

利用绿僵菌防治蝗虫是生物防治领域研究的一个热点。将绿僵菌按照一定比例配制成水剂或油剂喷雾是目前常用的防治蝗虫的措施(张泽华等 2000; 杨海珍等 2003; 雷仲仁等 2003; 刘宗祥等 2004; 张志武等 2004; 原红娟等 2008), 饵料释放也是常规手段之一(黄冬如等 2005; 宋树人等 2008)。蝗虫危害主要表现在取食大量的植物, 本文采用消化道侵染来研究绿僵菌侵染后东亚飞蝗取食行为及其它营养生理参数的变化, 说明东亚飞蝗取食绿僵菌饵料后对其营养生理的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

在 PRX-350B-30 智能型人工气候箱中设置 18、21、24、27、30℃ 5 个温度梯度(L:D=12:12, RH=60%), 绿僵菌处理和对照处理蝗虫分为 3、4、5 龄蝗蛹和雌、雄成虫 5 个阶段。蝗虫处理前后用小麦为食料, 在养虫笼(l=21 cm, w=16 cm, h=6 cm), 养虫盒(d_上=12 cm, d_下=6.5 cm, h=6 cm) 中单头饲养。BS221S 电子天平(d=0.1 mg) 和 DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱备用。

1.2 侵染方法

采用消化道侵染法(饵料饲喂) 处理蝗虫。供试菌株为金龟子绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*) IMI330189 菌株。称取干燥的绿僵菌孢子粉(含孢子量=600×10⁸ sp/g, 萌发率 90%) 0.5 g 到干燥洁净试管中, 另称取 9 g 烘烤麦麸, 再加入 0.5 mL 玉米油, 混合均匀制成饵料。处理时称取 0.01 g 饵料于养虫盒中, 放入 1 头蝗虫, 置于室温(24~28℃) 喂食 24 h。为刺激蝗虫取食, 蝗虫在供给饵料前 24 h 内停止喂食。以无菌的烘烤麦麸饲喂蝗虫为对照。喂食后收集剩余的饲料, 烘干, 据麦麸损失重量估算每头蝗虫摄入的孢子量(冯明光, 1997)。

1.3 取食量、近似消化力及食物转化率测定

用对比称重法(钦俊德等, 1957) 测定日取食量, 每天测量 1 次, 直至蜕皮或死亡。收集剩余小麦和蝗虫粪便, 80℃ 烘干至恒重后取出称重(王仁忠和祖元刚, 2001)。同龄等重对照法(即选择同一龄期蝗蛹或成虫称取鲜重后烘干至恒重, 根据鲜重与干重比计算得到一个比值) 得到虫体日增

重干重。喂食饵料后的蝗虫单头饲养, 15 次重复/处理。对照单头饲养, 10 次重复/处理。

1.4 数据分析

近似消化力及食物利用率计算方法参考李鸿昌等(1987), 近似消化力 $A. D. (\%) = [(摄入的食物量干重 - 粪便量干重) / 摄入的食物量干重] \times 100$; 摄入食物转换为体物质的效率(食物利用率) $E. C. I. (\%) = [身体增重干重 / 摄入的食物量干重] \times 100$ 。用 SAS 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 东亚飞蝗不同发育阶段单头摄入孢子量

3 龄、4 龄、5 龄、雄成虫、雌成虫单头摄入的孢子量分别为 0.1599×10^8 、 0.2262×10^8 、 0.2100×10^8 、 0.1890×10^8 、 0.2190×10^8 sp。

2.2 不同温度下绿僵菌侵染前后东亚飞蝗营养生理参数比较

绿僵菌侵染前(对照) 与侵染后(处理) 东亚飞蝗 3 龄蝗蛹的营养生理参数变化见表 1, 从表 1 可以看出, 温度在 21℃ 及以上温度时, 同一温度下处理日取食量极显著低于对照; 18℃ 时, 处理与对照之间无显著差异。同一温度下处理体重增重极显著小于对照, 且在 18、21、24℃ 时处理试虫体重负增长。在 18、21、24℃ 时, 同一温度下处理近似消化力极显著高于对照; 在 27、30℃ 时则相反。在 18、21、24℃ 时, 同一温度下对照试虫食物转化率极显著高于处理(负值); 在 27 和 30℃ 时处理与对照之间无显著差异。同一温度下对照试虫总取食量极显著高于处理。

绿僵菌侵染前后 4 龄蝗蛹营养生理参数变化见表 1, 从表 1 可以看出, 18、21、30℃ 时, 处理与对照之间日取食量无显著差异; 24、27℃ 时, 对照显著高于处理。对照体重增重极显著高于处理, 且在 18、21℃ 时处理试虫体重负增长。18、21℃ 时, 处理试虫近似消化力高于对照试虫; 在 24、27、30℃ 时, 处理与对照无显著差异。24℃ 时处理与对照之间无显著差异, 其它温度下, 对照试虫的食物转化率要极显著高于处理。总取食量变化规律, 对照极显著高于处理。

绿僵菌侵染前后 5 龄蝗蛹营养生理参数变化见表 1, 同一温度下对照日取食量显著高于处理。体重变化, 对照极显著高于处理。近似消化力变

表 1 不同温度下绿僵菌侵染前后东亚飞蝗营养生理参数变化比较

Table 1 Nutrient physiological parameter changes of locust before and after *Metarhizium anisopliae* infection at different temperatures

