

高、低温处理时间对东方粘虫成虫能源物质及飞行能力的影响

张 南 解幸承 成卫宁 仵均祥* 李怡萍*

(西北农林科技大学植物保护学院, 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为明确高、低温处理对东方粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 成虫能源物质积累和飞行能力的影响, 采用生化分析手段和飞行磨技术测定经不同时间的高、低温处理后东方粘虫成虫能源物质含量和代谢酶活力以及飞行能力的变化。结果表明, 卵至成虫低温饲养其糖原、海藻糖、总脂含量均最高, 分别为 6.45、3.74、10.58 mg/g, 但 3-磷酸甘油脱氢酶(GPD)、3-磷酸甘油醛脱氢酶(GAPDH)和 3-羟酰辅酶 A 脱氢酶(HOAD)活力均最低, 分别为 197.09、140.43 和 17.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{protein}$; 卵至 6 龄幼虫高温、蛹低温饲养, 其甘油三酯含量最高, 为 0.85 mg/g, 飞行能力最弱, 飞行时间平均为 1.94 h、飞行距离平均为 5.57 km; 卵至 6 龄幼虫低温、蛹高温饲养, 其糖原含量最低, 为 4.07 mg/g, 但飞行能力最强, 飞行时间平均为 4.14 h、飞行距离平均为 13.17 km; 卵至 2 龄幼虫低温、3 龄后高温饲养, 其海藻糖含量最低, 为 1.47 mg/g; 卵至成虫高温饲养, 其总脂和甘油三酯含量最低, 分别为 6.54 mg/g 和 0.2 mg/g, HOAD 活力最高, 为 62.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{protein}$; 卵至 5 龄幼虫低温、6 龄后高温饲养, 其 GPD 和 GAPDH 活力最高, 分别为 324.94、275.14 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{protein}$ 。表明高、低温处理对东方粘虫能源物质积累及飞行能力有显著影响, 高温使其代谢酶活力升高, 抑制能源物质积累, 有利于成虫迁飞; 低温使其代谢酶活力降低, 促进能源物质积累, 抑制飞行, 且高、低温对东方粘虫飞行能力的影响主要发生在蛹期后。

关键词: 东方粘虫; 高低温处理; 能源物质; 酶活力; 飞行能力

Effects of high- or low-temperature treatment time on energy material and flight capacity in the adults of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker)

Zhang Nan Xie Xingcheng Cheng Weining Wu Junxiang* Li Yiping*

(State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: To clarify the effects of high- and low-temperature on the accumulation of energy substances, the activities of metabolic enzymes and flight capacity of oriental armyworm *Mythimna separata* adults. Biochemical analysis was conducted to measure the contents of glycogen, trehalose, total lipid, triglyceride, and the activity changes of 3-glycerol phosphate dehydrogenase (GPD), 3-glyceraldehyde phosphate dehydrogenase (GAPDH) and 3-hydroxyacyl-coenzyme A dehydrogenase (HOAD), and the flight mill was used to determine the flight capacities of oriental armyworms under different treatment durations. The results showed that the contents of glycogen, trehalose, and total lipid were the highest with 6.45, 3.74, and 10.58 mg/g, respectively, but the activities of metabolic enzymes were the lowest with 197.09, 140.43 and 17.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{protein}$ for GPD, GAPDH and HOAD, respectively,

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201403031), 陕西省农业科技创新转化项目

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: junxw@nwsuaf.edu.cn, liyiping@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2016-07-13

when they were reared at low temperature from egg to adults. Triglyceride content was the lowest with 0.85 mg/g and flight capacity was the weakest with a flight duration of 1.94 h and a flight distance of 5.57 km on average when they were reared at high temperature from egg to 6th larval instar and low temperature since pupal stage. Glycogen content was the lowest with 4.07 mg/g and flight capacity was the highest with a flight duration of 4.14 h and a flight distance of 13.17 km on average at low temperature from egg to 6th larval instar and high temperature since pupal stage. Trehalose content was the lowest (1.47 mg/g) when treated with low temperature from egg to 2nd instar larval stage and high temperature since 3rd instar larval stage. Total lipid and triglyceride contents were the lowest (6.54 mg/g and 0.2 mg/g, respectively) and the activity of HOAD was the highest ($62.16 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ protein) when treated by high temperature through the life history. The activities of GPD and GAPDH were the highest (324.94 and $275.14 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ protein, respectively) when treated with low temperature from egg to 5th instar larval stage and high temperature since 6th instar larval stage. These results suggested that high and low temperature had an evident effect on accumulation of energy substances and flight capacity. High temperature increased the activities of metabolic enzymes, restrained accumulation of energy substances, and benefited migration, while low temperature promoted accumulation of energy substances, decreased the activities of metabolic enzymes, and suppressed migration. It was primarily that high and low temperature affected the flight capacity of the oriental armyworm after the pupal stage.

