

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220203

云杉花墨天牛生殖行为的研究

王珏¹, 时勇¹, 范立淳¹, 张彦龙², 郑雅楠^{1*}

(1. 沈阳农业大学林学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所/
国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 云杉花墨天牛是中温带地区传播松材线虫的媒介昆虫, 目前对它的报道较少, 国内缺乏对云杉花墨天牛生殖行为的研究。为了解云杉花墨天牛的生殖特性和规律, 本研究在室内对其成虫生殖行为进行观察和分析, 将有助于针对其生殖特性进一步研究防治技术, 未来有望通过干扰或延迟该天牛的交配抑制其繁殖, 从而降低下一代的种群密度。[方法] 将补充营养后的3日龄云杉花墨天牛雌、雄成虫成对放入装有红松木段和新鲜松枝的透明玻璃缸中内, 在室温, 相对湿度 $55\% \pm 5\%$, 光照8D:16L的条件下, 连续观察雌雄成虫抱对、交配、刻槽、产卵的生殖行为及日节律, 直至天牛自然死亡。[结果] 观察发现云杉花墨天牛交配行为分为3个阶段: 相遇抱对、插入交配和配后保护。每头成虫平均抱对 2.38 ± 0.89 次·天⁻¹, 抱对平均时长 27.86 ± 18.37 min·次⁻¹; 平均交配 1.74 ± 0.51 次·天⁻¹, 交配平均时长 8.68 ± 4.42 min·次⁻¹; 雌成虫平均刻槽 1.76 ± 0.74 次·天⁻¹, 刻槽平均时长 16.25 ± 9.45 min·次⁻¹; 平均产卵 1.87 ± 0.61 次·天⁻¹, 产卵平均时长 16.00 ± 10.04 min·次⁻¹。一个玻璃缸内同时饲养3对天牛时比只饲养1对天牛时, 每天平均的抱对、交配、刻槽次数增加, 产卵次数减少, 而每次交配行为所用平均时长缩短。云杉花墨天牛的生殖行为具有明显的日节律, 交配和产卵都出现高峰期, 其中交配高峰期为12:00—14:00, 雌成虫产卵高峰期为14:00—16:00。研究还发现云杉花墨天牛生殖行为中的特殊现象: 如雄成虫尝试与已死亡雌成虫交配, 同性成虫试图交配, 3只天牛抱在一起类似抱对的现象。[结论] 本研究结果证实: 在室内条件下, 云杉花墨天牛成虫在补充营养后第3天开始有生殖行为, 交配过程可分为相遇抱对、插入交配和配后保护3个阶段, 且该天牛的交配和产卵行为具有日节律。

关键词: 云杉花墨天牛; 生殖; 交配; 产卵; 日节律

中图分类号: Q969.511.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)02-0022-09

昆虫普遍通过雌雄个体的交配行为来完成后代的繁殖, 因此交配行为在种群的延续中具有重要的作用, 对交配行为的研究也成为昆虫行为学的热点^[1]。对天牛类昆虫交配产卵行为的研究有助于了解天牛繁殖行为的过程与机制, 针对其生殖特性设计防治策略, 或在成虫发生期利用信息素、寄主植物挥发物等在栖境进行人为干扰, 通过抑制或延迟该天牛的交配, 从而降低下一代的种群密度, 对其防治具有重要意义。目前已有许多关于天牛类昆虫

的交配行为的研究, 发现其交配行为具有明显的日节律。如有研究认为松褐天牛 (*Monochamus alternatus* Hope) 的交配行为主要发生在夜间^[2-4], 而罗亚萍等^[5]研究认为该天牛在中午还有一个交配行为的高峰期。新西兰的一种取食花粉的天牛 *Zorion guttigerum* (Westwood) 一天中也有两个交配行为的高峰期, 分别在中午和傍晚^[6]。青杨天牛 (*Saperda populnea* Linnaeus) 在阴雨天气前存在明显的交配高峰期, 表明气候条件会对该天牛

收稿日期: 2022-04-22 修回日期: 2022-05-17

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2023JH2/101300130)

* 通讯作者: 郑雅楠, 博士, 副教授。主要研究方向: 林草有害生物可持续性控制。电话: 18640403865。E-mail: rockyya@163.com;

yanan@syou.edu.cn

交配行为造成较大影响,可结合天牛自身的生殖节律和气候影响因素预测天牛发生规律,在暴发前及时进行防治^[7]。桃红颈天牛(*Aromia bungii* Faldermann)对不同寄主产卵选择性的研究中发现:该天牛最喜欢在桃树上产卵,因此应注意加强在桃树上对桃红颈天牛的防控^[8];栗山天牛(*Massicus raddei* Blessig)则主要在栎树干上产卵,且易被有伤口的寄主吸引聚集,增加雌雄成虫交配的机会,表明在天牛交配产卵过程中,寄主植物挥发物起到了重要作用,防治上可通过及时修复树木伤口以减轻栗山天牛对树木的危害^[9]。桑天牛(*Apriona germari* Hope)羽化后必须要取食桑科的树皮才能性成熟,利用这一特点在危害严重地区种植矮化桑科植物,可在天牛补充营养期进行防治^[10]。这些对天牛交配行为的研究,为进一步研究气候条件对天牛繁衍的影响、利用寄主挥发物和信息素开发引诱剂等提供了科学有效的依据。

