

东亚飞蝗耐高温能力及其体温调节行为

岳梅, 雷仲仁*, 朱彬洲, 姚君明

(中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为明确东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 的耐高温能力和体温调节行为, 采用高温饲养、提供辐射热源和风力等方法, 对东亚飞蝗各发育期的高温耐受能力、体温 (body temperature, Tb) 与环境温度 (air temperature, Ta) 和辐射温度 (radiant temperature, Tr) 的关系、飞蝗对辐射热的选择行为、体温升高速率以及辐射角度和风力对体温的影响进行了研究。结果表明: 东亚飞蝗 44℃ 下饲养, LT₉₀ 最长为 326.4 h; 50℃ 下, LT₉₀ 可达 20.6 h。无辐射热条件下, Tb 随 Ta 的上升而升高, 当 Ta 升至 32℃, 蝗虫出现体温调节行为; Ta 以 0.5℃/min 速率上升时, 出现体温波动的个体数占试虫总数的 53.7%, Tb 平均波动温差为 1.15℃, 平均波动时间为 5.2 min, Tb 平均波动起始温度为 47.2℃, 成虫致死时间略长于若虫。有辐射热条件下, 随笼顶辐射温度的逐渐升高, 飞蝗趋向选择温度相对较低的笼底, 试虫体温调节较无辐射热条件下强; 辐射角度和风力均对飞蝗的体温有显著影响。结果显示东亚飞蝗对高温的耐受能力较强, 并且具有明显的体温调节行为, 可调节体温达到最佳生理状态。

关键词: 东亚飞蝗; 耐高温能力; 体温调节行为; 辐射热; 辐射角度; 风速

中图分类号: Q968.1 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2009)10-1103-07

High temperature tolerance and thermoregulation behavior of the oriental migratory locust, *Locusta migratoria manilensis* (Orthoptera: Acrididae)

YUE Mei, LEI Zhong-Ren*, ZHU Bin-Zhou, YAO Jun-Ming (State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: To clarify the ability of high temperature tolerance and thermoregulation behavior of the oriental migratory locust, *Locusta migratoria manilensis*, we adopted the methods of high-temperature breeding and offering radiant heat and wind to research the high temperature tolerance of the locust at different developmental stages, the relationship between body temperature (Tb) and air temperature (Ta) and radiant temperature (Tr), choosing behavior of locusts to radiant heat, the increasing velocity of Tb and the effects of radiant angle and wind power to Tb. The results showed that LT₉₀ reached 326.4 h at 44℃ and 20.6 h at 50℃, respectively. In the condition without radiant heat, Tb increased with Ta. Locusts showed thermoregulation behavior when Ta was raised to 32℃. When Ta was raised at the velocity of 0.5℃/min, the percentage of individuals with temperature undulation was 53.7%, the average undulation range of Tb was 1.15℃, the average undulation time was 5.2 min and the average initiative undulation of Tb was 47.2℃. The lethal time of adults was longer than that of nymphs. In the condition with radiant heat, locusts inclined to choose the bottom of cage when the radiant temperature of the top was raised gradually; thermoregulation behavior was stronger than that in the condition without radiant heat. Under different radiant angles and different wind levels and illumination combinations, locusts displayed significant differences in Tb. The results indicate that *Locusta migratoria manilensis* has obvious high temperature tolerance and thermoregulation behavior which can adjust Tb to the best physiological condition.

Key words: *Locusta migratoria manilensis*; high temperature tolerance; thermoregulation behavior; radiant heat; radiant angle; wind speed

东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 是我国历史上的重要害虫, 其为害植物以禾本科、莎草科

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30671407); 国家科技支撑项目 (2005BA529A01)

作者简介: 岳梅, 女, 1980年5月生, 山东泰安人, 博士, 研究方向为昆虫生态学, E-mail: yuemei@126.com

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

收稿日期 Received: 2009-03-23; 接受日期 Accepted: 2009-09-01

为主,至今仍严重威胁我国的粮食生产。而近年来,由于全球性气候变化,水、热季节性分配失调,造成生态环境条件发生了很大变化,这些变化为蝗灾的发生创造了有利条件,加重了蝗灾爆发的频率和严重程度(黄冬如, 2004)。

昆虫是变温动物,体温随着环境温度的变化而改变,然而昆虫并非没有体温调节能力,代谢中产生的热和吸收辐射热都可以提高昆虫体温,尤其是辐射热对昆虫体温的影响显著(彩万志等, 2001)。行为性地调节体温并达到最佳温度是取食、运动、繁殖、栖息地的选择和种群增长等各种活动的根本前提,昆虫的大小(龄期、性别)、产热特征、分布和颜色等都能影响体温和行为(Thomas and Blanford, 2003)。