Key words: oriental armyworm; high- or low-temperature treatment; energy substance; enzyme activity; flight capacity

东方粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 又名粘虫、分泌夜蛾、粘秘夜蛾, 是一种典型的远距离迁飞害虫, 严重威胁我国玉米、小麦和水稻 3 大主粮作物生产安全(李光博等, 1964)。1958 年我国将其列为十大害虫中的第 2 位(江幸福等, 2014); 2012 年在全国范围内大暴发, 发生面积近 333 万 hm^2 , 为害程度为近年之最(张云慧等, 2012; 曾娟等, 2013)。2016 年受厄尔尼诺现象的影响, 我国多地遭受频繁的强降雨天气, 大范围洪涝灾害造成农田杂草繁茂, 为粘虫等多食性害虫提供了丰富的食料条件, 引起多地 3 代粘虫严重发生, 其中山西省芮城、万荣、平陆、闻喜、永济、盐湖等县(市、区)发生面积为 2.67 万 hm^2 ; 河南省洛阳、三门峡 2 市 8 县发生面积为 3.65 万 hm^2 ; 陕西省渭南、西安、咸阳、宝鸡 4 市发生面积为 4.02 万 hm^2 (程登发和赵中华, 2016), 对农业生产造成了严重影响。

粘虫飞行能力的遗传力仅为 0.27~0.45, 即环境是影响其迁飞的主要因素(江幸福, 2004)。影响其飞行能力及与飞行相关的能源物质、代谢酶活力及飞行肌和卵巢发育等的环境因素主要包括寄主植物(Wang et al., 2006)、温湿度(李光博, 1979; 蔡彬等, 2002)、幼虫密度(罗礼智等, 1995a; 李克斌和罗礼智, 1998)、光周期(曹雅忠等, 1997)及初羽化成虫 1 日龄饥饿程度(张蕾等, 2006)等。其中温度对粘

虫生长发育和迁飞的影响最大, 27℃ 恒温饲养的粘虫飞行能力最强, 但其飞行的最适温度为 18.1~26℃(江幸福等, 2000; 2003), 30℃ 以上高温对成虫飞行会产生不利影响, 降低其飞行能力(江幸福和罗礼智, 1997)。粘虫在飞行初始阶段主要动用糖原和海藻糖, 持续飞行时主要依靠甘油酯类(邹运鼎等, 1984; 王宗舜和欧阳迎春, 1995; 罗礼智等, 1999)。粘虫成虫体内 3-磷酸甘油脱氢酶(glycerol-phosphate dehydrogenase, GPD)、3-磷酸甘油醛脱氢酶(glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase, GAPDH)和 3-羟酰辅酶 A 脱氢酶(3-hydroxyacyl-coenzyme A dehydrogenase, HOAD)是其迁飞过程中主要的糖、酯代谢酶(李克斌和罗礼智, 1999)。粘虫起飞的适宜时间为羽化后第 2 晚(陈瑞鹿等, 1985; 罗礼智等, 1995b), 多数粘虫为日落后起飞, 天亮时降落休息和补充营养(Chen et al., 1989; 陈瑞鹿, 1990; Zhang et al., 2013)。

迄今为止, 关于温度对粘虫能源物质和飞行能力影响的研究虽然较多, 但供试虫源均为恒温饲养, 与自然环境差异很大, 变温条件下粘虫能源物质积累及其与飞行能力之间的关系鲜见报道。此外, 高、低温对粘虫能源物质积累的影响主要发生于粘虫生长发育的什么阶段, 高、低温处理时间的早晚和长短与能源物质积累及飞行能力之间是否相关, 关于这

些问题的相关研究在国内外均未见报道。鉴于此,本试验在2个变温条件下,对其初羽化成虫能源物质、相关代谢酶活力及与飞行能力的关系进行较为全面的研究与分析,旨在为粘虫的准确测报及有效防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源:2014年5月在陕西省兴平市内玉米田中采集东方粘虫5~6龄幼虫,在室内饲养至2015年6月(约11~12代),取初产24 h内的卵置于相对湿度(75±10)%、光周期14 L:10 D、光照强度2 178 lx的人工气候箱内饲养。幼虫用拔节前期的新鲜小麦叶片饲喂,品种为小偃22,由西北农林科技大学小麦育种研究室提供,整个幼虫饲养期间,每天早上08:00更换1次小麦叶片,并清理虫粪等杂物。成虫用5%蜂蜜水补充营养。

试剂:3-磷酸甘油醛、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)、乙酰辅酶A,美国Sigma公司;烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NAD),瑞士Roche公司;GPD测试试剂盒,上海源叶生物科技有限公司;其余试剂均为国产分析纯。

仪器:昆虫飞行信息系统,鹤壁佳多科工贸股份有限公司;MGC-450-HP2人工气候箱,上海一恒科学仪器有限公司;UV-1800 72-3分光光度计、MGC-HP电子天平,日本岛津公司;100 mm×200 mm P-1双槽层析缸,上海信谊仪器厂有限公司;100 mm×200 mm TLC硅胶板GF254,青岛海洋化工厂。

1.2 方法

1.2.1 饲养温度设置

东方粘虫饲养试验共设置8个处理:处理1为卵至2龄幼虫低温、3龄后高温饲养;处理2为卵至5龄幼虫低温、6龄后高温饲养;处理3为卵至6龄低温、蛹期后高温饲养;处理4为卵至成虫均高温饲养(高温处理对照);处理5为卵至2龄幼虫高温、3龄后低温饲养;处理6为卵至5龄幼虫高温、6龄后低温饲养;处理7为卵至6龄幼虫高温、蛹期后低温饲养;处理8为卵至成虫均低温饲养(低温处理对照)。其中高温处理为白天30℃,夜间24℃,低温处理为白天24℃,夜间18℃,其它饲养条件均同1.1。

