



陈晓燕, 刘佳妮, 郝若诗, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对粘虫生长发育和繁殖的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (1): 144 - 151.

大气 CO₂ 浓度升高对粘虫生长发育和繁殖的影响

陈晓燕¹, 刘佳妮², 郝若诗³, 李亚红⁴, 杨学存¹, 桂富荣^{1,3*}

(1. 云南农业大学植物保护学院, 农业生物多样性与病虫害控制教育部重点实验室, 昆明 650201;

2. 昆明学院农学院, 云南省高校都市型现代农业工程研究中心, 昆明 650214;

3. 云南省高原特色农业产业研究院, 昆明 650201; 4. 云南省植保植检站, 昆明 650034)

摘要: 为明晰大气 CO₂ 浓度升高对粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 生长发育和繁殖的影响, 在人工气候箱 800 μL/L 与 400 μL/L 两种不同 CO₂ 浓度下, 用人工饲料连续饲养粘虫 3 代后, 分析其发育历期、体重、存活率等种群参数的变化。结果表明: 不同 CO₂ 浓度处理下各世代的粘虫均能正常发育, 各虫态的发育历期为: 幼虫 > 成虫 > 蛹 > 卵, 幼虫 1-3 代的发育历期在两种 CO₂ 浓度下差异达极显著水平 ($P < 0.001$); CO₂ 浓度倍增条件下的蛹重和成虫体重较对照条件下明显下降; CO₂ 浓度倍增对粘虫的性比影响不大, 但可导致粘虫雌成虫寿命缩短, 单雌平均产卵量和单雌日均产卵量下降。高 CO₂ 浓度下第 1 代粘虫种群的平均世代周期 (T) 和种群加倍时间 (DT) 分别延长了 1.19 和 1.24 d, 1-2 代粘虫的净生殖率 (R_0)、内禀增长率 (r_m) 和周限增长率 (λ) 呈下降趋势, 至第 3 代略有回升, 但未达到显著性差异水平 ($P > 0.05$); 高 CO₂ 浓度条件下粘虫 1-3 代的存活率分别为 44%、31% 和 33%, 分别较对照条件下对应世代粘虫的存活率低 10%、27% 和 22%, 其中第 2、3 代粘虫的存活率在两种 CO₂ 浓度条件下差异显著 ($P < 0.05$), 第 1 代粘虫在高 CO₂ 浓度下存活率明显下降, 至第 3 代时逐渐趋于稳定, 说明随着世代的延长, 粘虫对高 CO₂ 浓度的适应能力增强。

关键词: CO₂ 浓度; 粘虫; 生长发育; 繁殖力

中图分类号: Q965; S433.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2017) 01-0144-08

Effects of the elevated atmospheric Carbon Dioxide levels on the growth, development and reproduction of *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae)

CHEN Xiao-Yan¹, LIU Jia-Ni², HAO Ruo-Shi³, LI Ya-Hong⁴, YANG Xue-Cun¹, GUI Fu-Rong^{1,3*}

(1. Key Laboratory for Agricultural Biodiversity and Pest Management of Ministry of Education, College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. School of Agriculture, Urban Modern Agriculture Engineering Research Center, Kunming University, Kunming 650214, China; 3. Yunnan Plateau Characteristic Agriculture Industry Research Institute, Kunming 650201, China; 4. Yunnan Plant protection Station, Kunming 650034, China)

Abstract: To clarify the effects of enriched atmospheric CO₂ levels on growth, development and fecundity of *Mythimna separata* (Walker), the insect which was the major agricultural, typical seasonal, long-distance migratory pest in China. The influence were examined in CO₂ artificial climate chambers under ambient (400 μL/L) and elevated CO₂ level (800 μL/L). This paper measured the developmental

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31260450, 30860069); 云南省科技人才培养计划项目 (2013HB072); 云南省植保植检站项目

作者简介: 陈晓燕, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事农业昆虫与害虫防治研究, E-mail: cxy_05@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: furonggui18@sina.com

收稿日期 Received: 2016-01-31; 接收日期 Accepted: 2016-06-21

duration, survival rate, and reproduction and population parameters of successive three generation of the oriental armyworm. Pupa and adult weight loss is obviously. The results showed that each generation army worm under different CO₂ concentration treatment can grow and develop normally, the development stage order of this insect is larva > adult > pupa > eggs. Compared to two kinds of CO₂ concentration, the larva 1 - 3 generation development period up to the level of the extremely significant different ($P < 0.001$). Under the 800 uL/L atmospheric CO₂ concentration, the effect of sex ratio of armyworm is not obvious, but it's can lead to life of female shortened, oviposition rate per female and daily oviposition rate per female decreased. In the 800 uL/L condition, generation span (T) and time of double population size (DT) of the first generation were extend to 1.19 d and 1.24 d. The first and second generation's population parameter of net reproductive rate (R_0), intrinsic growth rate (r_m) and DT showed downward trend, to the third generation slightly rebounded, but did not reach significant difference level ($P > 0.05$). Under the high CO₂ concentration 1 - 3 generation of survival rates were 44%, 31% and 33%. Compared with the corresponding generation under the low CO₂ concentration the survival rate is 10%, 27% and 22%, respectively. Among them the second and third generation armyworm survival rate under the condition of two kinds of CO₂ concentration reach a difference significant ($P < 0.05$). The first generation survival rate decreased significantly ($P < 0.05$), while to the third generation gradually stabilized. As the extension of generation, the adaptability of armyworm to high CO₂ concentration increased.