在应用微生物治蝗方面,常会遇到在室内测试效果很好,田间防治效果不理想,如致死速度慢,死亡率低,甚至无防效,对有的蝗虫防效很差或不稳定等,近几年的研究发现,主要的原因之一就是与蝗虫的体温调节行为密切相关(Inglis *et al.*, 1996; Blanford *et al.*, 1998, 2000; Blanford and Thomas, 2000; Arthurs and Thomas, 2001)。对褐飞蝗 *Locustana pardalina*、塞内加尔小车蝗 *Oedaleus senegalensis* 的研究均表明寄主蝗虫的体温调节行为与病原菌存在复杂的互作关系。体温调节降低防效的原因有两个方面:一是通过体温调节提高虫体温度,高温对病原菌产生不利影响甚至使病原菌致死,如飞蝗感染绿僵菌后其体温可达 40℃ 左右,对绿僵菌有明显的抑制作用,也可使多数白僵菌失活;二是体温调节可能提高免疫反应,包括释放分子凝集颗粒(凝集素)、提高吞噬作用(调理素)、溶解外来物质(细胞溶菌酶)、凝结血浆和阻止菌丝生长(Bayne, 1991)。

东亚飞蝗属耐高温昆虫,具有一定体温调节行为,但是对于此方面的深入研究鲜见报道。本实验测定了蝗虫的耐高温能力,以及不同环境温度下虫体在无辐射热和有辐射热条件下体温的变化速率和幅度,以期为东亚飞蝗的防治,尤其是虫生真菌治蝗提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试蝗虫

实验所用东亚飞蝗系实验室多年续代饲养,于网室内每天用新鲜玉米叶片和麦麸饲喂的健康群体。

1.2 体温测定方法

参照 Blanford 等(1998)的方法,用 HH509 型手

持式数字温度计(Omega Engineering Ltd, UK)连接直径 0.125 mm 的镍铜热电偶测定蝗虫体温。测定时先用诺和针(胰岛素注射笔针头,直径 0.25 mm,无痛,体液不回流)在试虫胸部轻扎一小孔,后插入热电偶探头(约 2 mm),待读数稳定后记录数据。

1.3 东亚飞蝗耐高温能力测定

分别设置人工气候箱(RXZ 智能型,宁波江南仪器厂)温度为 44, 46, 48 和 50℃。取 1~5 龄若虫和成虫各 30 头置于箱中,箱内保持 40%~50% 相对湿度,并及时饲喂试虫,每隔一定时间检查其死亡情况。重复 3 次,求 LT_{50} 和 LT_{90} 。

1.4 无辐射热条件下东亚飞蝗体温调节行为

1.4.1 东亚飞蝗体温(T_b)与环境温度(T_a)的关系:取 3~5 龄若虫及成虫各 20 头置于人工气候箱,设置箱内温度,使其从 24℃ 以 2℃ 为一梯度逐渐升至 48℃,每个温度梯度保持一定的时间(大于 1 h)以保证虫体温度稳定,测定东亚飞蝗若虫及成虫在每一特定温度下体温。每头试虫为一次重复。

1.4.2 东亚飞蝗体温(T_b)随环境温度(T_a)的变化速率、致死时间及致死温度:取 3~5 龄若虫及成虫各 20 头,分头置于电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9240A 型,上海精宏实验设备有限公司)内,箱内保持一定湿度,箱温以 30℃ 为起点,以 0.5℃/min 速率持续升高,试虫起始体温为室温(24℃ 左右),每分钟记录试虫体温(T_b)和箱内温度(T_a),直至死亡。试虫用胶带固定腹部末端,数字温度计探针插入虫体内,温度计置于箱外读数。每头试虫为一次重复。

1.5 有辐射热条件下东亚飞蝗体温调节行为

1.5.1 东亚飞蝗对辐射温度的选择行为:选用 40 cm × 30 cm × 40 cm 纱笼,以 10 cm 高划分为 4 层。分别装入 1~5 龄若虫和成虫各 20 头,笼顶挂 500 W 的白炽灯,室温 26℃ 左右,调节灯的高度使笼顶的温度为 30, 40, 50 和 60℃,检查各发育期蝗虫在不同分层的分布比率,每隔 15 min 观察一次,观察 10 次求平均数。

1.5.2 不同辐射温度下的体温调节行为:取 3~5 龄若虫及成虫各 20 头,在 26℃ 室内挂 500 W 白炽灯,分别调节灯与蝗虫的距离,达到一定温度差,试虫装于 6 cm × 6 cm × 3 cm 的笼内,使其能自由活动并能进行调节体温活动,蝗虫稳定 10 min 后测定其体温并记录下每一高度的辐射温度和照度。每头试虫为一次重复。