1.2.2 成虫能源物质含量的测定

将各处理的初羽化东方粘虫成虫在70℃烘箱中烘12 h,随即研磨成粉,放置于-20℃下备用。每

处理10头粘虫,重复3次,用于糖原、海藻糖、总脂和甘油三酯含量的测定。

糖原:将称好的0.2 g虫体粉末移入1.5 mL离心管中,加入1 mL 30% KOH,沸水浴30 min,再加入0.5 mL无水乙醇混匀,4 000 r/min下离心10 min,弃上清液,在沉淀物中加0.6 mol/L盐酸1 mL,沸水浴2 h后离心去沉淀,定容到1 mL待测(李克斌和罗礼智,1998)。糖原含量采用蒽酮比色法测定,取样100 μL加蒽酮试剂2.4 mL,摇匀后沸水浴10 min,立刻冰浴2 min,冷却后于620 nm处测定吸光度,标样为葡萄糖。将所得数值乘以0.927即为糖原值。

海藻糖:将称好的0.2 g虫体粉末移入1.5 mL离心管中,加入1 mL 10%三氯乙酸溶液,5 000 r/min离心5 min,上清液转入1.5 mL离心管中,定容至1 mL待测(李克斌和罗礼智,1998)。海藻糖含量测定方法同糖原。

总脂:将称好的0.2 g虫体粉末移入1.5 mL离心管中,加入0.5 mL 2:1的氯仿:甲醇,加0.2 mL 5% NaCl振荡后2 500 r/min离心10 min,取下层相移至1.5 mL离心管,再用氯仿定容到0.25 mL待测(Fuchs et al., 2011; 李丹等, 2014)。取20 μL样品,90℃水浴蒸干后加入100 μL浓硫酸,沸水浴10 min。冷却后加入2.4 mL香兰素,暗处理15 min,在525 nm处测定吸光度,标样为三油酸甘油酯(许向利, 2011)。

甘油三酯:采用薄层层析法测定。吸取20 μL总脂,用玻璃毛细管依次将样品点在100 mm×200 mm硅胶板GF254上。点样线距胶下边缘线2.5 cm,每板点4个样,间距20 cm,点样直径3 cm。用体积比为1:70:30的冰醋酸:正己烷:乙醚作层析展开剂,液面低于点样线。点样后将层析板放入装有1.5 cm层析液的层析缸中,加盖。当层析液距层析板上缘2~3 cm处时将层析板取出,晾干。再放入装有碘蒸汽的缸中分出甘油三酯,回收并用400 μL的氯仿甲醇溶液洗脱,2 500 r/min离心5 min,取上清液定容至0.25 mL备用(陈春艳, 2009)。取100 μL样品测定甘油三酯,方法同总脂。

1.2.3 糖脂代谢酶活力的测定

将各处理后羽化24 h内的粘虫成虫用液氮快速杀死,取出后加入预冷的0.1 mmol/L磷酸钾缓冲液(pH 7.3,含2 mmol/L的EDTA)8 mL,在冰浴中匀浆,然后将制备好的匀浆液在4℃下以14 000 r/min离心10 min,取上清液作为酶液,-20℃下保存。随后进行测定(Zera et al., 1999; 王洪亮等, 2006)。每处理10头,重复3次。

3-磷酸甘油脱氢酶:取上清酶液 10 μL , 参照 GPD 测试试剂盒说明书进行测定。

3-磷酸甘油醛脱氢酶和 3-羟辅酶 A 脱氢酶: 25 $^{\circ}\text{C}$ 下用 72-3 型分光光度计测定, 反应体系总体积均为 500 μL , 再加入上清酶液 10 μL , 均在 340 nm 处测定吸光度, 蛋白质含量用 Lowry 法以牛血清蛋白为标准测定。反应体系中各组分含量以终浓度表示, GAPDH 反应体系为: 62.73 mmol/L 磷酸钾 (EDTA, pH 8.0)、100 mmol/L 甘氨酸、1 mmol/L NAD、1 mmol/L 3-磷酸甘油醛 (Shalova et al., 2007); HOAD 反应体系: 50 mmol/L Tris-HCl 缓冲液 (pH 8.0)、1 mmol/L EDTA、1 mmol/L KCN、0.1 mmol/L NADH、100 mmol/L 乙酰辅酶 A (Zera et al., 1999)。酶活力 = $(\Delta OD \times V_t \times df) / (\varepsilon \times 1.0 \times V_s) \times (1/C)$, 其中, ΔOD 为吸光度每分钟的变化值; V_t 为反应总体积; df 为稀释倍数; ε 为 NADH 在 340 nm 处的消光系数 $6.22 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$; V_s 为加入酶液体积; 1.0 为光径长度; C 为酶液蛋白质含量。

1.2.4 初羽化成虫飞行能力的测定

将各处理的初羽化 12 h 内粘虫成虫于 10:00 用乙醚麻醉, 除去胸腹连接处鳞片和毛后, 用 502 胶粘连于吊环上, 单头放于塑料盒中饲喂 5% 蜂蜜水, 置于原饲养条件下补充营养 10 h, 于 20:00 用昆虫飞行信息系统测定其飞行能力 (罗礼智, 1995a)。8 种处理下东方粘虫成虫飞行能力测试均在温度 $(24 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、

相对湿度 $(70 \pm 10)\%$ 、完全黑暗条件下进行, 时间为 12 h。每处理虫数 60~90 头不等, 剔除极弱飞行个体或吊飞失败个体, 每个处理取有效数据 40~60 个。

1.3 数据分析

试验数据采用 SPSS 20.0 统计软件进行方差分析, 用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同温度处理对主要能源物质含量的影响

