大豆形态指标有一定影响(表 1,表 2):CO₂浓度升高对两个品种株高的影响均未达显著水平;对节数的影响,除中黄 13 分枝期 FACE 处理较对照减小外,其它生育期两个品种的节数均为 FACE 处理高于对照,中黄 35 增幅为 1.85% ~ 5.11%,其中收获期增幅最高并达到显著水平。中黄 13 节数 FACE 处理较对照增幅为 3.77% ~ 8.72%,鼓粒期增幅最高并达到显著水平;CO₂浓度升高对大豆分枝数的影响除中黄 35 花荚期 FACE 处理较对照低 2.82% 外,其余全部为增加,中黄 35 增幅为 10.52% ~ 58.97%,其中鼓粒

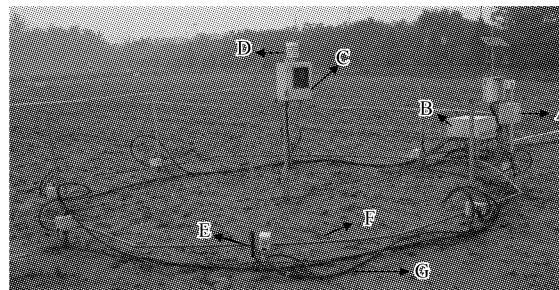


图 1 FACE 系统 CO₂浓度控制系统

Fig. 1 Structure of FACE

A:电源 Power supply, B:分流装置 Diffluent device, C:CO₂检测器 CO₂sensor, D:气象传感器 Tem, RH, and wind sensor, E:电磁阀 Valve for wind direction, F:放气管 Exhausting pipe, G:送气管 Transmission pipe

期增幅最大并达到极显著水平,中黄 13 增幅为 24.92% ~ 76.47%,其中花荚期和鼓粒期增幅为 73.61%、76.47% 达到显著水平;CO₂浓度升高促进了大豆茎粗的增加,中黄 35 增幅为 3.63% ~ 19.93%,中黄 13 增幅为 7.11% ~ 26.33%,两个品种分枝期均不显著,但其他生育期均为显著或极显著。可见,CO₂浓度升高将促进大豆节数、分枝数、茎粗的增加,这些都必将提高大豆地上部分生物量,并为产量的提高打下基础。

表 1 CO₂浓度升高对中黄 35 形态指标的影响Table 1 Effect of elevated [CO₂] on morphological traits in Zhonghuang 35

播后天数 Day after sowing(d)	处理 Treatment	株高 Height(cm)	节数 Node number	分枝数 Branch number	茎粗 Stem diameter(mm)
44	FACE	44.56	12.8	2.5	6.87
	CK	44.79	12.6	2.2	6.63
	P _{CO₂}	0.8993	0.4317	0.3596	0.4542
58	FACE	77.42	16.3	2.3	8.96
	CK	73.51	15.9	2.4	7.85
	P _{CO₂}	0.2055	0.5556	0.8420	0.0366
85	FACE	77.66	16.5	3.4	10.76
	CK	76.41	16.2	2.2	8.97
	P _{CO₂}	0.7991	0.4935	0.0042	0.0114
109	FACE	79.73	17.1	2.1	9.87
	CK	76.34	16.3	1.9	9.21
	P _{CO₂}	0.3865	0.0455	0.5306	0.0465

表 2 CO₂浓度升高对中黄 13 形态指标的影响Table 2 Effect of elevated [CO₂] on morphological traits in Zhonghuang 13

播后天数 Day after sowing(d)	处理 Treatment	株高 Height(cm)	节数 Node number	分枝数 Branch number	茎粗 Stem diameter(mm)
44	FACE	42.37	13.4	3.3	7.23
	CK	42.47	13.6	2.6	6.75
	P _{CO₂}	0.7707	0.6257	0.1282	0.1774
69	FACE	71.34	19.1	4.2	10.33
	CK	68.81	17.8	2.4	8.51
	P _{CO₂}	0.3855	0.0599	0.0244	0.0442
85	FACE	73.16	19.4	3.3	11.32
	CK	72.96	17.8	1.9	9.03
	P _{CO₂}	0.9628	0.0127	0.0219	0.0032
109	FACE	70.39	18.3	2.9	10.83
	CK	70.18	17.7	2.0	8.57
	P _{CO₂}	0.9617	0.1570	0.1764	0.0015