1.5.3 东亚飞蝗在同一辐射热源下不同角度的体温差异:取 3~5 龄若虫及成虫各 20 头,在室温

26℃下固定于养虫笼中, 笼顶悬挂 60 W 白炽灯, 调整试虫角度, 分别与白炽灯呈 0°, 30°, 45°和 60°角, 记录各角度的辐射温度、照度。数字温度计连接于虫体, 每分钟记录试虫体温, 每一角度每头试虫测量 1 h。每头试虫为一次重复。

1.5.4 东亚飞蝗在同一辐射热源不同风速下的体温差异: 取 3~5 龄若虫及成虫各 20 头, 在室温 26℃下固定于养虫笼, 笼顶悬挂 100 W 白炽灯, 设置风速级别分别为 0 级(无风)、1 级(1 m/s)和 2 级(2 m/s), 测定开灯和关灯状态下试虫在不同风级下的体温变化, 数字温度计连接于虫体, 每分钟记录试虫体温, 每一处理每头试虫测定 1 h。每头试虫为一次重复。

1.6 数据的统计分析

应用 DPS 软件进行处理间差异显著性分析、计算 Tb 与 Ta、Tr 间的拟合曲线以及 LT_{50} 、 LT_{90} 。

2 结果和分析

2.1 东亚飞蝗耐高温能力

人工气候箱内照度为 1 982 lux, 随着箱温(T_a)的升高, 东亚飞蝗的 LT_{50} 和 LT_{90} 逐渐变短, T_a 为 44℃时, 5 龄若虫 LT_{50} 、 LT_{90} 最长, 分别为 112.5 ± 9.5 h 和 326.4 ± 27.2 h; T_a 为 46℃时, 成虫 LT_{50} 、

LT_{90} 最长, 分别为 73.2 ± 4.3 h 和 155.9 ± 10.1 h; T_a 为 48℃和 50℃时, 4 龄若虫 LT_{50} 、 LT_{90} 最长, LT_{50} 分别为 35.5 ± 2.4 h、 11.4 ± 1.1 h, LT_{90} 分别为 72.7 ± 5.8 h 和 20.6 ± 2.9 h。总体而言, 高龄飞蝗耐高温能力强于低龄。

在本实验所设高温下东亚飞蝗可以正常蜕皮, 蜕皮后色素沉积减少, 常伴随白化现象发生, 不能形成正常体色。某些试虫虽未完全死亡, 但活动能力下降, 取食减少。

2.2 东亚飞蝗体温随环境温度变化的变化

随气候箱内温度(T_a)上升, 蝗虫体温(T_b)也逐渐升高(表 1), $T_a < 32^\circ\text{C}$ 时, $T_b > T_a$; $T_a = 32^\circ\text{C}$ 时, T_b 基本上与 T_a 相等; $T_a > 32^\circ\text{C}$ 时, $T_b < T_a$ 。

随 T_a 逐渐升高, 飞蝗开始调节体温, T_a 与 T_b 温差逐渐增大。Tb 与 T_a 的拟合曲线方程分别为: 3 龄 $T_b = 5.5545 + 1.0775T_a - 0.007294T_a^2$, $R^2 = 0.9204$ ($P < 0.01$); 4 龄 $T_b = 25.5816 - 0.259263T_a + 0.013798T_a^2$, $R^2 = 0.9144$ ($P < 0.01$); 5 龄 $T_b = 3.4481 + 1.0634T_a - 0.004991T_a^2$, $R^2 = 0.9092$ ($P < 0.01$); 成虫 $T_b = 18.0853 + 0.305592T_a + 0.004499T_a^2$, $R^2 = 0.8847$ ($P < 0.01$)。由方程可以看出, 各发育期飞蝗的体温与环境温度均呈极显著的曲线关系。

表 1 东亚飞蝗在不同环境温度 (T_a) 下的体温 (T_b)

Table 1 Body temperatures (T_b) of *Locusta migratoria manilensis* at different air temperatures (T_a)