云杉花墨天牛(*M. saltuarius* Gebler)属鞘翅目(Coleoptera)天牛科(Cerambycidae)墨天牛属(*Monochamus*)^[11],是传播松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer) Nickle)的媒介昆虫^[12-13]。2018年,在我国首次发现云杉花墨天牛为中温带地区松材线虫病的传播媒介^[14-15],在我国中温带地区主要危害红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)^[16]、油松(*P. tabuliformis* Carr.)、日本黑松(*P. thunbergii* Parl.)^[17]、樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica* Litv.)和落叶松(*Larix* spp.)等树种^[18]。目前,我国对云杉花墨天牛的研究较少,该天牛的生殖行为和特性尚不明确。本研究首次在我国对云杉花墨天牛的生殖行为特性开展研究,通过24 h内连续观察记录该天牛的生殖行为,研究其交配和产卵行为的日节律,为在林间对其进行防治,进而阻断松材线虫在中温带地区的传播提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

2020年12月,在辽宁省抚顺市大伙房实验林场元帅林内(41°56'23.028" N, 124°13'3.925" E),随机选取受云杉花墨天牛危害的红松疫木砍伐并解剖,收集树干内部的云杉花墨天牛幼虫,单头分装在装有木屑的5 mL离心管内带回实验室,在相对湿度55%±5%的室温条件下饲养,每日及时收集

初羽化的健康成虫。

1.2 供试材料

在透明玻璃缸(30 cm × 30 cm × 40 cm)内放入红松嫩枝作为云杉花墨天牛成虫的食物源,同时放入红松木段为该天牛提供栖息和产卵场所。其中木段为直径15±2 cm、长度25 cm、带有韧皮部的健康红松木段,两端封蜡处理保湿;嫩枝为1~3年生新鲜红松嫩枝。

1.3 云杉花墨天牛生殖行为的观察

将当日初羽化的健康云杉花墨天牛雌雄成虫分别用新鲜的红松嫩枝饲养,使其补充营养发育至性成熟。选取补充营养后的3日龄雌雄成虫各1头,置于放有红松木段和嫩枝的透明玻璃缸内,用纱布盖在玻璃缸上并用松紧绳系紧,防止天牛逃逸,观察单对天牛成虫的生殖行为;同时,选择补充营养后的3日龄雌雄成虫各3头,在成虫鞘翅上涂上不同颜色的无毒无味水彩颜料(马利,上海马利画材股份有限公司)进行标记来区分不同个体以便观察、记录生殖行为,然后置于同一玻璃缸内,观察同一缸内多对天牛成虫的生殖行为,单对和多对试验均各设15组重复。观察试验共10人分2组参加,即5人/组,每人观察6个玻璃缸内天牛生殖行为,两组人员每12 h轮班一次。

在相对湿度55%±5%,光周期8D:16L的室温条件下饲养,每3 d更换一次新鲜红松嫩枝,每两周更换一次红松木段。每天24 h不间断观察天牛交配产卵的过程,直至其自然死亡,期间统计云杉花墨天牛雌雄成虫抱对、交配的次数和时间,及雌成虫咬产卵刻槽和产卵的次数及时间。

各生殖行为起始和终止判断依据:

(1)抱对:雄成虫爬到雌成虫背上时记作抱对行为开始,雄成虫从雌成虫背上离开或交配行为开始时记作抱对行为结束。

(2)交配:雄成虫伸出阳茎插入雌成虫生殖器时记作交配行为开始,授精完成后雄成虫阳茎从雌成虫生殖器中抽离时记作交配行为结束。

(3)配后保护:最后一次交配结束记作配后保护行为开始,雄成虫从雌成虫背上离开记作配后保护行为结束。

(4)刻槽:交配后雌成虫啃咬树皮记作刻槽行为开始,开始尝试产卵时记作刻槽行为结束。

(5)产卵:产卵器插入刻槽记作产卵行为开始,产卵器抽离刻槽记作产卵行为结束。

1.4 数据计算与分析

交配频率和产卵频率计算公式如下：

交配频率(%) = 单位时间内交配次数 / 每天交配总次数 × 100%

产卵频率(%) = 单位时间内产卵次数 / 每天产卵总次数 × 100%

采用 SPSS (22.0) 软件进行数据统计, 各数值间差异采用独立样本 *t* 检验和 SNK 多重比较法分析。

2 结果与分析

2.1 云杉花墨天牛交配与产卵行为

通过观察云杉花墨天牛的交配行为发现, 其完整的交配过程包括 3 个阶段: 相遇抱对、插入交配和配后保护 (图 1)。

(1) 相遇抱对: 交配前, 雌雄成虫来回爬动, 雌成虫在雄成虫附近取食或静止, 此时雄成虫会靠近雌成虫, 二者用触角碰触进行识别, 若二者没有交配意愿则彼此分开, 当二者均有交配意愿时, 雄成虫会主动旋转方向以调整交配位置, 使其身体和雌成虫身体方向保持一致, 随后爬到雌成虫背上。抱对中的雄成虫会用前足跗节抓住雌成虫的鞘翅两侧或基部, 同时用中足跗节抓住雌成虫的腹端以保持交配姿势稳定, 后用腹部末端向雌成虫腹部末端弯曲并不断触碰以刺激雌成虫, 或用触角触