不同温度处理之间东方粘虫体内各能源物质含量差异显著。其中处理 8 (卵至成虫均低温饲养) 糖原含量最高, 为 6.45 mg/g, 显著高于处理 2 (卵至 5 龄幼虫低温、6 龄后高温饲养) 和处理 3 (卵至 6 龄低温、蛹期后高温饲养), 分别为 4.13 mg/g 和 4.07 mg/g, 其余处理之间无显著差异, 说明整个发育期不经历温度变化时成虫的糖原含量较高, 而 6 龄幼虫和蛹期之前低温处理随后高温处理, 成虫糖原积累量较低。处理 8、处理 7 (卵至 6 龄幼虫高温、蛹期后低温饲养) 的成虫海藻糖和总脂的含量均较高, 分别为 3.74、3.01 mg/g 和 10.58、10.42 mg/g, 均显著高于其余处理, 其中处理 1 (卵至 2 龄幼虫低温、3 龄后高温饲养) 海藻糖含量最低, 为 1.47 mg/g, 处理 4 (卵至成虫均高温饲养) 总脂含量最低, 为 6.54 mg/g。处理 7 甘油三酯含量最高, 为 0.85 mg/g, 处理 8 次之, 与其它处理差异显著; 处理 4 最低, 为 0.2 mg/g (表 1)。

表 1 不同温度处理对东方粘虫主要能源物质含量及 3 种代谢酶活力的影响

Table 1 Influences of different temperature treatments on the contents of main energy substances and the activity of three metabolic enzymes in *Mythimana separata*

处理 Treatment	糖原 Glycogen (mg/g)	海藻糖 Trehalose (mg/g)	总脂 Total lipid (mg/g)	甘油三酯 Triglyceride (mg/g)	GPD ($\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ protein)	GAPDH ($\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ protein)	HOAD ($\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ protein)
1	4.89 $\pm$ 0.46 ab	1.47 $\pm$ 0.20 a	9.28 $\pm$ 0.34 cd	0.44 $\pm$ 0.04 abc	223.42 $\pm$ 15.01 a	239.40 $\pm$ 37.61 b	48.05 $\pm$ 3.93 c
2	4.13 $\pm$ 0.44 a	1.74 $\pm$ 0.30 a	8.26 $\pm$ 0.29 bc	0.54 $\pm$ 0.06 abc	324.94 $\pm$ 12.97 c	275.14 $\pm$ 31.94 c	24.73 $\pm$ 1.96 ab
3	4.07 $\pm$ 0.18 a	2.30 $\pm$ 0.10 ab	8.01 $\pm$ 0.29 b	0.21 $\pm$ 0.05 ab	274.30 $\pm$ 31.02 bc	246.36 $\pm$ 18.26 bc	22.05 $\pm$ 1.13 ab
4	5.63 $\pm$ 0.91 ab	1.97 $\pm$ 0.38 a	6.54 $\pm$ 0.29 a	0.20 $\pm$ 0.03 a	252.05 $\pm$ 20.43 ab	224.15 $\pm$ 12.54 bc	62.16 $\pm$ 5.23 d
5	4.36 $\pm$ 0.73 ab	2.47 $\pm$ 0.38 ab	8.01 $\pm$ 0.29 b	0.26 $\pm$ 0.02 ab	210.67 $\pm$ 21.04 a	168.53 $\pm$ 32.89 ab	27.46 $\pm$ 1.48 b
6	4.46 $\pm$ 0.17 ab	1.57 $\pm$ 0.18 a	9.65 $\pm$ 0.44 de	0.35 $\pm$ 0.03 ab	216.11 $\pm$ 4.40 a	194.11 $\pm$ 24.86 ab	24.41 $\pm$ 3.25 ab
7	4.32 $\pm$ 0.64 ab	3.01 $\pm$ 0.50 bc	10.42 $\pm$ 0.40 e	0.85 $\pm$ 0.30 c	277.94 $\pm$ 8.08 bc	189.58 $\pm$ 17.86 ab	20.05 $\pm$ 3.09 ab
8	6.45 $\pm$ 0.94 b	3.74 $\pm$ 0.43 c	10.58 $\pm$ 0.55 e	0.67 $\pm$ 0.13 bc	197.09 $\pm$ 19.10 a	140.43 $\pm$ 7.67 a	17.59 $\pm$ 2.46 a

表中数据为平均数 $\pm$ 标准误。同列数据后不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean $\pm$ SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

不论是高温还是低温处理, 处理时间与成虫糖类物质含量并不呈正相关。高温处理 (处理 1~4) 与低温处理 (处理 5~8) 内部之间基本无显著差异, 总

体上整个发育期低温处理成虫糖原和海藻糖含量高于高温处理, 总脂和甘油三酯含量基本保持一致, 持续低温处理和蛹期前高温、蛹期后低温处理的含量

最高,持续高温处理的含量最低。

2.2 不同温度处理对3种代谢酶活力的影响

不同温度处理之间东方粘虫体内3种代谢酶活力差异显著,处理2(卵至5龄幼虫低温、6龄后高温饲养)的GPD和GAPDH及处理4(卵至成虫均高温饲养)的HOAD活力最高,分别为324.94、275.14、62.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{protein}$,处理8(卵至成虫均低温饲养)的GPD、GAPDH和HOAD活力均最低,分别为197.09、140.43、17.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{protein}$ (表1)。对比高、低温不同处理时间发现,GPD和GAPDH活力并不与处理时间呈正相关,总体上前期低温、后期高温处理成虫体内3种酶活力高于前期高温、后期低温处理,而高温处理时间越长初羽化成虫代谢