T_a ($^\circ\text{C}$)	T_b ($^\circ\text{C}$)			
	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	成虫 Adult
24.0	27.4 ± 0.2 a	27.2 ± 0.1 a	27.3 ± 0.2 a	26.8 ± 0.2 a
26.0	28.6 ± 0.2 ab	29.1 ± 0.2 a	27.0 ± 0.2 c	28.3 ± 0.2 b
28.0	30.0 ± 0.2 a	30.1 ± 0.2 a	29.0 ± 0.2 b	29.9 ± 0.3 a
30.0	31.3 ± 0.2 a	31.1 ± 0.3 a	30.6 ± 0.3 b	30.5 ± 0.2 b
32.0	31.7 ± 0.1 a	31.8 ± 0.3 a	31.6 ± 0.1 a	31.5 ± 0.2 a
34.0	32.9 ± 0.1 a	33.0 ± 0.2 a	33.1 ± 0.2 a	32.8 ± 0.3 a
36.0	34.5 ± 0.2 a	34.6 ± 0.3 a	34.6 ± 0.3 a	34.4 ± 0.3 a
38.0	34.7 ± 0.2 a	34.9 ± 0.4 a	34.9 ± 0.3 a	35.0 ± 0.2 a
40.0	35.9 ± 0.1 c	37.2 ± 0.2 b	38.3 ± 0.2 a	37.9 ± 0.2 a
42.0	39.2 ± 0.2 b	39.5 ± 0.3 ab	40.0 ± 0.2 a	40.1 ± 0.3 a
44.0	40.1 ± 0.2 a	39.8 ± 0.3 a	39.8 ± 0.3 a	40.0 ± 0.3 a
46.0	42.2 ± 0.2 a	42.3 ± 0.2 a	42.4 ± 0.2 a	42.5 ± 0.3 a
48.0	43.0 ± 0.3 a	43.2 ± 0.4 a	43.2 ± 0.4 a	43.3 ± 0.4 a

表中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 数据后不同字母表示差异显著 ($P \leq 0.05$, DPS 分析), 下同。The data in the table are mean $\pm$ SE. Different letters indicate significant difference at $P \leq 0.05$ level using DPS. The same below.

2.3 东亚飞蝗体温随环境温度的变化速率、致死时间及致死温度

T_a 与 T_b 之差是一个先缩小到稳定再增加的过程, 当 T_a 到达一定温度时, 部分试虫的体温开始在

一定范围内上下波动, 延缓体温的升高, 但随着 T_a 的继续升高, 这种控制作用被突破, T_b 继续上升直至死亡, 体温不出现波动的蝗虫则表现为升温速率降低, 以达到同样的控制体温上升效果。

从 30℃起, Ta 以 0.5℃/min 速率上升时, 体温出现波动的个体数占试虫总数的 53.7%, 平均波动温差为 1.15℃, 平均波动时间为 5.2 min, 波动开

始时平均 Ta 为 51.4℃, Tb 波动起始温度为 47.2℃。成虫致死时间最长, 死亡时的 Ta 和 Tb 较若虫高, 表现出略强的耐高温能力(表 2)。

表 2 飞蝗体温上升至死亡过程中各测定指标

Table 2 Measurement parameters during the increasing process of body temperature (Tb) of *Locusta migratoria manilensis* until death

发育期 Developmental stage	致死时间 Lethal time (min)	体温升高幅度 Elevated range of Tb (℃)	死亡时环境温度 Ta at the moment of death (℃)	死亡时体温 Tb at the moment of death (℃)	体温升高速率 Increasing velocity of Tb (℃/min)
3 龄 3rd instar	54.1 ± 0.9 b	30.1 ± 0.2 bc	57.1 ± 0.4 b	53.2 ± 0.2 b	0.56 ± 0.01 a
4 龄 4th instar	59.0 ± 0.8 a	31.1 ± 0.2 a	59.5 ± 0.4 a	54.0 ± 0.2 a	0.53 ± 0.01 ac
5 龄 5th instar	57.0 ± 1.4 ab	29.6 ± 0.5 c	58.5 ± 0.7 ab	52.9 ± 0.5 b	0.52 ± 0.02 bc
成虫 Adult	59.5 ± 1.0 a	30.7 ± 0.3 ab	59.8 ± 0.5 a	54.0 ± 0.1 a	0.52 ± 0.01 c

2.4 东亚飞蝗对辐射温度的选择行为

在笼顶 30, 40, 50 和 60℃ 下飞蝗选择辐射热 (以距离笼顶高度计) 的行为反应如图 1。所对应的

笼内顶部照度分别为: 2 020, 4 970, 13 030 和 27 300 lux; 笼底温度分别为: 28, 36, 41 和 45℃; 笼底照度分别为: 1 180, 2 400, 4 330 和 6 500 lux。

