

大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜生长发育 和繁殖的影响及其作用方式

陈法军, 吴 刚, 戈 峰*

(中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理国家重点实验室, 北京 100080)

摘要:通过开顶式 CO₂ 气室试验研究了大气 CO₂ 浓度升高((553±27)μl/L 和(754±33)μl/L vs. (376±22)μl/L)对连续 3 代棉蚜的生长发育和繁殖的影响及其作用方式——直接影响、间接作用或直接和间接影响的共同作用。试验结果表明:对于间接作用试验及直接和间接影响的共同作用试验而言,大气 CO₂ 浓度升高可显著影响棉蚜的体重和平均相对增长率(MRGR)。与对照 CO₂ 处理组相比,间接作用试验中(754±33)μl/L CO₂ 处理组棉蚜的虫体重和 MRGR 都显著增加;直接和间接影响的共同作用试验中两个高 CO₂ 处理组((553±27)μl/L 和(754±33)μl/L)棉蚜的虫体重也显著增加,(754±33)μl/L CO₂ 处理组棉蚜的 MRGR 也显著提高。此外,通过大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜作用方式的分析得出:(1) 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜的生长发育和繁殖的直接影响甚微;CO₂ 浓度变化主要通过影响寄主植物而间接作用于蚜虫。(2) 大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜的影响表现出一个长期的效应、多代的作用。(3) 大气 CO₂ 浓度增加对蚜虫的间接作用试验与直接和间接影响的共同作用试验的结果相同。

关键词:CO₂; 棉花; 生长发育; 繁殖; 直接影响; 间接作用

文章编号:1000-0933(2005)10-2601-07 中图分类号:Q143,Q968,S435,622.1 文献标识码:A

Impacts of elevated CO₂ on the growth, development and reproduction of cotton aphid *Aphis gossypii* (Glover)

CHEN Fa-Jun, WU Gang, GE Feng* (State Key Laboratory of integrated Management of Pest and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2601~2607.

Abstract:The direct and / or indirect effect of elevated CO₂((553±27)μl/L and (754±33)μl/L vs. (376±22)μl/L) on the growth, development and fecundity of successively three generations of the cotton aphid *Aphis gossypii* (Glover) feeding on cotton (cv. Simain-3) plants were studied by control-environment experiments in open-top chambers (OTC). The results indicated that CO₂ rising significantly affected body weight and mean relative growth rate (MRGR) of *A. gossypii* for both experiments of indirect effect treatment and direct and indirect effect treatment. Contrast to ambient CO₂, significant increases were shown in body weight and MRGR of aphid feeding on cotton plants grown in (754±33)μl/L CO₂ for the experiment of indirect effect treatment; significant increases were also found in body weigh of aphid for two elevated CO₂ treatments of the experiment of direct and indirect effect, and MRGR was also significantly higher for aphid feeding on cotton plants grown in (553±27)μl/L CO₂. Moreover, some conclusions were also gained, i. e. (1) the direct effects of elevated CO₂ on cotton aphid were weak or none, and the effect was mainly indirect by affecting host plants of cotton. (2) The effect of elevated CO₂ on the growth, development and fecundity of *A. gossypii* was a long-term and multi-generation impact. (3) There were similar

基金项目:中国科学院知识创新前沿资助项目(KSCX3-IOZ-04);国家重点基础发展规划(973)资助项目(G2000016209);国家自然科学基金资助项目(30571253)

收稿日期:2004-10-28;**修订日期:**2005-05-24

作者简介:陈法军(1974~),男,山东济南人,博士,主要从事昆虫生态学研究. E-mail:chenfj@ioz.ac.cn

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail:gef@ioz.ac.cn

Foundation item:the National Key Basic Research Project "973 Project" on pest management (No. G200016209) and Innovation Research of Chinese Academy of Science (No. KSCX3-IOZ-04);National Natural Science Foundation of China(No. 30571253)

Received date:2004-10-28;**Accepted date:**2005-05-24

Biography:CHEN Fa-Jun, Ph. D., mainly engaged in insect ecology. E-mail:chenfj@ioz.ac.cn

results from both of the indirect-effect experiment and the experiment of direct and indirect impact, i. e. the effects of elevated CO₂ on growth, development and fecundity of cotton aphid were the same when *A. gossypii* was reared with detached tissues (i. e. leaves) of elevated CO₂-grown cotton plants.