龄期 Instar	参数 Parameters	温度 Temperature (°C)				
		18	21	24	27	30
3 龄 3th instar	<i>D. F. C.</i> 处理	6.0 ± 1.0aA	5.4 ± 0.7bB	5.9 ± 1.2bB	4.8 ± 1.5bB	5.6 ± 0.5bB
	(mg) CK	8.4 ± 0.8aA	9.1 ± 0.7aA	14.1 ± 1.0aA	16.9 ± 1.3aA	26.9 ± 1.3aA
	<i>W.</i> 处理	-0.7 ± 0bB	-0.9 ± 0.1bB	-0.9 ± 0.1bB	1.5 ± 0.5bB	1.7 ± 0.2bB
	(mg) CK	2.0 ± 0.2aA	2.5 ± 0.2aA	4.7 ± 0.3aA	5.6 ± 0.5aA	8.0 ± 0.6aA
	<i>A. D.</i> 处理	73.4 ± 5.0aA	74.1 ± 2.9aA	59.1 ± 1.2aA	17.5 ± 2.0bB	20.3 ± 4.5bB
	(%) CK	50.5 ± 1.6bB	39.3 ± 3.6bB	34.4 ± 1.4bB	29.5 ± 1.4aA	37.3 ± 0.5aA
	<i>E. C. I.</i> 处理	-11.1 ± 1.8bB	-16.1 ± 3.0aA	-15.1 ± 2.9bB	30.6 ± 2.9aA	29.9 ± 3.8aA
	(%) CK	24.4 ± 1.0aA	26.3 ± 3.1bB	31.7 ± 4.7aA	34.6 ± 1.3aA	31.8 ± 1.0aA
	<i>F. C.</i> 处理	15.4 ± 1.3bB	12.6 ± 1.3bB	14.7 ± 1.3bB	10.6 ± 0.9bB	11.2 ± 0.2bB
	(mg) CK	105.4 ± 10.1aA	70.8 ± 5.5aA	84.5 ± 6.2aA	74.3 ± 5.6aA	102.2 ± 6.9aA
	<i>D. F. C.</i> 处理	15.0 ± 2.0aA	14.5 ± 2.7aA	15.9 ± 3.5bB	24.1 ± 5.2bA	41.1 ± 9.2aA
	(mg) CK	11.0 ± 1.3aA	19.6 ± 1.8aA	30.2 ± 1.8aA	36.2 ± 2.4aA	53.6 ± 4.0aA
4 龄 4th instar	<i>W.</i> 处理	-0.6 ± 0bB	-1.7 ± 0.6bB	2.9 ± 0.4bB	3.4 ± 0.7bB	4.3 ± 0.7bB
	(mg) CK	3.1 ± 0.5aA	4.8 ± 0.4aA	7.7 ± 0.5aA	9.8 ± 0.6aA	14.6 ± 1.2aA
	<i>A. D.</i> 处理	67.4 ± 2.8aA	60.8 ± 6.0aA	31.2 ± 5.8aA	34.1 ± 3.0aA	45.9 ± 6.8aA
	(%) CK	47.9 ± 0.5bA	37.8 ± 1.1bB	40.9 ± 2.3aA	39.7 ± 1.9aA	47.2 ± 0.3aA
	<i>E. C. I.</i> 处理	-3.8 ± 0.2bB	-11.7 ± 1.3bB	18.0 ± 2.3aA	14.1 ± 2.1bB	10.5 ± 0.6bB
	(%) CK	24.2 ± 0.3aA	24.9 ± 1.2aA	27.5 ± 1.5aA	27.9 ± 2.1aA	27.5 ± 0.6aA
	<i>F. C.</i> 处理	49.3 ± 2.8bB	48.9 ± 2.7bB	51.7 ± 4.0bB	60.3 ± 4.6bB	95.9 ± 8.7bB
	(mg) CK	157.8 ± 18.9aA	180.7 ± 16.5aA	190.1 ± 11.5aA	180.9 ± 12.1aA	225.3 ± 16.9aA
	<i>D. F. C.</i> 处理	9.4 ± 2.6bA	14.0 ± 6.5bB	16.4 ± 4.9bB	16.2 ± 2.9bB	45.6 ± 8.9bB
	(mg) CK	19.6 ± 2.4aA	36.7 ± 4.5aA	60.5 ± 5.6aA	92.3 ± 6.7aA	94.2 ± 10.1aA
	<i>W.</i> 处理	-0.7 ± 0bB	-2.5 ± 0.5bB	2.6 ± 0.1bB	4.5 ± 1.5bB	6.2 ± 2.7bB
	(mg) CK	3.1 ± 0.6aA	8.1 ± 1.0aA	13.3 ± 1.3aA	19.2 ± 1.5aA	23.2 ± 2.7aA
5 龄 5th instar	<i>A. D.</i> 处理	48.1 ± 4.0aA	47.5 ± 3.1aA	50.3 ± 1.6aA	10.7 ± 4.2bB	34.8 ± 4.1aA
	(%) CK	45.3 ± 1.7aA	38.2 ± 0.8bA	33.0 ± 1.2bB	33.5 ± 0.7aA	41.7 ± 0.7bB
	<i>E. C. I.</i> 处理	-8.0 ± 1.2bB	-18.1 ± 2.9bB	16.2 ± 2.9aA	24.0 ± 3.8aA	13.5 ± 2.0bB
	(%) CK	15.8 ± 1.9aA	21.6 ± 0.2aA	22.1 ± 1.2aA	21.2 ± 0.6aA	25.6 ± 0.8aA
	<i>F. C.</i> 处理	31.7 ± 3.9bB	46.8 ± 2.4bB	65.5 ± 5.2Bb	32.3 ± 1.2Bb	142.4 ± 16.0bB
	(mg) CK	590.1 ± 72.5aA	624.1 ± 77.3aA	544.0 ± 50.9aA	734.8 ± 51.9aA	663.6 ± 75.4aA
	<i>D. F. C.</i> 处理	—	24.3 ± 5.6aA	32.5 ± 8.0bB	38.5 ± 9.2bB	59.4 ± 7.7Bb
	(mg) CK	—	40.1 ± 4.9aA	74.4 ± 5.5aA	90.3 ± 5.7aA	110.1 ± 9.0aA
	<i>W.</i> 处理	—	6.4 ± 0.5aA	8.0 ± 0.7aA	8.9 ± 0.4aA	10.4 ± 2.6aA
	(mg) CK	—	4.0 ± 1.4aA	5.2 ± 0.8aA	7.4 ± 0.8aA	7.4 ± 1.0aA
	<i>A. D.</i> 处理	—	23.9 ± 1.8bB	29.9 ± 2.9bB	22.2 ± 2.5bB	26.0 ± 1.8bA
	(%) CK	—	37.2 ± 1.4aA	36.8 ± 1.1aA	31.3 ± 1.0aA	32.5 ± 1.3aA
♂ Male adult	<i>E. C. I.</i> 处理	—	26.4 ± 2.5aA	35.0 ± 2.8aA	23.6 ± 1.0aA	17.6 ± 0.8aA
	(%) CK	—	9.3 ± 1.2bB	7.6 ± 0.8bB	7.3 ± 0.8bB	6.4 ± 0.8bB
	<i>F. C.</i> 处理	—	93.1 ± 11.6bB	121.8 ± 15.5bB	109.0 ± 11.8bB	237.5 ± 32.5bB
	(mg) CK	—	3623.7 ± 445.7aA	4673.8 ± 347.9aA	4245.6 ± 267.4aA	4260.2 ± 349.0aA