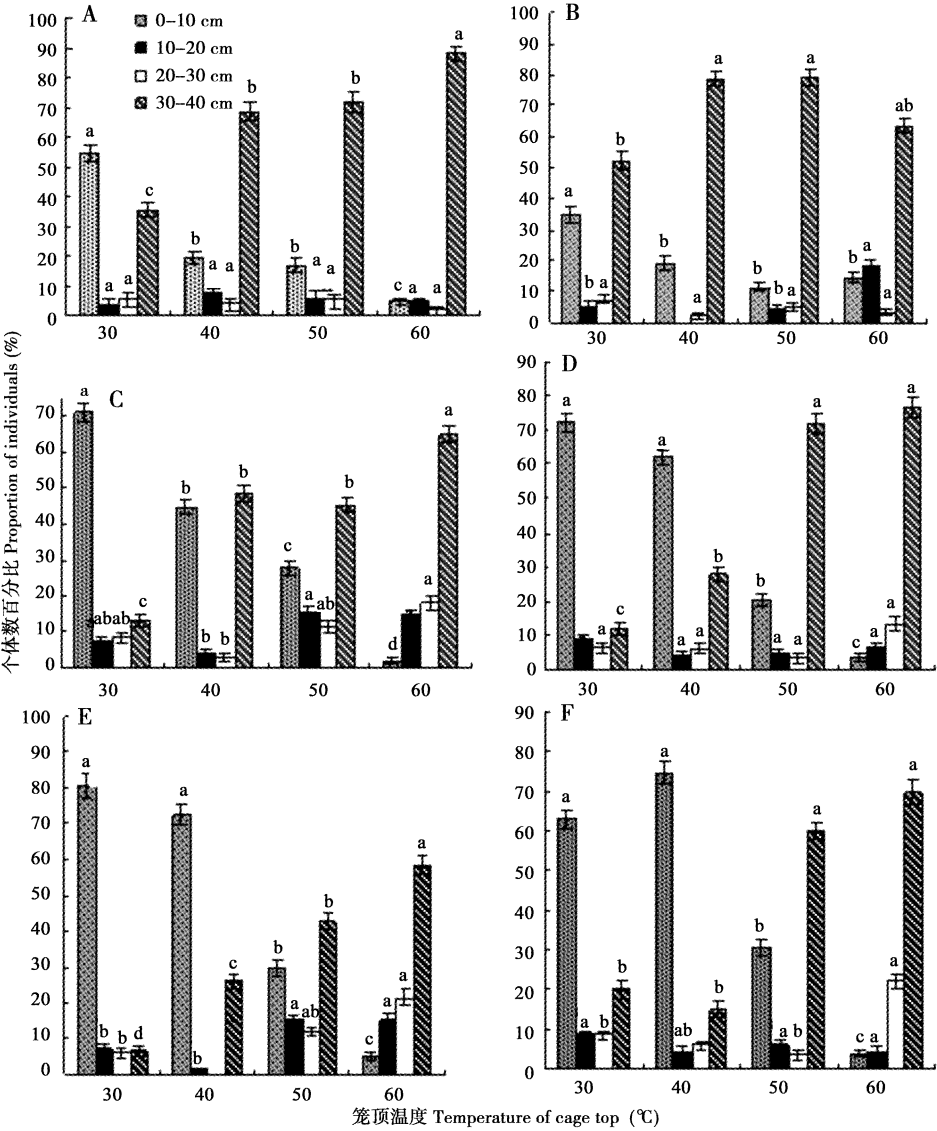


图 1 不同笼顶温度下东亚飞蝗在各层次的分布

Fig. 1 Layer distribution of *Locusta migratoria manilensis* at different radiant temperatures of cage top
A: 1 龄 1st instar; B: 2 龄 2nd instar; C: 3 龄 3rd instar; D: 4 龄 4th instar; E: 5 龄 5th instar; F: 成虫 Adult.

随着笼顶温度的升高，飞蝗趋向于选择笼底，总体来讲，飞蝗选择笼顶和笼底的个体较中间两层多，4、5 龄若虫和成虫在笼顶 40℃ 以下时，趋于选择温度较高的层次，在温度大于等于 50℃ 时，若虫和成虫一般均趋于选择温度较低的层次，笼顶温度为 30℃、40℃ 时，飞蝗选择辐射热的行为明显，大部分个体处于笼子顶层。高龄飞蝗较低龄选择高辐射温度的行为明显。

2.5 不同辐射温度下飞蝗的体温调节行为

不同发育期飞蝗在不同辐射温度 (Tr) 下的体温测定结果见表 3。热源距离蝗虫的高度为 160, 100 和 70 cm 时，Tb 比 Tr 略高，50, 40 和 30 cm 高度处，