Key words: CO₂; cotton; growth; development; fecundity; direct effect; indirect impact

目前,全球正面临着大气 CO₂ 浓度升高的问题。据报道,1700~1900 年,大气 CO₂ 浓度升高了近 10 μ l/L,达到 290 μ l/L;而 1900~1998 年,大气 CO₂ 浓度则升高了 77 μ l/L,达到了 367 μ l/L;并预计在 21 世纪 50 年代,CO₂ 浓度将加倍,即增加到 700 μ l/L 左右^[1~4]。CO₂ 是植物进行光合作用的原料,其浓度增加对植物有“施肥效应”^[5,6],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^[7,8]。同时,也引起植物化学组分和营养价值的改变,如降低了组织的含氮量,增加了 C/N 比等^[9,10]。这些变化又将影响到以之为食的昆虫的生长发育^[11~13],进而通过食物链影响到天敌昆虫的发生^[14]。目前,国内外非常重视大气 CO₂ 浓度变化对昆虫的影响,并开展了大量的研究^[15~17]。

大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的影响可分为直接影响和间接作用。研究方法大体经历了控制环境试验阶段(Controlled Environment, CE),开顶式同化箱试验阶段(Open-top Chamber, OTC)和开放式大气 CO₂ 浓度升高试验阶段(Free-air CO₂ Enrichment, FACE)^[18]3 个阶段。控制环境试验阶段是将寄主植物放入封闭设施内进行不同浓度 CO₂ 气体熏蒸处理,然后用处理后的寄主植物组织饲喂昆虫^[19,20];或者直接将昆虫饲养于封闭式熏气罩内的植物上^[21]。开顶式气室试验阶段也主要是用高 CO₂ 浓度处理后的离体组织饲喂昆虫,或将昆虫直接饲养在高 CO₂ 浓度的开顶式气室内^[22]。这些研究存在一个十分重要的问题,即大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的影响方式,是直接影响,间接作用,还是两种方式共同起作用?至今,有关大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的影响方式尚缺乏严格的试验研究。

本文通过开顶式同化箱试验(OTC),以棉花作为寄主植物,研究大气 CO₂ 浓度升高((553±27) μ l/L、(754±33) μ l/L 和 (376±22) μ l/L)对连续饲养的 3 代棉蚜的生长发育和繁殖的影响,并分析大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的作用方式,即直接影响、间接作用或两种方式共同起作用,以明确这方面试验设计的前提假设的一致性,并阐明未来大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜的作用方式及其影响。

1 材料和方法

1.1 开顶式气室

开顶式气室(OTC)的物理结构和 CO₂ 浓度自动控制系统详见陈法军和戈峰^[23]以及陈法军等^[24]。

试验设置 3 个大气 CO₂ 浓度,即当前的大气 CO₂ 浓度(370 μ l/L CO₂ 或 Ambient CO₂),高出当前近 50%的大气 CO₂ 浓度(550 μ l/L CO₂ 或 1.5x Ambient)和高出当前近一倍的大气 CO₂ 浓度(750 μ l/L 或 2x Ambient CO₂)。每个 OTC 设置一个 CO₂ 浓度水平。

试验期间,全天 24h 通气。3 个 OTC 内实际控制的日平均 CO₂ 浓度分别为(376±22) μ l/L、(553±27) μ l/L 和(754±33) μ l/L;日平均气温分别为(26.8±3.8)C(Ambient CO₂),(26.4±4.8)C(1.5x Ambient CO₂)和(26.5±4.0)C(2x Ambient CO₂)。经 LSD 检验,3 个 OTC 之间日平均温度差异不显著($p>0.05$)。

1.2 供试材料

1.2.1 供试棉花 试验所用棉花品种为“Simian-3”,属于常规栽培品种。6 月 12 日,将棉花播种于塑料盆钵(直径:高=35 cm:45 cm)中;7 月 12 日,移入开顶式气室内;7 月 13 日,开始通 CO₂ 气体。试验用土壤为壤土:干牛粪:干蚯蚓粪=8:3:1,每个开顶式气室内各随机放置 30 盆,每盆 2 株棉花。每周 3 个气室内的棉花轮换放置,以减少气室之间小气候差异。试验期间,不使用任何化肥和农药,每隔 2d 浇水 1 次,每盆 1000~2000ml。开顶式气室顶部用 80 目纱网罩住,以防止外面的昆虫侵入。

1.2.2 供试棉蚜 棉蚜 *Aphis gossypii*(Glover)采自中科院动物所实验地棉田。田间采回的无翅成蚜先接种于人工培养箱里的棉苗(Simain-3)上,扩大种群并保种以备试验用。人工气候箱的温度:白天,(28±1)C;夜间,(26±1)C;相对湿度为 60%~70%,光周期为 14L:10D;光照强度为 9000 lx。