Key words: CO₂ concentration; *Mythimna separata*; growth and development; reproduction

化石燃料等工业活动的频繁使用导致全球气候变暖是目前全球气候变化最显著特征之一, 大气 CO₂ 浓度以每年 0.4% 左右的速度不断上升 (IPCC, 2007)。而 CO₂ 浓度升高对昆虫的影响及昆虫对这一变化的响应是近几年全球气候变暖研究的热点问题之一。根据昆虫种类、寄主植物、同种昆虫不同龄期等因素的不同对大气 CO₂ 浓度升高的响应程度也不尽相同, 说明大气 CO₂ 浓度升高可直接或间接影响昆虫。如赵磊等 (2015) 在高 CO₂ 浓度下用人工饲料饲养了 6 个世代的亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*, 测定了不同世代下高 CO₂ 浓度对该害虫的个体生物学参数的直接影响; 蛱蝶幼虫 *Junonia coenia* 在高 CO₂ 浓度下死亡率增加 (Fajer *et al.*, 1991); 禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 表现出繁殖力增强、生长速率明显加快等特点 (张钧等, 2002); 西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 成虫体内酶活性在 CO₂ 浓度升高条件下具有不同的变化趋势 (刘建业等, 2014)。

全球气候变暖将会直接或间接地影响我国的农业生产及农作物病虫害的发生和为害。粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 作为鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae 的一种咀嚼式口器害虫, 具有极强的迁飞性, 其幼虫以成群迁徙对迁

入地进行危害, 以啃食作物叶片为食从而对我主要粮食作物进行为害, 具有突发性、暴发性 and 毁灭性的为害特点 (曾娟等, 2013)。目前关于粘虫的研究多集中于 Bt 杀虫蛋白对粘虫生长发育的影响及其对高龄幼虫体内酶活性、生长发育、繁殖及飞行能力的影响 (蒋善军等, 2010; 解娜等, 2012), 而有关 CO₂ 浓度升高对粘虫多个世代生长发育和繁殖的影响并未见报道。

本研究通过人工气候箱内模拟实验测定了高 CO₂ 浓度环境中粘虫各虫态的发育历期、存活率和繁殖力 (平均产卵期、雌成虫寿命、蛹重、产卵量和性比), 比较了粘虫不同世代之间对 CO₂ 浓度升高的响应差异, 为预测全球气候变化条件下粘虫的发生为害趋势奠定基础, 并为未来 CO₂ 浓度升高的环境条件下更深入了解粘虫发生的生态学机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 人工气候箱中 CO₂ 浓度的设置

RXZ 智能型人工气候箱 (上海三腾仪器 LTC-4000) 条件设置如下: 温度 26°C ± 1°C, 相对

湿度 $75\% \pm 5\%$ ，光周期 L:D=16:8，光强 20000 xL。实验设 2 个大气 CO₂ 浓度水平，即对照 (400 $\mu\text{L/L}$ ，当前大气 CO₂ 浓度水平) 和倍增 CO₂ 浓度 (800 $\mu\text{L/L}$ ，预计本世纪末大气 CO₂ 浓度水平)。人工气候箱全天 24 h 通气，在 8:30 至 20:30 期间每 30 min 记录 1 次 CO₂ 浓度值，计算日平均值。试验期间，人工气候箱中 2 个 CO₂ 的实际浓度分别为 $395.23 \pm 22.37 \mu\text{L/L}$ 和 $804.25 \pm 22.15 \mu\text{L/L}$ 。

1.1.2 供试虫源

虫来自云南省普洱市宁洱县 (101.13°E, 23.16°N) 田间灯光诱捕的迁入成虫，带回实验室进行种类鉴定后，在人工气候箱 (400 $\mu\text{L/L}$) 中用人工饲料 (公布号: CN101856085A) 加以改进并进行多代饲养纯化备用，以确保本实验所需粘虫种群来自相同的群体。主要饲养过程为：挑取初孵幼虫，在放有人工饲料的 12 孔细胞培养板 (CrystalGen 公司) 中单孔单头饲养至 6 龄，然后移入 6 孔细胞培养板中继续单孔单头饲养，幼虫化蛹 2 d 后，将蛹集中移入养虫笼 (55 × 55 × 55 cm³) 中，每日饲喂羽化成虫并更换 5% (v/v) 蜂蜜水，直至产卵。