Tb 低于 Tr，Tr 达到 50℃ 以上时，蝗虫开始频繁活动，Tb 明显低于 Tr。与若虫相比，成虫在低辐射温度下体温略高，高辐射温度下体温略低，体温调节较强。Tb 与 Tr 的拟合曲线方程分别为：3 龄 $Tb = 15.3761 + 0.664274Tr - 0.001431Tr^2$, $R^2 = 0.9181$ ($P < 0.05$)；4 龄 $Tb = 5.2260 + 1.1745Tr - 0.007697Tr^2$, $R^2 = 0.9179$ ($P < 0.05$)；5 龄 $Tb = 0.960063 + 1.2842Tr - 0.008275Tr^2$, $R^2 = 0.9809$, ($P < 0.01$)；成虫 $Tb = -2.3559 + 1.4857Tr - 0.010445Tr^2$, $R^2 = 0.7655$, ($P > 0.05$)。由方程可以看出，不同发育期体温与辐射温度呈曲线关系，但较无辐射热条件下拟合程度低，表明试虫体温调节范围较大。

表 3 东亚飞蝗在不同辐射 (Tr) 温度下的体温 (Tb)

Table 3 Body temperatures (Tb) of *Locusta migratoria manilensis* at different radiant temperatures (Tr)

高度 (cm) Height	照度 (lux) Illumination	辐射温度 (℃) Radiant temperature	试虫体温 Tb of locusts (℃)			
			3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	成虫 Adult
160	2 200	30.2	32.0 ± 0.4 bc	31.8 ± 0.4 c	32.5 ± 0.5 ab	32.8 ± 0.2 a
100	6 300	34.0	35.3 ± 0.4 b	35.2 ± 0.3 b	35.5 ± 0.4 b	36.2 ± 0.2 a
70	9 530	37.5	38.8 ± 0.5 bc	38.6 ± 0.4 c	39.2 ± 0.2 b	40.1 ± 0.4 a
50	14 350	43.9	41.8 ± 0.5 a	41.5 ± 0.5 b	41.9 ± 0.5 a	42.1 ± 0.6 a
40	20 900	48.9	42.4 ± 0.4 a	42.6 ± 0.5 a	42.9 ± 0.3 a	42.5 ± 0.5 a
30	28 300	56.8	47.6 ± 0.4 a	47.9 ± 0.3 a	47.7 ± 0.2 a	47.4 ± 0.4 a

2.6 热辐射源角度对东亚飞蝗体温的影响

试虫与光源呈 0°, 30°, 45° 和 60° 角时，对应的照度分别为：11 500, 8 200, 6 580 和 3 290 lux。不同发育期蝗虫在不同角度下 1 h 内达到的最高体温和体温升高的幅度分别见表 4 和图 2。辐射角度的差异实质为辐射温度和照度的差异，试虫表现出极显著的体温差异，同一角度下体温和升温幅度均为成虫略高。

在 1 h 记录过程中发现，试虫达到最高温度后体温并非一直维持不变，而是小范围波动，到达最高体温的时间因个体不同而不同，基本上 20 min 左右趋于稳定。

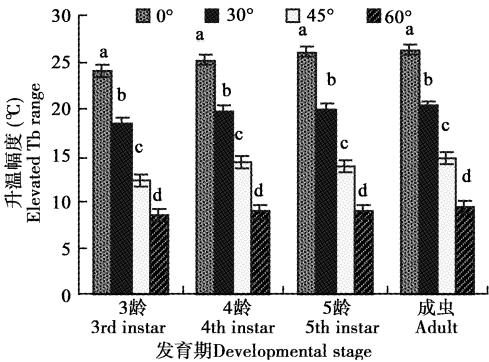


图 2 东亚飞蝗在不同辐射角度下 1 h 内体温 (Tb) 升温幅度

Fig. 2 Elevated body temperature (Tb) range of *Locusta migratoria manilensis* at different radiate angles in 1 h

表 4 东亚飞蝗在不同热辐射角度下 1 h 内达到的最高体温 (℃)

Table 4 Highest body temperature (Tb) (℃) at different heat radiate angles of *Locusta migratoria manilensis* in 1 h

发育期 Developmental stage	辐射角度和温度 Radiant angle and radiant temperature			
	0°, 45.5℃	30°, 40.0℃	45°, 35.3℃	60°, 30.8℃
3 龄 3rd instar	49.8 ± 0.8 a	44.1 ± 0.6 b	38.0 ± 0.5 c	33.1 ± 0.4 d
4 龄 4th instar	50.7 ± 0.8 a	45.2 ± 0.5 b	39.7 ± 0.5 c	34.1 ± 0.3 d
5 龄 5th instar	51.7 ± 0.7 a	45.5 ± 0.6 b	39.4 ± 0.3 c	34.2 ± 0.3 d
成虫 Adult	51.9 ± 0.8 a	45.7 ± 0.5 b	40.1 ± 0.4 c	34.4 ± 0.4 d

2.7 风力对东亚飞蝗体温的影响

风力与光照组合对蝗虫体温的影响见表 5，同一辐射热源下，从无风至给予 1 级风再至给予 2 级风，飞蝗体温逐渐下降，说明在环境温度稳定、辐射热源稳定的情况下，接近室温的风温可以降低虫

