黄褐幕枯叶蛾生殖行为研究和林间引诱试验*

武玉洁[1**] 刘志雄[1] 张金桐[1***] 陈旭鹏[1] 郝爱忠[2] 李建兵[3]

（1. 山西农业大学化学生态研究所，太谷 030801；2. 山西省林业有害生物防治检疫站，太原 030012；
3. 山西省大同市阳高县森林病虫害防治检疫站，大同 038100）

摘 要 **【目的】**为探索一种高效、无污染的防治黄褐幕枯叶蛾 *Malacosoma neustria testacea* Motschulsky（Lepidoptera：Lasiocampidae）的方法，本文对其生殖生物学特征进行了研究。**【方法】** 本试验于 2013 年和 2014 年期间通过室外笼内人工饲养和野外调查相结合，观察黄褐幕枯叶蛾的生殖行为学特征。**【结果】**黄褐幕枯叶蛾羽化期 40 d 左右，羽化高峰在 6 月 19 日—7 月 03 日，日羽化高峰期在 17:00—19:00，雌雄平均性比为 1∶(1.19±0.07)，未交配雌雄成虫的平均寿命分别为（4.13±0.142）d 和（4.57±0.035）d，雄蛾的寿命高于雌蛾。在凌晨 0:00—3:00 均能观察到雌蛾有明显的求偶行为。成虫交尾高峰在凌晨 2:30 左右，1 日龄的成虫交尾率最高（61.67%±2.89%），随着日龄的增加成虫的交尾行为逐渐减弱。交尾持续时间最短为 20 min，最长可达 135 min。林间诱蛾实验中，未交配雄蛾和空白对照都没有引诱到成虫，1~6 日龄未交配雌蛾均能引诱到雄虫，且 1 日龄未交配雌蛾诱蛾量最大，凌晨 2:00—3:00 是诱蛾高峰期；凌晨 1:30 未交配雌蛾性腺提取物的引诱量最大，1 日龄未交配雌蛾性腺提取物对雄蛾的引诱效果最佳。**【结论】**本试验的研究结果为利用昆虫性信息素防治黄褐幕枯叶蛾奠定了基础。

关键词 黄褐幕枯叶蛾，羽化，性行为，性引诱

Reproductive behavior of *Malacosoma neustria testacea* Motschulsky and the relative effectiveness of different attractants in the field

WU Yu-Jie[1**] LIU Zhi-Xiong[1] ZHANG Jin-Tong[1***] CHEN Xu-Peng[1]
HAO Ai-Zhong[2] LI Jian-Bing[3]

(1. Institute of Chemical Ecology, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Forest Pest Control and Quarantine Station of Taiyuan Shanxi, Taiyuan 030012, China; 3. Forest Pest Control and Quarantine Station of Yanggao Datong Shanxi, Datong 038100, China)

Abstract **[Objectives]** To study the reproductive behavior of this pest in order to develop effective and environmentally friendly prevention and control methods for it. **[Methods]** The reproductive behavior of *Malacosoma neustria testacea* Motschulsky were studied under laboratory conditions, and in the field, in 2013 and 2014. **[Results]** The emergence period was about 40 days in duration and the peak time of eclosion occurred between June 19th and July 3rd. Peak daily emergence occurred between 17: 00 to 19: 00. The mean sex ratio of females to males was 1∶(1.19 ± 0.07). The average lifespan of virgin females was (4.13±0.142) days, which was shorter than that of unmated males (4.57±0.035)d. Calling behavior occurred between 00:00 and 03:00 and the mating peak at 02:30. The highest mating rate was observed in 1-day-old adults (61.67%±2.89%) and decreased gradually with female age. The duration of mating varied from 20 min to 135 min. In field experiments, no adults were trapped using unmated male moths or a blank control as attractants, whereas males were attracted by virgin females of different ages. More males were trapped between 02:00 and 03:00, and 1 d old females attracted more males than females of other ages. The highest number of male moths was captured at 01:30, using crude extract of virgin female glands as the attractant. The crude gland extract of 1-day-old virgin females had the highest attractiveness to adult males

* 资助项目 Supported projects：“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD19B07)

**第一作者 First author，E-mail：1076086287@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhangjintong@126.com

收稿日期 Received：2015-01-13，接受日期 Accepted：2015-05-06

but that from females of other ages also had some attractiveness. **[Conclusion]** The results of this study lay a foundation for the application of insect sex pheromones to the prevention and control of *M. neustria testacea*..