碰雌成虫的触角, 或用下颚须在雌成虫鞘翅的翅基区抚慰, 轻咬或舔雌成虫鞘翅基部和前胸背板。

(2) 插入交配: 在相遇抱对成功后, 雄成虫会伸展阳基侧突和阳茎触碰雌成虫腹部末端并留在雌成虫生殖腔外, 然后插入其从交配孔外翻出的内囊, 向雌成虫生殖器内输送精液, 期间雄成虫用前足抓住雌成虫的鞘翅, 用中足跗节抓住雌成虫腹端, 同时后足抵在木段上起到支撑的效果。在一次抱对过程中, 雌雄成虫可能会有多次插入交配的现象。

(3) 配后保护: 在最后一次交配结束后, 雄成虫会继续攀附在雌成虫体背上, 跟随雌成虫一起移动, 驱赶附近的其他雄成虫。

(4) 刻槽: 交配后, 雌成虫会在木段上寻找适合产卵的位置, 并啃咬产卵刻槽准备开始产卵。雌成虫沿树干和树枝行走, 期间不断用触角和口器触碰树干表皮, 直到选好产卵刻槽位置。随后雌成虫头朝树木基部方向, 开始用下颚啃食树皮形成产卵刻槽。

(5) 产卵: 刻槽完成后, 雌成虫会调转头朝上, 腹部弯曲, 末端不断触碰树干表皮探索刻槽位置, 并不断调整位置及姿势, 直至腹部末端探入刻槽内, 后产卵器缓慢伸出, 插入刻槽上壁, 腹部不断蠕动开始产卵。产卵后雌成虫可能会离开或再次与雄成虫交配 (图 2)。

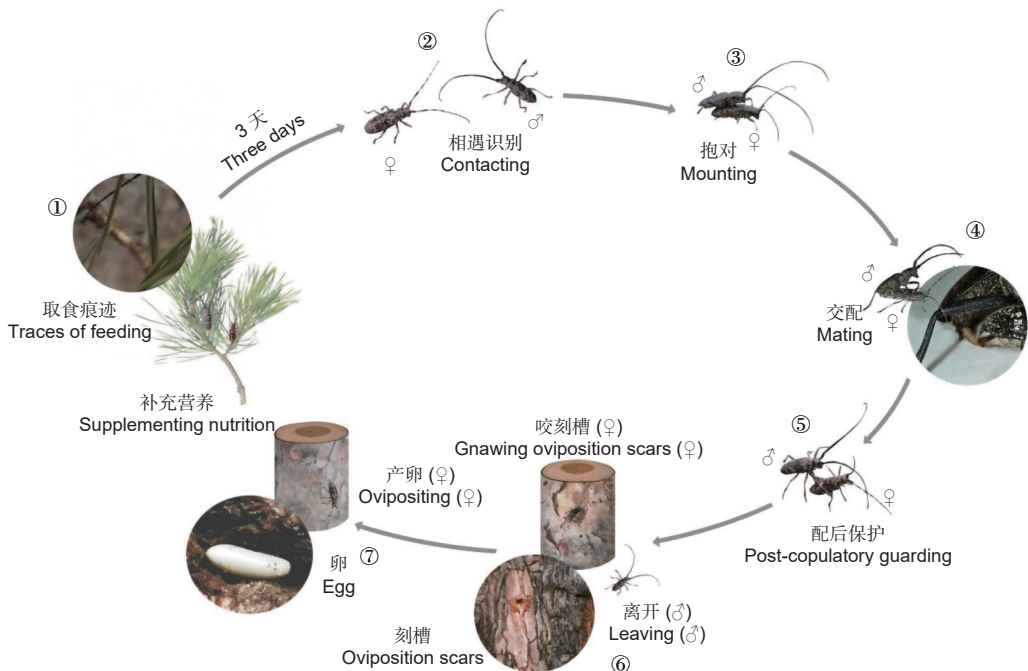


图 1 云杉花墨天牛的生殖行为过程

Fig. 1 Reproductive behavior process of *Monochamus saltuarius*



注: A: 交配 B: 咬刻槽 C: 产卵

Notes: A: Mating; B: Gnawing oviposition scars; C: Ovipositing

图 2 云杉花墨天牛交配和产卵行为

Fig. 2 Mating and ovipositing behavior of *Monochamus saltuarius*

观察在同一玻璃缸中饲养的 3 对云杉花墨天牛雌雄成虫之间的交配行为, 发现雌雄成虫一生中均会与多只不同异性成虫进行交配, 没有固定的配偶关系。存在雄成虫试图与已死亡雌成虫交配、同性成虫试图交配、3 只天牛抱在一起类似抱对的特殊

现象 (图 3)。其中雄成虫与死亡雌成虫 (或其他雄成虫) 试图交配时, 雄成虫会伸展阳茎触碰死亡雌成虫 (或其他雄成虫) 腹部末端, 不断尝试插入授精, 但均未能成功完成授精。雌成虫进行同性抱对时, 上位雌成虫偶尔会做出曲腹动作, 并伸出产卵器试探。



注: A: 同性试图交配 B: 3 只天牛抱在一起

Notes: A: Homosexual adults trying to mate; B: Three adults mounting together.