CO₂浓度升高对大豆不同生育期叶面积影响结果表明(表 3):中黄 35 倒数第 2、第 3 片功能叶叶面积不同生育期 FACE 处理较对照都有所提高,提高幅度为 7.38% ~ 45.50%。而中黄 13 倒数第 2、第 3 片功能叶叶面积除个别生育期(分枝期及花荚期)外大部分为 FACE 处理下较对照减小,减大幅度为 1.11% ~ 17.74%。之前的研究认为 CO₂浓度升高促进了大豆叶面积的增加,研究表明 CO₂浓度升高对大豆叶面积的影响存在明显的品种间差异。

CO₂浓度升高对大豆鼓粒期倒数第 3 片功能叶比叶重结果表明(图 2):FACE 处理使大豆比叶重较对照增加,中黄 35 增加 23.08% 到达显著水平,中黄 13 增加 17.85% 但未达到显著水平。

表 3 CO₂ 浓度升高对大豆叶面积的影响Table 3 Effects of elevated [CO₂] on leaf area in soybean over the growing season (cm²)

品种 Cultivar	叶位 Leaf	处理 Treatment	分枝期 Branching 38 (d)	开花期 Flowering 45 (d)	花荚期 Flowering and poding 54 (d)	盛荚期 Poding 67 (d)	鼓粒期 Filling pod 82 (d)
Zhonghuang 35	倒数第 2 片功能叶	FACE	21.51	49.79	49.20	43.32	50.36
	Reciprocal 2th	CK	14.78	38.08	45.81	37.59	46.89
	function leaf	增加率 increase (%)	45.50	30.75	7.42	15.26	7.38
	倒数第 3 片功能叶	FACE	44.97	69.03	71.14	57.50	65.70
	Reciprocal 3th	CK	38.60	56.72	63.48	51.26	55.76
	function leaf	增加率 increase (%)	16.50	21.69	12.08	12.19	17.83
Zhonghuang 13	倒数第 2 片功能叶	FACE	21.80	58.65	62.29	61.57	71.47
	Reciprocal 2th	CK	17.53	59.91	57.58	65.95	85.47
	function leaf	增加率 increase (%)	24.36	-2.09	8.19	-6.64	-16.38
	倒数第 3 片功能叶	FACE	53.63	87.56	88.99	73.76	79.73
	Reciprocal 3th	CK	42.66	92.72	89.99	81.99	96.92
	function leaf	增加率 increase (%)	25.69	-5.57	-1.11	-10.04	-17.74

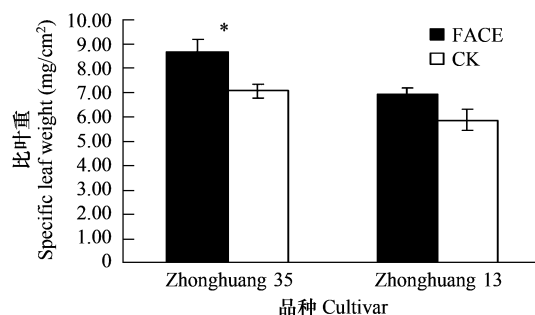
2.2 CO₂ 浓度升高对夏大豆各器官生物量的影响

高 CO₂ 浓度对中黄 35 和中黄 13 两个大豆品种各器官生物量及总生物量都有促进作用(图 3), 两个大豆品种的叶干重在分枝期(播后 44d)、花荚期(中黄 35 为播后 58d, 中黄 13 为播后 69d) FACE 下较对照都有所增加, 但未到达显著水平, 鼓粒期(播后 85d)和收获期(播后 109d) FACE 条件下叶重较对照显著增加, 中黄 35 分别增加 61.2% 和 90.9%, 中黄 13 分别增加 63.9% 和 56.2%。中黄 35 茎干重在分枝期、开花期、鼓粒期 FACE 条件下较对照显著提高, 分别增加 11.6%、25.8%、64.2%, 收获期平均增加 41.8%。在 4 个生育期, 中黄 13 茎干重 FACE 条件下较对照不同程度有所增加, 分枝期未达到显著水平, 其它生育期均显著增加, 增幅分别为 20.9%、58.5%、73.6%、80.5%。FACE 条件下, 两个大豆品种荚重各生育期均有所提高, 在收获期达到显著水平, 收获期荚重分别增加 27.45%、63.9%。不同生育期两种大豆地上部分总生物量 FACE 条件下均比对照高, 仅中黄 35 开花期未达显著水平, 其他生育期均达显著或极显著水平, 中黄 35 鼓粒期增幅最高达 62.2%, 而中黄 13 收获期增幅最高达 66.9%, 均达极显著水平。中黄 35 收获期地上部分总生物量增加 36.6% 也达到极显著水平, 两个品种大豆收获后地上部分总干重平均提高 52.30%。这一结果较其它的研究结果高, 美国 Soyface 研究结果是增加 17%~18%^[10], 而温室及开顶式的结果是增加 33%~41%^[14-17]。