续表 1

龄期 Instar	参数 Parameters	温度 Temperature (°C)				
		18	21	24	27	30
♀ Female adult	<i>D. F. C.</i> 处理	—	26.2 ± 8.4bA	48.9 ± 13.3bB	58.7 ± 13.4bB	44.1 ± 17.6bB
	(mg) CK	—	72.8 ± 13.9aA	166.4 ± 18.6aA	224.9 ± 23.7aA	291.6 ± 19.2aA
	<i>W.</i> 处理	—	5.9 ± 1.0aA	7.1 ± 1.6aA	8.0 ± 1.4bA	6.4 ± 1.4bB
	(mg) CK	—	6.9 ± 1.6aA	12.7 ± 3.1aA	17.5 ± 4.1aA	24.3 ± 3.9aA
	<i>A. D.</i> 处理	—	22.4 ± 3.7bB	37.5 ± 4.3aA	33.5 ± 2.0aA	18.2 ± 2.2bA
	(%) CK	—	39.9 ± 1.2aA	36.2 ± 1.4aA	36.7 ± 0.5aA	33.6 ± 2.9aA
	<i>E. C. I.</i> 处理	—	22.5 ± 2.3aA	14.6 ± 2.0aA	13.6 ± 1.8aA	15.0 ± 2.7aA
	(%) CK	—	8.6 ± 1.6bB	7.6 ± 1.3bA	8.0 ± 1.7aA	8.6 ± 1.8aA
	<i>F. C.</i> 处理	—	108.7 ± 8.5bB	195.0 ± 10.9bB	234.7 ± 17.1bB	114.7 ± 11.7bB
	(mg) CK	—	6971.0 ± 1088.2aA	10482.0 ± 1170.0aA	10414.0 ± 1096.0aA	11897.3 ± 781.0aA

注: *D. F. C.* — 一日取食量干重, *W.* — 一日体重干重变化, *A. D.* — 近似消化力, *E. C. I.* — 转化率, *F. C.* — 总取食量。表中值为平均值 ± 标准误, 相同小写字母表示处理与 CK 在 0.05 水平上无显著差异, 相同大写字母表示在 0.01 水平上无显著差异。

D. F. C. — daily food consumption, *W.* — daily body weight changes, *A. D.* — approximate digestibility, *E. C. I.* — efficiency of conversion of ingested food, *F. C.* — total food consumption. Data in the table are mean ± SE, and followed by the same lowercase letter indicate no significant difference between treatment and CK at 0.05 level, while the capital letter at 0.01 level. The data of adults are not used when they are at 18°C.

化, 18°C 时, 处理与对照之间无显著差异; 21、24°C 时, 处理试虫近似消化力显著高于对照; 27、30°C 时, 对照试虫近似消化力极显著高于处理。食物转化率比较, 在 18、21、30°C 时, 对照试虫食物转化率极显著高于处理, 而在 24、27°C 时, 对照与处理之间无显著差异。总取食量变化, 对照极显著高于处理。

绿僵菌侵染前后雄成虫营养生理参数变化见表 1, 从表 1 可以看出, 21°C 处理试虫日取食量与对照之间无显著差异, 其它温度下对照极显著高于处理。同一温度下体重变化无显著差异。近似消化力变化, 对照试虫近似消化力显著高于处理。食物转化率变化, 处理试虫的食物转化率显著高于对照。总取食量变化, 对照总取食量极显著高于处理。

绿僵菌侵染前后雌成虫营养生理参数变化见表 1, 从表 1 可以看出, 对照日取食量极显著高于处理。体重变化, 21、24°C 时处理与对照之间无显著差异; 27、30°C 时, 对照试虫体重增重显著高于处理。近似消化力变化, 21、30°C 时对照试虫近似消化力显著高于处理; 24、27°C 时, 侵染前后无显著差异。食物转化率变化, 21、24°C 时处理试虫食物转化率显著高于对照; 27、30°C 时, 侵染前后无

显著差异。总取食量变化, 对照极显著高于处理。

总体而言绿僵菌侵染后, 5 个温度下蝗蛹期总取食量分别为 96.4、108.3、131.9、103.2、249.5 mg; 21、24、27、30°C 4 个温度梯度下雄成虫总取食量为 93.1、121.8、109.0、237.5 mg, 雌成虫为 108.7、195.5、234.7、114.7 mg。蝗蛹期随温度升高, 近似消化力降低, 食物转化率升高, 低温时转化率为负值。雄成虫近似消化力各温度间无显著差异, 雌成虫先升后降; 24 ~ 30°C 范围内随温度升高, 雄成虫食物转化率降低, 雌成虫无显著差异。通过绿僵菌侵染前后不同发育阶段的取食比较表明: 对照试虫取食量要远远高于处理试虫, 随龄期增长, 对照试虫日取食量增大, 且雌成虫大于雄成虫; 其总取食量变化规律与日取食量相同。而处理试虫在不同发育阶段日取食量和总取食量变化没有表现出一定规律性。

3 讨论

绿僵菌侵染后东亚飞蝗日取食量和总取食量都显著减少, 同一温度下不同发育阶段的取食比较说明绿僵菌在 18 ~ 30°C 范围内对东亚飞蝗 3 龄蝗蛹至成虫均具有致病性。同时蝗虫通过自身生理变化能对外界不良环境产生一定的免疫反应

(Carruthers *et al.*, 1992; Inglis *et al.*, 1997; Blanford and Thomas, 2000; Springate and Thomas, 2005)。

绿僵菌的致病性与温度互作影响蝗虫的生长发育表现在:第一,蛹期处理试虫体重增重极显著小于对照,低温时甚至出现负增长,而成虫期体重变化无显著差异。第二,侵染后的蝗蛹在较低温时近似消化力较高,食物转化率较低,这可能与蝗虫摄入能量在体内的分配有关,即蝗蛹对食物的消化能力高,在需要一部分能量用于生长的同时,还要抵抗绿僵菌孢子萌发,而后者需要消耗较高比例的能量,所以用于体重增加的能量相对减少(Kaufmann, 1965; Mordue and Hill, 1970; Mehrotra *et al.*, 1972; Muthukrishnan and Delvi, 1974; Carefoot, 1977; Singhal, 1979; Mulkern, 1982)。而在 24~27℃ 时绿僵菌侵染后近似消化力或食物转化率变化规律发生改变,说明这个温度范围可能与绿僵菌的致病力强弱有关(Blanford *et al.*, 1998, 2001)。第三,在成虫期,侵染后的雄成虫与对照试虫比较,近似消化力较低,但食物转化率高;雌成虫在较低温时食物转化率高于对照试虫,一方面与雌雄个体差异有关,另一方面可能由于成虫期具有更强的抵抗外界不良环境的能力(Beenackers *et al.*, 1971; Beenackers and Broek, 1974)。

参考文献(References)