1.2 实验方法

1.2.1 粘虫生长发育和繁殖力测定

将粘虫初孵幼虫接入配好的人工饲料，遂即放入不同 CO₂ 浓度人工气候箱。每个 CO₂ 浓度处理中，用细胞培养板单头饲养 20 头，重复 3 次，每隔 12 h 观察 1 次，记录各虫态的发育和存活情况，同时另外选取 100 头用以补充与死亡虫口数相同且同一龄期的粘虫活虫，使供试虫口总数始终保持 60 头。观察记录幼虫每天的发育进度参数，即卵历期、幼虫发育历期、幼虫体重；蛹历期、蛹重；成虫历期、成虫体重。

1.2.2 粘虫种群生命表参数及存活率测定

将粘虫初孵幼虫接入配好的人工饲料，遂即放入不同 CO₂ 浓度人工气候箱。每个 CO₂ 浓度处理中，用细胞培养板单头饲养 20 头，重复 3 次，每隔 12 h 观察 1 次，记录各虫态的发育和存活情况，同时另外选取 100 头用以补充与死亡虫口数相同且同一龄期的粘虫活虫，使供试虫口总数始终保持 60 头。化蛹后将蛹置于相应 CO₂ 浓度人工气候

箱中，每天观察各 CO₂ 浓度下成虫的羽化情况，将当天羽化的成虫按 1:1 配对置于养虫笼 (10 cm³ × 8 cm³ × 8 cm³) 中，并给与 5% 蜂蜜水喂养，每天定时更换产卵纸并记录产卵量，直至雌虫自然死亡；并将孵化的若虫继续饲养至成虫，记录雌、成虫的数量，统计性比。

根据饲养数据资料，计算粘虫在不同 CO₂ 浓度下的实验种群生命表参数 (张孝曦, 2011): 净生殖率 $R_0 = \sum L_x M_x$ ，平均世代周期 $T = \sum x L_x M_x / R_0$ ，内禀增长率 $r_m = (\ln R_0) / T$ ，周限增长率 $\lambda = e^{r_m}$ ，种群加倍时间 $DT = \ln 2 / r_m$ ；其中 x 为按龄期划分的单位间距， L_x 表示任意个体在 x 期间的存活率， M_x 表示在 x 期间平均每雌产雌数。

1.3 数据处理

实验数据用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析，采用独立样本 t 检验法和 Duncan 氏新复极差法比较同一指标的差异；以 CO₂ 浓度和世代为处理因子，应用双因素方差分析 Two-way ANOVA 进行处理间实验数据的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度倍增对粘虫生长发育及繁殖的影响

2.1.1 发育历期

在不同 CO₂ 浓度处理下各世代的粘虫均能正常发育，各虫态的发育历期顺序为：幼虫 > 成虫 > 蛹 > 卵 (表 1)。CO₂ 浓度倍增时，粘虫卵的发育历期表现出缩短的趋势，而 800 $\mu\text{L/L}$ 浓度下，1-3 代幼虫、蛹与成虫的发育历期与对照相比表现出延长趋势；对比两种 CO₂ 浓度，粘虫幼虫与成虫历期在同一世代均达到显著性差异水平 ($P < 0.05$)，其中幼虫 1-3 代达到极显著差异水平 ($P < 0.001$)。

ANOVA 分析表明，CO₂ 浓度变化对卵期有显著性影响 ($P < 0.05$)，对幼虫、蛹、成虫历期的影响均未达到显著水平 ($P > 0.05$ ，表 2)。而 CO₂ 浓度和世代的交互作用对蛹期的影响达显著水平 ($P < 0.05$)，对幼虫和成虫历期影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。由此说明，CO₂ 浓度和世代的共同作用是导致粘虫在高 CO₂ 浓度下发育历期缩短的主要原因。

表 1 两种浓度下粘虫的发育历期比较

Table 1 The comparison of *Mythimna separata* of the developmental duration under two CO₂ concentrations

CO ₂ 浓度(μL/L)	各发育阶段 (d) Developmental stages				
	世代 Generation	卵 Egg	幼虫 Larva	蛹 Pupa	成虫 Adult
400	1	4.00 ± 0.08 aA	31.62 ± 0.49 aB	10.30 ± 0.35 aA	13.93 ± 0.32 aB
	2	3.92 ± 0.09 aA	25.45 ± 0.26 bB	10.03 ± 0.22 aA	12.03 ± 0.38 bcA
	3	3.95 ± 0.10 aA	20.80 ± 0.35 cB	9.32 ± 0.45 aA	11.32 ± 0.84 cA
800	1	3.78 ± 0.06 aA	21.83 ± 0.86 aA	9.12 ± 0.31 aA	13.55 ± 0.16 aA
	2	3.72 ± 0.06 aA	21.03 ± 0.61 bA	9.78 ± 0.22 aA	14.23 ± 0.11 bB
	3	3.78 ± 0.02 aA	22.52 ± 0.29 aA	9.8 ± 0.15 aA	14.17 ± 0.14 bB