1.3 大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜生长发育和繁殖的影响

随机取 1.2.2 中供试棉蚜的当日龄若蚜作为试验的初始种群。试验处理的设置见表 1。

1.3.1 直接影响 8 月 17 日,随机取棉蚜初始种群的当日龄若蚜,随机取对照组 OTC 内棉花的棉叶放于玻璃培养皿(直径为 7.5cm)中饲养棉蚜,每皿 1 头,并用植物营养液^[25]保鲜,每 2d 更换 1 次棉叶和植物营养液。培养皿分别放于 3 个 OTC 内,每个 OTC 内 10 个皿。每天观察棉蚜的蜕皮、产卵、死亡等情况,并用十万分之一精度电子天平称取棉蚜一日龄和 4 龄若蚜体重,测定其相对增长率^[26]。8 月 23 日取当日所产若蚜作为第 2 代,8 月 30 日起第 2 代所产的当日龄若蚜作为第 3 代。第 2 代和第 3 代的饲养方法同第 1 代。

表 1 试验处理的设置

Table 1 Setup of the experiments

试验 Experiment	作用方式 Types of effect	试验气室 Chambers	寄主植物 Host plant	棉蚜 <i>Aphis gossypii</i>	
试验一 Experiment 1	直接作用 Direct effect	OTC1	Simian-3 in OTC1	随机取寄主植物叶片,置于直径 7 mm 的玻璃培养皿中饲养棉蚜,培养皿分别放置于 OTC1,OTC2 和 OTC3 中。培养皿中预先倒入 0.2~0.3cm 改良的植物组织营养液	
		OTC2	Simian-3 in OTC1		
		OTC3	Simian-3 in OTC1		
试验二 Experiment 2	间接作用 Indirect impact	OTC1	Simian-3 in OTC1	OTC1 内饲养,饲养方法同试验一	
		OTC1	Simian-3 in OTC2		
试验三 Experiment 3	共同作用 Direct and indirect effect	OTC1	Simian-3 in OTC1	OTC1 内饲养,饲养方法同试验一	
		OTC2	Simian-3 in OTC2		OTC2 内饲养,饲养方法同试验一
		OTC3	Simian-3 in OTC3		

OTC1-开顶式气室 1,对照气室,不通 CO₂ 气体;OTC2-开顶式气室 2,550 μ L CO₂;OTC3-开顶式气室 3,750 μ L CO₂。试验用棉蚜为 1 日龄若蚜;随机取自对照种群 OTC1-Open-top chamber 1, ambient CO₂; OTC2-Open-top chamber 2, 550 μ L CO₂; OTC3-Open-top chamber 3, 750 μ L CO₂;Test aphids were the 1st-day nymphs randomly taken from stock population

1.3.2 间接作用 8月17日,随机取棉蚜初始种群的当日龄若蚜,分别用3个 OTC 内的棉花的棉叶饲养于玻璃培养皿内,培养皿全部放于对照组 OTC 内。样本大小、饲养方法及世代数同 1.3.1。

1.3.3 共同作用 8月17日,随机取棉蚜初始种群的当日龄若蚜,分别用3个 OTC 内的棉花的棉叶饲养于玻璃培养皿内,培养皿分别放于各自对应的 OTC 内,样本大小、饲养方法和世代数同 1.3.1。

1.4 统计分析

用 SAS6.12 统计软件(SAS Institute, USA, 1996)的方差分析(ANOVA)来进行试验数据的统计和分析。

对直接影响试验,用双因子方差分析(Two-way ANOVA)来研究棉蚜世代和 CO₂ 对棉蚜生长发育和繁殖的影响。处理组间差异显著性采用 LSD 检验。对间接作用试验,也采用双因子方差分析(Two-way ANOVA)来研究棉蚜世代和气室对棉蚜生长发育和繁殖的影响。其中,气室 1(OTC1)、气室 2(OTC2)、气室 3(OTC3)对应着 3 个 CO₂ 浓度设置水平,即 Ambient CO₂, 550 μ L CO₂ 和 750 μ L CO₂。处理组间差异显著性也采用 LSD 检验。对直接和间接影响的共同作用试验,同样采用双因子方差分析(Two-way ANOVA)来研究棉蚜世代和 OTC / CO₂ 对棉蚜生长发育和繁殖的影响。由于 OTC 与 CO₂ 一一对应(即 OTC1 - Ambient CO₂, OTC2-550 μ L CO₂, OTC3-750 μ L CO₂),两者可以作为一个作用因子看待。处理组间差异显著性同样采用 LSD 检验。