图 3 云杉花墨天牛交配时的特殊行为

Fig. 3 Special mating behavior of *Monochamus saltuarius*

2.2 云杉花墨天牛各生殖行为次数与时长

通过 24 h 连续观察云杉花墨天牛成虫的生殖行为发现, 一个玻璃缸内同时饲养 3 对天牛时比只饲养 1 对天牛时, 天牛每天平均抱对、交配和刻槽次数都增加, 其中每天平均交配次数显著增加 ($F=4.765$, $df=27$, $P<0.05$), 而产卵次数却减少。同时各生殖行为每次所用平均时长都缩短, 其中刻槽和产卵时长显著缩短 (刻槽时长: $F=4.986$, $df=26$, $P<0.05$; 产卵时长: $F=5.672$, $df=23$, $P<0.05$) (表 1)。

随着日龄的增加, 云杉花墨天牛每天抱对次数

总体呈下降趋势。一个玻璃缸内同时饲养 3 对天牛时和只饲养 1 对天牛时, 天牛每天抱对次数随日龄的变化趋势均一致, 但 3 对天牛的每天抱对次数整体多于 1 对天牛的每天抱对次数 (图 4)。天牛每天交配次数总体也呈下降趋势, 且相较于抱对行为交配行为的下降趋势更为明显, 同时 3 对天牛每天交配次数整体多于 1 对天牛的每天交配次数 (图 5)。

玻璃缸中饲养 1 对云杉花墨天牛时, 随着日龄增加, 天牛每天平均抱对、交配、刻槽和产卵次数均先增加, 在 7~10 日龄达到最高峰, 然后逐步减少 (图 6)。一个玻璃缸内同时饲养 3 对天牛

表1 云杉花墨天牛各生殖行为发生次数和时长

Table 1 The times and duration of reproductive behaviors of *Monochamus saltuarius*

行为 Behavior	平均次数/(次·天 ⁻¹) Average times per day		平均时长/(min·次 ⁻¹) Average duration	
	1对天牛 A pair of <i>Monochamus saltuarius</i>	3对天牛 Three pairs of <i>Monochamus saltuarius</i>	1对天牛 A pair of <i>Monochamus saltuarius</i>	3对天牛 Three pairs of <i>Monochamus saltuarius</i>
抱对 Mounting	2.38 ± 0.89 a	3.55 ± 1.22 a	27.86 ± 18.37 a	24.95 ± 12.64 a
交配 Mating	1.74 ± 0.51 b	2.64 ± 1.38 a	8.68 ± 4.42 a	8.00 ± 4.74 a
刻槽 Gnawing oviposition scars	1.76 ± 0.74 a	2.58 ± 1.44 a	16.25 ± 9.45 a	9.92 ± 4.79 b
产卵 Ovipositing	1.87 ± 0.61 a	1.67 ± 0.59 a	16.00 ± 10.04 a	7.49 ± 4.32 b

注：分别对1对天牛和3对天牛的每天发生的各种行为次数和各种行为每次发生的时长进行方差分析。表中数据为平均值 ± 标准差，同一行的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, t -test)。

Note: Variance analysis was performed on the times and duration of each reproductive behavior for one pair of and three pairs of *Monochamus saltuarius*. Data are means ± SD, data followed by the different letters within a row are significantly different ($P < 0.05$, t -test).

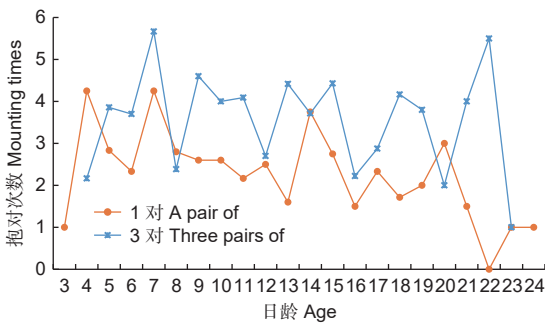


图4 云杉花墨天牛抱对次数随日龄的变化规律

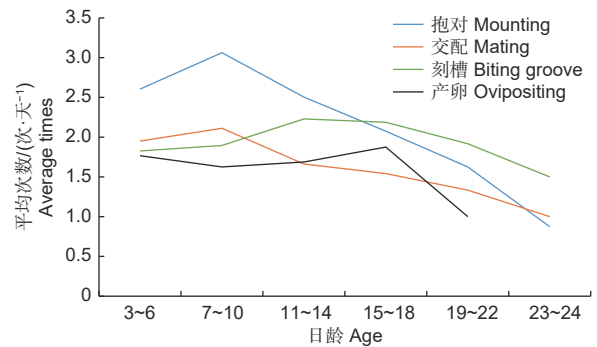
Fig. 4 Regulation of mounting times of *Monochamus saltuarius* with age

图6 1对云杉花墨天牛生殖行为次数随日龄的变化规律

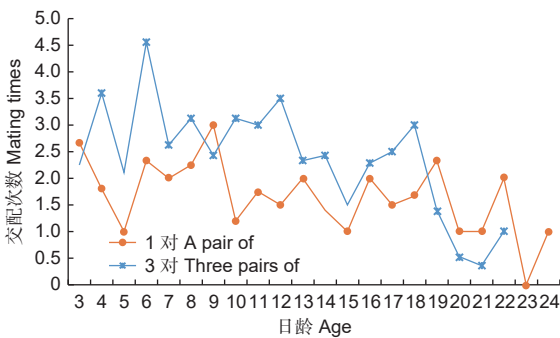
Fig. 6 Regulation of reproductive behavior times of a pair of *Monochamus saltuarius* with age