Key words *Malacosoma neustria testacea*, eclosion, sexual behavior, sexual attractant

黄褐幕枯叶蛾 *Malacosoma neustria testacea* Motschulsky 属鳞翅目（Lepidoptera）枯叶蛾科（Lasiocampidae），在我国内蒙古、新疆、辽宁、黑龙江和山西等地均有发生，发生严重时能将被害树木叶片全部吃光，次年出现枯枝现象，甚至有的树木整株枯死。近些年，黄褐幕枯叶蛾在山西省大同市阳高县杏林大发生，发生重灾区杏树叶片几乎被啃光，树木光合作用受到严重影响，使得杏的产量和质量都大幅度下降。由于该虫分布范围广，群居数量大，危害极其严重，防治难度较大。人工采卵或者摘除虫茧的方法需要消耗大量的人力物力，化学农药防治法尽管效果较好，但易造成环境污染。

为积极探索利用性诱剂建立一种高效无毒无污染、无公害防治黄褐幕枯叶蛾的新方法，作者对黄褐幕枯叶蛾的羽化、求偶和交尾行为进行了观察，并在林间进行了未交配雌蛾及其性信息素腺体提取物诱蛾实验，以便明确黄褐幕枯叶蛾的生殖行为学特征，为进一步对黄褐幕枯叶蛾性信息素的提取分离、鉴定和人工合成奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫的采集和保藏

分别于 2013 年和 2014 年 5 月下旬，在山西省大同市阳高县黄褐幕枯叶蛾危害严重的杏树林中，于杏树卷叶内、两叶间或其他隐蔽处寻找白色黄褐幕枯叶蛾的茧，收集黄褐幕枯叶蛾的蛹。取 150 cm×150 cm×150 cm 的纱笼，内装新鲜的杏树枝叶，将采集的黄褐幕枯叶蛾的茧平铺于枝叶上，将养虫笼置于通风处，保持自然温度，自然光照周期，每天枝叶表面喷适量水，防止枝叶枯萎，每隔 2 d 更换一次新鲜的杏树枝叶。

1.2 试验方法

1.2.1 黄褐幕枯叶蛾羽化行为观察 当养虫笼中第一头蛹羽化开始，观察成虫羽化行为，并将羽化的黄褐幕枯叶蛾雌雄分开，分别转移到两个纱笼内，记录每天羽化的雌蛾和雄蛾的数量，直到所有的蛹羽化完为止。从成虫大量羽化开始，每小时统计并记录一次羽化成虫的性别和数量，设置 5 个试验重复，每个重复查蛹 120 头。

1.2.2 黄褐幕枯叶蛾成虫性比调查 2013 年和 2014 年各查蛹 1 000 头和 1 530 头，分别对两年黄褐幕枯叶蛾羽化的雌蛾和雄蛾的数量进行统计，并分析雌雄性比。

1.2.3 黄褐幕枯叶蛾成虫寿命调查及求偶行为观察 将同一日羽化高峰期羽化的未交配雌蛾和雄蛾各取 30 头分别放入两个小纱笼（60 cm×60 cm×60 cm）中，另取一个同样大小的小纱笼放入未交配雌、雄蛾各 15 头，将雌蛾、雄蛾按 1∶1 比例进行混养。在每个小纱笼中悬挂一个用 5%的蜂蜜水浸湿的脱脂棉球，为成虫提供营养源。每天定时清理纱笼中死亡的成虫，记录纱笼中剩余的成虫的性别及数量。实验共设定了 3 个处理：单独饲养未交配雄成虫、单独饲养未交配雌成虫和雌、雄成虫按 1∶1 混养。

预实验中观察发现黄褐幕枯叶蛾在进入暗期后才有求偶行为，所以只需在进入暗期后观察其求偶行为。每天于暗期观察单独饲养的未交配雌蛾是否处于召唤异性的状态，记录未交配雌蛾召唤开始时间、结束时间，持续观察直至死亡。

1.2.4 黄褐幕枯叶蛾交配行为观察 将 1~6 日龄未交配的成虫各 20 对分别放入 6 个 80 cm×80 cm×80 cm 的纱笼内，在进入暗期后观察其交配情况，记录雌雄成虫交尾开始时间、结束时间，统计每半个小时内成虫的交配率，设置 3 个试验重复。

1.2.5 黄褐幕枯叶蛾活蛾野外诱蛾试验 采用三角形诱捕器，材料为白色塑料中空板，边长 30 cm，棱长 40 cm，用回形针将涂有粘虫胶的粘板固定在底部。将 1~6 日龄未交配雌蛾各 1 头分别放入 6 个小纱笼（4 cm×4 cm× 4 cm）中，用细铁丝将其悬挂在诱捕器中，距离胶面 2 cm 左右，用挂

有未交配雄蛾的小纱笼和未装有活蛾的空小纱笼的诱捕器做对照。在黄褐幕枯叶蛾危害严重的杏园中，将诱捕器悬挂在距地面高度大约 2 m 左右的杏树上，间隔 20 m 左右，随机分布，从 23:00 到次日凌晨 5 : 00 每小时记录诱蛾数量，统计一天中诱蛾量，每个处理设置 3 个重复。

