

DOI: 10.5846/stxb201411122240

苏营, 张逸飞, 牟文雅, 邢光南, 陈法军. 大豆主要株型和产量指标对大气 CO₂ 和温度升高的响应. 生态学报, 2016, 36(9): - - .
Su Y, Zhang Y F, Mou W Y, Xing G N, Chen F J. Morphological traits and yield of soybean under elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - - .

大豆主要株型和产量指标对大气 CO₂ 和温度升高的响应

苏 营¹, 张逸飞¹, 牟文雅¹, 邢光南², 陈法军^{1,*}

1 南京农业大学植物保护学院昆虫学系, 南京 210095

2 南京农业大学农学院, 国家大豆改良中心, 南京 210095

摘要: 针对当前气候变暖和大气 CO₂ 浓度升高同步发生现实, 以高光效大豆品种黑农 41 (HN41) 和 3 个常规对照品种周豆 16 号 (ZD16)、中豆 35 号 (ZD35) 和桂黄豆 2 号 (GHD2) 为研究对象, 通过开顶式气室模拟高 CO₂ 浓度 (650 μL/L) 和温度升高 (±0.5—0.6 °C) 研究了大气 CO₂ 和温度升高对大豆的生长发育与产量影响。结果表明, CO₂ 浓度升高对株高、茎粗、单株干重和单株籽粒重影响极显著; 温度、CO₂ 与品种互作极显著地影响单株籽粒重。CO₂ 浓度升高有增加大豆株高、茎粗、干重和单株籽粒重的趋势, 且高温下 CO₂ 浓度升高对株高和茎粗的促进作用更大, 而正常温度水平下高 CO₂ 浓度升高更有利于干物质积累。与对照 CO₂ 浓度比, 高 CO₂ 浓度显著促进了高温下 HN41、ZD16 和 GHD2 的株高, 并显著提高了正常温度下 HN41、ZD16、ZD35 和 GHD2 的单株干重。与正常温度相比, 高温仅显著提高了高 CO₂ 处理下 HN41 的茎粗, 并显著提高了对照 CO₂ 处理下 HN41 的单株籽粒重。此外, 同一 CO₂ 浓度和温度处理下, 高光效大豆 HN41 的茎粗、根冠比和单株籽粒重等都显著高于 ZD16、ZD35 和 GHD2; 而仅在正常温度与高 CO₂ 浓度处理下 HN41 的单株干重显著高于 ZD16 和 GHD2。CO₂ 浓度和温度升高显著影响了高光效大豆的生长, 其中, 高温下 CO₂ 浓度升高有利于其生长势, 正常温度下 CO₂ 浓度升高有利于其光合产物积累。

关键词: 大豆; 全球变暖; 高 CO₂ 浓度; 生长势; 籽粒产量

Morphological traits and yield of soybean under elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature

SU Ying¹, ZHANG Yifei¹, MOU Wenya¹, XING Guangnan², CHEN Fajun^{1,*}

1 Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 National Center for Soybean Improvement, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Increasing levels of atmospheric CO₂ and temperature are the two most important factors of global climate change. As two key environmental factors for plant growth, the changes in atmospheric CO₂ concentration and temperature can affect photosynthetic productivity of crop plants. Moreover, used as a raw material in plant photosynthesis, increasing atmospheric CO₂ concentration will have a direct positive impact on photosynthesis and a series of physiological and biochemical process in plants and finally on crop yield. The atmospheric CO₂ level is increasing sharply with the expanding scope of human economic activities, which raises Earth surface temperature, eventually leading to global warming. In general, the photosynthetic rate is not saturated in most crop species under ambient CO₂ level (about 375 μL L⁻¹); hence, the increasing atmospheric CO₂ level can enhance the photosynthetic rate in most crop plants. However, the effect of climate change on photosynthesis, and physiological and biochemical processes is much more complex and unknown in most crops,

基金项目: 国家自然科学基金 (31272051, 31101491, 31470454)

收稿日期: 2014-11-12; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fajunchen@njau.edu.cn

especially in cultivars with high photosynthetic efficiency under the assumption of concomitant global warming and atmospheric CO₂ concentration increase. In this study, soybean cultivar HN41 with high photosynthetic efficiency ($\geq 17.64 \mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and three varieties ZD16, ZD35, and GHD2 with normal photosynthetic efficiency (10.75—15.48 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) were selected to study morphological traits and yield of soybean under elevated levels of CO₂ (650 $\mu\text{L/L}$ vs. ambient CO₂) and temperature (± 0.5 — 0.6°C vs. ambient temperature). The results indicated that CO₂ levels significantly affected plant height and stem diameter, as well as dry weight and seed weight per plant. Temperature levels and the interaction between CO₂ concentration and soybean cultivars significantly affected seed weight per plant. Relative to ambient CO₂ concentration, elevated levels of CO₂ promoted plant height, stem diameter, and dry weight and seed weight per plant, particularly under higher temperature. Moreover, elevated CO₂ significantly increased plant height in HN41, ZD16, and GHD2 at high temperature (18.9%, 24.4%, and 31.5%, respectively) and significantly enhanced dry weight per plant in HN41, ZD16, ZD35, and GHD2 at ambient temperature (7.3%, 4.7%, 16.0%, and 18.8%, respectively), in contrast to ambient CO₂ levels. Compared with ambient temperature, higher temperature significantly increased only the stem diameter of HN41 under elevated CO₂ levels and significantly enhanced the grain weight per plant in HN41 under ambient CO₂ levels. In addition, stem diameter, root/shoot ratio, and grain weight per plant in HN41 were significantly greater than those in normal cultivars (ZD16, ZD35, and GHD2) under the same conditions of atmospheric CO₂ levels and temperature, whereas dry biomass per plant in HN41 was significantly increased compared with that in ZD16 and GHD2. In conclusion, increase of both atmospheric CO₂ levels and temperature significantly affected plant growth of the highly photosynthesis-efficient soybean. Elevated CO₂ concentration can promote plant growth particularly at high temperature, whereas elevated CO₂ favors accumulation of photosynthetic products at ambient temperature especially for the highly photosynthesis-efficient soybean.