2 结果和分析

2.1 大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜的生长发育和繁殖的直接影响

大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜的产卵前期(图 1a)、世代历期(图 2a)、繁殖力(图 3a)、虫体重(图 4a)和平均相对增长率(MRGR; 图 5a)的直接影响都不显著。

不同世代和 CO₂ 浓度的直接作用的双因子方差分析表明(表 2),只有世代间棉蚜的产卵前期($p < 0.001$)差异显著;而其它因子及因子间的交互作用对棉蚜的生长发育和繁殖的影响均未达到显著水平($p > 0.05$)。

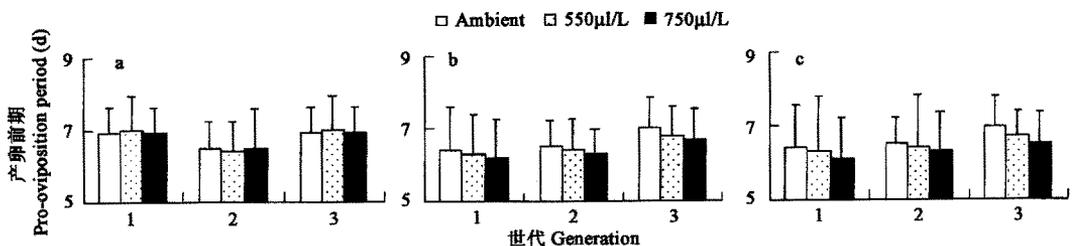


图 1 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜产卵前期的影响

Fig. 1 Effects of elevated CO₂ on the pre-oviposition period (Mean+SE) of the three successive generations of cotton aphid *Aphis gossypii* (Glover)

(a)直接影响 Direct effect; (b)间接作用 Indirect effect; (c)直接和间接影响共同作用 Direct and indirect effect;下同 the same below

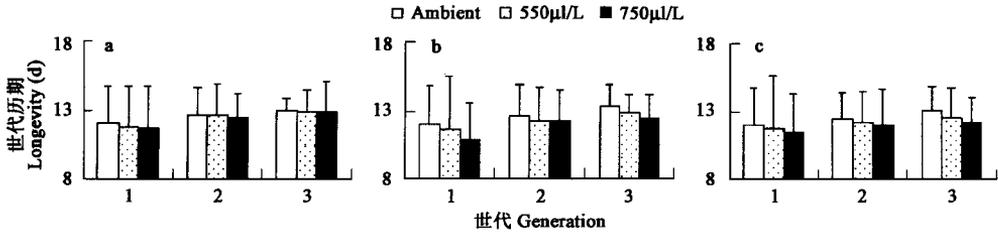


图 2 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜世代历期的影响

Fig. 2 Effects of elevated CO₂ on the longevity (Mean + SE) of the three successive generations of cotton aphid *A. gossypii*

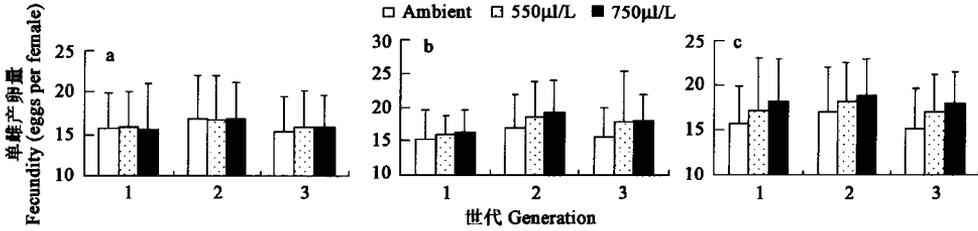


图 3 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜繁殖力的影响

Fig. 3 Effects of elevated CO₂ on the fecundity (Mean + SE) of the three successive generations of cotton aphid *A. gossypii*

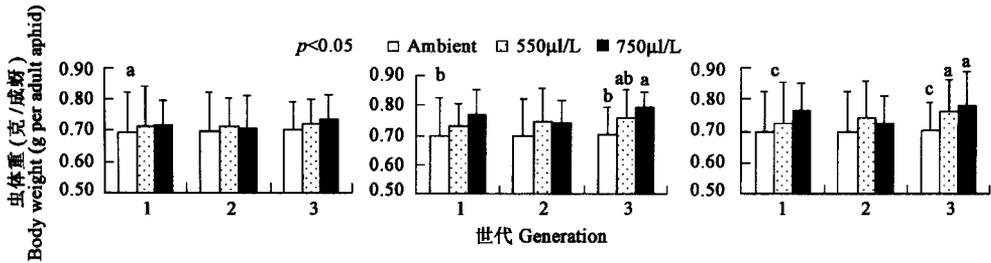


图 4 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜体重的影响

Fig. 4 Effects of elevated CO₂ on body weight (Mean + SE) of the three successive generations of cotton aphid *A. gossypii*