1.2.6　性信息素腺体提取物野外诱蛾试验

1.2.6.1　腺体提取　用手轻轻挤压处女雌蛾腹部末端，模拟其召唤状，迫使其性信息素腺体暴露，用手术刀切下性腺体，置于滤纸上，擦拭除去体液，然后迅速浸泡在装有 1 000 μL 重蒸正己烷的尖底玻璃管内，室温下浸泡提取 40 min，然后将提取液浓缩至一定体积，转移到另一干净玻璃管中，封口备用。

1.2.6.2　未交配雌蛾不同时间性信息素腺体提取物野外诱蛾试验　选取 2 日龄未交配雌蛾，分别于 22:00、23:00、0:00、1:00、1:30、2:00、2:30、3:00 和 3:30 进行腺体提取，每个时间各提 5 头，将浓缩后的提取液（5 FE，female equivalent）注入诱芯基质中制成诱芯，用注入等量重蒸正己烷的诱芯作为空白对照，将诱芯悬挂于诱捕器中进行林间诱蛾试验，诱捕器的悬挂同 1.2.5 中的方法，每个处理设置 3 个重复，统计一天中引诱到雄蛾的数量。

1.2.6.3　不同日龄未交配雌蛾性信息素腺体提取物野外诱蛾试验　分别取 1~5 日龄的未交配雌蛾 5 头于凌晨 1:30 对其进行腺体提取，将浓缩后的提取液（5 FE）注入诱芯基质中制成诱芯用于林间诱蛾试验，注有等量正己烷的诱芯为空白对照，每个处理设置 3 个重复，统计一天中引诱到雄蛾的数量。

1.3　数据统计与处理

采用 SPASS19.0 软件对数据进行统计分析，利用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验，图表用 Excel 2007 制作。成虫的羽化百分率和交配率进行反余弦转换后，再进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　黄褐幕枯叶蛾成虫羽化行为及其动态节律

2.1.1　羽化行为　黄褐幕枯叶蛾羽化时，蛹体在白色网幕中蠕动，用头部顶破虫茧，待头部蛹壳开裂出一小孔，成虫逐渐从蛹壳中爬出，钻出网幕。刚羽化的成虫双翅潮湿且折叠成皱缩状，整个背部外露，随着成虫频繁振翅，双翅慢慢展开，随后双翅合拢直立于背上，大约 10~15 min 后双翅水平放下，羽化完成（图 6：A1~A3，B1~B3）。雄蛾个体较小，体翅为浅黄色，腹部色较浅（图 6：A3）。雌蛾个体一般较大，体翅为褐黄色，腹部色较深（图 6：B3），一般不进行远距离飞翔，静止时翅呈屋脊状，覆盖于腹部。

2.1.2　羽化的动态节律　黄褐幕枯叶蛾的时动态节律如图 1 所示。从图 1 可以看出，每日从 14:00—23:00 均可观察到成虫羽化，其中以 17:00—19:00 羽化最为集中，羽化数占当天羽化总量的 73%，与其他时段相比，差异达到显著水平（P<0.05）。雄蛾、雌蛾分别于 17:00、19:00 达到羽化最高峰，雄虫的羽化高峰早于雌蛾。

黄褐幕枯叶蛾羽化的日动态节律如图 2 所示。养虫笼中的蛹从 6 月上旬开始羽化，7 月中旬进入羽化末期，羽化期 40 d 左右。成虫的羽化高峰期在 6 月 19 日—7 月 03 日，期间成虫羽化量达到整体羽化量的 80%。

2.2　黄褐幕枯叶蛾成虫的雌雄性比

分别对 2013 年、2014 年两年羽化的成虫进行雌、雄性比统计，统计结果见表 1。从统计结果看，雄虫的数量高于雌虫的数量，其雌雄比例为 1∶1.12（2013 年）和 1∶1.26（2014 年）。

2.3　黄褐幕枯叶蛾成虫寿命及求偶行为

2.3.1　黄褐幕枯叶蛾成虫的寿命　从表 2 可以看出，在未交配情况下雌、雄蛾的最长寿命均为 7 d，但平均寿命雄蛾（4.57±0.035）d 明显高于雌蛾（4.13±0.142）d。混养条件下雌、雄蛾的寿命与未交配雌、雄的寿命相比均缩短，并且都达到极其显著水平。

2.3.2　求偶行为　黄褐幕枯叶蛾在羽化后进入第一个暗期后大部分雌蛾即开始求偶，呈现召唤状态，少数雌蛾只在进入第二个暗期后才开始有求偶行为。雌蛾求偶时其两翅微向两侧外展，腹