Key Words: Soybean; global warming; elevated CO₂; growth; yield

气候变暖和大气 CO₂ 浓度升高是当前人们最为关心的全球气候变化问题之一。而大气中 CO₂、CH₄、O₃ 等温室气体增加又是造成全球气候变暖的直接原因,进而会导致一系列生物生态学效应,这也成为了当今全球性关注的热门课题^[1-3]。研究气候变暖和大气 CO₂ 浓度升高等气候变化对我国大豆生长及其产量的影响,对更好的服务于我国的大豆生产有积极指导意义。

全球大气 CO₂ 浓度升高主要是由于人类活动和工业生产发展所致。据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2007 年报道,工业革命之前大气 CO₂ 浓度为 280 $\mu\text{L/L}$, 2005 年达到了 379 $\mu\text{L/L}$, 预计到 2100 年将会达到 540—970 $\mu\text{L/L}$ ^[4]。我国是当前 CO₂ 排放总量最多的国家之一,一次能源消费结构以比重占 2/3 以上的煤炭燃烧为主。煤、石油、天然气等矿物燃料和木材、木炭等植物性燃料作为人类社会的主要能源,在燃烧过程中都释放大量 CO₂,从而使我国能源消费的 CO₂ 排放强度比世界平均水平高 30% 以上。CO₂ 作为植物光合作用的原料,其浓度高低对植物光合作用及一系列生理生化过程会产生直接影响。研究大气 CO₂ 浓度升高对植物,尤其对经济作物的影响已成为国内外农业研究的热点。CO₂ 增加对作物光合作用、生长发育及产量形成的正效应已有大量的研究报道^[5-7]。从理论上讲,CO₂ 是植物进行光合作用的原料,大气 CO₂ 浓度增加有利于提高植物的光合作用和生产力^[8-12]。

CO₂ 和温度是作物生长过程中非常重要的两个因子,同时影响植物的光合生产力。Drake 等^[13] 研究表明,随着 CO₂ 浓度升高植物的光合最适温度也会相应的升高 5—10 $^\circ\text{C}$ 。也有研究发现,在达到最适温度之前,温度升高对作物的光合速率有促进作用。廖建雄等^[14] 利用开顶式气室方法研究发现,水分充足条件下,温度升高对春小麦光合有促进作用。Reddy 等^[15] 研究发现昼夜温度为 30/22 $^\circ\text{C}$ 以下时,棉花冠层光合作用随温度上升而增加,CO₂ 倍增后趋势相同。David 等^[16] 研究表明,气温 5 $^\circ\text{C}$ 时小麦叶片净光合速率很小(仅为最大值的 25%),当气温增至适宜范围时小麦叶片净光合速率随之增加,但高温(>25 $^\circ\text{C}$)时则减少并于高温 40 $^\circ\text{C}$

时停止。同时,温度过高会对作物产生抑制作用。由此可见温度升高对农作物光合影响很大,处于高于最适温度条件下的农作物,光合作用受阻,甚至中断或终止作物的正常生育过程。本研究旨在明确我国极度短缺的大豆,特别是高光效大豆的主要体型和产量指标对大气 CO₂浓度升高和全球气候变暖的响应。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选取高光效大豆品种黑农 41(HN41)为研究对象,其光合速率为 $\geq 17.64 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$;常规对照品种选取生育期较为一致的周豆 16 号(ZD16)、中豆 35 号(ZD35)和桂黄豆 2 号(GHD2),所研究的常规对照大豆品种的光合速率范围为 $10.75\text{—}15.48 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。以上 4 个大豆品种均来源于南京农业大学国家大豆改良中心。

1.2 温度和 CO₂浓度试验设置

试验地点为山东省德州市宁津县“气候变化与生物多样性和控害减排(联合)创新研究基地”的 12 套开顶式 CO₂气室(即 OTC—open top chamber; 专利授权号:ZL201120042889.1)^[17]内进行。分别设高 CO₂浓度处理(E—elevated; 566—658 $\mu\text{L/L}$),和正常 CO₂浓度处理(A—ambient; 当前 CO₂浓度水平,381—383 $\mu\text{L/L}$);以及高温处理(+T—high temperature; 日均温 26.10—26.19 $^{\circ}\text{C}$)和常温处理(—T—normal temperature; 日均温 25.55—25.60 $^{\circ}\text{C}$),温差平均为 0.57 $^{\circ}\text{C}$,以模拟近百年来全球 0.7 $^{\circ}\text{C}$ 的温度增幅^[18]。以上 CO₂浓度和温度处理的设置组合分别为 A+T(即正常 CO₂浓度和高温处理),A-T(即正常 CO₂浓度和常温处理),E+T(即高 CO₂浓度和高温处理)和 E-T(即高 CO₂浓度和常温处理),每个处理 3 个 OTC 重复,共计 12 个 OTC 设置。大豆生长期间定期检测与控制 OTC 中 CO₂浓度和温度水平。

1.3 试验设计及指标测定

选取籽粒饱满的 4 个大豆品种种子,于 2012 年 6 月 25 日盆栽种植于 OTC 内,每个 OTC 内每个品种各种植 6 盆,共计 24 盆,每盆播种 6—8 粒种子,播种深度为 2 cm。大豆出苗后定期浇水,使其在最适环境下生长;待幼苗长出真叶后每盆定植 4 株,分别于 8 月 5 日盛花期(即 R2)、8 月 25 日盛荚期(即 R4)、9 月 15 日鼓粒期(即 R6)和 10 月 6 日成熟期(即 R8)记录大豆生长情况,生育期划分参见 Fehr 等^[19]。R2、R4、R6 期测定的大豆生长指标包括株高、茎粗、生物量(即干重)和根冠比。每次调查时每个 OTC 内每个品种各随机测定 2 株大豆的株高和茎粗,以子叶节到茎尖顶端生长点的长度作为株高,测量植株底部第二节间的直径作为茎粗,并取其中 1 株置于烘箱内 65 $^{\circ}\text{C}$ 连续烘干 72 h 后分别测定其地上部(冠层)和地下部(根系)干重作为其生物量,并计算根冠比。R8 期测定单株籽粒重作为其产量指标,即每个 OTC 内每个品种各随机收取 2 株大豆籽粒,烘箱内 65 $^{\circ}\text{C}$ 连续烘干 72 h 后测定其干重。