- Beenackers AMT, Broek ATM, 1974. Influence of juvenile hormone on growth and digestion in fifth instar larvae and adults of *Locusta migratoria*. *J. Insect Physiol.*, 20(7): 1131—1142.
- Beenackers AMT, Meisen MAHQ, Scheres JMJC, 1971. Influence of temperature and food on growth and digestion in fifth instar larvae and adults of *Locusta*. *J. Insect Physiol.*, 17(5): 871—880.
- Blanford S, Matthew B, Thomas, 1998. Behavioural fever in the Senegalese grasshopper, *Oedaleus senegalensis*, and implications for biological control using pathogens. *Ecological Entomology*, 23(1): 9—14.
- Blanford S, Matthew B, Thomas, 2001. Adult Survival, maturation, and reproduction of the desert locust *Schistocerca gregaria* infected with the fungus *Metarhizium anisopliae* var *acridum*. *J. Invertebr. Pathol.*, 78(1): 1—8.
- 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. *Environmental Entomology*, 29(5): 1060—1069.
- Carefoot TH, 1977. Energy partitioning in the desert locust, *Schistocerca gregaria* (Forsk.). *Acrida*, 6(2): 85—107.
- Carruthers RI, Larkin TS, Firstencel H, 1992. Influence of thermal ecology on the mycosis of a rangeland grasshopper. *Ecology*, 73(1): 190—204.
- 冯明光, 1997. 迁徙蚱蜢经口器摄入感染球孢白僵菌的时间与剂量效应. 浙江农业大学学报, 23(5): 491—498.
- 黄冬如, 雷仲仁, 王国平, 问曾锦, 2005. 东亚飞蝗感染绿僵菌后的组织病理变化. 昆虫知识, 42(2): 183—185.
- Inglis GD, Johnson DL, Goettel MS, 1997. Effects of temperature and sunlight on mycosis (*Beauveria bassiana*) (Hyphomycetes: Symptomulosporea) of grasshoppers under field conditions. *Environmental Entomology*, 26(2): 400—409.
- Kaufmann T, 1965. Biological studies of some Bavarian Acridoidea (Orthoptera), with special reference to their feeding habits. *Ann. Ent. Soc. Am.*, 58(6): 791—800.
- 雷仲仁, 问曾锦, 谭正华, 王音, 谢志庚, 李顺功, 吴福海, 2003. 绿僵菌油剂防治东亚飞蝗田间试验. 植物保护, 29(1): 17—19.
- 李鸿昌, 王征, 陈永林, 1987. 典型草原三种蝗虫成虫期的食物消耗量及其利用的初步研究. 生态学报, 7(4): 331—337.
- 刘宗祥, 常明, 代建聪, 谭成虎, 王俊梅, 钟自琦, 尹翠琴, 唐建明, 贺宝宝, 2004. 绿僵菌防治草原蝗虫田间效果. 草业科学, 21(8): 68—70.
- Mehrotra KN, Rao PJ, Farooqi TNA, 1972. The consumption, digestion and utilization of food by locusts. *Entomol. Exp. Appl.*, 15(1): 90—96.
- Mordue AJ, Hill L, 1970. The utilisation of food by the adult female desert locust, *Schistocerca gregaria*. *Entomol. Exp. Appl.*, 13(3): 352—358.
- Mulkern GB, 1982. Multidimensional analysis of overlap in resource utilization by grasshoppers. *Transactions of the American Entomological Society*, 108(1/2): 1—9.
- Muthukrishnan J, Delvi MR, 1974. Effects of ratio levels on food utilization in the grasshopper *Poecilacerus pictus*. *Oecologica (Berl.)*, 16: 227—236.
- 钦俊德, 郭郭, 郑竺英, 1957. 东亚飞蝗的食性和食物利用以及不同食料植物对其生长和生殖的影响. 昆虫学报, 7(2): 143—166.
- Singhal RN, 1979. Effect of temperature on consumption,

- digestion and utilization of food in *Poecilocus pictus* Fabr. (Orthoptera: Acrididae). *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 88(1): 229—239.
- 宋树人,张泽华,高松,农向群,王广君,2008. 绿僵菌药后草原蝗虫种群空间分布型研究. *昆虫学报*, 51(8): 883—888.
- Springate S, Thomas MB, 2005. Thermal biology of the meadow grasshopper, *Chorthippus parallelus*, and the implications for resistance to disease. *Ecological Entomology*, 30(6): 724—732.
- 王仁忠,祖元刚,2001. 羊草种群生物量和能量生殖分配的研究. *植物研究*, 21(2): 299—303.
- 杨海珍,赵郁强,李素平,2003. 20% 绿僵菌油剂防治东亚飞蝗药效试验研究. *农药科学与管理*, 24(2): 17—18.
- 原红娟,樊昌密,陈莉,2008. 高效杀蝗绿僵菌复配制剂田间试验研究. *农业与技术*, 28(4): 64—67.
- 张泽华,高松,张刚应,王扬,杨宝东,张卓然,郑双悦,王梦龙,2000. 应用绿僵菌油剂防治内蒙古草原蝗虫的效果. *中国生物防治*, 16(2): 49—52.
- 张志武,谢建军,史滢预,史滢预,谢志庚,李顺功,吴福海,2004. 20% 杀蝗绿僵菌油剂防治东亚飞蝗田间药效试验. *天津农林科技*, 1: 4—5.

祁连山区几种草地蝗虫蛋白质营养评价*

孙涛^{1 2 **} 刘志云^{1 3} 秦丽萍^{1 3}

(1. 兰州大学青藏高原生态系统管理国际中心 兰州 730020; 2. 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室 兰州 730020; 3. 兰州大学草地农业科技学院 兰州 730020)

摘要 为评价草地蝗虫作为家禽蛋白源饲料的营养价值。本研究以几种草地蝗虫为供试对象,在分析测定其蛋白和氨基酸含量基础上,采用国际通用蛋白质营养评价标准,分析评价其蛋白质营养价值。结果表明,草地蝗虫蛋白含量高(62.4% ~ 67.3%, DM),氨基酸组分齐全、家禽所需必需氨基酸约占蝗虫总干重的30.3% ~ 34.2%,其氨基酸模式优于1973年FAO提出模式。与家禽常用蛋白源饲料(鱼粉和大豆)相比,草地蝗虫蛋白多数氨基酸评分、化学分、必需氨基酸指数和比值系数高于或接近参照蛋白源相应评分。但草地蝗虫蛋氨酸、胱氨酸和色氨酸的化学分和氨基酸分均低于对照蛋白源,说明这3种氨基酸可能成为草地蝗虫用作家禽饲料的限制性氨基酸。而氨基酸比值系数分析结果也证实草地蝗虫作为蛋白源饲料,其蛋白蛋氨酸、胱氨酸和色氨酸含量的不足。总之,草地蝗虫作为家禽饲料,是一种优质蛋白源饲料,有望随着草地蝗虫开发利用的不断深入,必将在家禽养殖业中发挥越来越重要的作用。