图5 云杉花墨天牛交配次数随日龄的变化规律

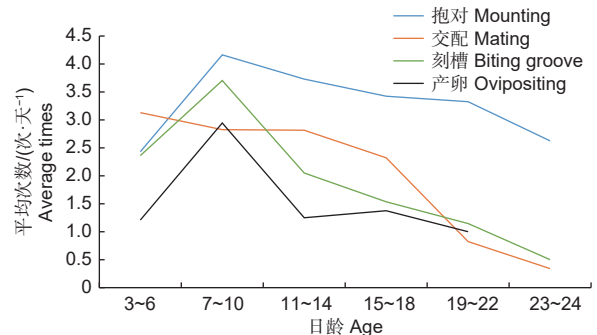
Fig. 5 Regulation of ovipositing times of *Monochamus saltuarius* with age

图7 3对云杉花墨天牛生殖行为次数随日龄的变化规律

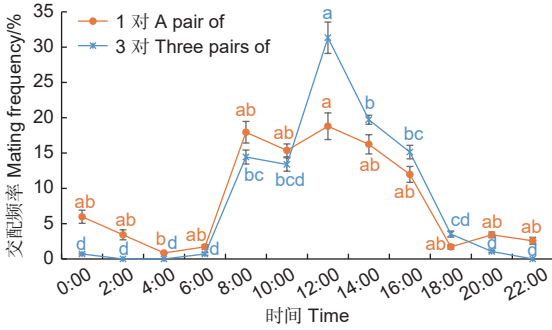
Fig. 7 Regulation of reproductive behavior times of three pairs of *Monochamus saltuarius* with age

时，天牛各生殖行为次数随日龄的变化趋势一致，但增加和减少的趋势都更加明显（图7）。

2.3 云杉花墨天牛交配和产卵日节律

通过对比云杉花墨天牛成虫一日内不同时段交配频率发现，一个玻璃缸内同时饲养3对天牛时和只饲养1对天牛时，都在12:00—14:00有一个交配高峰期。当玻璃缸中只饲养1对云杉花墨天牛时，每天的8:00—16:00交配频率均在15%以

上，其中在12:00—14:00期间交配频率较高，达到18.80%，和其他时间段差异显著 ($F=3.667$, $df=11, 156$, $P < 0.05$)。当玻璃缸中同时饲养3对云杉花墨天牛时，每天的12:00—18:00交配频率均在15%以上，其中在12:00—14:00期间交配频率较高，达到31.34%，和其他时间段差异显著 ($F=12.423$, $df=11, 168$, $P < 0.05$) (图8)。



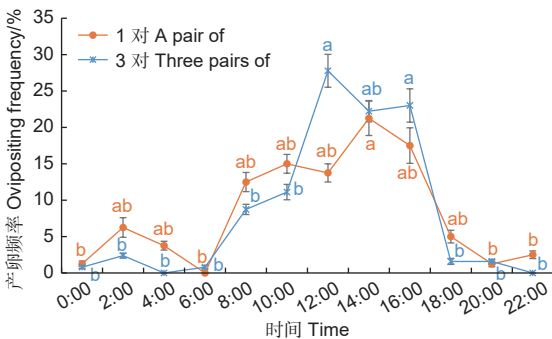
注: 不同字母表示云杉花墨天牛在不同时间段的交配频率差异显著 ($P < 0.05$, SNK)。

Note: Different letters indicate significant difference among the mating frequency of *M. saltuarius* at different times ($P < 0.05$, SNK).

图 8 云杉花墨天牛的交配日节律

Fig. 8 Mating circadian rhythm of *Monochamus saltuarius*

通过对比云杉花墨天牛成虫一日内不同时段产卵频率发现, 一个玻璃缸内同时饲养 3 对天牛时和只饲养 1 对天牛时, 天牛产卵行为都存在一个高峰期。当玻璃缸中只饲养 1 对云杉花墨天牛时, 每天的 14:00—18:00 产卵频率均在 15% 以上, 其中在 14:00—16:00 期间产卵频率较高, 达到 21.25%, 和其他时间段差异显著 ($F = 3.171$, $df = 11, 108$, $P < 0.05$)。当玻璃缸中同时饲养 3 对云杉花墨天牛时, 每天的 12:00—18:00 产卵频率均在 15% 以上, 其中在 12:00—14:00 和 16:00—18:00 期间产卵频率较高, 分别为 27.78% 和 23.02%, 和其他时间段差异显著 ($F = 6.000$, $df = 11, 168$, $P < 0.05$)。可以看出, 一个玻璃缸内同时饲养 3 对天牛时比只饲养 1 对天牛时, 天牛的产卵高峰期提前了 2 h (图 9)。



注: 不同字母表示云杉花墨天牛在不同时间段的产卵频率差异显著 ($P < 0.05$, SNK)。

Note: Different letters indicate significant difference among the ovipositing frequency of *M. saltuarius* at different times ($P < 0.05$, SNK).