酶活力越强,低温处理时间越长代谢酶活力越低。

2.3 不同温度处理对初羽化成虫飞行能力的影响

东方粘虫初羽化成虫在不同温度处理之间的飞行时间及飞行距离差异显著。处理3(卵至6龄低温、蛹期后高温饲养)飞行时间最长,平均为4.14 h,处理4(卵至成虫均高温饲养)次之,为3.94 h,处理7最短,仅为1.94 h,其余处理之间无显著差异。处理3飞行距离最远,平均为13.17 km,处理4次之,为10.48 km,显著高于其它处理;处理7飞行距离最短,为5.57 km,处理8(卵至成虫均低温饲养)次之,为5.82 km,其余处理之间无显著差异(图1)。总体上来看,前期低温、后期高温处理飞行时间及飞行距离均高于前期高温、后期低温处理。

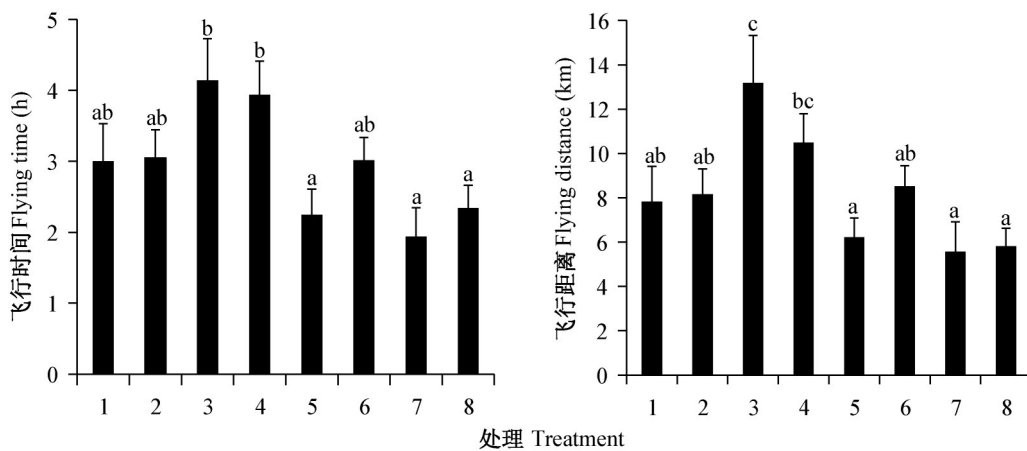


图1 不同温度处理条件下东方粘虫初羽化成虫的飞行时间及飞行距离

Fig. 1 Flight time and flight distance of newly emerged adults of *Mythimna separata* in different temperature treatments

图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

对不同处理东方粘虫个体飞行时间及飞行距离进行分段分析发现,除处理4外其余处理都是飞行时间为1~4 h个体所占比例最大,达到27%~48%;除处理6外其余处理都是飞行时间为8 h以上个体占比例最小,其中处理3飞行8 h以上的个体最多为22%,处理4和处理6次之为13%,处理5最少仅为3%。各处理都是飞行距离小于5 km个体最多,达到35%~56%,但飞行距离与个体所占比例间并不呈负相关关系;飞行距离大于15 km的强飞行个体中以处理3最多,为39%,处理4次之,为29%,处理7和处理8最少,均为7%(表2)。

3 讨论

温度对昆虫的能源物质积累、酶活力和飞行能力均有一定的影响。李艳红(2014)研究表明,不同

时间的高温处理后,斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (Fabricius) 初羽化成虫之间能源物质含量无显著差异,而短期高温处理使3龄幼虫体内甘油三酯含量显著降低,海藻糖含量显著升高;高温胁迫对梨小食心虫 *Grapholita molesta* (Busck) 体内可溶性糖含量也有显著影响,处理时间越久可溶性糖含量越低(刘彦飞,2013)。本研究结果发现,高温对照的东方粘虫酶活力与飞行能力均比低温对照高,但能源物质含量均较低。这与前人研究结论不一致,可能是由于不同昆虫生物学特性的差异以及高温处理的温度、时长和龄期的差异所致。高、低温处理对东方粘虫能源物质积累和飞行能力的影响主要在蛹期之后,而高温对幼虫生长发育的不利影响主要在4龄之后(江幸福等,1998),说明卵期及低龄幼虫耐高温能力较好。本试验虽然温度设置及处理时间与江幸福等

(1998)不完全一致,但试验结果相似,即高温对蛹期和成虫期影响较大。也有研究表明,短时高温对桃小食心虫卵期影响较小,低龄幼虫耐高温能力低于高龄幼虫(李定旭等,2014)。

表2 不同温度处理条件下东方粘虫初羽化成虫具有不同飞行时间及飞行距离的个体所占比例
Table 2 Individual proportion of newly emerged *Mythimna separata* adults with different flight time and flight distance in different temperature treatments %

处理 Treatment	不同飞行时间所占比例 Proportion of different flight durations				不同飞行距离所占比例 Proportion of different flight distances			
	<1 h	1-4 h	4-8 h	>8 h	<5 km	5-10 km	10-15 km	>15 km
1	25	46	25	4	54	25	7	14
2	29	46	14	11	50	22	14	14
3	25	31	22	22	45	8	8	39
4	31	27	29	13	35	25	11	29
5	38	44	15	3	56	29	6	9
6	29	48	10	13	52	2	10	16
7	37	48	11	4	67	22	4	7
8	30	48	16	5	57	25	11	7