注: 数据为平均数 ± 标准误, 不同小写字母表示同一浓度不同世代间的差异显著 (Duncan 氏新复极差法, $P < 0.05$), 不同大写字母表示同一世代不同浓度间的差异显著 (独立样本 t 检验, $P < 0.05$), 下同。Note: Data in the figure are mean ± SE. Different lowercase letters above table represent significant difference in the same concentrations between different generations (Duncan, $P < 0.05$). Different uppercase letters above table indicate significant difference in the same generation between two concentrations (Independent t -test, $P < 0.05$), the same as follow.

表 2 发育历期方差分析

Table 2 ANOVA analysis of the developmental duration

各发育阶段 Developmental stages	CO ₂ 浓度 (μL/L) Concentration		世代 Generation		CO ₂ 浓度 × 世代 CO ₂ concentration × Generation	
	F	P	F	P	F	P
卵 Eggs	1.75	0.01*	9.00	0.10	0.06	0.95
幼虫 Larva	1.57	0.34	0.81	0.55	6.14	0.00**
蛹 Pupa	0.43	0.58	0.18	0.85	3.85	0.05*
成虫 Adult	2.48	0.25	0.30	0.77	9.08	0.00**

2.1.2 体重

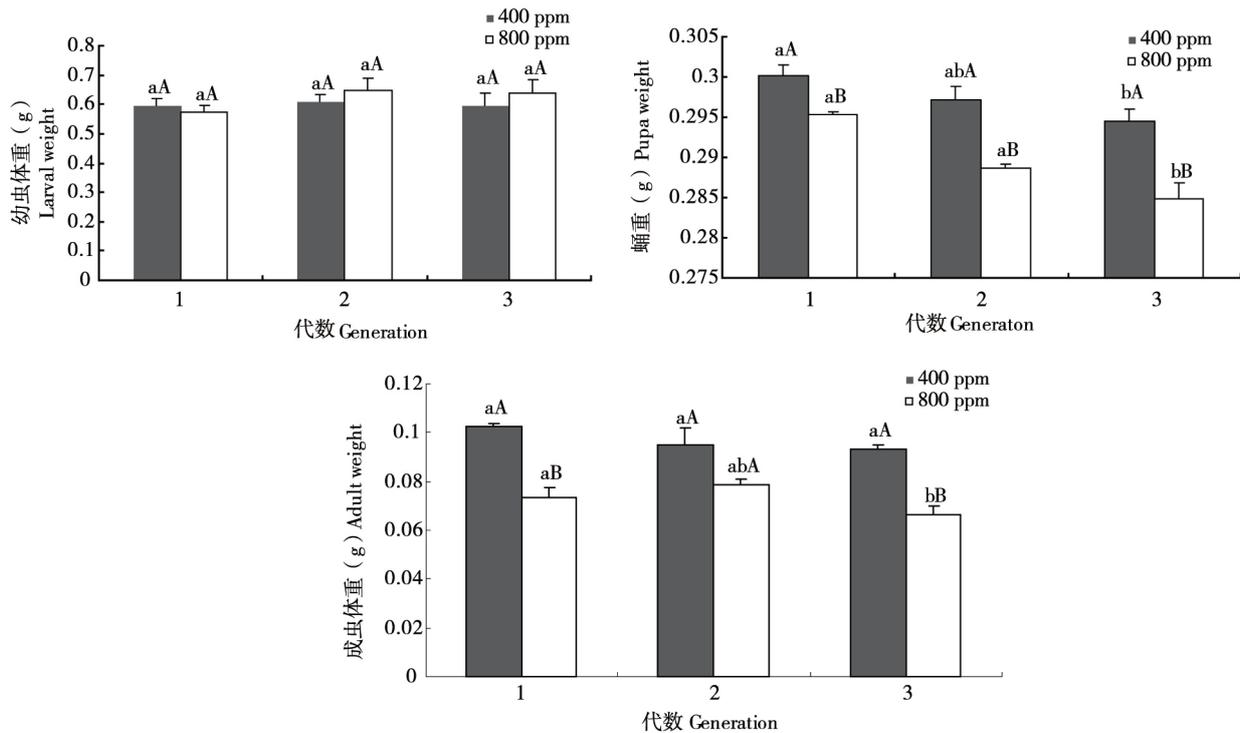
在两种 CO₂ 浓度条件下, 粘虫蛹重和成虫体重均随世代的增加而下降 (图 1)。CO₂ 浓度倍增条件下的蛹重与对照 (400 μL/L) 条件下的对应世代蛹重相比呈显著下降 ($P < 0.05$), 第 1 代和第 3 代蛹和成虫体重比对照条件下的对应世代体重下降极显著 ($P < 0.01$)。粘虫幼虫体重在两种 CO₂ 浓度条件下的差异不显著 ($P > 0.05$), CO₂ 浓度倍增条件下的第 2 - 3 代幼虫体重略大于对照 CO₂ 浓度下的第 2、3 代幼虫体重, 但未达到显著性差异水平 ($P > 0.05$)。