1.4 数据分析

数据分析采用统计分析软件 SPSS V19.0 进行。其中,采用三因子重复测量方差分析(Three-way Repeated-measured ANOVA)以明确 R2、R4 和 R6 期 CO₂浓度和温度水平、大豆品种及其三者之间的交互作用对株高、茎粗、生物量和根冠比等测定指标的影响;采用三因子方差分析(Three-way ANOVA)以明确 CO₂浓度和温度水平、大豆品种及其三者之间的交互作用对产量的影响。处理间差异显著性采用 LSD(Least-Significant Difference)检验($P<0.05$)。统计分析前,对绝对值数据采用对数转换、对百分比数据进行反正弦平方根转换以满足数据正态分布假设。

2 结果与分析

2.1 CO₂浓度和温度升高对大豆株高和茎粗的影响

株高和茎粗是反应植株生长状况的重要农艺性状。三因子重复测量方差分析表明(表 1),在连续调查的盛花期(R2)、盛荚期(R4)和鼓粒期(R6),两个 CO₂水平之间和 4 个大豆品种之间株高差异极显著($P<$

0.01),而温度及其与 CO₂浓度和品种三者之间的相互交互作用都未显著影响大豆株高($P \geq 0.25$)。图 1 显示,CO₂浓度升高有利于大豆株高的增加,且高温处理下对株高的促进作用更大。与常规光效大豆 ZD16、ZD35 和 GHD2 对 CO₂浓度升高的响应不同,常温处理下 CO₂浓度升高并未导致 R2 和 R4 期高光效大豆 HN41 株高的增加(图 1B)。经 LSD 检验,与对照 CO₂浓度相比,高 CO₂浓度显著促进了高温处理下 HN41、ZD16 和 GHD2 的株高($P < 0.05$; 图 1A、C 和 G),R6 期株高分别显著提高了 18.9%、24.4%和 31.5%,说明高 CO₂浓度在高温处理下对高光效和常规大豆株高都有促进作用;CO₂浓度升高还显著提高了常温处理下 GHD2 的株高($P < 0.05$; 图 1H),R6 期株高显著提高了 8.8%。此外,高温和高 CO₂浓度处理下,HN41 的株高仅显著高于 GHD2($P < 0.05$),但与 ZD16 和 ZD35 的株高差异不显著($P > 0.05$)。

表 1 不同温度和 CO₂浓度下高光效大豆和常规对照品种生长指标的三因子重复测量方差分析,以及产量指标的三因子方差分析(F/P 值)

Table 1 Three-way repeated-measured analysis of variance (ANOVA) on the growth indexes, and three-way ANOVA on the yield index of the soybean cultivar with high photosynthetic efficiency and the control soybean cultivars (F/P values)

测量指标 Measured indexes	[†] CO ₂	[‡] Temp	[§] Cv.	CO ₂ ×Temp	CO ₂ ×Cv.	Temp×Cv.	CO ₂ ×Temp×Cv.
株高 (cm) Plant height	8.49/0.005 **	0.03/0.87	6.42/0.0013 **	1.33/0.25	0.37/0.78	0.16/0.92	0.66/0.58
茎粗 (mm) Stem diameter	6.86/0.011 *	1.99/0.16	21.13 / 000 ***	5.34/0.023 *	0.72/0.55	0.73/0.54	0.80/0.50
单株干重 (g) Dry weight per plant	39.15/0.000 ***	0.008/0.93	5.98/0.002 **	0.33/0.57	0.52/0.68	0.99/0.41	0.32/0.81
根冠比 (%) Ratio of root to shoot	2.13/0.15	0.75/0.39	26.86/0.000 ***	0.008/0.93	1.35/0.28	0.34/0.80	3.95/0.017 *
单株籽粒重 (g) Seeds' weight per plant	50.52/0.000 ***	4.61/0.039 *	65.32/0.000 ***	0.013/0.91	8.80/0.000 ***	0.98/0.42	0.21/0.89

[†]CO₂:CO₂水平(高 CO₂浓度和对照 CO₂浓度) CO₂ levels (elevated CO₂ vs. ambient CO₂); [‡]Temp:温度水平(高温和低温) Temperature levels (high temperature vs. low temperature); [§] Cv.:大豆品种(黑农 41、周豆 16、周豆 35 和桂黄豆 2 号) Soybean cultivars (HN41, ZD16, ZD35 and GHD2); * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

对大豆茎粗而言,调查的 R2、R4 和 R6 期两个 CO₂水平之间($P < 0.05$)和 4 个大豆品种之间($P < 0.001$)差异显著,且存在显著的 CO₂浓度和温度的交互作用(表 1, $P < 0.05$)。图 2 显示,CO₂浓度升高有促进大豆茎粗的趋势,且高温处理下对茎粗的促进作用更大。经 LSD 检验,与对照 CO₂浓度相比,高 CO₂浓度显著提高了高温处理下 ZD16 和 ZD35 的茎粗($P < 0.05$; 图 2C 和 E),R6 期茎粗分别显著提高了 15.0%和 13.0%。此外,同一 CO₂浓度和温度处理下,大豆茎粗依次为 HN41>ZD16>ZD35>GHD2;LSD 检验表明,高光效大豆 HN41 的茎粗显著大于常规光效大豆 ZD35 和 GHD2($P < 0.05$),而与 ZD16 差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 CO₂浓度和温度升高对大豆生物量的影响

生物量是植物光合产物积累的直接体现,也是反映其生长状况的重要农艺性状指标之一。三因子重复测量方差分析表明(表 1),在连续调查的 R2、R4 和 R6 期两个 CO₂水平之间以及 4 个品种之间单株生物产量差异极显著($P < 0.01$),而温度及其与 CO₂浓度、品种三者之间相互的交互作用都未显著影响其生物产量。图 3 显示,CO₂浓度升高有促进大豆生物量的趋势,且常温处理下高 CO₂浓度对大豆干物质积累的促进作用更大。与对照 CO₂浓度相比,高 CO₂浓度显著提高了常温处理下高光效大豆 HN41 和常规光效大豆 ZD16、ZD35 和 GHD2 的生物量,其 R6 期单株干重分别显著增加了 7.3%(图 3B)、4.7%(图 3D)、16.0%(图 3F)和 18.8%(图 3H)。此外,常温和高 CO₂浓度处理下,HN41 的单株生物产量显著高于 ZD16 和 GHD2($P < 0.05$),而与 ZD35 的差异不显著($P > 0.05$)。