温度也是导致东方粘虫季节性迁飞的重要因素(江幸福等,2014),前人研究均为恒温条件(罗礼智,1998;江幸福等,2000),而本研究发现变温下的高、低温生长环境对初羽化成虫能源物质含量及飞行能力也有不同程度的影响。卵至成虫均在高温环境下生长的粘虫,其初羽化成虫较低温环境下的更适宜迁飞,这与江幸福等(2000)报道的恒温30℃与24℃条件下生长的粘虫成虫飞行能力无显著差异不同,可能与本试验采用变温饲养有关。

总体来看,不同时间的高温处理后,东方粘虫初羽化成虫能源物质含量较低,代谢酶活力和飞行能力较高,而低温处理之间能源物质含量较高,飞行能力较低,说明高温抑制能源物质积累但能提高其飞行能力,而低温有利于能源物质积累却抑制其飞行能力。粘虫羽化后24 h内是控制其成为迁飞型还是居留型的关键时期(江幸福等,2014),本试验中成虫羽化24 h内的温度与羽化前一致,成虫在低温诱导下迁飞型转化为居留型(张蕾,2006;Zhang et al., 2008;Jiang et al., 2011),而高温抑制成虫生殖系统发育,诱导迁飞(江幸福等,2000),粘虫飞行过程中的能量一部分来自幼虫期积累,另一部分来自成虫补充营养(曹雅忠等,1996),因此,本试验中高温处理初羽化成虫体内能源物质含量少而飞行能力较好的原因可能是成虫将幼虫期积累和补充的能源物质均用于飞行,而低温处理多用于生殖。

本试验中,根据飞行时间总和、飞行距离总和以及平均飞行速度的分析结果可知,蛹期前低温、蛹期后高温以及持续高温下成虫飞行能力最强,而蛹期

前高温、蛹期后低温以及持续低温下成虫飞行能力最弱;其余高、低温处理时间对飞行能力无显著影响;总体上高温处理下的东方粘虫成虫飞行能力强于低温处理,由此可以推测东方粘虫夏季由南方向北方迁飞的行为受南方夏季高温影响较大。本试验初次对变温条件下高、低温处理时间对东方粘虫能源物质、代谢酶活力及飞行能力进行了测定,由于供试虫源的原因,未考虑雌雄虫之间能源物质积累与利用的差异(蔡彬等,2002),有待在今后的试验中再继续分类研究。

参 考 文 献 (References)

Cai B, Jiang XF, Luo LZ, Cao YZ, Liu YQ. 2002. Influences of temperature and humidity on utilization of energy substances during flight in the moths of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 22(7): 1068-1074 (in Chinese) [蔡彬, 江幸福, 罗礼智, 曹雅忠, 刘悦秋. 2002. 温、湿度对粘虫蛾飞行能源物质及其利用的影响. *生态学报*, 22(7): 1068-1074]

Cao YZ, Li GB, Hu Y. 1997. Effect of photoperiod on reproduction and flight of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 17(4): 402-406 (in Chinese) [曹雅忠, 李光博, 胡毅. 1997. 光周期对粘虫生殖与飞翔影响的初步研究. *生态学报*, 17(4): 402-406]

Cao YZ, Luo LZ, Guo J. 1996. Performance of adult reproduction and flight in relation to larval nutrition in the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 39(1): 105-108 (in Chinese) [曹雅忠, 罗礼智, 郭军. 1996. 粘虫生殖和飞翔与幼虫期营养的关系. *昆虫学报*, 39(1): 105-108]

Chen CY. 2009. Studies on the methods of harvesting *Phaeodactylum tricornutum* and extracting triglyceride. Master Thesis. Wuhan: Central China Normal University, pp. 38-42 (in Chinese) [陈春