体温度，风速越大体温降低越多。无辐射热源照射时，蝗虫体温与室温有关，风速不能大幅度降低体温，试虫体温 1 h 内与室内无风条件下无显著差异。

表 5 不同风力、光照组合下东亚飞蝗 1 h 内达到的最高、最低体温 (Tb) (°C)

Table 5 The highest and lowest body temperature (Tb) (°C) of *Locusta migratoria manilensis* under different wind levels and illumination combinations in 1 h

发育期 Developmental stage	风力光照组合 Combinations of wind and illumination				
	有光照无风 Illumination without wind	有光照 1 级风 Light air with illumination	有光照 2 级风 Light breeze with illumination	无光照 1 级风 Light air without illumination	无光照 2 级风 Light breeze without illumination
3 龄 3rd instar	40.1 ± 0.5 a	30.2 ± 0.4 b	29.1 ± 0.3 c	26.4 ± 0.3 d	26.0 ± 0.2 d
4 龄 4th instar	40.4 ± 0.6 a	30.3 ± 0.5 b	28.7 ± 0.3 c	26.3 ± 0.3 d	25.9 ± 0.3 d
5 龄 5th instar	40.4 ± 0.7 a	31.0 ± 0.5 b	28.8 ± 0.4 c	26.5 ± 0.4 d	25.8 ± 0.2 d
成虫 Adult	40.9 ± 0.8 a	30.6 ± 0.4 b	29.1 ± 0.3 c	27.0 ± 0.4 d	25.7 ± 0.3 d

3 讨论

3.1 东亚飞蝗的耐高温能力

为了便于说明温度对昆虫生命活动的作用，可以假定把温度范围划分为致死高温区、亚致死高温区、适温区、亚致死低温区和致死低温区 5 个温区，其中 45 ~ 60℃ 为致死高温区，此温度范围内高温直接破坏酶的作用，甚至其他蛋白质亦受到破坏，此温度范围引起的有机体损伤是不可能恢复的。40 ~ 45℃ 为亚致死高温区，在此温区昆虫各种代谢过程的速率不一致，从而引起功能失调，表现出热昏迷状态，如继续保持这样的温度，亦会引起死亡(彩万志等, 2001)。

本实验中，东亚飞蝗各龄期均表现出较强的耐高温能力，44℃ 可以存活十几天，48℃ 下某些龄期的 LT₅₀ 也大于 3 d，这与郭鄂等(1989)报道飞蝗蝗蝻生活在 48.3℃，5 ~ 15 min 内死亡的结果不一致，原因可能是实验条件的不同，其文章中推测蝗虫高温死亡的原因与失水过多有关，本实验在人工气候箱内保持一定的湿度并提供充足食物，为蝗虫补充了水分，可能是延长其存活时间的一个原因。关于东亚飞蝗耐热的生理生化机制研究较少，杜尧等(2007)对高温造成虫体损伤甚至死亡的生理生化机制进行了归纳，大致为：高温导致昆虫体内失水、细胞内离子浓度改变、细胞骨架和细胞膜遭到破坏、神经传导紊乱以及生物大分子(蛋白质、DNA、

RNA)的结构和功能改变。东亚飞蝗具有一定耐高温能力，必然存在某种可以抵御高温的生理生化机制，可能是上述机制中的一种或几种，具体原因有待于进一步深入研究。

3.2 东亚飞蝗的体温调节行为

大多数昆虫(以及其他变温动物)通常遵循两种体温变化规律，即行为性的调节体温和无行为性调节体温。行为性调节体温表现为体温与环境温度非线性变化，而无行为性体温调节则表现为体温趋近环境温度，与环境温度成线性关系(Heath, 1964)。如蔗蝗 *Hieroglyphus daganensis* Krauss 就没有明显的体温调节行为，其体温变化和环境温度间呈直线关系(Anderson *et al.*, 1979)。

本实验通过无辐射热和有辐射热两种方式，从不同侧面研究了东亚飞蝗不同发育期的体温变化规律，结果表明东亚飞蝗具有明显的行为性体温调节。

有辐射热条件下，东亚飞蝗的体温调节行为明显高于无辐射热条件下，表现在辐射温度较低时，体温高于环境温度，当辐射温度升高至一定程度时降低体温以避免温度过高造成的伤害。虫体与辐射热源角度不同，即获得的辐射热不同，导致虫体温不同，风力在有辐射热条件下，对降低蝗虫体温有一定影响，这与 Lactin 和 Johnson(1998)报道的田间蝗虫选择最适宜的角度以最大限度的吸收太阳辐射热量和风力降低辐射条件下蝗虫体温的结果一致。总体来讲，东亚飞蝗成虫较若虫体温调节行为