2.3 CO₂浓度和温度升高对大豆根冠比的影响

根冠比是植物地下部根系与其地上部冠层生物量的比值,可用来表征其光合作用产物在地下部与地上部组织间的分配结构,是反映植物光合作用产物再分配的重要农艺性状指标。三因子重复测量方差分析表明

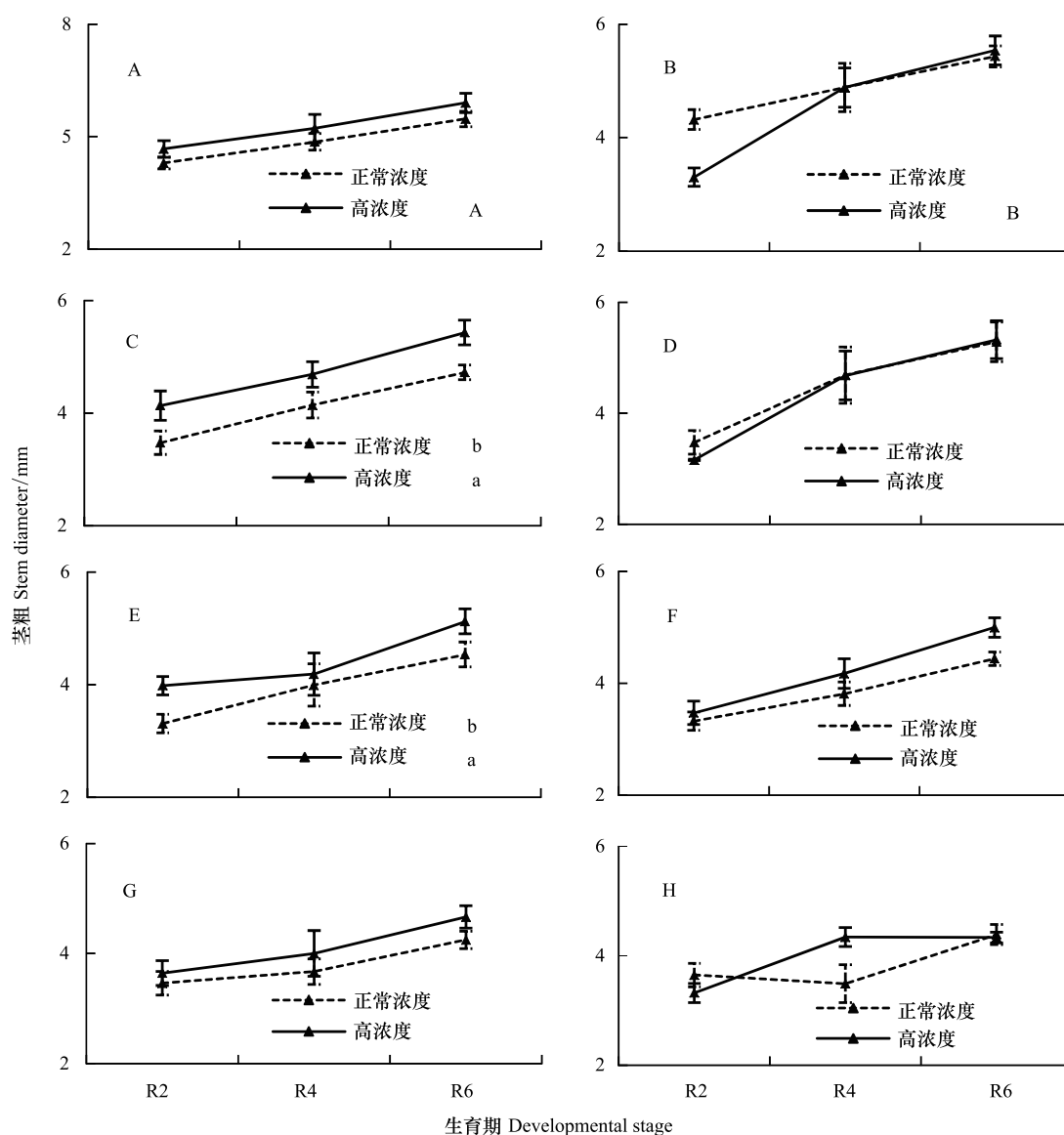


图2 不同温度和 CO₂ 浓度处理下高光效大豆和常规对照品种的茎粗

Fig. 2 Stem diameter of the soybean cultivar with high photosynthetic efficiency and the control cultivars under different levels of CO₂ and temperature

不同小写字母和大写字母分别表示经 LSD 检验同一品种、同一温度下不同 CO₂ 水平间, 以及同一品种、同一 CO₂ 处理下不同温度水平间差异显著, $P < 0.05$

(表 1), 在连续调查的 R2、R4 和 R6 期, 4 个大豆品种之间根冠比差异显著 ($P < 0.001$), 且存在温度、CO₂ 浓度和品种之间显著的三因子交互作用 ($P < 0.05$)。与对照 CO₂ 浓度相比, 高 CO₂ 浓度显著提高了常温处理下高光效大豆 HN41 的根冠比 ($P < 0.05$; 图 4B); 同时, 还显著提高了高温处理下常光效大豆 GHD2 的根冠比 ($P < 0.05$; 图 4G), 并显著降低了常温处理下 GHD2 的根冠比 ($P < 0.05$; 图 4H)。此外, 同一 CO₂ 浓度和温度处理下, HN41 的根冠比显著高于 ZD16、ZD35 和 GHD2 ($P < 0.05$), 而后三者之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 CO₂ 浓度和温度升高对大豆籽粒产量的影响

CO₂ ($P < 0.001$)、温度 ($P < 0.05$) 和品种 ($P < 0.001$) 之间大豆单株籽粒干重差异显著, 还存在 CO₂ 和品种之间显著的交互作用 (表 1, $P < 0.001$)。图 5 显示, 温度和 CO₂ 浓度升高都有增加大豆单株籽粒重的趋势。经 LSD 检验, 与对照 CO₂ 浓度相比, 高 CO₂ 浓度显著提高了高温 (65.4%) 和常温 (97.9%) 处理下高光效大豆 HN41 的单株籽粒重 ($P < 0.05$; 图 5A 和 B) 说明高 CO₂ 浓度更有利于高光效大豆籽粒产量的提高。与常温相