从 CO₂ 浓度升高对两个大豆品种不同器官干重占地上部分生物量的比例来看, 统计分析均未达到显著水平。

2.3 CO₂ 浓度升高对夏大豆产量及其构成因素的影响

CO₂ 浓度升高促进了大豆产量的提高(图 4), 中黄 35 FACE 处理较对照增产 20.42%, 中黄 13 增产 51.40%, 但未到达显著水平, 统计分析不显著的原因可能和后期部分小区出现病害使同一处理的不同小区产量差异较大所致。两个品种平均增产 30.93% 达到显著水平。CO₂ 浓度升高促进了大豆产量提高的原因主要是由于单株荚数的提高, 中黄 13 还和百粒重提高有关(表 4)。单株荚数分别提高 29.87% 和 68.14%, 都达

图 2 CO₂ 浓度升高对大豆鼓粒期比叶重的影响Fig. 2 Effect of elevated [CO₂] on the weight of unit area leaf in filling pod

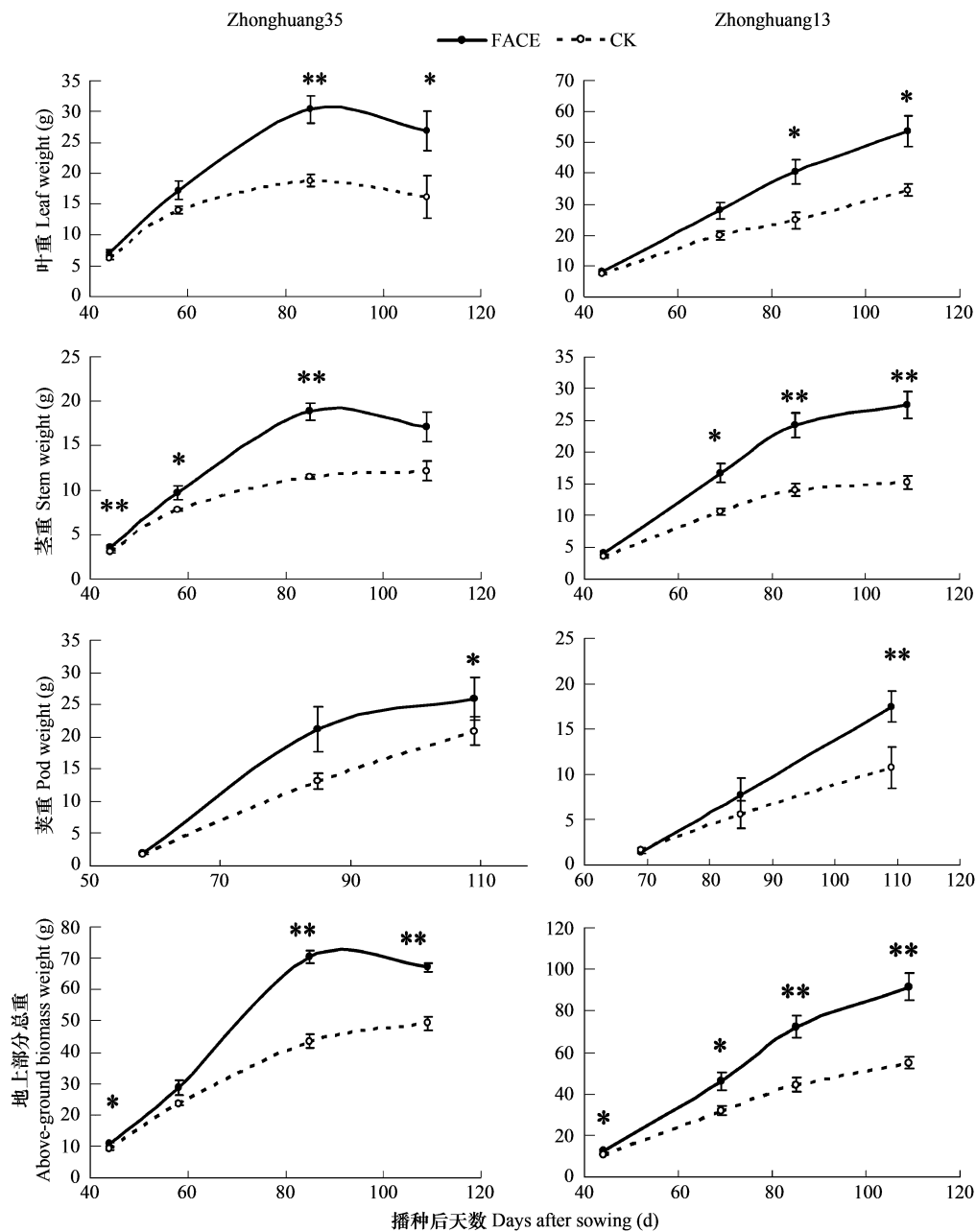


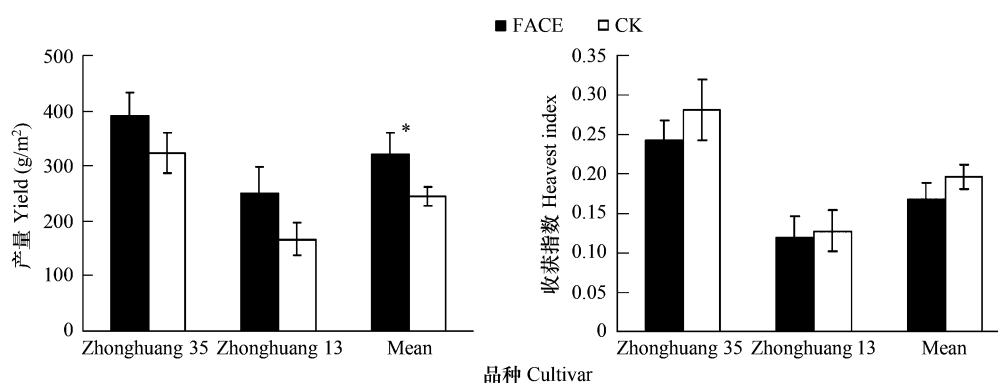
图3 CO_2 浓度升高对夏大豆不同发育期各组织生物量及总生物量的影响

Fig. 3 Leaf, stem, pod and aboveground dry mass weight per plant over the growing season under current or elevated $[\text{CO}_2]$

* 表示在 $\alpha = 0.05$ 水平显著, * * 表示在 $\alpha = 0.01$ 水平显著 (下同) * means Significant ($\alpha = 0.05$) and * * means significant ($\alpha = 0.01$). The same below

到显著水平,其中中黄 13 到达极显著水平。而单荚粒数增加不明显。 CO_2 浓度升高促进了大豆百粒重的提高,两个品种分别提高 4.61% 和 11.67%,其中中黄 13 达到了显著水平。之前温室和开顶式气室的结果是 CO_2 浓度升高使大豆产量增加 15.19% ~ 37%^[14~17],而美国 Soyface 的研究结果是增产 15%^[10]。中黄 13 增产的幅度较前人的研究偏高,其原因有待进一步研究。

收获指数 FACE 处理较对照均有所降低 (图 4),但均未到达显著水平。

图4 CO₂浓度升高对大豆产量、收获指数的影响Fig. 4 Effects of elevated [CO₂] on yield and harvest index in soybean表4 CO₂浓度升高对大豆株荚数、荚粒数、百粒重的影响Table 4 Effect of elevated [CO₂] on pod number per plant, seed number per pod and 100 seeds weight in soybean