更强, 高温时死亡需要的时间更长。

3.3 体温调节行为与病原菌致病性

体温调节使蝗虫体温达到最佳的生理状态, 提高虫体的免疫能力, 按照这个过程, 达到和维持昆虫的最佳温度可称为它们“最健康”的状态, 接种病原菌后, 一方面孢子要入侵寄主, 需要一个适合入侵的条件; 另一方面, 寄主要避免孢子的入侵, 产生不利于入侵的因素, 这一过程即为病原物和寄主的互作, 温度是互作关系中一个重要的因素, 体温调节起到了非常重要的作用。本实验室同时开展了在有辐射热和无辐射热条件下, 东亚飞蝗接种绿僵菌后的毒力测定实验。结果表明, 给与辐射热源的蝗虫可以通过调节提高体温, 降低感染率, 延迟致死时间, 当每日照射时间达到一定量时, 甚至可以避免感染(具体结果将另文发表)。

因此, 了解东亚飞蝗各发育期体温调节的规律和虫体可以耐受的高温极限, 可以为搞清绿僵菌和东亚飞蝗的互作关系提供理论基础, 田间应用生物农药时应避免高温阳光好的天气施药, 选择阴天气温低的天气或傍晚施药将会明显提高防治效果。

参 考 文 献 (References)

- Anderson RV, Tracey CR, Abramsky Z, 1979. Habitat selection in two species of short-horned grasshoppers. *Oecologia*, 38: 359–374.
- Arthurs S, Thomas MB, 2001. Effect of dose, pre-mortem host incubation temperature and thermal behaviour on host mortality, mycosis and sporulation of *Metarhizium anisopliae* var. *acridum* in *Schistocerca gregaria*. *Biocontrol Sci. Tech.*, 11: 411–420.
- Bayne CJ, 1991. Invertebrate host immune mechanisms and parasites escapes. In: Toft CA, Aeschlimann A, Bolis L eds. *Parasite-Host Associations: Coexistence or Conflict?* Oxford University Press, Oxford. 299–315.
- Blanford S, Thomas MB, 2000. Thermal behavior of two acridid species; Effects of habitat and season on body temperature and the potential impact on biocontrol with pathogens. *Environ. Entomol.*, 29(5): 1 060–1 069.
- Blanford S, Thomas MB, Langewald J, 1998. Behavioural fever in the Senegalese grasshopper, *Oedaleus senegalensis*, and its implications for biological control using pathogens. *Ecol. Entomol.*, 23: 9–14.
- Blanford S, Thomas MB, Langewald J, 2000. Thermal ecology of *Zonocerus variegatus* and its effect on biocontrol using pathogens. *Environ. Entomol.*, 2: 3–10.
- Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2001. General Entomology. China Agricultural University Press, Beijing. 391–402. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 梁广文, 宋敦伦, 2001. 普通昆虫学. 北京: 中国农业大学出版社. 391–402]
- Du Y, Ma CS, Zhao QH, Ma G, Yang HP, 2007. Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms of insects; a literature review. *Acta Ecol. Sin.*, 27(4): 1 565–1 572. [杜尧, 马春森, 赵清华, 马罡, 杨和平, 2007. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进展. 生态学报, 27(4): 1 565–1 572]
- Guo F, Chen YL, Lu BL, 1989. The Biology of the Migratory Locusts in China. Shandong Science and Technology Press, Jinan. 420 pp. [郭郭, 陈永林, 卢宝廉, 1989. 中国飞蝗生物学. 济南: 山东科学技术出版社. 420 页]
- Heath JE, 1964. Reptilian thermoregulation: Evaluation of field studies. *Science*, 146: 784–785.
- Huang DR, 2004. Preliminary Studies on the Pathogenesis of *Metarhizium to Locusta migratoria manilensis*. MSc Thesis, Hunan Agricultural University, Changsha. 1–2. [黄冬如, 2004. 绿僵菌对东亚飞蝗致病机理的初步研究. 长沙: 湖南农业大学硕士论文. 1–2]
- Inglis GD, Johnson DL, Goettel MS, 1996. Effects of temperature and thermoregulation on mycosis by *Beauveria bassiana* in grasshoppers. *Biol. Control*, 7: 131–139.
- Lactin DJ, Johnson DL, 1998. Environmental, physical and behavioural determinants of body temperature in grasshopper nymphs (Orthoptera: Acrididae). *The Canadian Entomologist*, 130(5): 551–577.
- Thomas MB, Blanford S, 2003. Thermal biology in insect-parasite interactions. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(7): 344–350.

(责任编辑: 袁德成)