

寄主型和迁飞型棉蚜的交配行为^{*}

张帆 刘向东^{**}

(南京农业大学昆虫学系 南京 210095)

摘 要 棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 种群存在寄主利用和迁飞能力上的明显分化,有棉花型和瓜型、迁飞型和滞留型之分。但是,棉花型与瓜型之间,以及迁飞型与滞留型之间是否能发生交配行为,尚无研究报道。本文在低温和短光照条件下分别诱导棉花型、瓜型、迁飞型和滞留型棉蚜的性蚜,并进行性蚜间的交配行为观察。结果表明,迁飞型和滞留型性蚜间可以发生交配行为,杂交时发生交配行为的个体比率与自交时无显著差异,但是杂交时雄蚜寻找配偶所花的时间要显著长于自交时,并且迁飞型雌蚜(M♀)与滞留型雄蚜(S♂)杂交时的交配持续时间也显著长于自交时。迁飞型和滞留型棉蚜同型交配容易完成,棉蚜的迁飞型和滞留型已在交配行为上产生了一定的分化。棉花型和瓜型棉蚜的性蚜间可以发生交配行为,并且两品系在正交和反交时雄蚜的寻偶时间与交配持续时间均无显著差异。

关键词 棉蚜, 棉花型, 瓜型, 迁飞型, 滞留型, 交配行为

Mating behaviour of host-specialized and migratory biotypes of the cotton aphid

ZHANG Fan LIU Xiang-Dong^{**}

(Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Variation in host use and flight ability in the cotton aphid *Aphis gossypii* Glover is such that some biotypes can be regarded as cotton-specialized, cucurbits-specialized, migratory and sedentary. However, it is not known whether cotton-specialized and cucurbits-specialized biotypes, or migratory (M) and sedentary (S) biotypes, interbreed. The sexual forms of cotton-specialized, cucurbits-specialized, migratory, and sedentary biotypes were induced under reduced temperature and short photoperiod and their mating behavior was investigated. The results indicate that migratory and sedentary biotypes interbreed, and the number of males that completed copulation within three hours did not significantly differ between inter-biotype and intra-biotype mating. However, it took significantly longer for males to find a mate of another biotype than one of their own biotype. The duration of copulation of M♀ × S♂ was also significantly longer than that of M♀ × M♂ and S♀ × M♂. Mating was more likely to occur when the male and female were of the same biotype than when they were from different biotypes. There was a trend towards assortative mating between migratory and sedentary biotypes. Interbreeding occurred between cotton-specialized (Co) and cucurbits-specialized (Cu) biotypes, and the time required for males to find a mate and complete copulation were similar between Co♀ × Cu♂ cross and Cu♀ × Co♂ cross.

Key words *Aphis gossypii*, cotton-specialization, cucurbits-specialization, migratory biotype, sedentary biotype, mating behaviour

通常认为,棉蚜是多食性昆虫,其寄主范围较广。但是,现有的研究表明,棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 在广泛的寄主中,形成了明显的寄主专化

型。黄瓜和菊花上的棉蚜相互转接基本不能繁殖后代建立种群(Guldemond *et al.*, 1994)。棉花和黄瓜上的棉蚜也一样,互换寄主后也不能建立种

^{*} 资助项目:国家自然科学基金(31070377,30771418)。

^{**}通讯作者:E-mail: liuxd@njau.edu.cn

收稿日期:2011-05-18,接受日期:2012-03-17

群,世界多国的研究均表明,棉蚜已形成了棉花型和瓜型两类寄主专化型(朱弘复和张广学,1958;孟玲等,1998; Vanlerberghe-Masutti and Chavigny, 1998;刘向东等,2002;Liu *et al.*, 2008a)。寄主专化型棉蚜除了表现为寄主利用的专化性以外,在形态、生态和生理上也表现出了明显的分化。研究表明,棉花型和瓜型棉蚜虽然在形态结构上没有明显的差异,但是可以用形态指标的数值分类方法进行区分(孟玲和李保平,2001;刘向东等,2004),并且棉花型棉蚜对天敌的应对反应要敏感于瓜型棉蚜,但对寄主的定向与选择能力要弱于瓜型棉蚜(刘向东等,2004)。已有的研究还表明,棉花型和瓜型棉蚜均具有产生有性世代的能力,同时,棉花型棉蚜产生性蚜的时间要早于瓜型棉蚜,并且瓜型棉蚜种群中存在有多种繁殖模式(高雪和刘向东,2008)。不过,至今还没有棉花型和瓜型棉蚜有性世代的交配行为方面的研究报道,而对交配行为的研究,可以明确寄主专化型棉蚜是否选择同型交配行为来降低相互间的基因交流水平,以保持专化性的延续。因此,有关寄主专化型棉蚜间的交配行为观察,值得研究。