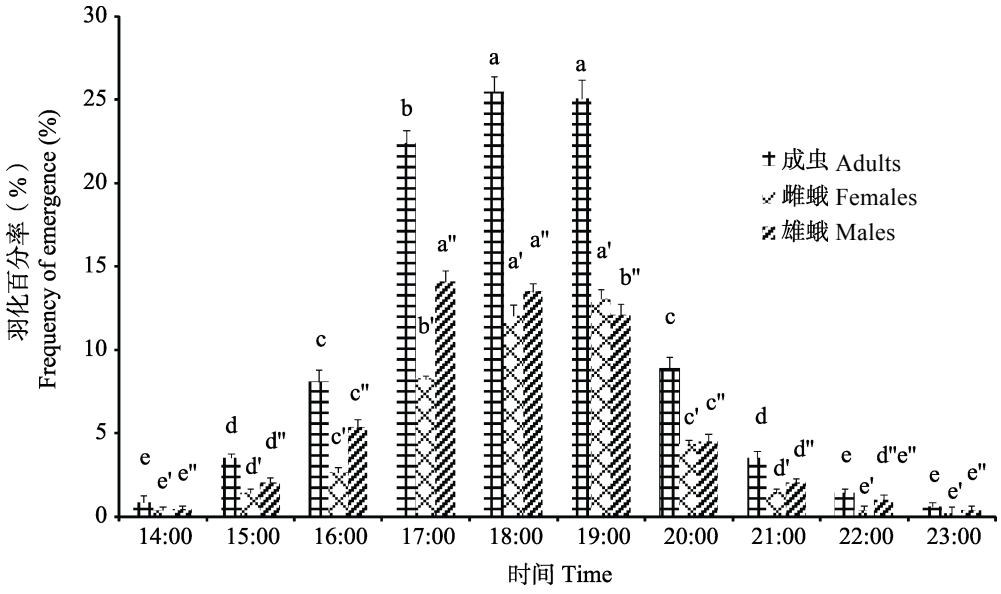

图 1　黄褐幕枯叶蛾羽化的时动态节律

Fig. 1　The emergence rhythm of *Malacosoma neustria testacea* in a day

图中数据为平均值±标准误，柱上标有不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。下图同。

Data are mean±SE. Histograms with different small letters indicate significantly different ($P < 0.05$). The same below.

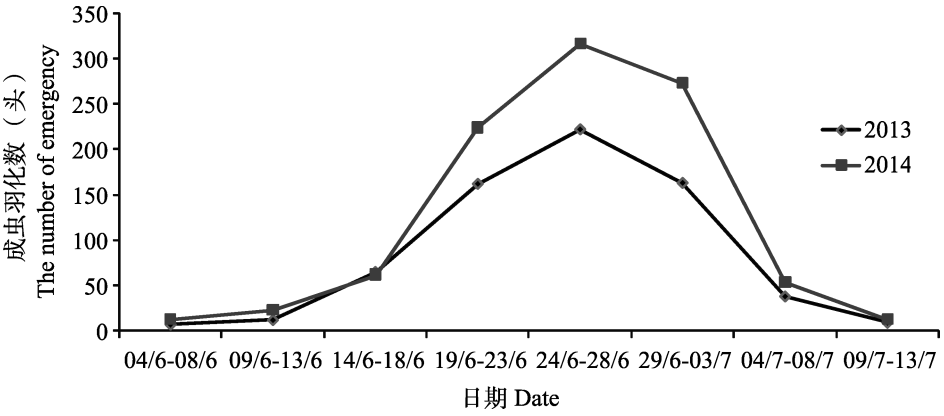

图 2　黄褐幕枯叶蛾羽化的日动态节律（2013 和 2014）

Fig. 2　The daily rhythm of *Malacosoma neustria testacea* adult's emergence (2013, 2014)

表 1　黄褐幕枯叶蛾雌雄比例（2013 和 2014）

Table 1　The radio of *Malacosoma neustria testacea* female to male moths（2013, 2014）

年份 Year	成虫的数量 雌蛾 ♀	Number of the moths 雄蛾 ♂	雌雄性比 Sex ration 雌蛾: 雄蛾 ♀：♂	平均值 Mean±SE
2013	320	358	1：1.12	1：(1.19±0.07)
2014	432	546	1：1.26	

表 2　不同处理成虫的寿命
Table 2　The lifespan of the adults *Malacosoma neustria testacea* under different treatments

处理 Treatment	观察头数 Numbers of observed	最长寿命（d） Maximum (d)	最短寿命（d） Minimum (d)	平均寿命（d） Mean of lifespan (d)
未交配雌蛾 Female	30	7	2	4.13±0.142Bb
未交配雄蛾 Male	30	7	3	4.57±0.035Aa
混养雌蛾 Female in mixture feed	15	5	2	3.62±0.166Cc
混养雄蛾 Male in mixture feed	15	7	2	4.07±0.365Bb

表中数据为平均值±标准误，同一列数据后标有不同小写字母代表差异显著（$P < 0.05$），不同大写字母代表差异极显著（$P < 0.01$）。下表同。
Date in the table are mean±SE, and followed by different small letters or capital letters in a column indicate significantly different at 0.05 level or extremely significantly different at 0.01 level, respectively. The same below.