不同字母表示经 LSD 检验, 处理间差异达到了显著水平, $p < 0.05$ Different letters show significant difference between treatments by LSD test at $p < 0.05$; 下同 the same below

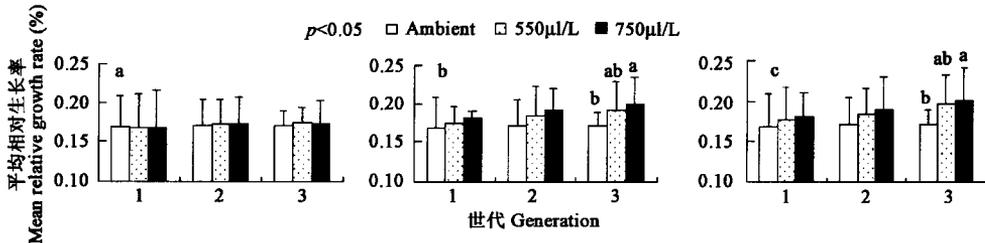


图 5 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜平均相对生长率的影响

Fig. 5 Effects of elevated CO₂ on mean relative growth rate (MRGR; Mean + SE) of the three successive generations of cotton aphid *A. gossypii*

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜的生长发育和繁殖的间接作用

随着大气 CO₂ 浓度的升高, 连续 3 代棉蚜的产卵前期和世代历期都随之缩短(图 1b 和图 2b), 繁殖力、虫体重和 MRGR 都有所提高(图 3b、图 4b 和图 5b)。经 LSD 检验, 750µL/L CO₂ 浓度处理组第 3 代棉蚜的虫体重(图 4b, $p < 0.05$)和 MRGR(图 5b, $p < 0.05$)都显著高于对照 CO₂ 处理组。

表 2 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜直接影响的双因子方差分析Table 2 Two-factor ANOVAs of the direct effects of elevated CO₂ on the successive three generations of cotton aphid, *A. gossypii*

种群参数 Population indexes	作用因子 Factors <i>F</i> (<i>P</i>)		
	世代 Generation	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	交互作用 Interactions
产卵前期 Pre-oviposition period	3.26 (0.043)	0.01 (0.99)	0.05 (0.995)
世代历期 Longevity	1.90 (0.16)	0.04 (0.96)	0.01 (0.9998)
繁殖力 Fecundity	0.63 (0.54)	0.01 (0.99)	0.03 (0.998)
平均相对增长率 Mean relative growth rate (MRGR)	0.13 (0.88)	0.01 (0.99)	0.02 (0.9993)
体重 Body weight	0.14 (0.88)	0.42 (0.66)	0.05 (0.996)

双因子方差分析表明(表 3),取食来自不同气室内的寄主植物可显著影响棉蚜的虫体重($p < 0.01$)和 MRGR($p < 0.05$);对世代历期也有一定的影响($p = 0.089$),而对产卵前期的影响亦接近显著水平($p = 0.055$);其它因子及因子间的交互作用对棉蚜的生长发育和繁殖的影响均未达到显著水平($p > 0.05$)。

表 3 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜间接影响的双因子方差分析Table 3 Two-factor ANOVAs of the indirect effects of elevated CO₂ on the successive three generations of cotton aphid, *A. gossypii*

种群参数 Population indexes	作用因子 Factors <i>F</i> (<i>P</i>)		
	世代 Generation	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	交互作用 Interactions
产卵前期 Pre-oviposition period	3.01 (0.055)	0.51 (0.60)	0.01 (0.9996)
世代历期 Longevity	2.49 (0.089)	0.90 (0.41)	0.09 (0.99)
繁殖力 Fecundity	2.01 (0.14)	1.39 (0.25)	0.10 (0.98)
平均相对增长率 Mean relative growth rate (MRGR)	1.27 (0.29)	3.39 (0.039)	0.23 (0.92)
体重 Body weight	0.49 (0.62)	4.04 (0.021)	0.23 (0.92)