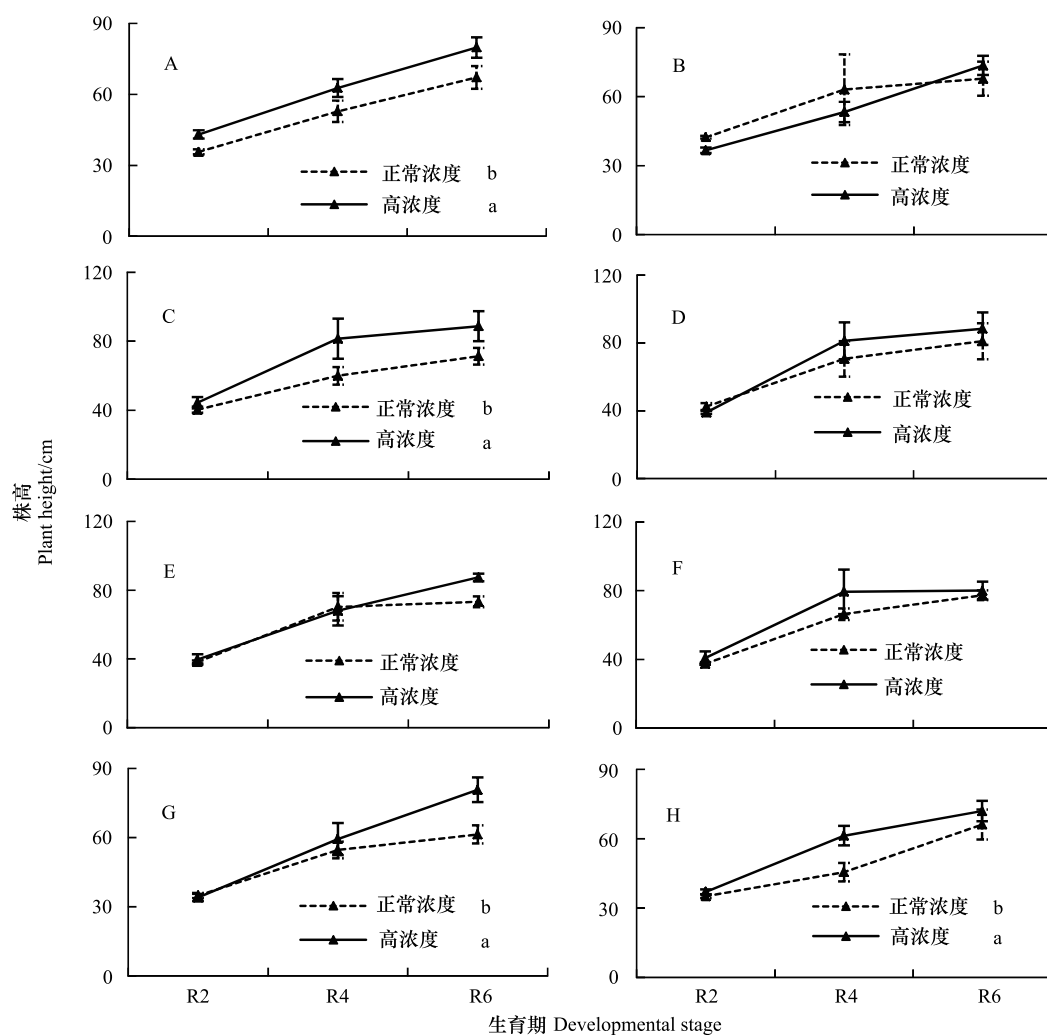


图1 不同温度和 CO₂ 浓度处理下高光效大豆和常规对照品种的株高(高光效大豆:黑浓 41(A 和 B))

Fig. 1 Plant height of the soybean cultivar with high photosynthetic efficiency and the control cultivars under different levels of CO₂ and temperature (Soybean cultivar with high photosynthetic efficiency; cv. HN41 (A and B))

常规对照:周豆 16 号(C 和 D)、中豆 35 号(E 和 F)、桂黄 2 号(G 和 H)。A、C、E、G 为高温处理,B、D、F、H 为低温处理;R2-盛花期,R4-盛荚期,R6-鼓粒期;以下同。不同小写字母表示经 LSD 检验同一品种、同一温度下不同 CO₂ 水平间差异显著($P < 0.05$)

比,高温仅显著提高了对照 CO₂ 浓度处理下 HN41 的单株籽粒重(31.6%; $P < 0.05$; 图 5A 和 B)。此外,同一 CO₂ 浓度和温度处理下,HN41 的单株籽粒重显著高于 ZD16、ZD35 和 GHD2,增产达 45.7%—193.1% ($P < 0.05$);而后三者之间差异不显著($P > 0.05$)。

3 讨论与结论

众所周知,CO₂ 是植物进行光合作用的原料。从理论上讲,大气 CO₂ 增加对植物有“施肥效应”,尤其是有利于提高 C₃ 植物(如小麦、水稻、大豆、棉花等)的光合作用和生产力^[10,20]。另一方面,大气 CO₂ 浓度升高所造成的温室效应(Greenhouse Effects)又会导致全球温度升高、气候变暖^[21-22]。可见,大气 CO₂ 浓度升高和全球变暖是同步发生的^[23]。因此,大气 CO₂ 浓度升高的环境下温度升高,而温度升高将使得植物的有效日积温增加,从而使植物的生育期提前^[24]。可见,温度和 CO₂ 浓度联合作用对植物光合作用和生长发育的影响更为复杂。一般而言,当前大气 CO₂ 浓度对植物的光合作用是不饱和的^[25]。因此,大气中 CO₂ 浓度增加可提高植物的光合作用,有利于植物的生长。