部末端经几次伸缩后，露出产卵器及性腺体，性腺体翘起与腹部成一定角度，如果没有进行交尾此状态可维持 1~2 h（图 6：C1，C2）。

2.4　交配行为及其动态节律

雌蛾的召唤对雄蛾能产生明显的定向行为。当雄蛾接受到雌蛾释放的性信息素信号时，便定向飞往雌蛾，在其周围频繁振翅飞行，处于高度兴奋状态，并不时伸出抱握器，不断用翅和身体接触雌虫，直至交尾成功。雌雄成虫交尾多发生在纱笼四壁的中上部和顶部，交尾时雌雄成虫尾部连在一起，多呈“一”字形（图 6：D），极少数为“人”字形，并保持静止不动。交尾持续时间最短为 20 min，最长可达 135 min。

对不同日龄成虫交配行为观察的统计结果见表 3。1 日龄的成虫交配率最高，并且与其他日龄成虫的交配率相比达到极其显著水平。随着日龄的增加，成虫的交配百分率下降，而求偶行为提前。

黄褐幕枯叶蛾羽化后在第一个暗期不同时段的交配率如图 3 所示。凌晨 0:30 即开始观察到成虫的交配行为，交配高峰出现在凌晨 2:30，交配率显著高于其他时段。

2.5 黄褐幕枯叶蛾活蛾野外诱蛾实验结果

在活蛾林间诱蛾实验中，雄蛾和空白对照都

表 3　不同日龄黄褐幕枯叶蛾交配行为观察
Table 3　Observation of calling of *Malacosoma neustria testacea* at different ages

日龄（d） Age (d)	召唤时间 Calling time	交配率（%） Mating rate (%)	平均交尾持续时间（min） Average lasting time of mating (min)
1	0:30-3:10	61.67±2.89Aa	75.67±0.76Cc
2	0:25-3:15	48.33±2.89Bb	75.63±4.69Cc
3	0:11-3:20	25.00±5.00Cc	88.41±2.30BCb
4	0:06-3:32	6.67±2.89Dd	101.00±9.64ABa
5	11:57-3:40	3.33±2.89Dde	110.00±9.00Aa
6	11:52-3:50	0.00±0.00De	0.00±0.00Ee

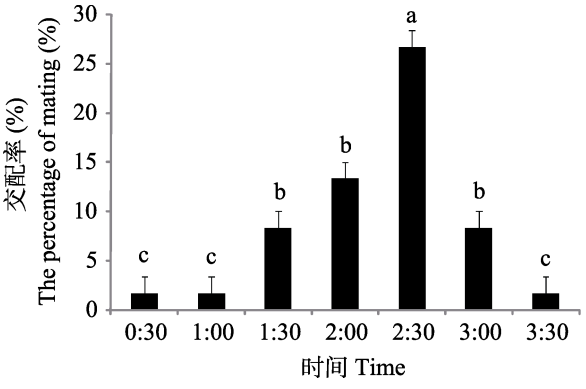

图 3　黄褐幕枯叶蛾在不同时段的交配率（n=3）
Fig. 3　The percentage of mating behavior of *Malacosoma neustria testacea* in different times during the first scotophase (n=3)

未诱到成虫，而 1~6 日龄雌蛾均能引诱到雄蛾。不同日龄的黄褐幕枯叶蛾未交配雌蛾在同一天中诱蛾数量是不同的（表 4），1 日龄未交配雌蛾诱蛾数显著高于其他日龄（$P<0.05$），随着日龄的增大未交配雌蛾引诱的雄蛾的数量减少。黄褐幕枯叶蛾未交配雌蛾在暗期不同时刻对雄蛾的引诱量也不同（表 5），在凌晨 2:00–3:00 诱蛾量最多，与其他时刻相比达到极其显著水平（$P<0.01$）。

2.6 性腺提取物野外诱蛾实验结果

不同时刻、不同日龄未交配雌蛾性信息素腺体提取物林间诱蛾实验结果分别如图 4 和图 5 所示。1 日龄未交配雌蛾性腺提取物对雄蛾的引诱量显著高于其他日龄未交配雌蛾性腺提取物，说明 1 日龄成虫即达到性成熟，并且体内合成性信息素量可能最多。22:00–3:30 未交配雌蛾性腺提取物均能诱到雄蛾，并且凌晨 1:30 提取物的引诱效果最好，与其他时刻性腺提取物相比达到显著水平，说明 22:00 雌蛾体内就开始合成性信息素，1:30 性信息素含量可能达到最高。