品种 Cultivar	处理 Treatment	株荚数 Pod number per plant	荚粒数 Seed number per pod	百粒重 100 seeds weight (g)
Zhonghuang 35	FACE	60.434	1.75	19.72
	CK	46.534	1.8	18.85
	增加率 increase(%)	29.87	-2.78	4.62
	<i>P</i> _{CO₂}	0.0489	0.7365	0.2657
Zhonghuang 13	FACE	40.42	1.43	29.35
	CK	24.04	1.375	26.28
	增加率 increase(%)	68.14	4.00	11.67
	<i>P</i> _{CO₂}	0.0023	0.6123	0.0337

3 讨论

CO₂是作物进行光合作用的重要原料。在人工气候室条件下采用盆栽栽培方法的众多研究指出,增加CO₂浓度能够促进叶面积生长,提高单位叶面积的净光合速率,显著增加干物质积累量^[2~5,14~16]。但自由大气CO₂浓度增加对大豆物质生产的影响报道很少^[10]。本研究结果表明,自由大气CO₂浓度增加促进了中黄35功能叶叶面积增加(表3),鼓粒期比叶重也明显较对照高(图2),所以其叶干重较对照高(图3)。中黄13虽然大部分生育期功能叶叶面积较对照低(表3),鼓粒期比叶重也未显著提高(图2),但由于节数、分枝数都较对照高(表2),仍然使叶的总重较对照提高(图3),且后期达到显著水平。以前的研究认为CO₂浓度升高会使作物叶面积提高^[14,17,18],不同的品种是存在差异的,CO₂浓度升高使中黄35叶面积增加而中黄13叶面积减小。

CO₂浓度升高促进了大豆的节数、分枝数、茎粗的增加(表1,表2),特别是茎粗显著增加,使大豆茎重、收获期荚重、地上部分总生物量明显增加(图2)。但随着生物量的增加,收获指数较对照下降(图4)。这也给将来增产一个新的思路,如果能够抑制碳同化物向茎输送或能够使其再分配到种子中去将有助于产量及收获指数的提高。

主要研究结论与美国 SoyFACE 的研究结果基本一致,如 FACE 系统下大豆生物量、产量都较对照增高。但幅度较 SoyFACE 的结果高,其原因是由于品种差异造成的还是由于栽培方式的不同造成的有待于进一步研究探讨。另外,美国 SoyFACE 的研究^[10,19]发现 CO₂浓度升高促进大豆增产的原因是由于单株荚数和单荚种子数的提高,与单粒种子重无关研究结果表明(表4):CO₂浓度升高使大豆单株荚数明显提高,单荚种子数变化不明显,使中黄13百粒重明显提高,而中黄35百粒重有所提高但未到达显著水平。可见,CO₂浓度升高

对大豆产量构成因素的影响也存在品种差异。

我国学者范桂枝等^[20~23]对 FACE 条件下水稻产量及产量构成因子相关的 QTL(quantitative trait locus,数量性状基因座)的研究认为,水稻对 FACE 处理的响应存在很大的基因型差异,不同基因型的水稻对 CO₂ 浓度升高的反应会有差异,控制水稻株高、产量及产量构成因子的部分基因表达与环境 CO₂ 浓度互作。推测大豆在部分形态指标、产量及产量构成因素方面对 CO₂ 浓度响应存在品种差异以及我们的结果与美国学者研究结果存在差异的原因可能是由于不同品种大豆基因型不同。

本试验第一次在中国利用 FACE 系统对夏大豆进行了研究,取得了以上关于自由大气 CO₂ 浓度升高对夏大豆影响的研究结果,但这仅仅是 1a 的试验结果,且部分小区又受到后期病害的影响,有待于今后进一步完善。

References:

- [1] Prentice I C, Farquahar G D, Fasham M J R, *et al.* The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linder P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A, eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001. 183—237.
- [2] Curtis P S, Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology. *Oecologia*, 1998, 113: 299—313.
- [3] Drake B G, Gonzalez-Meler M A, Long S P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1997, 48: 609—639.
- [4] Kimball B A. Carbon-dioxide and agricultural yield — an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal*, 1983, 75: 779—788.
- [5] Poorter H. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetation*, 1993, 104/105: 77—97.
- [6] Thomas R B, Strain B R. Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiol*, 1991, 96: 627—634.
- [7] Long S P, Ainsworth E A, Rogers A, *et al.* Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 591—628.
- [8] Kimball B A, Pinter P J, Garcia R L, *et al.* Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 1995, 1: 429—442.
- [9] Kim H Y, Lieffering M, Kobayashi K, *et al.* Seasonal changes in the effects of elevated CO₂ on rice at three levels of nitrogen supply: a free air CO₂ enrichment (FACE) experiment. *Global Change Biology*, 2003, 9: 826—837.
- [10] Patrick B M, Germa N B, Randall L N, *et al.* Smaller than predicted increase in aboveground net primary production and yield of field-grown soybean under fully open-air [CO₂] elevation. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1856—1865.
- [11] Sun C M, Zhuang H Y, Yang L X, *et al.* A simulation of growth duration in FACE rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 613—619.
- [12] Yang L X, Li S F, Wang Y L, *et al.* Effects of free air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 75—80.
- [13] Huang J Y, Yang H J, Dong G H, *et al.* Effects of free air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation in rice (*Oryza sativa*). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1210—1214.
- [14] Jian Y L, Zhang O G, Yue W, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ Concentration on growth and yield of soybean. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(6): 355—357.
- [15] Wang X L, Xu S H. Effect of CO₂ Concentration doubling on photosynthesis and dry matter production in different growth stages of soybean plant. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(5): 520—527.
- [16] Wang C Y, Bai Y M, Wen M, *et al.* Effects of double CO₂ and O₃ on growth and yields in Soybean. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 6—10.
- [17] Ainsworth E A, Davey P A, Bernacchi C J, *et al.* A metaanalysis of elevated [CO₂] effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. *Global Change Biology*, 2002, 8: 1—15.
- [18] Ainsworth E A, Long S P. What we have learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165: 351—372.
- [19] Heagle A S, Miller J E, Pursley W A. Influence of ozone stress on soybean response to carbon dioxide enrichment. III. Yield and seed quality.

Crop Science, 1998, 38: 128—134.

- [20] Fan G Z, Cai Q S, Wang C M, *et al.* QTL for yield and its components responded to elevated CO₂ in Rice (*Oryza sativa* L.). Acta Genetica Sinica, 2005, 32 (10): 1066—1073.
- [21] Fan G Z, Cai Q S, Wang C M, *et al.* Response of plant height to free Air CO₂ enrichment in Rice(*Oryza sativa* L.). Acta Agronomica Sinica, 2007,33(3):433—440.
- [22] Fan G Z, Cai Q S, Wang C M, *et al.* Response of 1000-grain weight to FACE in CSSL population of Rice(*Oryza sativa* L.). Acta Agronomica Sinica,2005,51(6):706—711.
- [23] Fan G Z, Cai Q S, Xie H, *et al.* QTL analysis of yield and its components traits in Rice(*Oryza sativa* L.) under free air CO₂ enrichmen. Journal of Plant Genetic Resources,2008,9(4):417—422.

参考文献:

- [11] 孙成明,庄恒扬,杨连新,等. FACE 水稻生育期模拟. 生态学报,2007,27(2):613~619.
- [12] 杨连新,李世峰,王余龙,等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响. 应用生态学报, 2007,18(1):75~80.
- [13] 黄建晔,杨洪建,董桂春,等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻产量形成的影响. 应用生态学报,2002, 13 (10): 1210~1214.
- [14] 蒋跃林,张庆国,岳伟,等. 大气 CO₂ 浓度升高对大豆生长和产量的影响. 中国农学通报,2005,21(6):355~357.
- [15] 王修兰,徐师华. CO₂ 浓度倍增对大豆各生育期阶段的光合作用及干物质积累的影响. 作物学报, 1994,20(5):520~527.
- [16] 王春乙,白月明,温民,等. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及复合效应对大豆生长和产量的影响. 环境科学, 2004,25 (6):6~10.
- [21] 范桂枝,蔡庆生,王春明,等. 水稻株高性状对大气 CO 浓度升高的响应. 作物学报,2007,33(3):433~440.
- [22] 范桂枝,蔡庆生,王春明,等. 水稻千粒重对大气 CO₂ 浓度升高的响应, 作物学报, 2005,51(6):706~711.
- [23] 范桂枝,蔡庆生,谢辉,等. 水稻产量及其构成因子对大气 CO₂ 浓度升高响应的相关 QTL 初步分析. 植物遗传资源学报,2008,9(4):417~422.