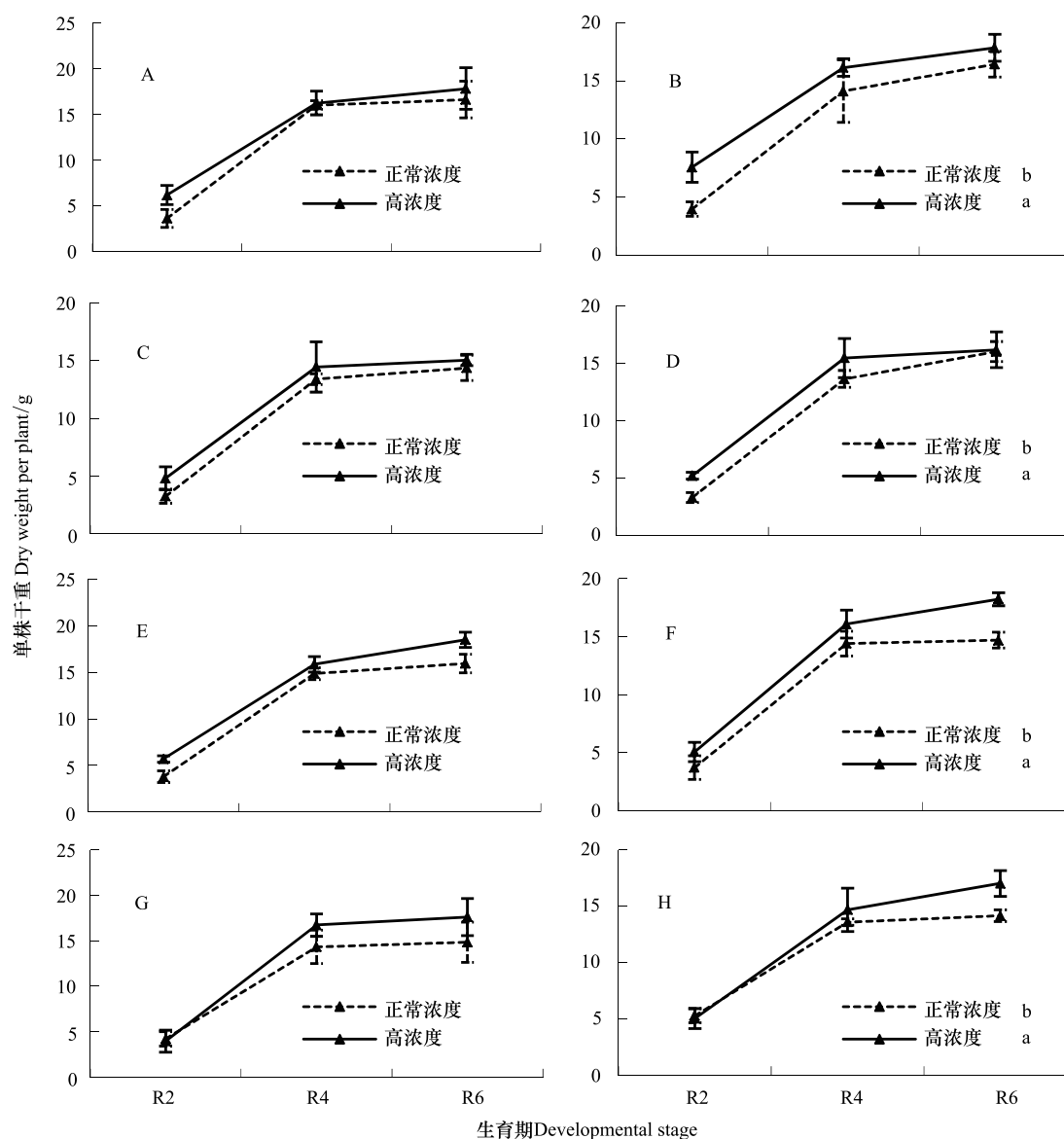


图 3 不同温度和 CO₂ 浓度下高光效大豆和常规对照品种的生物量

Fig. 3 Biomass production of the soybean cultivar with high photosynthetic efficiency and the control cultivars under different levels of CO₂ and temperature

不同小写字母表示经 LSD 检验同一品种、同一温度下不同 CO₂ 水平间差异显著, $P < 0.05$

对于高光效的大豆品种 HN41 而言,其光合作用的“CO₂ 饱和点”更高^[26]。可以推测,大气 CO₂ 浓度升高下其高效的光合速率也必将得到更好地发挥,进而有利于其生长,并有助于光合产物的更多积累。本研究结果表明,CO₂ 浓度升高显著影响了大豆的株高和茎粗,低温处理下除了 HN41 外,CO₂ 浓度升高有促进各品种大豆株高和茎粗的趋势。与对照 CO₂ 浓度比,CO₂ 浓度升高显著促进了高温处理下 HN41、ZD16 和 GHD2 的株高,但温度的作用不显著。另一方面,CO₂ 浓度和温度的交互作用还显著影响大豆茎粗指标。与对照 CO₂ 浓度相比,CO₂ 浓度升高显著提高了高温处理下 ZD16 和 ZD35 的茎粗。此外,同一 CO₂ 浓度和温度处理下,HN41 茎粗最大,显著大于 ZD35 和 GHD2。已有研究证实大豆株高与倒伏为正相关,茎粗与倒伏为负相关^[27]。可见,未来大气 CO₂ 浓度升高和全球变暖同步发生的情况下高光效大豆 HN41 具备更强的抗倒伏能力,进而有利于保产增收。