3 结论与讨论

室外笼内观察实验结果表明，黄褐幕枯叶蛾的总羽化率为 65.5%，在 6 月上旬开始羽化，7 月中旬为羽化末期，6 月 24 日至 6 月 28 日达到羽化高峰期。黄褐幕枯叶蛾的羽化行为在 14:00—23:00 均可见，17:00—19:00 羽化最为集中，这与大部分昆虫类似，如小木蠹蛾 *Holcocerus insularis* Staudinger（张金桐和孟宪佐，2001）、蜀柏毒蛾 *Parocneria orienta* Chao（张坤胜等，2012）、栎黄枯叶蛾 *Trabala vishnou gigantina* Yang（刘永华等，2013）等昆虫的羽

表 4 不同日龄黄褐幕枯叶蛾未交配雌蛾对雄蛾引诱数（n=3）

Table 4 Number of the male moths trapped by different age virgin females of *Malacosoma neustria testacea* in a day (n=3)

日龄 Days	未交配雌蛾诱蛾数（日平均） Daily average number of the adults trapped by unmated females	未交配雄蛾诱蛾数（日平均） Daily average number of the adults trapped by unmated males	空白对照 Blank control
1	7.67±0.88Aa	0	0
2	5.33±0.88ABb	0	0
3	3.33±0.33BCc	0	0
4	1.00±0.58CDd	0	0
5	0.33±0.33Dd	0	0
6	0.33±0.33Dd	0	0

表 5 黄褐幕枯叶蛾未交配雌蛾在不同时刻对雄蛾的引诱数（n=3）

Table 5 Number of the male moths trapped by virgin females of *Malacosoma neustria testacea* during different times of the day in the field (n=3)

时间 Time	处女雌蛾诱蛾数（日平均） Daily average number of the male moths trapped by unmated females	对照 Control
23:00-0:00	0.33±0.58Cc	0
0:00-1:00	1.00±0.00BCc	0
1:00-2:00	2.33±0.58Bb	0
2:00-3:00	4.33±0.58Aa	0
3:00-4:00	0.33±0.58Cc	0

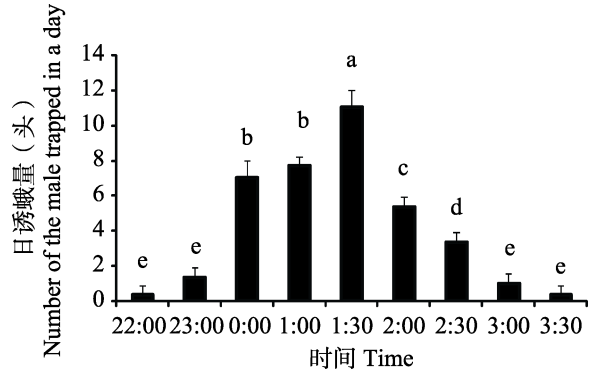

图 4　不同时刻未交配雌蛾性腺提取物田间引诱实验（*n*=3）

Fig. 4　Number of the male moths trapped by crude extract of female glands at different times in the field experiment (*n*=3)

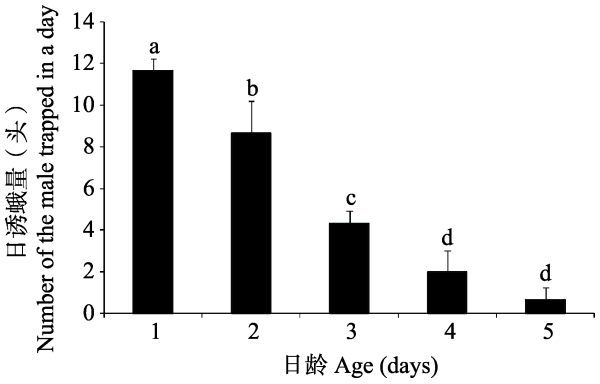

图 5　不同日龄未交配雌蛾性腺提取物田间引诱实验（*n*=3）

Fig. 5　Number of the male moths trapped by crude extract of female glands of different ages in the field experiment (*n*=3)

化行为都存在一定的动态节律，这可能是由于温度和光周期会影响蛾类的羽化行为（马建军等，2010）。成虫雌雄平均配比为 1∶(1.19±0.07)，平均寿命分别为 4.13±0.142 d（雌蛾）和 4.57±0.035 d（雄蛾），雄虫寿命略高于雌虫。混养条件下雌雄成虫的寿命比单独饲养条件下成虫的寿命短，这与同属于枯叶蛾科昆虫的栎黄枯叶蛾（刘永华等，2013）类似，交配使雌雄成虫的寿命均缩短。