关键词 蛋白营养源, 营养价值, 饲料, 家禽

Protein nutrition evaluation of rangeland grasshoppers in the Qilian Mountain

SUN Tao^{1 2 **} LIU Zhi-Yun^{1 3} QIN Li-Ping^{1 3}

(1. International Centre for Tibetan Plateau Ecosystem Management, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China;
2. Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China;
3. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University; Lanzhou 730020, China)

Abstract In order to investigate the nutritional value of grassland grasshoppers as poultry feed, several different species of grasshoppers were collected from grassland and their protein content analyzed according to international standards. The results indicate that grasshoppers are rich in protein, the content of which varied from 62.4 percent in *Angaracris rhodopa* to 67.3 percent in *Oedalius asiaticus*. There were 18 kinds of amino acids, accounting for 30.3% – 34.2% DM of the dietary requirements of poultry. The amino acid profile of grasshopper protein was superior to that recommended by the FAO in 1973. The amino acid scores (AAS), chemical scores (CS), essential amino acid index (EAAI) and ratio coefficient (RC) of most protein in grasshoppers was higher, or similar, to those of common poultry feeds, such as fish and beans. However, the CS and AAS of methionine, cystine and tryptophan in grasshopper protein were lower than those of fish and beans, indicating that these amino acids are limiting in grasshopper protein. In conclusion, grasshoppers are a good protein source for poultry feed that could play an increasing role in the poultry industry.

Key words protein nutritional resource, nutritional value, feed, poultry

昆虫作为地球上广泛分布的古老生物类群之一,以其种类多、繁殖快和巨大生物量而著称。此外,昆虫体内所含蛋白养分丰富、齐全和均衡,是最具开发潜力的动物蛋白营养源(Barker *et al.*, 1998; 陈晓鸣, 1999)。近年来,昆虫营养源逐渐受到人们普遍关注,相关营养分析和评价工作渐多(Finke, 1987; 马惠钦和裴素俭, 1999; Onifade *et al.*, 2001; 吴福中等, 2005); 同时受到有关行业

1998; 陈晓鸣, 1999)。近年来,昆虫营养源逐渐受到人们普遍关注,相关营养分析和评价工作渐多(Finke, 1987; 马惠钦和裴素俭, 1999; Onifade *et al.*, 2001; 吴福中等, 2005); 同时受到有关行业

* 资助项目: 国家自然科学基金(30730069)。

** 通讯作者, E-mail: sunt231@lzu.edu.cn

收稿日期: 2011-05-31, 接受日期: 2011-06-13

亚洲飞蝗发声器结构与鸣声时域特征研究^{*}

李 敏 王寅亮 宋慧华 刘 斐 任炳忠^{**}

(东北师范大学 生命科学学院 长春 130024)

摘 要 本文对亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* (L.) 发声器的结构及鸣声的时域特征进行了研究。亚洲飞蝗主要的发声方式为前翅中闰脉-后足股节型,即前翅中闰脉的发声齿与后足股节内侧隆线相互摩擦发出鸣声。应用扫描电子显微镜技术对发声器的结构进行观察,结果表明,亚洲飞蝗前翅中闰脉具有单排规则排列的发声齿,发声齿为圆形颗粒状突起。同种不同个体,发声齿的形态与排列稳定,个体差异不明显。亚洲飞蝗雄性与雌性发声齿的数量和分布存在差异,雄性的发声齿发育较为正常,雌性的发声齿发育不完全,这可能是造成雄性鸣声较为清脆,雌性鸣声较为嘶哑的原因之一。鸣声时域波形图分析结果表明,亚洲飞蝗鸣声的脉冲序列由一系列具有典型双脉冲的脉冲组构成,每个脉冲组持续时间为 0.042 s,脉冲组间隔为 0.073 s;脉冲组中 2 个单脉冲持续时间分别为 0.015 s 和 0.017 s,2 个单脉冲的脉冲间隔约为 0.0075 s。

关键词 亚洲飞蝗,发声器,鸣声,时域

Studies on the time domain characters of songs and the stridulatory organs of *Locusta migratoria migratoria*

LI Min WANG Yin-Liang SONG Hui-Hua LIU Fei REN Bing-Zhong^{**}

(School of Life Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract The morphology of the stridulatory organs of *Locusta migratoria migratoria* (L.) was examined with a scanning electron microscope and the time domain characters of its songs analyzed. Stridulation in *Locusta migratoria migratoria* involves the forewing acting in combination with the rear femur. Rubbing stridulatory teeth on the middle intercalary vein of the forewing with on the rear femur produces sound. Stridulatory teeth with a circular granular swell are distributed regularly on the middle intercalary vein of the forewing in a single line. No significant differences in the shape and arrangement of stridulatory teeth were found between individuals of *Locusta migratoria migratoria*. However, the number and distribution of stridulatory teeth on the middle intercalary vein differed between male and female adults. Stridulatory organs of male adults were fully developed but those of female adults were only partially developed. We infer that this is the reason why the chirp of male adults is crisp and that of female adults is hoarse. Song analysis showed that the chirp rhythm of *Locusta migratoria migratoria* was highly regular with an obvious double pulse. Individual chirps lasted about 0.042 s and the interchirp interval was about 0.073 s. The A and B pulse of the chirps continued for about 0.015 s and 0.017 s respectively with a pulse interval of about 0.0075 s.

Key words *Locusta migratoria migratoria*, stridulatory organs, song, time domain

亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* (L.) 属于直翅目 Orthoptera、蝗总科 Acridoidea、飞蝗属 *Locusta* Linnaeus,亚洲飞蝗雌性成虫和雄性成虫在两性交配期均可以发出鸣声。鸣声是昆虫间传递信息的有效方式之一,在种内个体间的召唤、求

偶、攻击和报警等方面起着非常重要的作用。印象初(1982)对我国蝗总科的发声器进行研究,蝗总科昆虫除无翅及翅非常退化的种类外,大多数种类能发声,且不同的种类具有不同的发声机制。金杏宝和夏凯龄(1981)用扫描电镜技术,研究了