- 艳. 2009. 三角褐指藻的收集及从中提取甘油三酯的方法研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中师范大学, pp. 38–42]
- Chen RL. 1990. Radar forecasting of migratory pests. *Forecasting of Diseases and Pests*, (2): 36–41 (in Chinese) [陈瑞鹿. 1990. 迁飞害虫的雷达监测. *病虫测报*, (2): 36–41]
- Chen RL, Bao XZ, Drake VA, Farrow RA, Wang SY, Sun YJ, Zhai BP. 1989. Radar observations of the spring migration into northeastern China of the oriental armyworm, *Mythimna separata* and other insects. *Ecological Entomology*, 14(2): 149–162
- Chen RL, Bao XZ, Wang SY, Sun YJ, Li LQ, Liu JR, Zhang DK, Lu J. 1985. The Gongzhuling entomological radar and observation on migration of armyworm and meadow moths. *Scientia Agricultura Sinica*, 18(3): 93–94 (in Chinese) [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 孙雅杰, 李立群, 刘继荣, 张德宽, 卢加. 1985. 公主岭昆虫雷达的装置和初步应用. *中国农业科学*, 18(3): 93–94]
- Cheng DF, Zhao ZH. 2016. Analysis of the reason of the armyworm outbreak in some regions of China and some suggestions. *Seed Science & Technology*, 34(10): 89–90 (in Chinese) [程登发, 赵中华. 2016. 我国部分地区黏虫暴发原因分析与对策建议. *种子科技*, 34(10): 89–90]
- Fuchs B, Süß R, Teuber K, Eibisch M, Schiller J. 2011. Lipid analysis by thin-layer chromatography: a review of the current state. *Journal of Chromatography A*, 1218(19): 2754–2774
- Jiang XF. 2004. The physiological and genetic characteristics of migratory behavior and genetic diversity, as determined by AFLP in the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). Ph. D Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [江幸福. 2004. 粘虫迁飞行为的生理、遗传特征以及遗传多样性的AFLP分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Jiang XF, Cai B, Luo LZ, Cao YZ, Liu YQ. 2003. Influences of temperature and humidity synthesize on flight capacity in the moths of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 23(4): 738–743 (in Chinese) [江幸福, 蔡彬, 罗礼智, 曹雅忠, 刘悦秋. 2003. 温、湿度综合作用对粘虫蛾飞行能力的影响. *生态学报*, 23(4): 738–743]
- Jiang XF, Liu YQ, Luo LZ, Hu Y. 1998. Effects of high temperature on the immature stages of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Journal of Beijing Agricultural College*, 13(2): 20–26 (in Chinese) [江幸福, 刘悦秋, 罗礼智, 胡毅. 1998. 高温对粘虫未成熟期生长发育的影响. *北京农学院学报*, 13(2): 20–26]
- Jiang XF, Luo LZ. 1997. Influence of temperature at pupal and adult stage on flight capacity of adult oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). //Chen XF, Dai XF, Hu T. Research and the sustainable development of ecological environment. Beijing: China Environmental Science Press, pp. 274–280 (in Chinese) [江幸福, 罗礼智. 1997. 粘虫蛹期及成虫期环境温度对成虫飞行能力的影响. //陈晓峰, 戴小枫, 胡涛. 生态环境研究与可持续发展. 北京: 中国环境科学出版社, pp. 274–280]
- Jiang XF, Luo LZ, Hu Y. 2000. Influences of rearing temperature on flight and reproductive capacity of adult oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 20(2): 288–299 (in Chinese) [江幸福, 罗礼智, 胡毅. 2000. 饲养温度对粘虫蛾飞行和生殖能力的影响. *生态学报*, 20(2): 288–299]
- Jiang XF, Luo LZ, Zhang L, Sappington TW, Hu Y. 2011. Regulation of migration in *Mythimna separata* (Walker) in China: a review integrating environmental, physiological, hormonal, genetic, and molecular factors. *Environmental Entomology*, 40(3): 516–533
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ. 2014. Novel features, occurrence trends and economic impact of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1444–1449 (in Chinese) [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智. 2014. 我国粘虫发生危害新特点及趋势分析. *应用昆虫学报*, 51(6): 1444–1449]
- Li D, Long ZR, Wang Y, Wu JX, Xu Y, Cheng WN. 2014. Changes of total lipid and triglyceride contents in pre-diapause, diapause and post-diapause larvae and pupae of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(5): 509–514 (in Chinese) [李丹, 龙治任, 王越, 仵均祥, 许烨, 成卫宁. 2014. 麦红吸浆虫滞育发生和解除过程中总脂和甘油三酯含量变化. *昆虫学报*, 57(5): 509–514]
- Li DX, Lei XH, Xu YC, Li Z, Gao LW. 2014. Effects of brief exposure to high temperature on the growth, development and reproduction of the peach fruit moth, *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(2): 218–225 (in Chinese) [李定旭, 雷喜红, 徐艳彩, 李政, 高灵旺. 2014. 短时高温对桃小食心虫生长发育和繁殖的影响. *昆虫学报*, 57(2): 218–225]
- Li GB. 1979. Comprehensive prevention and control of oriental armyworm. //Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences. Comprehensive prevention and control of major pests in China. Beijing: Science Press, pp. 301–319 (in Chinese) [李光博. 1979. 粘虫的综合防治. //中国科学院动物研究所. 中国主要害虫综合防治. 北京: 科学出版社, pp. 301–319]
- Li GB, Wang HX, Hu WX. 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three year result of releasing and recapturing of marked moths. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 101–110 (in Chinese) [李光博, 王恒祥, 胡文绣. 1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. *植物保护学报*, 3(2): 101–110]
- Li KB, Luo LZ. 1998. Effects of larval rearing density on energetic reserves in the adults of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 41(3): 250–257 (in Chinese) [李克斌, 罗礼智. 1998. 粘虫幼虫密度对成虫能源物质含量的影响. *昆虫学报*, 41(3): 250–257]
- Li KB, Luo LZ. 1999. Activities of enzymes in the flight muscle of pupal and adult oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 42(1): 37–43 (in Chinese) [李克斌, 罗礼智. 1999. 粘虫飞行肌中与能量代谢有关的酶活性研究. *昆虫学报*, 42(1): 37–43]
- Li YH. 2014. Effects of short-time high or low temperature treatment on biology and metabolism of *Prodenia litura* Fabricius. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [李艳红. 2014. 短期高、低温处理对斜纹夜蛾生物学及代谢的影响. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Liu YF. 2013. Physiological responses of adult *Grapholita molesta*