另外,棉蚜种群存在迁飞能力上的明显分化,在冬寄主木槿上越冬的棉蚜种群有迁飞型和滞留型之分,并且迁飞能力具有明显的遗传效应(刘向东等,2006;Liu *et al.*, 2008b)。通过多年调查发现,南京地区冬寄主木槿上的棉蚜存在周年在冬寄主上生活的种群,并且这部分个体在低温和短光照条件下可以产生有性世代(耿桃兰和刘向东,2009,2010)。迁飞型和滞留型棉蚜均能产生性蚜,并且迁飞型棉蚜在秋季会回迁到冬寄主上进行交配、产卵和越冬。这样迁飞型和滞留型棉蚜就存在相互杂交的可能性。因此,很有必要判断迁飞型和滞留型棉蚜间是否存在同型交配的偏爱,以达到降低两者间基因交流程度的目的。因此,本文分别观察了寄主型和迁飞型各品系棉蚜有性世代的交配行为特征,以探讨棉蚜种群在寄主利用和迁飞能力上的分化程度。

1 材料与方法

1.1 棉蚜品系的选育

供试棉蚜品系有:滞留型(S)、迁飞型(M)、棉花型(Co)和瓜型(Cu)。迁飞型棉蚜于2008年4月在南京农业大学木槿树上采集有翅若蚜,带回

室内饲养到成蚜后,进行起飞能力测定,将能起飞的个体收集,在室内棉苗上进行饲养,连续筛选3代次后作为迁飞型品系。2008年8月,在木槿树上采集夏季滞留于木槿树上的棉蚜,带回室内用棉苗饲养,作为滞留型棉蚜品系。棉花型和瓜型棉蚜为南京地区棉花和黄瓜上采集,在室内分别用棉花和黄瓜苗孤雌饲养7年,已测定属于典型的寄主专化型(刘向东等,2002;Liu *et al.*, 2008a)。用于饲养各品系棉蚜的棉花和黄瓜苗均为常规品种,采用珍珠岩栽种在一次性塑料杯中,定期浇灌营养液,供试植株长至6~7片真叶时用于实验。

1.2 性蚜诱导方法

在光照培养箱中采用低温和短光照(18℃, L:D=8:16)分别对4个品系的棉蚜在活体植株上进行有性世代的诱导。每品系棉蚜诱导起始时均随机选取20头无翅成蚜,均匀接于5株饲养寄主上,用塑料笼罩好,放于低温短光照的培养箱中。其中瓜型棉蚜Cu接于黄瓜上,其它3个品系(棉花型Co,迁飞型M和滞留型S)接于棉花上。诱导至开始出现雄蚜时,每4d挑取低龄若蚜至带有饲养叶片的培养皿中单头饲养,待其长到成蚜后进行性别确定、记数和交配实验。

1.3 性蚜交配的观察方法

交配实验观察了迁飞型和滞留型棉蚜的正交(M♀×S♂, 22对)和反交(S♀×M♂, 19对)、迁飞型棉蚜的自交(M♀×M♂, 9对)和滞留型棉蚜的自交(S♀×S♂, 4对)、瓜型棉蚜和棉花型棉蚜的正交(Cu♀×Co♂, 28对)和反交(Co♀×Cu♂, 24对)等组合。所有的交配行为均在直径为8.4cm的培养皿中的棉叶上进行。

每天12:00—18:00之间进行交配行为观察(室内温度24℃),观察棉蚜的运动行为,记录寻找配偶时间和交配持续时间等参数,每对棉蚜观察最长3h。观察前将雌性蚜放于叶片上,当其静止不动后,将一头雄蚜放在雌性蚜旁约3cm处,此时开始记时,当雄蚜触角试探到了雌蚜,或雌雄蚜身体有接触时,视为雄蚜寻找到了配偶,其间的历时即为寻偶时间。雄蚜寻找到雌蚜后,有的会爬到雌虫身体上进行交配,有的会离开而不发生交配。交配时间从雌、雄蚜结合在一起时开始,到雌、雄蚜彻底分开时结束,由此可得到交配持续时

群,世界多国的研究均表明,棉蚜已形成了棉花型和瓜型两类寄主专化型(朱弘复和张广学,1958;孟玲等,1998; Vanlerberghe-Masutti and Chavigny, 1998;刘向东等,2002;Liu *et al.*, 2008a)。寄主专化型棉蚜除了表现为寄主利用的专化性以外,在形态、生态和生理上也表现出了明显的分化。研究表明,棉花型和瓜型棉蚜虽然在形态结构上没有明显的差异,但是可以用形态指标的数值分类方法进行区分(孟玲和李保平,2001;刘向东等,2004),并且棉花型棉蚜对天敌的应对反应要敏感于瓜型棉蚜,但对寄主的定向与选择能力要弱于瓜型棉蚜(刘向东等,2004)。已有的研究还表明,棉花型和瓜型棉蚜均具有产生有性世代的能力,同时,棉花型棉蚜产生性蚜的时间要早于瓜型棉蚜,并且瓜型棉蚜种群中存在有多种繁殖模式(高雪和刘向东,2008)。不过,至今还没有棉花型和瓜型棉蚜有性世代的交配行为方面的研究报道,而对交配行为的研究,可以明确寄主专化型棉蚜是否选择同型交配行为来降低相互间的基因交流水平,以保持专化性的延续。因此,有关寄主专化型棉蚜间的交配行为观察,值得研究。