^{*} 资助项目:公益性行业(农业)科研专项(200903021)。

^{**}通讯作者, E-mail: bzren@163.com

收稿日期:2011-04-27,接受日期:2011-05-11

雏蝗属 *Chorthippus* 40 多种的发声齿,这个属的种类似发声齿生于后足股节内侧下隆线上,其是表皮的角质衍生物,生于小窝内,可转动,不同种的发声齿形态有别。同种不同个体,发声齿的形态与排列稳定,个体差异不明显。雄性的发声齿发育正常,雌性的发声齿发育不完全。郑哲民(1988)曾研究过白纹蝗属 *Leuconemacris* 8 种雄性的发声齿,席瑞华等(1990)研究了长白山自然保护区 6 属 7 种蝗虫的鸣声特征和发声齿的结构。曹立民等(1992)对东北地区跃度蝗属 *Podismopsis* 8 种雄性的发声齿作了比较研究,发声齿大致呈桃形,不同种的发声齿形态、排列、数目及特异性齿等有明显的差异,曹立民等(1995)对东北地区跃度蝗属鸣声结构进行了比较研究。目前,对于飞蝗属的发声器结构与鸣声特征的研究较为少见。本文应用扫描电子显微镜技术对亚洲飞蝗的发声器结构进行观察,通过计算机的声谱分析软件对鸣声时域特征进行分析,所得研究结果将为蝗总科鸣声的研究提供基础资料,为鸣声在分类学、行为学等方面的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验用亚洲飞蝗为东北师范大学昆虫学研究室笼养,室内饲养温度(30 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 65%~75%,养虫笼的规格为 55 cm \times 53 cm \times 50 cm,每只养虫笼内饲养 40 只亚洲飞蝗成虫,雌雄性别比例为 1:1,食料为新鲜的芦苇叶。

1.2 方法

2010 年 7 月 23 日至 2010 年 8 月 23 日晴天 16:00—21:00 对雌性和雄性成虫交配期间的鸣声行为进行观察录音,在距离鸣叫个体 15~20 cm 处利用线性录音棒(PCM-D50 Digital Recorder, Sony Corporation, Tokyo, Japan)对亚洲飞蝗雌性和雄性个体交配期间各种行为下的鸣声进行录音采样,把数字化后的鸣声资料以“.wav"格式文件贮存。亚洲飞蝗前翅发声器的结构取材于录音现场,经处理后进行扫描电镜观察。

1.3 数据处理与分析

采用 Cool Edit Pro V2.1 声谱分析软件对数字化的鸣声资料进行分析、归纳和比较,然后选出清晰且有代表性的鸣声进行时域特征分析,应用

u -检验的方法对亚洲飞蝗鸣声的时域特征参数进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 亚洲飞蝗发声器的结构

亚洲飞蝗雌性和雄性成虫在交配期间均可发声,其发声方式为前翅中闰脉-后足股节型,即利用前翅中闰脉上着生的发声齿与后足股节内侧隆线摩擦发声。亚洲飞蝗前翅中闰脉的发声齿扫描电镜结果表明(图 1),亚洲飞蝗雌雄成虫前翅中闰脉上的发声齿结构相同,均为单排圆形颗粒状的突起,发声齿直径大约为 0.035 mm,声齿间距大约为 0.020 mm,密度为 18 个/mm。同种不同个体,发声齿的形态与排列稳定,个体差异不明显。但是,亚洲飞蝗雄性与雌性成虫前翅中闰脉上发声齿的分布与数量存在差异,雄性中闰脉长度大约为 11.00 mm,从中闰脉的前端直至后端与前肘脉交界处均有发声齿的分布,发声齿的数量大约在 180~185 个左右。雌性中闰脉长度大约为 12.00 mm,中闰脉前端无发声齿的分布,中闰脉末端发声齿分布较为稀疏,并且发声齿发育不完全,整个中闰脉上发声齿数目 135~140 个左右。由此可见,雄性的发声齿比雌性的发声齿发育更为正常且分布数目较多,这可能是造成雄性鸣声较为清脆,雌性鸣声较为嘶哑的原因之一。

2.2 亚洲飞蝗鸣声时域特征分析

亚洲飞蝗鸣叫高峰期即交尾高峰期一般在下午 16:00 到 21:00 左右,雌雄成虫在抱对开始前的一段时间,雄性每隔 5~8 min 用后足摩擦前翅发出鸣声,一次鸣声持续 5~10 s。亚洲飞蝗鸣声的时域波形图(图 2)及光谱图(图 3)表明,鸣声的脉冲序列由一段具有典型双脉冲的脉冲组构成,脉冲序列间隔不均匀,不同脉冲序列中包含的脉冲组数不等。每个脉冲组由 2 个稳定的单脉冲组成且排列有序,每个脉冲组持续时间约为 0.042 s,脉冲组间隔约为 0.073 s;每个脉冲组中 2 个单脉冲(脉冲 A 与脉冲 B)的持续时间分别为 0.015 s 和 0.017 s,2 个单脉冲的脉冲间隔稳定,约为 0.0075 s。对脉冲组中 2 个单脉冲的脉冲宽度和振幅进行 u -检验,结果表明,脉冲 A 和脉冲 B 在脉冲宽度和振幅方面存在差异(表 1),两者为大小不同的独立脉冲。另外,多个样本鸣声的声谱

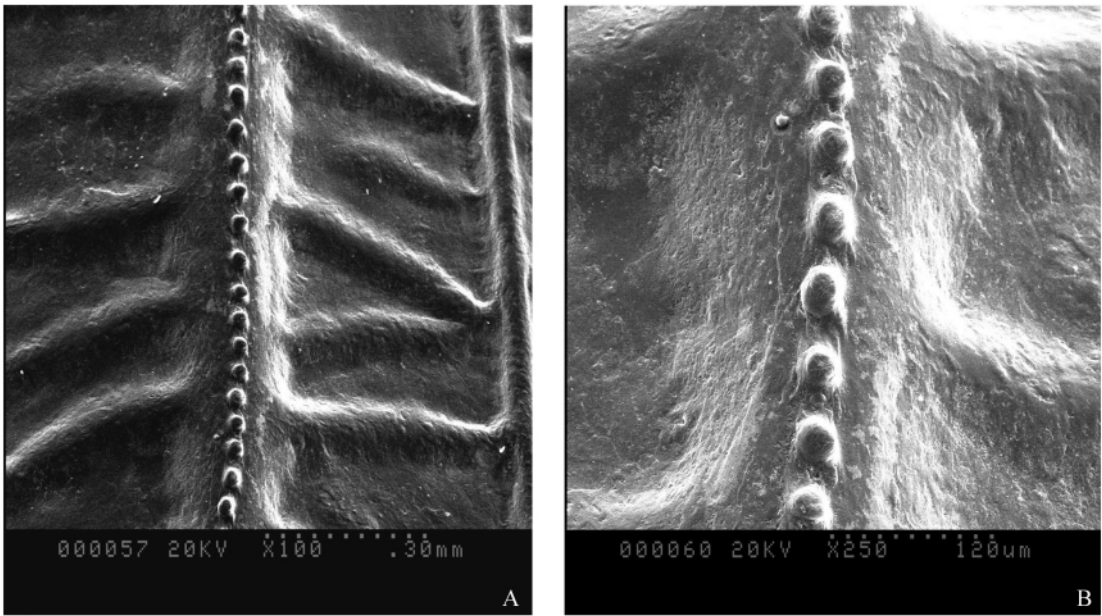


图 1 亚洲飞蝗雄性前翅中闰脉发声齿(A ×100; B ×250)