2.3 大气 CO₂ 浓度升高对棉蚜的生长发育和繁殖的直接与间接影响的共同作用

大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜的直接和间接影响的共同作用表明,高 CO₂ 浓度处理组棉蚜的产卵前期和世代历期都比对照 CO₂ 处理组的短(图 1c 和图 2c),繁殖力、虫体重和 MRGR 都与对照组相比都有所提高(图 3c、图 4c 和图 5c)。经 LSD 检验,与对照 CO₂ 处理组的棉蚜相比,550 μ L 和 750 μ L CO₂ 处理组第 3 代棉蚜的虫体重显著增加(图 4c; $p < 0.05$);此外,750 μ L CO₂ 处理组的第 3 代棉蚜的 MRGR 也显著增加(图 5c; $p < 0.05$)。

双因子方差分析的结果表明(表 4),在不同 CO₂ 处理组气室内的寄主棉花上取食可显著影响棉蚜的虫体重和 MRGR($p < 0.05$),而其它因子及因子间的交互作用对棉蚜的生长发育和繁殖的影响均未达到显著水平($p > 0.05$)。

表 4 大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜直接和间接影响的两因子方差分析Table 4 Two-factor ANOVAs of the direct and indirect effects of elevated CO₂ on the successive three generations of cotton aphid, *A. gossypii*

种群参数 Population indexes	作用因子 Factors <i>F</i> (<i>P</i>)		
	世代 Generation	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	交互作用 Interactions
产卵前期 Pre-oviposition period	1.51 (0.23)	0.73 (0.49)	0.06 (0.99)
世代历期 Longevity	0.95 (0.39)	0.47 (0.63)	0.02 (0.9991)
繁殖力 Fecundity	0.64 (0.53)	2.08 (0.13)	0.03 (0.998)
平均相对增长率 MRGR	1.17 (0.32)	3.79 (0.027)	0.23 (0.92)
体重 Body weight	0.70 (0.50)	4.85 (0.023)	0.30 (0.88)

3 讨论

尽管国内外已开展了大量试验来研究大气 CO₂ 浓度变化对于昆虫的影响,至今,许多方面还存在着很大的不可知性^[27]。与短期试验以及离体研究相比,长期的试验以及在整株植物上危害的研究表明,植食性昆虫对于大气 CO₂ 浓度升高的反应不同^[15]。而大气 CO₂ 浓度升高对于昆虫的直接影响甚微^[28]。

本试验的结果表明,大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜的生长发育和繁殖的直接影响甚微,甚至没有影响;对照表 3 和表 4,本试验的结果显示,大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的生长发育和繁殖影响的间接作用试验与直接和间接影响共同作用试验的结果基本相同。这表明 CO₂ 浓度变化主要是通过间接作用,即通过影响寄主植物而间接作用于昆虫的生长发育和繁殖。目前主要有营养补偿假说(Nutrient Complementation Hypothesis, NH)^[29],毒素假说(Toxins Hypothesis, TH)^[30, 31]和碳营养平衡假说

(Carbon Nutrient Balance Hypothesis, CNBH)^[32]等学说解释其作用的机理。

Awmack, Docherty 等和陈法军等在研究 CO₂ 浓度增加对取食韧皮部的害虫的影响时得出, 处理较短时间, 害虫的历期未发生变化; 而处理多个世代后, 其生长发育受到极大影响, 发育率明显加快^[20, 33, 34]。本文通过研究大气 CO₂ 浓度升高对连续 3 代棉蚜的间接作用, 以及直接和间接影响的共同作用表明, 前两代饲养的棉蚜对大气 CO₂ 浓度升高的反应不明显, 只有第 3 代棉蚜的虫体重和 MRGR 对大气 CO₂ 浓度增加的反应敏感。其中, 550 μl/L 和 750 μl/L CO₂ 浓度处理组棉蚜的虫体重显著高于对照处理组, 750 μl/L CO₂ 浓度处理组棉蚜的 MRGR 也显著高于对照处理组。可见, 大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的作用表现出一个长期的影响, 多代的效应。

试验中发现经高 CO₂ 浓度处理的棉花, 当置于对照 CO₂ 浓度环境中 3d, 其组织内糖类、含氮量以及总糖与总氮的比值等指标均未发生显著变化, 而每天更换棉叶也没有显著影响棉花组织内这些化学指标。因此, 试验中用高 CO₂ 浓度处理后的离体组织饲喂昆虫, 或将昆虫直接饲养在高 CO₂ 浓度的开顶式气室内生长的寄主植物上, 对昆虫生长发育和繁殖的影响基本一致。此外, 大气 CO₂ 浓度升高还会改变寄主植物的组织结构^[35], 以及植物叶片的显微结构^[36, 37]。作为物理抗性之一, 植物组织结构的变化也会影响到棉蚜的刺吸取食。今后, 应开展大气 CO₂ 浓度变化对植物组织(如叶片)的显微(或超显微)结构的影响, 结合蚜虫的刺吸取食行为(EPG)研究, 及 GC-EAG 和 GC-MS 试验, 以便从组织学角度来探索大气 CO₂ 浓度升高对刺吸危害韧皮部的蚜虫的作用机理。