ANOVA 分析表明, CO₂ 浓度升高对粘虫的蛹和成虫体重影响均达到显著水平 ($P < 0.05$), 但对幼虫的影响不显著 ($P > 0.05$); 世代、CO₂ 浓度和世代的交互作用对粘虫个体体重的影响均不显著 ($P > 0.05$)。说明粘虫个体体重的变化主要

是受 CO₂ 浓度的影响, 因此 CO₂ 浓度升高是导致粘虫个体体重降低的主要原因。

2.1.3 繁殖力

CO₂ 浓度倍增对粘虫的性比影响不大, 但可导致粘虫雌成虫寿命缩短, 单雌平均产卵量和单雌日均产卵量下降 (表 3)。高 CO₂ 浓度条件下 1 - 3 代粘虫的单雌平均产卵量均显著低于对照 CO₂ 浓度条件下的对应世代粘虫 ($P < 0.05$), 分别降低了 66.91 粒、80.25 粒和 94.6 粒, 1 - 3 代粘虫单雌日均产卵量降低了 4.46 粒、5.35 粒和 6.31 粒, 说明随着世代的增加, CO₂ 浓度对粘虫成虫产卵量的影响增大。800 μL/L 条件下, 第 3 代雌成虫寿命与 1、2 代相比具有显著性差异 ($P < 0.05$), 第 1 代粘虫平均产卵期分别为第 2、3 代的 1.08 倍和 1.42 倍。两种 CO₂ 浓度下, 1 - 2 代雌成虫寿命、1 - 3 代单雌平均和日均产卵量达到极显著差异水平 ($P < 0.01$)。

图1 不同大气 CO₂ 浓度下粘虫幼虫、蛹和成虫体重变化Fig. 1 Larva, pupa, and adult weights of *Mythimna separata* under different levels of atmospheric CO₂表3 两种 CO₂ 浓度下粘虫成虫的繁殖力及性比Table 3 The fecundity and sex ratio of *Mythimna separata* at two CO₂ concentrations

CO ₂ 浓度 ($\mu\text{L/L}$) Concentration	世代 Generation	参数 Parameters				
		雌成虫寿命 (d) Longevity of female	平均产卵期 (d) Oviposition period	单雌平均产卵量 (Eggs/female) Oviposition rate per female	单雌日均产卵量 (Eggs/female/day) Daily oviposition rate per female	性比 ($\text{♀} / \text{♂}$) Sex ratio
400	1	15.13 \pm 0.25 aB	7.27 \pm 0.04 aA	777.93 \pm 9.92 aB	51.86 \pm 0.66 aA	2.28 \pm 0.12 aA
	2	12.63 \pm 0.27 bB	6.73 \pm 0.10 bA	667.22 \pm 7.21 aB	44.48 \pm 0.48 aA	2.21 \pm 0.03 aA
	3	10.63 \pm 0.14 cA	5.37 \pm 0.20 cA	640.65 \pm 7.21 bB	42.71 \pm 0.48 bA	2.23 \pm 0.02 aA
800	1	11.89 \pm 0.32 aA	7.37 \pm 0.20 aA	711.02 \pm 6.11 aA	47.40 \pm 0.41 aB	2.26 \pm 0.02 aA
	2	10.38 \pm 0.20 aA	6.82 \pm 0.36 bB	586.97 \pm 6.06 bA	39.13 \pm 0.40 bB	2.18 \pm 0.03 aA
	3	10.37 \pm 0.31 bA	5.20 \pm 0.29 bA	546.05 \pm 1.15 cA	36.40 \pm 0.08 cB	2.23 \pm 0.04 aA

ANOVA 分析表明, CO₂ 浓度、世代对粘虫产卵量的影响均显著, 其中对粘虫单雌平均产卵量的影响达到显著性水平 ($P < 0.05$), 而世代对单雌平均产卵量的影响比 CO₂ 浓度影响更大, 达到极显著性水平 ($P < 0.01$); 同时世代对粘虫性比的影响也达到了显著性水平 ($P < 0.05$), 而 CO₂ 浓度与世代的交互作用仅对雌成虫寿命具有极显著影响 ($P < 0.01$)。由此说明, 粘虫的产卵量主要受 CO₂ 浓度与世代的影响, 性比主要受世代的影响,