Fig.1 Stridulatory teeth on the middle intercalary vein forewing of male *Locusta migratoria migratoria*(A ×100; B ×250)

表 1 亚洲飞蝗鸣声参数 *u* - 检验

Table 1 *u*-test of *Locusta migratoria migratoria* calling songs

	样本数 Number of samples	平均值 Average	标准差 Standard error	相对误差 Relative error (%)	<i>u</i> -test value
脉冲 A 宽度(ms) Width of pulse A	187	15.45	0.25	1.7	5.329
脉冲 B 宽度(ms) Width of pulse B	187	17.74	0.36	2.1	
脉冲间隔(ms) Intervals between A & B	186	7.49	0.36	4.9	
脉冲组间隔(ms) Intervals between double pulse	186	73.1	1.5	2.1	11.68
脉冲 A 振幅 Amplitude of pulse A (normalized)	187	0.293	0.019	6.3	
脉冲 B 振幅 Amplitude of pulse B (normalized)	187	0.0736	0.0036	4.9	
振幅比率 A / B Amplitude ratio A / B	187	4.12	0.25	6.0	

分析结果表明 ,同种不同个体的鸣声结构特征稳定 ,差异不明显 ,亚洲飞蝗雄性和雌性成虫鸣声时域特征无显著性差异。

3 讨论

印象初(1982) 对我国蝗总科的发声机制进行系统研究 ,认为共有 11 种类型。其发声器的构造一般为身体某一部分具有颗粒状突起(发声齿) ,

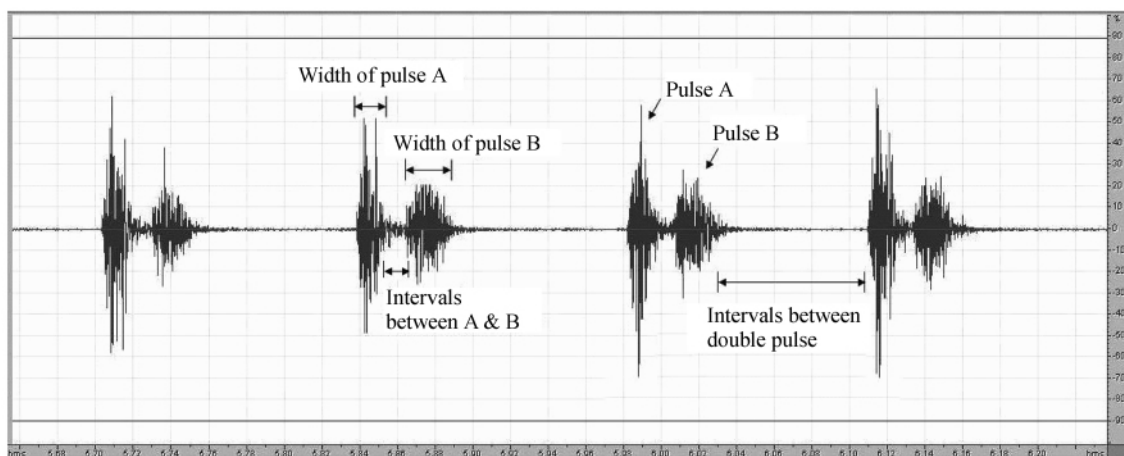


图 2 亚洲飞蝗鸣声时域波形图

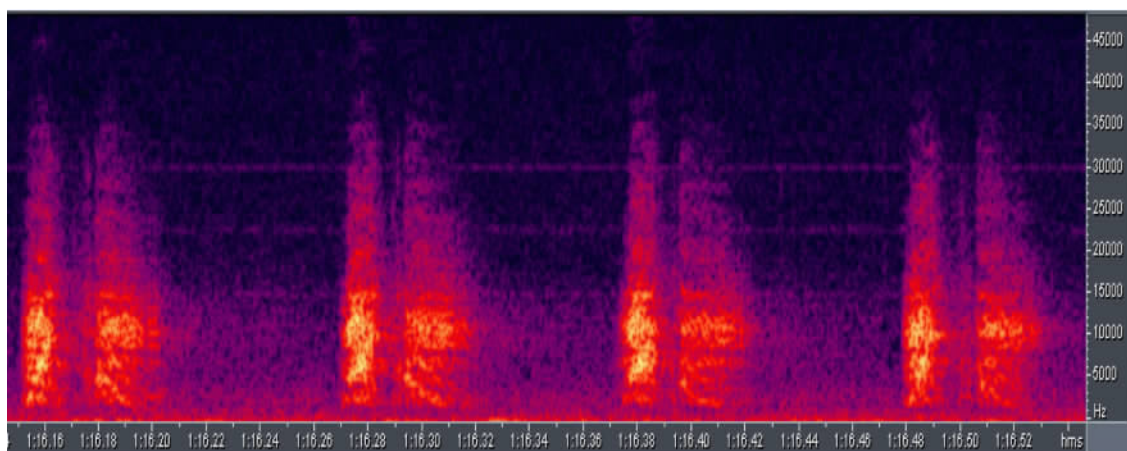
Fig. 2 Time-domain plot of *Locusta migratoria migratoria* calling songs

图 3 亚洲飞蝗鸣声光谱图

Fig. 3 Spectral graph of *Locusta migratoria migratoria* calling songs

与身体的相应部位相互摩擦发声。斑翅蝗科的发声方式主要为前翅中闰脉-后足腿节型,即前翅中闰脉上具一系列发声齿,同后足腿节内侧隆线相摩擦而发声。本文的研究结果验证了这一结论,亚洲飞蝗雌雄性成虫均为前翅中闰脉-后足股节型发声方式,为典型的斑翅蝗科的发声类型。林凤鸣(1987)研究了西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* Chen 雌性的一种发声器,其雌性发声器由前翅亚前缘脉(Sc)和第一肘脉(Cu₁)腹面的隆线(其上具发声齿)构成声锉,后翅的径脉(R)背面构成刮器。在交配季节,雌雄虫相遇时,雄虫后足腿节与前翅中闰脉摩擦,发出求偶信号。雌虫接到该信号后,后足腿节轻微地作前后摆动(但不