Reinert 等^[28] 研究结果表明,CO₂ 浓度升高下植物的叶片、茎秆、根及总干重都会增加。本研究结果表明,

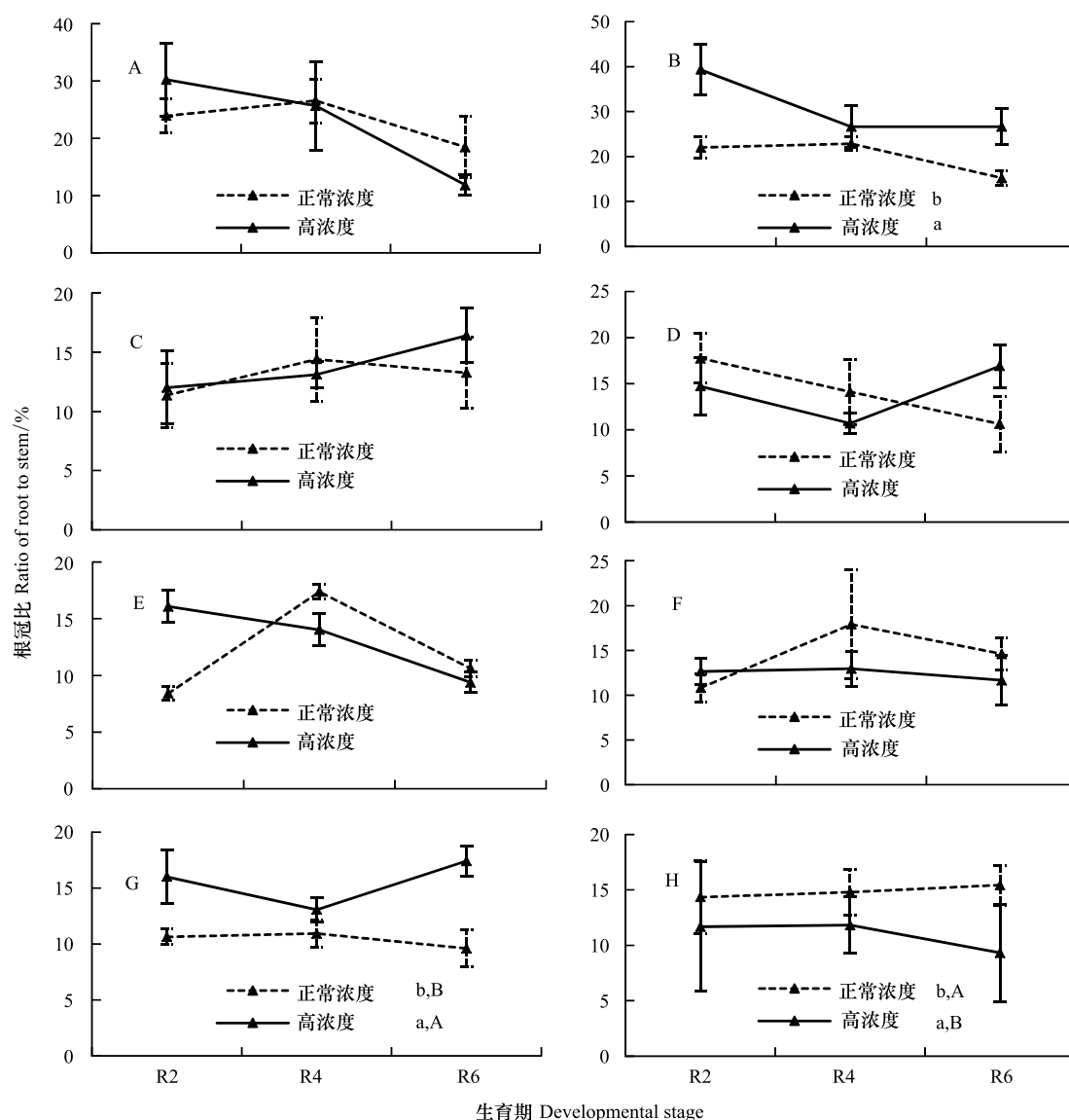


图4 不同温度和 CO₂ 浓度处理下高光效大豆和常规对照品种的根冠比

Fig. 4 Root to shoot ratio of the soybean cultivar with high photosynthetic efficiency and the control cultivars under elevated levels of CO₂ and temperature

不同小写字母和大写字母分别表示经 LSD 检验同一品种、同一温度下不同 CO₂ 处理间, 以及同一品种、同一 CO₂ 浓度下不同温度处理间差异显著, $P < 0.05$

与对照 CO₂ 处理相比, CO₂ 浓度升高显著提高了常温处理下 HN41、ZD16、ZD35 和 GHD2 的生物量, R6 期单株干重分别增加了 7.3%、4.7%、16.0% 和 18.8%; 而高温处理下 CO₂ 浓度升高的增加效果不显著。温度和 CO₂ 浓度变化显著影响了高光效大豆 HN41 的单株籽粒产量。与对照 CO₂ 浓度相比, CO₂ 浓度升高在常温和高温下都显著提高了 HN41 的单株籽粒重; 与常温相比, 高温仅显著提高了对照 CO₂ 浓度处理下 HN41 的单株籽粒重, 而在高 CO₂ 浓度下 HN41 的增产不显著。CO₂ 浓度升高有增加大豆株高、茎粗、单株干重和单株籽粒重的趋势, 这一结果与张朋^[5]、黄辉^[7]、王修兰^[29] 等的研究结果相同, CO₂ 浓度和温度升高显著影响了高光效大豆的生长, 其中, 高温下 CO₂ 浓度升高有利于其生长势, 正常温度下 CO₂ 浓度升高有利于其光合产物积累。大豆高光效育种目标是选育高产和超高产、优质抗病新品种(种质)^[30]。大豆高光效育种更侧重于从提高作物光能利用效率角度出发, 选育的高光效高产品种既具有形态、株型和群体最大限度地吸收光能, 又具有自身生理功能改善, 最大限度地提高光能的传递效率和光能转化效率, 构成理想光合生态型^[31]。

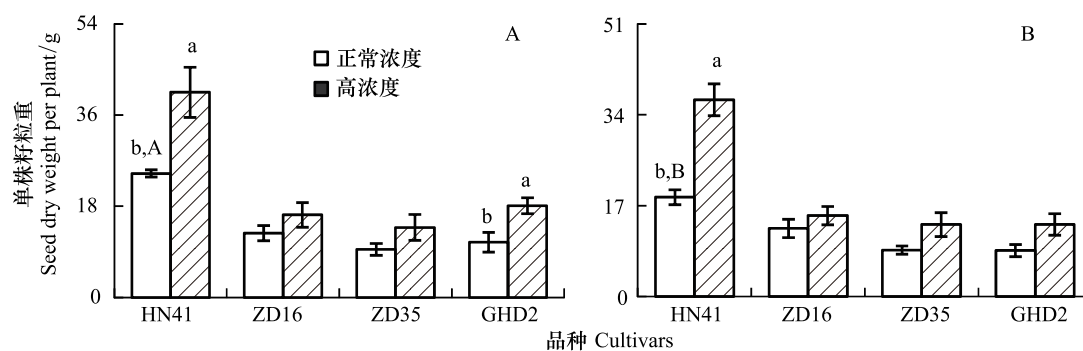


图 5 不同温度和 CO₂ 浓度处理下高光效大豆和常规对照品种的单株籽粒产量

Fig. 5 Seed yield of the soybean cultivar with high photosynthetic efficiency, and the control cultivars under different levels of CO₂ and temperature