- Busck to high temperature stress. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [刘彦飞. 2013. 高温胁迫下梨小食心虫 *Grapholita molesta* Busck 成虫生理响应的研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Luo LZ. 1998. Major progress for the study of mechanism of the oriental armyworm migration flight in China. // Cheng DF. Plant protection outlook in the 21st century: plant protection outlook in the 21st century and the third national youth conference on corpus plant protection science and technology workers. Beijing: China Science and Technology Press, pp. 30–35 (in Chinese) [罗礼智. 1998. 我国粘虫迁飞行为机制研究的主要进展. //程登发. 植物保护21世纪展望——植物保护21世纪展望暨第三届全国青年植物保护科技工作者学术研讨会文集. 北京: 中国科学技术出版社, pp. 30–35]
- Luo LZ, Jiang XF, Li KB, Hu Y. 1999. Influences of flight on reproduction and longevity of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 42(2): 150–158 (in Chinese) [罗礼智, 江幸福, 李克斌, 胡毅. 1999. 粘虫飞行对生殖及寿命的影响. *昆虫学报*, 42(2): 150–158]
- Luo LZ, Li GB, Cao YZ, Hu Y. 1995a. The influence of larval rearing density in flight capacity and fecundity of adult oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 38(1): 38–45 (in Chinese) [罗礼智, 李光博, 曹雅忠, 胡毅. 1995a. 粘虫幼虫密度对成虫飞行与生殖的影响. *昆虫学报*, 38(1): 38–45]
- Luo LZ, Li GB, Hu Y. 1995b. Relationship between flight capacity and oviposition of oriental armyworm moths, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 38(3): 284–289 (in Chinese) [罗礼智, 李光博, 胡毅. 1995b. 粘虫飞行与产卵的关系. *昆虫学报*, 38(3): 284–289]
- Shalova IN, Cechalova K, Rehakova Z, Dimitrova P, Ognibene E, Caprioli A, Schmalhausen EV, Muronetz VI, Saso L. 2007. Decrease of dehydrogenase activity of cerebral glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase in different animal models of Alzheimer's disease. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1770(5): 826–832
- Wang GP, Zhang QW, Ye ZH, Luo LZ. 2006. The role of nectar plants in the severe outbreaks of armyworm *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) in China. *Bulletin of Entomological Research*, 96(5): 445–455
- Wang HL, Wu JX, Wang BL. 2006. Changes of trehalase and sorbitol dehydrogenase activity in the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) during mature and diapause stage. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 34(8): 139–142 (in Chinese) [王洪亮, 仵均祥, 王丙丽. 2006. 麦红吸浆虫滞育期间海藻糖酶和山梨醇脱氢酶活性的变化. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 34(8): 139–142]
- Wang ZS, Ouyang YC. 1995. Carbohydrates mobilization and utilization during initial flight period in the moths *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 38(2): 146–152 (in Chinese) [王宗舜, 欧阳迎春. 1995. 东方粘虫飞行初期糖类的动用和消耗. *昆虫学报*, 38(2): 146–152]
- Xu XL. 2011. Flight capacity and its physiological and biochemical mechanism in the wing polyphenic aphid, *Sitobion avenae*. Ph. D Thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [许向利. 2011. 麦长管蚜飞行能力及其相关生理生化. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Zeng J, Jiang YY, Liu J. 2013. Analysis of the armyworm outbreak in 2012 and suggestions of monitoring and forecasting. *Plant Protection*, 39(2): 117–121 (in Chinese) [曾娟, 姜玉英, 刘杰. 2013. 2012年黏虫暴发特点分析与监测预警建议. *植物保护*, 39(2): 117–121]
- Zera AJ, Sall J, Otto K. 1999. Biochemical aspects of flight and flightlessness in *Gryllus*: flight fuels, enzyme activities and electrophoretic profiles of flight muscles from flight-capable and flightless morphs. *Journal of Insect Physiology*, 45(3): 275–285
- Zhang L. 2006. The sensitive period and regulatory mechanisms for the shifting of migrant into resident in the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). Ph. D Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [张蕾. 2006. 粘虫迁飞型转为居留型的关键时期和调控基础. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Zhang L, Jiang XF, Luo LZ. 2008. Determination of sensitive stage for switching migrant oriental armyworms into residents. *Environmental Entomology*, 37(6): 1389–1395
- Zhang L, Luo LZ, Jiang XF, Hu Y. 2006. Influences of starvation on the first day after emergence on ovarian development and flight potential in adults of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 49(6): 895–902 (in Chinese) [张蕾, 罗礼智, 江幸福, 胡毅. 2006. 一日龄饥饿对粘虫成虫卵巢发育和飞行能力的影响. *昆虫学报*, 49(6): 895–902]
- Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, Zeng J, Gao YB, Cheng DF. 2012. Preliminary analysis of the outbreak of the third generation armyworm, *Mythimna separata* in China in 2012. *Plant Protection*, 38(5): 1–8 (in Chinese) [张云慧, 张智, 姜玉英, 曾娟, 高月波, 程登发. 2012. 2012年三代黏虫大发生原因初步分析. *植物保护*, 38(5): 1–8]
- Zhang YH, Zhang Z, Li C, Jiang YY, Zeng J, Cheng DF. 2013. Seasonal migratory behavior of *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) in northeast China. *Acta Entomologica Sinica*, 56(12): 1418–1429
- Zou YD, Wang SH, Wang HF. 1984. Study on the energy substances for migration of armyworm, *Leucania separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 4(4): 372–376 (in Chinese) [邹运鼎, 王士槐, 王弘法. 1984. 粘虫迁飞能源物质的研究. *生态学报*, 4(4): 372–376]

(责任编辑:李美娟)