与前翅接触),前翅略张开,然后以后翅径脉背面的隆线急速地摩擦前翅腹面的声齿,从而产生鸣声。雌虫发出鸣声后,雄虫便与之交配。本文观察的亚洲飞蝗雌性成虫并未发现此种发声方式,这说明作为飞蝗属的2个不同亚种,在发声结构与发声方式上两者可能存在差异。飞蝗属的不同亚种在飞翔状态下会发出鸣声,但是由于飞蝗在飞翔时的鸣声难以观察收集和测量,本文仅对亚洲飞蝗雌雄成虫静息状态下的发声机制进行了研究。

郭郭等(1991)对飞蝗两性交配的习性进行了观察,发现雌雄两性成虫在交配过程中能用后足摩擦前翅发声。本研究对亚洲飞蝗雌雄成虫性成

熟期的鸣声进行了观察,发现雌雄成虫的鸣声行为主要与两性交配期的抱对交尾等活动有关。亚洲飞蝗在以下几种行为模式下通常会发出鸣声:雌雄成虫开始交尾时,雄性个体跃登雌性背上进行抱对,在抱对前期雌蝗前翅与后足股节内侧隆线摩擦发声,若雌虫接受雄虫的交尾行为,雌虫发声一段时间后停止;若雌虫不接受雄虫的交尾行为,雌虫不间断的发出鸣声,警告雄虫离开。当雄虫误登上另一个雄虫背面,被抱住的雄虫用力挣扎同时摩擦前翅发出鸣声以示警告,错误抱对的雄虫即自行离开。雌雄成虫在抱对交尾过程中,如遇到第3者跃登到正在抱对的雄虫背面时,处于抱对状态的雄蝗也会摩擦前翅发出鸣声警告。另外,亚洲飞蝗雌雄成虫在停栖静止、取食等活动进行时如果受到第二方个体干扰时也会用前翅摩擦后足股节内侧隆线发出鸣声。本文对亚洲飞蝗两性交配期间不同行为下鸣声的时域特征进行了比较研究,结果显示,雌雄成虫在性成熟期类似求偶、报警、排斥等不同行为模式下的鸣声时域波形图无显著性差别。关于亚洲飞蝗不同行为模式下鸣声特征的细微差异及其所代表的准确生物学意

义,还有待于进一步深入研究。

参考文献(References)

- 曹立民,郑哲民,廉振民,1992. 东北地区跃度蝗属发音器的比较研究(蝗总科:网翅蝗科). 中国科协首届青年学术年会陕西卫星会论文集. 西安:陕西师范大学出版社. 69—73.
- 曹立民,郑哲民,廉振民,1995. 东北地区跃度蝗属鸣声结构的比较研究. 昆虫分类学报, 17(1): 70—74.
- 郭郭,陈永林,卢宝廉,1991. 中国飞蝗生物学. 济南:山东科学技术出版社. 330—332.
- 金杏宝,夏凯岭,1981. 发音器在蝗虫分类中应用的初步研究. 昆虫学研究集刊(2): 183—186.
- 林凤鸣,1987. 西藏飞蝗的雌性的一种发声器. 昆虫知识, 24(5): 292—293.
- 席瑞华,湖举鹏,陈念丽,1990. 长白山自然保护区蝗虫鸣声结构的特点. 昆虫知识, 27(6): 329—331.
- 印象初,1982. 中国蝗总科发音器的研究. 中国昆虫学会1982年代表大会及学术讨论会论文集. 82—85.
- 郑哲民,1988. 白纹蝗属 *Leuconemacris* 8种雄性蝗虫的发声齿的比较. 昆虫分类学报, 10(3/4): 283—292.

绿僵菌侵染后东亚飞蝗营养生理参数变化研究^{*}

涂雄兵^{1,2,**} 李志红² 牙森·沙力¹ 张泽华^{1,***}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所农业部生物防治重点开放实验室 北京 100193;

2. 中国农业大学农学与生物技术学院昆虫系 北京 100193)

摘 要 本文采用饵料饲喂方法研究东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) 营养生理参数变化,结果表明:绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*)侵染后,5个温度梯度下蛹期总取食量分别为96.4、108.3、131.9、103.2、249.5 mg;21、24、27、30℃ 4个温度梯度下雄成虫总取食量为93.1、121.8、109.0、237.5 mg,雌成虫为108.7、195.5、234.7、114.7 mg。随温度升高,蛹期近似消化力降低,食物转化率升高,低温时转化率为负值。21~30℃范围内雄成虫近似消化力在各温度间无显著差异,雌成虫先升后降;24~30℃范围内随温度升高,雄成虫食物转化率降低,雌成虫无显著差异。与对照相比:同一温度下对照总取食量极显著高于处理试虫。绿僵菌侵染前后不同发育阶段的取食比较表明:对照试虫随龄期增长,日取食量增大,且雌成虫大于雄成虫;对照试虫总取食量变化规律与日取食量相同;而处理试虫在不同发育阶段日取食量和总取食量变化没有表现出一定规律性。

关键词 东亚飞蝗,绿僵菌,温度,生长发育,取食量

Nutrition physiological parameter changes of *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) infected with *Metarhizium anisopliae*

TU Xiong-Bing^{1,2,**} LI Zhi-Hong² Yaseen · Sali¹ ZHANG Ze-Hua^{1,***}

(1. Key Laboratory for Biological Control of Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. Department of Entomology, College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract We investigated changes in the nutritional physiological parameters of *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) infected with *Metarhizium anisopliae* at 18, 21, 24, 27 and 30℃. Total food consumption of 3rd – 5th instar nymphs infected with *M. anisopliae* was 96.4, 108.3, 131.9, 103.2 and 249.5 mg respectively. The total food consumption of infected adults at 21, 24, 27 and 30℃, was 93.1, 121.8, 109.0 and 237.5 mg, respectively for males, and 108.7, 195.5, 234.7, 114.7 mg for females. The approximate digestive efficiency of infected nymphs decreased, and conversion efficiency increased, with increasing temperature, the latter being a negative value at lower temperatures. There were no significant differences in the approximate digestive efficiency of infected male adults, but that of infected female adults decreased after initially rising. The conversion efficiency of infected male adults decreased from 24 to 30℃, but that of infected female adults did not. The total food consumption of infected locusts was much less than that of CK locusts. We also studied changes in the food consumption of different developmental stages; the daily food consumption of CK nymphs increased at constant temperature and that of female adults was higher than that of male adults. Changes in the total food consumption of CK locusts were the same as changes in daily food consumption. However, there was no obvious relationship between these parameters in locusts infected with *M. anisopliae*.

Key words *Locusta migratoria manilensis*, *Metarhizium anisopliae*, temperature, growth and development, food consumption

* 资助项目:现代农业产业技术体系建设项目(nycytx-37)。

**E-mail: txb1208@163.com

***通讯作者, E-mail: lgbcc@263.net

收稿日期:2011-04-26,接受日期:2011-05-05