References:

- [1] Trabalka J R, Edmonds J A, Reilly J M, *et al.* Human alteration of the global carbon cycle and the projected future. In: Trabalka J R ed. *Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle*. U. S. Department of Energy. Washington: Carbon Dioxide Research Division, 1985. 247~287.
- [2] Houghton J T, Meirs Filho L G, Callander B A, *et al.* *Climate Change 1995; the Science of Climate Change*. Contribution of Working Group? to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 584.
- [3] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, *et al.* *Climate Change 2001; the Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001. 944.
- [4] Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H. *Climate change 1995; Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [5] Alley L H, Baker J T, Boote K J. The CO₂ fertilization effect: higher carbohydrate production and retention as biomass and seed yield. In: Bazzaz F and Sombroek W ed. *Global Climate Change and Agricultural production: Direct and indirect effects of Changing Hydrological, Pedological and plant Physiological Processes*. Chichester: John Wiley, 1993. 65~100.
- [6] 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**: 155~189.
- [7] Wu K J. Effects of air pollution on insects. *Entomologia Knowledge*, 1988, **25**(2): 122~127.
- [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] Tuchman N, Wetzel R, Rier S, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ lowers leaf litter nutritional quality for stream ecosystem food webs. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 163~170.
- [10] Poorter H, Berkel Y, Baxter R, *et al.* The effects of elevated CO₂ on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C3 species. *Plant Cell and Environment*, 1997, **20**: 472~482.
- [11] Slansky F. Stabilization of the rate of nitrogen accumulation by larvae of the cabbage butterfly on wild and cultivated food plants. *Ecological Monograph*, 1977, **47**: 209~228.
- [12] Mattson W J. Herbivory in relation to plant nitrogen contents. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1980, **11**: 119~161.
- [13] White T C A. The abundance of invertebrate herbivores in relation to the availability of nitrogen in stressed food plants. *Oecologia*, 1984, **63**: 90~105.
- [14] Stacey D A, Fellowes M E. Influence of elevated CO₂ on interspecific interactions at higher trophic levels. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 668~678.
- [15] Bezemer T M, Jones T H. Plant-insect herbivore interactions in elevated atmospheric CO₂ quantitative analyses and guild effects. *OIKOS*, 1998, **82**: 212~222.
- [16] Hunter M D. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions. *Agricultural and Forest Entomology*, 2001, **3**: 153~159.
- [17] Stiling P, Moon D C, Hunter M D. Elevated CO₂ lowers relative and absolute herbivore density across all species of scrub-oak forest. *Oecologia*, 2003, **134**: 82~87.