而 CO₂ 浓度与世代的交互作用并不是高 CO₂ 浓度下粘虫产卵量减少的主要原因。

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对粘虫生命表参数及存活率的影响

2.2.1 生命表参数

在 CO₂ 浓度倍增条件下, 粘虫的净生殖率降低, 平均世代周期延长, 内禀增长率和周限增长率下降, 种群加倍时间增加 (表 4)。与对照相比, 高 CO₂ 浓度下第 1 代粘虫种群的平均世代周期

(T) 和种群加倍时间 (DT) 分别延长了 1.19 d 和 1.24 d, 1-2 代粘虫的净生殖率 (R_0)、内禀增长率 (r_m) 和周限增长率 (λ) 呈下降趋势, 至第 3 代略有回升, 但未达到显著性差异水平 ($P > 0.05$), 说明随着世代的延长, 粘虫对 CO₂ 浓度环

境适应性逐渐增大。两种浓度下, 不同世代间也表现出不同的变化趋势, 如 1-3 代 R_0 、 T 、 r_m 、 λ 、DT 5 个种群参数指标均达到显著性差异 ($P < 0.05$), 其中 R_0 1-3 代与对照相比达到极显著差异水平 ($P < 0.001$)。

表 4 两种 CO₂ 浓度下粘虫的种群参数
Table 4 Population parameters of of *Mythimna separata* at two CO₂ concentrations

CO ₂ 浓度 ($\mu\text{L/L}$) Concentration	世代 Generation	参数 Parameters				
		净生殖率 (R_0) Net reproductive rate	平均世代 周期 (T) (d) Mean generation time	内禀增长率 (r_m) Intrinsic rate of increase	周限增长率 (λ) Finite rate of increase	种群加倍 时间 (DT) (d) Time of double population size
400	1	587.20 \pm 6.02 aA	3.79 \pm 0.13 aA	1.69 \pm 0.06 aA	5.41 \pm 0.31 aA	0.41 \pm 0.01 aA
	2	516.85 \pm 5.67 bA	3.78 \pm 0.08 bA	1.72 \pm 0.06 aA	5.25 \pm 0.20 aA	0.42 \pm 0.01 aA
	3	532.63 \pm 7.61 cA	3.12 \pm 0.05 bA	1.75 \pm 0.04 aA	5.75 \pm 0.21 aA	0.40 \pm 0.01 aA
800	1	450.23 \pm 2.51 aB	4.51 \pm 0.16 aB	1.36 \pm 0.05 aB	3.89 \pm 0.19 aB	0.51 \pm 0.02 aB
	2	437.76 \pm 4.65 bB	4.80 \pm 0.23 abB	1.27 \pm 0.06 abB	3.59 \pm 0.21 abB	0.55 \pm 0.03 abB
	3	345.70 \pm 9.55 bB	3.93 \pm 0.15 bB	1.54 \pm 0.05 bB	4.46 \pm 0.22 bB	0.47 \pm 0.02 bB

2.2.2 存活率

粘虫从卵至成虫的累积存活率在 CO₂ 浓度倍增条件下明显低于对照条件下的存活率 (图 2), 在高 CO₂ 浓度条件下粘虫 1-3 代的存活率分别为 44%、31% 和 33%, 分别比对照条件下对应世代粘虫的存活率低 10%、27% 和 22%, 其中第 2、3 代粘虫的存活率在两种 CO₂ 浓度条件下的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

ANOVA 分析表明, CO₂ 浓度升高对粘虫存活率的影响达到显著水平 ($P < 0.05$), 世代、CO₂ 和世代的交互作用对粘虫存活率的影响均不显著 ($P > 0.05$)。说明粘虫存活率的变化主要受 CO₂ 浓度的影响, CO₂ 浓度升高是导致粘虫存活率降低的主要原因。

3 结论与讨论

目前国内外已开展了大量的试验来研究大气 CO₂ 浓度升高对昆虫的影响, 通常以设定在未来大气 0.5 或 1 倍环境下的 CO₂ 浓度, 检测昆虫体内生长发育的各个阶段、个体体重以及繁殖力等种群参数的变化 (Whittaker *et al.*, 1999; Hunter *et al.*, 2001)。有关不同种类的昆虫, 对不同 CO₂ 浓度响应方式从生长发育、存活力及繁殖情况来