A 为高温处理, B 为常温处理; 不同小写字母和大写字母分别表示经 LSD 检验同一品种、同一温度下不同 CO₂ 水平间, 以及同一品种、同一 CO₂ 浓度下不同温度水平间差异显著, $P < 0.05$

致谢: 感谢南京农业大学国家大豆改良中心提供试验用大豆种源; 感谢南京农业大学刘满强教授、华南农业大学吴蔼民教授协助润色英文摘要。

参考文献 (References):

- [1] Leakey A D B, Uribeharrea M, Ainsworth E A, Naidu S L, Rogers A, Ort D R, Long S P. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. *Plant Physiology*, 2006, 140(2): 779-790.
- [2] Olszyk D M, Tingey D T. Joint action of O₃ and SO₂ in modifying plant gas exchange. *Plant Physiology*, 1986, 82(2): 401-405.
- [3] Ainsworth E A, Rogers A, Vodkin L O, Walter A, Schurr U. The effects of elevated CO₂ concentration on soybean gene expression an analysis of growing and mature leaves. *Plant Physiology*, 2006, 142(1): 135-147.
- [4] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, Van Der Plicht J. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 1995, 375(6533): 660-670.
- [5] 张朋, 张文会, 苗秀莲, 李会, 刘丽丽, 张雯雯. CO₂ 浓度倍增对大豆生长及光合作用的影响. *大豆科学*, 2010, 29(1): 64-69.
- [6] 郑宝香, 满为群, 杜维广, 梁晓燕, 刘鑫磊, 马岩松. 高光效大豆光合速率与主要光合生理指标及农艺性状的关系. *大豆科学*, 2008, 27(3): 397-401.
- [7] 黄辉, 王春乙, 白月明, 温民. O₃ 与 CO₂ 浓度倍增对大豆叶片及其总生物量的影响研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 52-55.
- [8] Wu K J. Effects of air CO₂ elevation on the relationship between plants and insects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(2): 198-202.
- [9] Pitelka L F. Ecosystem response to elevated CO₂. *Trends in Ecology and Evolution*, 1994, 9(6): 204-207.
- [10] Rogers H H, Dahlman R C, Krupa S V. Plant responses to CO₂ enrichment. *Vegetatio*, 1994, 104: 117-131.
- [11] Luo Y Q, Reynolds J, Wang Y P, Wolfe D. A search for predictive understanding of plant responses to elevated CO₂. *Global Change Biology*, 1999, 5(2): 143-156.
- [12] Bezemer T M, Jones T H. Plant insect herbivore interactions in elevated atmospheric CO₂ quantitative analyses and guild effects. *OIKOS*, 1998, 82(2): 212-222.
- [13] 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.
- [14] 廖建雄, 王根轩. 干旱、CO₂ 和温度升高对春小麦光合、蒸发蒸腾及水分利用效率的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 547-550.
- [15] Reddy V R, Reddy K R, Hodges H F. Carbon dioxide enrichment and temperature effects on cotton canopy photosynthesis, transpiration, and water-use efficiency. *Field Crops Research*, 1995, 41(1): 13-23.
- [16] David W, Rowan A C. Crop ecosystem responses to climatic change: Wheat // Reddy K R, Hodges H F, eds. *Climate Change and Global Crop Productivity*. New York, USA: CABI Press, 2000: 57-80.
- [17] 陈法军, 万贵钧, 党志浩. 一种开顶式气室及温室效应模拟试验装置: 中国, 201120042889. 1, 2011-10-05.
- [18] ICSU (International Council for Science). Statement by ICSU on the Controversy Around the 4th IPCC Assessment. 23 February, 2010.

- [19] Fehr W R, Caviness C E, Burmood D T, Pennington J S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, 1971, 11(6): 929-931.
- [20] Rogers H H, Runion G B, Krupa S V. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environmental Pollution*, 1994, 83(1/2): 155-189.
- [21] 丁一汇. IPCC 第二次气候变化科学评估报告的主要科学成果和问题 // 丁一汇主编. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京: 气象出版社, 1997: 369-380.
- [22] 方精云, 位梦华. 北极陆地生态系统的碳循环与全球温暖化. *环境科学学报*, 1998, 18(2): 113-121.
- [23] Unsworth M H, Hogett W E. Combined efforts of changing CO₂, temperature, UVB radiation and O₃ on crop growth // Bazzaz F, Sombroek W, eds. *Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and indirect efforts of Changing Hydrological. Pedological and Plant Physiological Processes*, 1996: 171-179.
- [24] Whittaker J B. Insects and plants in a changing atmosphere. *Journal of Ecology*, 2001, 89(4): 507-518.
- [25] 方精云, 庄亚辉. 全球生态学—气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社和施普林格出版社, 2000.
- [26] 杜维广, 陈怡, 张桂茹, 栾晓燕, 满为群, 谷秀芝. 高脂肪和高光效的高产稳产抗病大豆新品种黑农 41 选育与推广. *黑龙江农业科学*, 2003, (1): 1-4.
- [27] 周蓉, 王贤智, 陈海峰, 张晓娟, 单志慧, 吴学军, 蔡淑平, 邱德珍, 周新安, 吴江生. 大豆倒伏性及其相关性状的 QTL 分析[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 57-65.
- [28] Reinert R A, Ho M C. Vegetative growth of soybean as affected by elevated carbon dioxide and ozone. *Environmental Pollution*, 1995, 89(1): 89-96.
- [29] 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[J]. *作物学报*, 1994, 20(5): 520-527.
- [30] 杜维广, 张桂茹, 满为群, 陈怡, 栾晓燕, 郝乃斌, 戈巧英, 谷秀芝. 大豆高光效品种(种质) 选育及高光效育种再探讨. *大豆科学*, 2001, 20(2): 110-114.
- [31] 满为群, 杜维广, 郝迺斌. 大豆高光效育种研究. *大豆科学*, 2009, 28(3): 382-387.