- [18] Chen F J, Ge F. Study on some general conclusions in the effects of elevated CO₂ on the systems of crops and insects. National Congress of Entomological Society of China, 2004, 281~286.
- [19] Lincoln D E, Sionit, N, Strain B R. Growth and feeding response of *Pseudoplusia includens* (Lepidoptera: Noctuidae) to host plant growth in controlled carbon dioxide atmosphere. *Environmental Entomology*, 1984, **13**(6): 1527~1530.
- [20] Chen F J, Ge F, Liu X H. Responses of cotton to elevated CO₂ and the effects on cotton aphid occurrences. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(5): 991~996.
- [21] Osbrink W L A, Trumble J T, Wagner R E. Host suitability of *Phaseolus lunata* for *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae) in controlled carbon dioxide atmospheres. *Environmental Entomology*, 1987, **16** (3): 639~644.
- [22] Chen F J. Impacts of elevated CO₂ on the system of crops, insect pest and natural enemies. Chinese Academy of Science, PhD. Thesis, 2004.
- [23] Chen F J, Ge F. An experimental instrument to study the effects of changes in CO₂ concentrations on the interactions between plants and insects—CDCC-1 chamber. *Entomologia Knowledge*, **41**(3): 279~281.
- [24] Chen F J, Ge F, Su J W. An improved top-open chamber for research on the effects of elevated CO₂ on agricultural pests in field—Improved open-top chamber. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(5).
- [25] Liu S S. A method for rearing aphids—a new leaf-disc method. *Entomologia Knowledge*, 1987, **24**(2): 113~116.
- [26] Viskari E L, Surakka J, Pasanen P. Responses of spruce seedlings (*Picea abies*) to exhaust gas under laboratory conditions I. plant-insect interactions. *Environmental Pollution*, 2000, **107**: 89~98.
- [27] Lawton J H. The Response of insects to environmental change. In; Harrington, R and Stork, N E, eds. *Insects in changing environment; symposium of the Royal Entomological Society*. London; Academic Press, 1995. 3~26.
- [28] Ding Y H, Gao S H. *Effects of trace gas on the agriculture and ecosystem of our country*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1995.
- [29] Pennings S C, Nadeaau M T, Paul V J. Selectivity and growth of the generalist herbivore *Dolabella auricularia* feeding upon complementary resources. *Ecology*, 1993, **74**: 879~890.
- [30] Cornelissen T, Stiling P, Drake B. Elevated CO₂ decreases leaf fluctuating asymmetry and herbivory by leaf miners on two oak species. *Global Change Biology*, 2003, **10**: 27~36.
- [31] Penuelas J E, Castells E R, Joffre S T, et al. Carbon-based secondary and structural compounds in Mediterranean shrubs growing near a natural CO₂ spring. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 281~288.
- [32] Bryant J P, Chapin F S, Klein D R. Carbon nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos*, 1983, **40**: 357~368.
- [33] Awmack C S, Harrington R, Leather S R. Host plant effects on the performance of the aphid *Aulacorthum solani* (Kalt.) (Homoptera: Aphididae) at ambient and elevated CO₂. *Global Change Biology*, 1997, **3**: 545~549.
- [34] Docherty M W, Hurst F A, Whittaker D K, et al. Responses of tree sap-feeding herbivores to elevated CO₂. *Global Change Biology*, 1997, **3**: 51~59.
- [35] Cornelissen T, Stiling P, Drake B. Elevated CO₂ decreases leaf fluctuating asymmetry and herbivory by leaf miners on two oak species. *Global Change Biology*, 2003, **10**: 27~36.
- [36] Yang S T, Li Y F, Hu Y X, et al. Effects of CO₂ concentrations doubling on the leave morphology and structure of 10 species in gramineae. *Acta Botanica Sinica*, 1997, **39**(9): 859~866.
- [37] Zhang X, Zhang X F, Ju B H. Effects of elevated CO₂ on plant morphology and structure. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1997, **14**(1): 36~41.

参考文献:

- [7] 吴坤君. 空气污染对昆虫的影响. *昆虫知识*, 1988, **25**(2): 122~127.
- [8] 吴坤君. 大气中 CO₂ 含量增加对植物-昆虫关系的影响. *应用生态学报*, 1993, **4**(2): 198~202.
- [18] 陈法军, 戈峰. 大气 CO₂ 浓度升高对“作物-害虫-天敌”系统影响的若干规律研究. *中国昆虫学会论文集*, 2004, 281~286.
- [20] 陈法军, 戈峰, 刘向辉. 棉花对大气 CO₂ 浓度升高的响应及其对棉蚜种群发生的作用. *生态学报*, 2004, **24**(5): 991~996.
- [22] 陈法军. 大气 CO₂ 浓度升高对“农作物-害虫-天敌”系统的影响. 中国科学院博士学位论文, 2004.
- [23] 陈法军, 戈峰. 一套用于研究 CO₂ 浓度增加对植物-昆虫相互作用影响的设备——CDCC-1 型密闭式动态 CO₂ 气室. *昆虫知识*, 2004, **41**(3): 279~281.
- [24] 陈法军, 戈峰, 苏建伟. 用于研究大气 CO₂ 浓度升高对农田有害生物影响的田间试验装置-改良的开顶式气室. *生态学杂志*, 2005, **24** (5): 00~00.
- [25] 刘树生. 介绍一种饲养蚜虫的方法-新的叶子圆片法. *昆虫知识*, 1987, **24**(2): 113~116.
- [28] 丁一汇, 高素华. 痕量气体对我国农业和生态系统影响研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [36] 杨松涛, 李彦肪, 胡玉熹, 等. CO₂ 浓度倍增对 10 种禾本科植物叶片形态结构的影响. *植物学报*, 1997, **39**(9): 859~866.
- [37] 张昕, 张秀芬, 鞠赋红. 大气 CO₂ 浓度升高对植物形态结构的影响. *莱阳农学院学报*, 1997, **14**(1): 36~41.