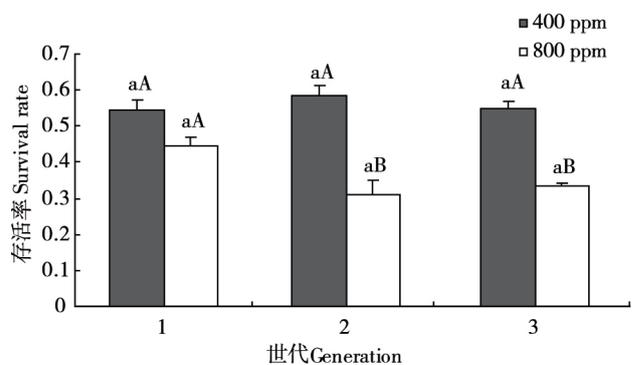


图 2 两种 CO₂ 浓度下粘虫的存活率

Fig. 2 The survival rate of *Mythimna separata* at two CO₂ concentrations

看, 目前国内外均有报道, 但结果差异较大。在高 CO₂ 浓度中生长的棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 幼虫取食量增加, 发育历期延长, 体重变化不明显 (吴刚等, 2006)。而甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hiibner 幼虫在高 CO₂ 浓度下, 发育历期延长、体重下降显著 (Akey *et al.*, 1989)。大气 CO₂ 浓度升高不仅影响昆虫的生长发育而且可进一步影响繁殖能力大小。高 CO₂ 浓度条件下, 麦长管蚜 *Sitobion avenae* (Fabricius) 繁殖力显著提高, 产卵期提前 (Awmack *et al.*, 1996)。戈峰等 (2006) 认为 CO₂ 浓度升高不但影响植物的生长发育, 而且

还改变植物体内的化学成分与含量,从而间接地影响到植食性昆虫,进而通过食物链影响到以之为食的天敌种群。本研究结果显示,CO₂浓度的增加导致粘虫发育历期延长,粘虫的蛹重与成虫体重呈明显下降趋势,受CO₂浓度和世代的影响,粘虫的产卵量显著降低。高CO₂浓度处理1个世代后,粘虫的净生殖率(R_0)、内禀增长率(r_m)和周限增长率(λ)均有不同程度的降低,平均世代周期(T)、种群加倍时间(DT)均略高于对照。由此推测在未来CO₂浓度升高的大背景下,粘虫可能通过降低其种群数量来适应不良环境。

大气CO₂浓度升高对植食性昆虫生存率的影响因种类、发育时期及其寄主植物的不同而异,且不同种类的昆虫对大气CO₂浓度升高的响应也不尽相同。如绿齿胫叶甲 *Gastrophysa viridula* 在高CO₂浓度下死亡率增加(Brooks and White, 1998);高CO₂浓度条件下取食菜豆 *Phaseolus lunata* 的粉纹夜蛾 *Thichoplusia ni* Hbn. 其存活率与正常CO₂浓度环境相比无显著性差异(Osbrik *et al.*, 1987)。本研究结果显示,随着大气CO₂浓度升高,取食人工饲料的粘虫幼虫存活率下降,与对照相比,粘虫1-3代虫体存活率分别下降了1.23%、1.88%、1.65%。由此可见,粘虫存活率主要受CO₂浓度的影响,且由于长时间处于高CO₂浓度条件下,粘虫的死亡率有逐渐趋缓之势。

高CO₂浓度对昆虫的影响具有长期的、多世代的作用,同种昆虫不同世代之间对高CO₂浓度的响应存在差异。Yin等(2010)在研究高CO₂浓度下以人工饲料饲养连续3代的棉铃虫,结果显示1代种群死亡率上升、繁殖力降低,而第2代幼虫数量增加,繁殖力变化不显著。高CO₂浓度条件下Brooks(1998)研究了在饲养3个世代的叶甲 *Gasrophysa uiridula*,结果显示2代雌虫的产卵量比第1代减少30%。本研究结果显示,在800 μ L/L CO₂处理时,第3代粘虫的蛹重、成虫体重与第1代相比显著降低,两种浓度下,不同世代间种群参数也表现出不同的变化趋势, R_0 、 T 、 r_m 、 λ 、DT 5个种群参数指标1-3代均达到显著性差异($P < 0.05$),其中 R_0 1-3代与对照相比达到极显著差异水平($P < 0.001$)。由此说明CO₂浓度升高是导致粘虫 T 、 λ 、 r_m 、DT种群参数变化的主要原因,从而推测CO₂浓度升高显著降低了粘虫对环境的适合度,粘虫对两种CO₂浓度的环境适应性是导致粘虫种群参数变化的重要原因。