黄褐幕枯叶蛾羽化当天进入暗期后就具有求偶、交配等性行为，交配高峰期在凌晨 2:30 左右。黄褐幕枯叶蛾的求偶和交配等性行为只发生在暗期，这与大多数鳞翅目昆虫的生殖行为不是出现在全天，而是集中在暗期的特定时期（汪新文和刘孟英，1997），并且成虫求偶和交配等性行为具有一定的时间节律，都受到光周期的影响的结论是一致的，如舞毒蛾 *Lymantri dispar*（Giebultowicz *et al.*，1991）、枣镰翅小卷蛾 *Ancylissativa* Liu（韩桂彪等，1999）、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*（董双林和杜家纬，2002）、豆野螟 *Maruca vitrata*（Fabricius）（陆鹏飞等，2007）、榆木蠹蛾 *Holcocerus vicarius*（杨美红等，2010）等昆虫的求偶、交配行为也是仅出现在一天中的某一时段。

随着雌蛾日龄的增加，交配率下降的现象在鳞翅目昆虫中是比较常见的，如小木蠹蛾（张金桐和孟宪佐，2001）、榆木蠹蛾（杨美红等，2010）、蜀柏毒蛾（张坤胜等，2012）。黄褐幕枯叶蛾的交配百分率也随着日龄的增加而下降，但与大多数鳞翅目昆虫 2 日龄成虫的交配率最高不同的是黄褐幕枯叶蛾 1 日龄交配率即达到最高，并且显著高于其他日龄，造成黄褐幕枯叶蛾这一性行为节律特殊性的原因可能是成虫平均寿命相对较短，通过提前交配行为来提高生殖能力。

不同日龄的黄褐幕枯叶蛾未交配雌蛾求偶行为随着日龄的增大逐渐提前，这和大多数鳞翅目昆虫的求偶行为非常相似（Edmonds *et al.*，2000；Zarbin *et al.*，2007；杨美红等，2010）。日龄越大，交配率越低，通过求偶行为的提前，可以从时间上避免与较低日龄的雌蛾竞争交配对象，从而增加交配率，提高生殖力，这种行为可以认为是昆虫的一种适应性的生殖策略（Swier *et al.*，1977；Mazor and Dunkelblum，2005）。

在野外诱蛾实验中，未交配雌蛾对雄蛾的诱捕量可以反应雌蛾性信息素的释放节律，未交配雌蛾性腺提取物的诱蛾量则可以反应雌蛾性信息素的产生节律。野外诱蛾实验结果表明，1 日龄未交配雌蛾诱蛾数量显著大于其他日龄，并且凌晨 2:00—3:00 诱蛾量显著比其他时刻多；1 日龄未交配雌蛾性腺提取物对雄蛾的引诱量同样显著多于其他日龄，凌晨 1:30 未交配雌蛾性腺

提取物的引诱量最多，显著高于其他时刻，这说明黄褐幕枯叶蛾性信息素的产生和释放具有明显的日节律和时辰节律，并且性信息素的产生要早于释放，相似的结果见于 Snir 等（1986）对 *Plusia chalcites* 的研究。

黄褐幕枯叶蛾 1 年 1 代，由于它主要危害杏、苹果、梨、山楂和核桃等果树，如果采用传统的化学方法对其进行防治，容易造成农药在果实上的残留量过高，并且还会对环境造成污染。因此寻找一种天然无污染且有效的防治黄褐幕枯叶蛾的方法是很有必要的。目前，利用昆虫性信息素高效、无毒、无污染，且专一性地对昆虫进行防治已经受到国内外学者的高度重视。本文对黄褐幕枯叶蛾羽化及性行为学特征进行研究为以后有效利用性信息素来防治黄褐幕枯叶蛾对果树林的危害提供依据。

图 6　黄褐幕枯叶蛾的生殖行为

Fig. 6　Reproductive behavior of *Malacosoma neustria testacea*

A1~A3. 雄虫羽化行为；B1~B3. 雌虫羽化行为；C1~C2. 召唤行为；D. 交配行为。

A1-A3. Eclosion behavior of male adult; B1-B3. Eclosion behavior of female adult; C1-C2. Calling; D. Mating.

参考文献 (References)

Dong SL, Du JW, 2002. Effects of mating experience and temperature on sex pheromone production of beet armyworm, *Spodoptera ex igua*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(12): 1633–1636. [董双林, 杜家纬, 2002. 交配和温度对甜菜夜蛾(*Spodoptera exigua*)雌蛾性信息素产生的影响. 应用生态学报, 13(12): 1633–1636.]

Edmonds RP, Borden JH, Angerilli NDP, Rauf A, 2000. A comparison of the development and reproductive biology of two soybean pod borers, *Etiella* spp. in Indonesia. *Entomol. Exp. Appl.*, 97(2): 137–147.

Giebultowicz JM, Raina AK, Uebel EC, Ridgway RL, 1991. Two-step regulation of sex-pheromone decline in mated gypsy moth females. *J. Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 16(2): 95–105.