图 9 云杉花墨天牛的产卵日节律

Fig. 9 Ovipositing circadian rhythm of *Monochamus saltuarius*

通过对比云杉花墨天牛成虫一日内不同时段交配和产卵频率发现, 天牛在交配后就会开始寻找合适的位置刻槽并产卵, 产卵日节律趋势跟随交配日节律趋势而变化, 都存在一个高峰期。(图 10)。一个玻璃缸内同时饲养 3 对天牛时比只饲养 1 对天牛时, 交配和产卵日节律的一致性未发生改变 (图 11)。

3 讨论

3.1 云杉花墨天牛生殖行为

云杉花墨天牛在交配前没有复杂的求偶过程, 雌雄成虫聚集后就容易发生交配。而当雌雄成虫相遇时, 即使它们距离很近, 雄成虫也不会兴奋, 但雄成虫接触雌成虫体壁后会立即变得兴奋, 这与松褐天牛的交配行为类似^[4]。云杉花墨天牛雄成虫接触雌成虫的行为对雄成虫产生了直接的刺激, 推测成虫体壁存在接触性信息素, 聚集信息素和性信息素均在成虫交配过程中发挥着重要作用。Ginzel 和 Hanks 提出的“3 步定位假说”就包括雄成虫释放聚集信息素吸引雌成虫靠近, 后通过雌成虫体表的

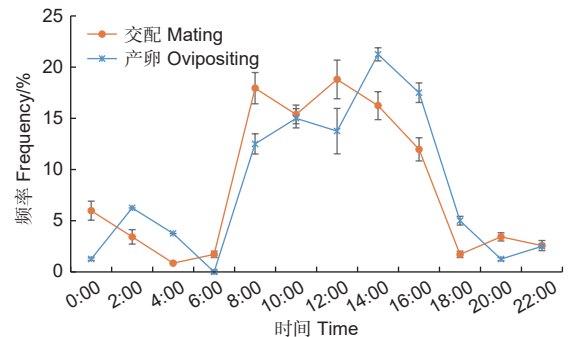


图 10 1 对云杉花墨天牛的交配和产卵日节律

Fig. 10 Mating circadian rhythm and ovipositing rhythm of a pair of *Monochamus saltuarius*

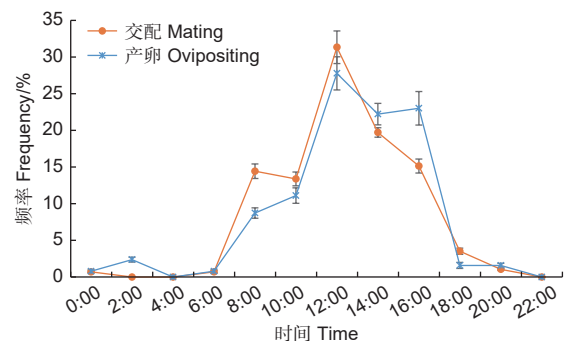


图 11 3 对云杉花墨天牛的交配和产卵日节律

Fig. 11 Mating circadian rhythm and ovipositing rhythm of three pairs of *Monochamus saltuarius*

接触信息素相互识别,进而发生交配行为^[19]。观察发现云杉花墨天牛雌成虫和雄成虫在一次抱对后有多次交配的现象,此现象在栗山天牛^[20]、松褐天牛^[3]、云斑天牛(*Batocera horsfieldi* Hope)^[21]中均有发生。交配次数会影响雄成虫的交配成功率,多次交配有利于雄成虫成功授精,同时多次交配可以及时补充雌成虫受精囊内的精子,有助于提升雌成虫的产卵量和卵孵化量^[3]。本研究中云杉花墨天牛雌成虫平均产卵次数为 1.87 ± 0.61 次·天⁻¹,平均每头雌成虫一生产卵次数约为40次,与韩国的研究结论相符^[22]。

本研究还观察到云杉花墨天牛存在雄成虫尝试与已死亡雌成虫交配、同性成虫试图交配、3只天牛抱在一起类似抱对的特殊现象,在日本对云杉花墨天牛生殖行为的研究中也观察到了同样的现象^[23]。其中,(1)雄成虫尝试与死亡雌成虫交配的现象表明,雌成虫对雄成虫的反应并不是发生交配行为的关键,可能是由雌成虫释放的体表接触信息素被雄成虫识别进而发生交配行为,且死亡不超过24h的雌成虫仍能引起雄成虫试图进行交配行为,推测这种接触信息素具有稳定性。(2)而同性天牛试图交配的现象,在松褐天牛的交配行为中也存在,罗亚萍等人^[5]认为这一现象出现的可能原因包括:同性恋和接触信息素的错误识别。并根据出现过同性试图交配的天牛并不排斥与其他异性天牛正常交配,进一步推测天牛出现同性试图交配现象的主要是由接触性信息素的错误识别导致。针对本研究中出现的同性成虫试图交配、3只天牛抱在一起类似抱对的特殊现象,研究推测同性成虫之间试图交配可能是体壁信息素错误识别导致,而3只天牛抱在一起类似抱对现象主要是由于聚集信息素的影响,这表明在云杉花墨天牛种群监测和诱捕中,聚集信息素具有重要的应用意义。

3.2 云杉花墨天牛成虫交配产卵日节律

目前关于天牛交配の日节律已有很多研究,不同种天牛交配の日节律略有不同,其中光肩星天牛(*Anoplophora glabripennis* Motschulsky)、星天牛(*Anoplophora chinensis* Forster)、云斑天牛等均在白天交配,且交配高峰期集中在上午^[19,24];而松褐天牛、栗山天牛、桑天牛的交配高峰期集中于晚上^[5,25-26]。同一生态位的不同种天牛选择不同的日节律进行取食、求偶、交配及产卵,可以降低种间对相同资源的竞争以及保持交配活动