综上所述,高CO₂浓度在粘虫发育历期缩短、个体体重下降、存活率降低等方面致使粘虫对高CO₂浓度环境的适应性下降;而对世代的影响主要是通过降低产卵量、改变粘虫的性比进而影响粘虫种群的繁殖;CO₂与世代的交互作用致使雌成虫寿命缩短,幼虫、蛹及成虫的发育历期扰乱而影响粘虫正常的生长发育。本实验主要测定了用人工饲料饲养的粘虫生长发育、繁殖力等方面的变化,对于用天然寄主植物如玉米、小麦等饲养的粘虫其体内生理酶活性的变化、不同世代间生长发育、生命表参数等指标的跨世代效应还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- Akey DH, Kimball BA. Growth and development of the beet armyworm on cotton grown in an enriched carbon dioxide atmosphere [J]. *Southwestern Entomologist*, 1989, 86 (5): 484-493.
- Awmack CS, Harrington R, Leather SR, *et al.* The impacts of elevated CO₂ on aphid-plant interactions [J]. *Aspects Applied Biology*, 1996, 45: 317-322.
- Brooks GL, Whittaker JB. Responses of multiple generations of *Gastrophysa viridula*, feeding on *Rume obtusifolius*, to elevated CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4 (1): 63-75.
- Chen FJ, Wu G, Ge F. Impacts of elevated CO₂ on the growth, development and reproduction of cotton aphid *Aphis gossypii* (Glove) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (10): 2601-2607. [陈法军, 吴刚, 戈峰. 大气CO₂浓度升高对棉蚜生长发育和繁殖的影响及其作用防治 [J]. 生态学报, 2005, 25 (10): 2601-2607]
- Fajer ED, Bowers MD, Bazzza FA. The effects of enriched carbon dioxide atmospheres on the Buckeye butterfly, *Junonia coenia* [J]. *Ecology*, 1991, 72 (2): 751-754.
- Ge F, Chen FJ. Impacts of elevated CO₂ on insects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (3): 935-944. [戈峰, 陈法军. 大气CO₂浓度增加对昆虫的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (3): 935-944]
- Hunter MD. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2001, 3 (3): 153-159.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. The physical science basis. Summary for policy makers [R]. Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- Jiang SJ, Luo LZ, Hu Y, *et al.* Effects of Cry1Ac protein on growth and development, reproduction and flight potential of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 53 (12): 1360-1366. [蒋善军, 罗礼智, 胡毅, 等. Cry1Ac 毒蛋白对粘虫生长发育、繁殖及飞行能力的影响 [J]. 昆虫学报, 2010, 53 (12): 1360-1366]

- Liu JY, Qian L, Jiang XC, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on the activities of detoxifying enzymes and protective enzymes in adults of *Frankliniella occidentalis* and *F. intonsa* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (7): 754–761. [刘建业, 钱蕾, 蒋兴川, 等. CO₂ 浓度升高对西花蓟马和花蓟马成虫体内解毒酶和保护酶的影响 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (7): 754–761]
- Osbrink WLA, Trumble JT, Wagner RE. Host suitability of *Phaseolus lunaa* for *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae) in controlled carbon dioxide atmospheres [J]. *Environmental Entomology*, 1987, 16 (3): 639–644.
- Whittaker JB. Impacts and responses at population level of herbivorous insects to elevated CO₂ [J]. *European Journal of Entomology*, 1999, 96 (2): 149–156.
- Wu G, Chen FJ, Ge F. Direct effects of elevated CO₂ on growth, development and reproduction of cotton bollworm *Helicoverpa armigera* Hübner [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (6): 1732–1738. [吴刚, 陈法军, 戈峰. CO₂ 浓度升高对棉铃虫生长发育和繁殖的直接影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (6): 1732–1738]
- Xie N, Jiang XF, Luo LZ, et al. Effects of Cry1Ac toxin on activities of some enzymes in the larval midgut of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2012, 55 (2): 168–175. [解娜, 江幸福, 罗礼智, 等. Cry1Ac 杀虫蛋白对粘虫中肠几种酶活性的影响 [J]. 昆虫学报, 2012, 55 (2): 168–175]
- Yin J, Sun YC, Wu G, et al. Effects of elevated CO₂ associated with maize on multiple generations of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2010, 136 (1): 12–20.
- Zeng J, Jiang YY, Liu J, et al. Analysis of the armyworm outbreak in 2012 and suggestions [J]. *Plant Protection*, 2013, 39 (2): 117–121. [曾娟, 姜云英, 刘杰, 等. 2012 年黏虫暴发特点分析与监测预警建议 [J]. 植物保护, 2013, 39 (2): 117–121]
- Zhang J, Yang HM, Lin JS, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on population dynamics of the wheat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2002, 45 (4): 477–481. [张钧, 杨惠敏, 林久生, 等. 大气二氧化碳浓度变化对禾谷缢管蚜种群动态的影响 [J]. 昆虫学报, 2002, 45 (4): 477–481]
- Zhang XX. *Insect Ecology and Prediction* (3rd edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011. [张孝曦. 昆虫生态及预测预报 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011]
- Zhao L, Yang QF, Xie HC, et al. Direct effects of the elevated atmospheric carbon dioxide levels on the growth, development and reproduction of *Ostrinia furnacalis* (Guenee) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (3): 885–891. [赵磊, 杨群芳, 解海翠, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对亚洲玉米螟生长发育及繁殖的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35 (3): 885–891]