Han GB, Du JW, Hu C, Li LC, 1999. Effects of environmental temperature and photoperiodic changes on calling behaviour and sex pheromone release in *Ancylis sativa* Liu. *Scientia Silvae Sinicae*, 35(2): 75–81. [韩桂彪, 杜家纬, 胡萃, 李连昌, 1999. 环境温度和光周期对枣镰翅小卷蛾求偶活动及性信息素释放的影响. 林业科学, 35(2): 75–81.]

Lu PF, Qiao HL, Wang XP, Zhou XM, Wang XQ, Lei CL, 2007. Adult behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of the legume pod borer *Maruca vitrata* (Fabricius) (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50(4): 335–342. [陆鹏飞, 乔海莉, 王小平, 周兴苗, 汪细桥, 雷朝亮, 2007. 豆野螟成虫行为学特征及性信息素产生与释放节律. 昆虫学报, 50(4): 335–342.]

Liu YH, Yan XF, Zhang YQ, Qi LZ, Lu PF, Zong SX, Luo YQ, 2013. The eclosion and reproduction of *Trabala vishnou gigantina,* Yang (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Chinese Journal of Applied Entomology,* 50(5): 1253–1259．[刘永华, 阎雄飞, 章一巧, 齐连珍, 陆鹏飞, 宗世祥, 骆有庆, 2013. 栎黄枯叶蛾羽化及生殖行为研究. 应用昆虫学报, 50(5): 1253–1259.]

Ma JJ, Yao H, Qi ZL, 2010. Emergence characteristics of overwintering *Apocheima cinerarus* and its larval spatial distribution pattern. *Forest Pest and Disease*, 29(1): 10–12. [马建军, 姚虹, 齐志利, 2010. 春尺蠖越冬蛹羽化特性及幼虫空间分布研究. 中国森林病虫, 29(1): 10–12.]

Mazor M, Dunkelblum E, 2005. Circadian rhythms of sexual behavior and pheromone titers of two closely related moth species *Autographa gamma* and *Cornutiplusia circumflexa*. *J. Chem. Ecol.*, 31(9): 2153–2168.

Snir R, Dunkelblum E, Gothilf S, Harpaz I, 1986. Sexual behavior and pheromone titer in the tomato looper, *Plusia chalcites* (Esp.) (Lepidoptera: Noctuidae) . *J. Insect Physiol.*, 32(8): 735–739.

Swier SR, Rings RW, Musick GJ, 1977. Age-related calling behavior of the black cutworm, *Agrotisipsilon*. *Ann. Entomol. Soc. Am*.,70(6): 919–924.

Wang XW, Liu MY, 1997. Periodicity of calling and variation of sex pheromone titer in the calling of the oriental armyworm *Mythimna separate* walker. *Acta Entomologica Sinica*, 40(4): 428–431. [汪新文, 刘孟英, 1997. 粘虫雌蛾求偶周期和性信息素含量变化规律. 昆虫学报, 40(4): 428–431.]

Yang MH, Zhang JT, Liu JL, Jing XY, Luo YQ, Zong SX, Cao CJ, Li YH, 2010. Reproductive behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of *Holcocerus vicarius* (Walker) (Lepidoptera: Cossidae). *Acta Entomologica Sinica*, 53(11): 1273–1280. [杨美红, 张金桐, 刘金龙, 荆小院, 骆有庆, 宗世祥, 曹川健, 李月华, 2010. 榆木蠹蛾生殖行为及性信息素产生与释放节律. 昆虫学报, 53(11): 1273–1280.]

Zarbin PHG, Lorini LM, Ambrogi BG, Vidal DM, Lima ER, 2007. Sex pheromone of *Lonomia obliqua*: daily rhythm of production, identification, and synthesis. *J. Chem. Ecol.*, 33(3): 555–565.

Zhang JT, Meng XZ, 2001. Sexual behavior of *Holcocerus insularis* and circadian rhythm of its sex pheromone production and release. *Acta Entomologica Sinica*, 44(4): 428–432. [张金桐, 孟宪佐, 2001. 小木蠹蛾性行为和性信息素产生与释放的时辰节律. 昆虫学报, 44(4): 428–432.]

Zhang KS, Yang W, Zhuo ZH, Deng ZB, Yang CP, Yang Y, Zhou JH, Xiao YB, Jia YZ, 2012. Reproduction behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release in *Parocneria orienta* (Lepidoptera: Lymantriidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(1): 46–54. [张坤胜, 杨伟, 卓志航, 邓忠彬, 杨春平, 杨桦, 周建华, 肖银波, 贾玉珍, 2012. 蜀柏毒蛾生殖行为及性信息素产生与释放节律. 昆虫学报, 55(1): 46–54.]