的同步性^[27]。

本研究发现云杉花墨天牛的交配和产卵活跃期持续时间较长且集中在10:00—16:00,分析原因可能和饲养的环境有关:(1)室内饲养时,天牛生存空间有限,雌雄成虫活动范围较小,和野外环境相比雌雄成虫的相遇频率较高,因此发生交配行为的频率也相对较高;(2)在室内饲养时,温湿度、光照等环境条件更稳定,可能有利于天牛的交配和产卵等行为。进一步证实昆虫的行为节律除了受昆虫本身生物控制的内源性节律影响,同时还会受到如光照、温度、湿度等自然环境的影响^[6,28]。

3.3 种群密度对云杉花墨天牛成虫生殖行为的影响

通过对比玻璃缸内饲养1对和3对云杉花墨天牛时成虫的生殖行为,发现当玻璃缸内天牛数量增加后,平均每天的生殖行为次数随之增加,但并不构成简单的倍数关系,这很可能是由于种群密度增大后天牛间竞争增加;而各生殖行为尤其是刻槽和产卵行为每次所用平均时长缩短,很可能是由于雌成虫因争夺合适的刻槽产卵位置而相互干扰迫使刻槽和产卵行为中断。同时,当密度增加时天牛交配和产卵行为的活跃期更加集中,这进一步加剧了种间竞争,对天牛的繁殖起到抑制作用。这与前人在种群密度对豌豆蚜繁殖影响的研究中所得结论相符^[29]。

4 结论

本研究通过观察云杉花墨天牛成虫生殖行为发现:(1)云杉花墨天牛在补充营养后第3天开始有生殖行为。(2)云杉花墨天牛的生殖行为主要包括抱对、交配、刻槽和产卵,其中完整的交配过程可分为相遇抱对、插入交配和配后保护三个阶段。(3)一个玻璃缸内同时饲养3对天牛时比只饲养1对天牛时,每天平均的抱对、交配、刻槽次数增加,产卵次数减少,而每次交配行为所用平均时长缩短。(4)云杉花墨天牛的交配和产卵行为具有日节律,其中交配高峰期为12:00—14:00,雌成虫产卵高峰期为14:00—16:00。可利用云杉花墨天牛羽化后需补充营养的特性,在该时期使用寄主植物挥发物对天牛进行诱捕,阻止天牛的交配,从而降低下一代的种群密度。这将有助于防治云杉花墨天牛,从而阻断其携带松材线虫在东北地区进一步传播扩散。此外,由于本研究仅在室内对

云杉花墨天牛成虫生殖行为特性进行了研究,而在自然条件下天牛会受到温度、降雨、光照、寄主松树种类等诸多因素的影响,其在林区内的生殖特性还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] XU T, HANSEN L, TEALE S A. Mating and adult feeding behaviour influence pheromone production in female Asian longhorn beetle *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2020, 23(3): 276-286.
- [2] 张永慧, 郝德君, 王 焱, 等. 松墨天牛成虫交配与产卵行为的观察[J]. *昆虫知识*, 2006, 43 (1): 47-49+142.
- [3] 杨 洪, 王进军, 赵志模, 等. 松褐天牛的交配行为[J]. *昆虫学报*, 2007, 50 (8): 807-812.
- [4] 钱明惠, 黄咏槐, 范军祥, 等. 松墨天牛的日交配节律[J]. *林业实用技术*, 2013, 23 (9): 73-76.
- [5] 罗亚萍, 徐华潮, 孟俊国, 等. 松墨天牛交配行为及其规律初步研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29 (5): 795-798.
- [6] WANG Q, CHEN L Y. Mating behavior of a flower-visiting longhorn beetle *Zorion guttigerum* (Westwood) (Coleoptera: Cerambycidae: Cerambycinae)[J]. *Naturwissenschaften*, 2005, 92(5): 237-241.
- [7] 王海香, 陶 敏, 姬凯茜, 等. 不同时期青杨楔天牛生理活性及交配特征的研究[J]. *应用昆虫学报*, 2017, 54 (3): 462-467.
- [8] 陈俊蓉, 闫诗瑶, 曹丹丹, 等. 桃红颈天牛成虫的交配行为及对不同寄主植物的栖落和产卵选择性[J]. *昆虫学报*, 2020, 63 (7): 851-860.
- [9] 唐艳龙, 魏 可, 王丽娜, 等. 栗山天牛成虫取食、交配和产卵行为[J]. *环境昆虫学报*, 2020, 42 (3): 732-739.
- [10] 沈嘉程, 廖为财, 罗 鹏, 等. 桑天牛寄主选择及其与植物营养和次生代谢物质含量的相关性分析[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43 (4): 783-791.
- [11] 王直诚. 东北天牛志[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社. 2003.
- [12] KOBAYASHI F, YAMANE A, IKEDA T. The Japanese pine sawyer beetle as the vector of pine wilt disease[J]. *Annual Review of Entomology*, 1984, 29: 115-135.
- [13] HAN J H, YOON C M, SHIN S C, *et al.* Seasonal occurrence and morphological measurements of pine sawyer, *Monochamus saltuarius* adults (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2007, 10(1): 63-67.
- [14] 于海英, 吴 昊. 辽宁发现松材线虫新奇主植物和新传播媒介昆虫[J]. *中国森林病虫*, 2018, 37 (5): 61.
- [15] 范立淳, 时 勇, 姜生伟, 等. 辽宁携带松材线虫的天牛种类研究[J]. *林业科学研究*, 2021, 34 (6): 174-181.
- [16] 吴 昊, 时 勇, 刘佩旋, 等. 云杉花墨天牛成虫在红松上的补充营养特性[J]. *昆虫学报*, 2021, 64 (6): 703-710.
- [17] 于海英, 吴 昊, 张旭东, 等. 落叶松自然条件下感染松材线虫初报[J]. *中国森林病虫*, 2019, 38 (4): 7-10.
- [18] 潘佳亮, 李 娟, 董瀛谦, 等. 云杉花墨天牛取食倾向初报[J]. *中国森林病虫*, 2020, 39 (1): 19-22.
- [19] 廖晨延, 魏建荣, 苏 智. 天牛类昆虫交配行为研究进展[J]. *中国森林病虫*, 2021, 40 (2): 27-33.
- [20] 唐艳龙, 姜 静, 杨忠岐, 等. 栗山天牛成虫的活动节律[J]. *环境昆虫学报*, 2021, 33 (1): 17-23.
- [21] 杨 桦, 杨 伟, 杨茂发, 等. 云斑天牛的交配产卵行为[J]. *林业科学*, 2011, 47 (6): 88-92.
- [22] KIM H. *Pinus koraiensis* twigs affect *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) longevity and reproduction[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2011, 14(3): 327-333.
- [23] KOBAYASHI H, YAMANE A, IWATA R. Mating behavior of the pine sawyer, *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Applied Entomology & Zoology*, 2003, 38(1): 141-148.
- [24] KEENA M A, SANCHEZ V. Reproductive behaviors of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in the laboratory[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111(2): 620-628.
- [25] 唐艳龙, 杨忠岐, 姜 静, 等. 栗山天牛幼虫和蛹在辽东栎树干上的分布规律[J]. *林业科学*, 2011, 47 (3): 117-123.
- [26] 黎保清, 嵇保中, 刘曙雯, 等. 桑天牛成虫生殖行为观察[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, 36 (3): 33-36.
- [27] SAUNDERS D S. *Insect Clocks*, 3rd ed[M]. Oxford: Pergamon Press. 2002.
- [28] KIRIYAMA S, IWATA R, FUKAYA M, *et al.* Mating behavior of *Rosalia batesi* (Coleoptera: Cerambycidae) is mediated by male-produced sex pheromones[J]. *Insects*, 2018, 9(2): 48.
- [29] 林春燕, 张 祥, 郝亚楠, 等. CO₂浓度和种群密度对两种色型豌豆蚜生长发育和繁殖的影响[J]. *草原与草坪*, 2020, 40 (6): 46-51.

Reproductive Behavior of *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae)

WANG Jue¹, SHI Yong¹, FAN Li-chun¹, ZHANG Yan-long², ZHENG Ya-nan¹

(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning Province, China; 2. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To clarify the reproductive characteristics and regulation of *Monochamus saltuarius*, in this study, the reproductive behavior of the adults of *M. saltuarius* under laboratory conditions was observed and analyzed, which is helpful for the study of control strategies on the basis of its reproductive characteristics. The population density of the next generation can be reduced by inhibiting or delaying the mating of the *M. saltuarius*. [Method] After nutrition supplementation, the a couple of 3-day-old female and male *M. saltuarius* adults were put in a transparent glass jar with segments and branches of *P. koraiensis* at room temperature, relative humidity 55% ± 5%, lighting conditions 8D:16L. The mounting, mating, gnawing oviposition scars, ovipositing and circadian rhythm of adults were observed continuously until they died. [Result] The results showed that the mating of *M. saltuarius* could be divided into three stages: pair-bonding, ejaculation, and post-copulatory guarding. The average mating time of each adult was 2.38 ± 0.89 times per day, and the average mating duration was 27.86 ± 18.37 min per time; the average mating time was 1.74 ± 0.51 times per day, and the average mating duration was 8.68 ± 4.42 min per time; female adults average gnawing an oviposition scar of 1.76 ± 0.74 times per day, and the average duration of gnawing oviposition scars was 16.25 ± 9.45 min per time; the average spawning time was 1.87 ± 0.61 times per day, and the average duration of spawning was 16.00 ± 10.04 min per time. When there were three pairs of *M. saltuarius* in the glass jar, the times of mounting, mating, and gnawing oviposition scars increased, the number of eggs laid decreased, and the average duration of each mating behavior shortened. The reproductive behavior of *M. saltuarius* had an obvious circadian rhythm, there were peaks during mating and oviposition periods. The peak period of mating was 12:00-14:00, and the peak period of oviposition was 14:00-16:00 00. The study also found that during the mating process male adults tried to mate with the dead female adults, homosexual adults tried to mate with each other, and three adults mounded together. [Conclusion] Under indoor conditions, *M. saltuarius* begins to reproduce on the 3th day after nutritional supplementation. The mating process can be divided into three stages: pair-bonding, ejaculation, and post-copulatory guarding. The mating and spawning behaviors of *M. saltuarius* have circadian rhythms.

Keywords: *Monochamus saltuarius*; reproduction; mating; ovipositing; circadian rhythm

(责任编辑: 崔 贝)