另外,棉蚜种群存在迁飞能力上的明显分化,在冬寄主木槿上越冬的棉蚜种群有迁飞型和滞留型之分,并且迁飞能力具有明显的遗传效应(刘向东等,2006;Liu *et al.*, 2008b)。通过多年调查发现,南京地区冬寄主木槿上的棉蚜存在周年在冬寄主上生活的种群,并且这部分个体在低温和短光照条件下可以产生有性世代(耿桃兰和刘向东,2009,2010)。迁飞型和滞留型棉蚜均能产生性蚜,并且迁飞型棉蚜在秋季会回迁到冬寄主上进行交配、产卵和越冬。这样迁飞型和滞留型棉蚜就存在相互杂交的可能性。因此,很有必要判断迁飞型和滞留型棉蚜间是否存在同型交配的偏爱,以达到降低两者间基因交流程度的目的。因此,本文分别观察了寄主型和迁飞型各品系棉蚜有性世代的交配行为特征,以探讨棉蚜种群在寄主利用和迁飞能力上的分化程度。

1 材料与方法

1.1 棉蚜品系的选育

供试棉蚜品系有:滞留型(S)、迁飞型(M)、棉花型(Co)和瓜型(Cu)。迁飞型棉蚜于2008年4月在南京农业大学木槿树上采集有翅若蚜,带回

室内饲养到成蚜后,进行起飞能力测定,将能起飞的个体收集,在室内棉苗上进行饲养,连续筛选3代次后作为迁飞型品系。2008年8月,在木槿树上采集夏季滞留于木槿树上的棉蚜,带回室内用棉苗饲养,作为滞留型棉蚜品系。棉花型和瓜型棉蚜为南京地区棉花和黄瓜上采集,在室内分别用棉花和黄瓜苗孤雌饲养7年,已测定属于典型的寄主专化型(刘向东等,2002;Liu *et al.*, 2008a)。用于饲养各品系棉蚜的棉花和黄瓜苗均为常规品种,采用珍珠岩栽种在一次性塑料杯中,定期浇灌营养液,供试植株长至6~7片真叶时用于实验。

1.2 性蚜诱导方法

在光照培养箱中采用低温和短光照(18℃, L:D=8:16)分别对4个品系的棉蚜在活体植株上进行有性世代的诱导。每品系棉蚜诱导起始时均随机选取20头无翅成蚜,均匀接于5株饲养寄主上,用塑料笼罩好,放于低温短光照的培养箱中。其中瓜型棉蚜Cu接于黄瓜上,其它3个品系(棉花型Co,迁飞型M和滞留型S)接于棉花上。诱导至开始出现雄蚜时,每4d挑取低龄若蚜至带有饲养叶片的培养皿中单头饲养,待其长到成蚜后进行性别确定、记数和交配实验。

1.3 性蚜交配的观察方法

交配实验观察了迁飞型和滞留型棉蚜的正交(M♀×S♂, 22对)和反交(S♀×M♂, 19对)、迁飞型棉蚜的自交(M♀×M♂, 9对)和滞留型棉蚜的自交(S♀×S♂, 4对)、瓜型棉蚜和棉花型棉蚜的正交(Cu♀×Co♂, 28对)和反交(Co♀×Cu♂, 24对)等组合。所有的交配行为均在直径为8.4cm的培养皿中的棉叶上进行。

每天12:00—18:00之间进行交配行为观察(室内温度24℃),观察棉蚜的运动行为,记录寻找配偶时间和交配持续时间等参数,每对棉蚜观察最长3h。观察前将雌性蚜放于叶片上,当其静止不动后,将一头雄蚜放在雌性蚜旁约3cm处,此时开始记时,当雄蚜触角试探到了雌蚜,或雌雄蚜身体有接触时,视为雄蚜寻找到了配偶,其间的历时即为寻偶时间。雄蚜寻找到雌蚜后,有的会爬到雌虫身体上进行交配,有的会离开而不发生交配。交配时间从雌、雄蚜结合在一起时开始,到雌、雄蚜彻底分开时结束,由此可得到交配持续时

间以及全部供试雌雄蚜发生了交配行为的对数。将发生了交配行为的雌蚜单独饲养,观察其产卵情况。

1.4 数据分析方法

棉蚜不同品系的自交和杂交的各参数差异显著性比较采用 Duncan's 新复极差方法,两两组合间的比较采用 *t* 测验。交配成功率间的比较采用 Crosstab 列联表中的卡方检测。所有数据的统计

分析均在 SPSS17.0 中进行。文中数据均为平均数 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 寄主型和迁飞型各品系产生雄蚜和雌性蚜的时间

性蚜诱导表明,各品系棉蚜在低温短光照条件下均能产生有性世代。迁飞型棉蚜在诱导 21 d

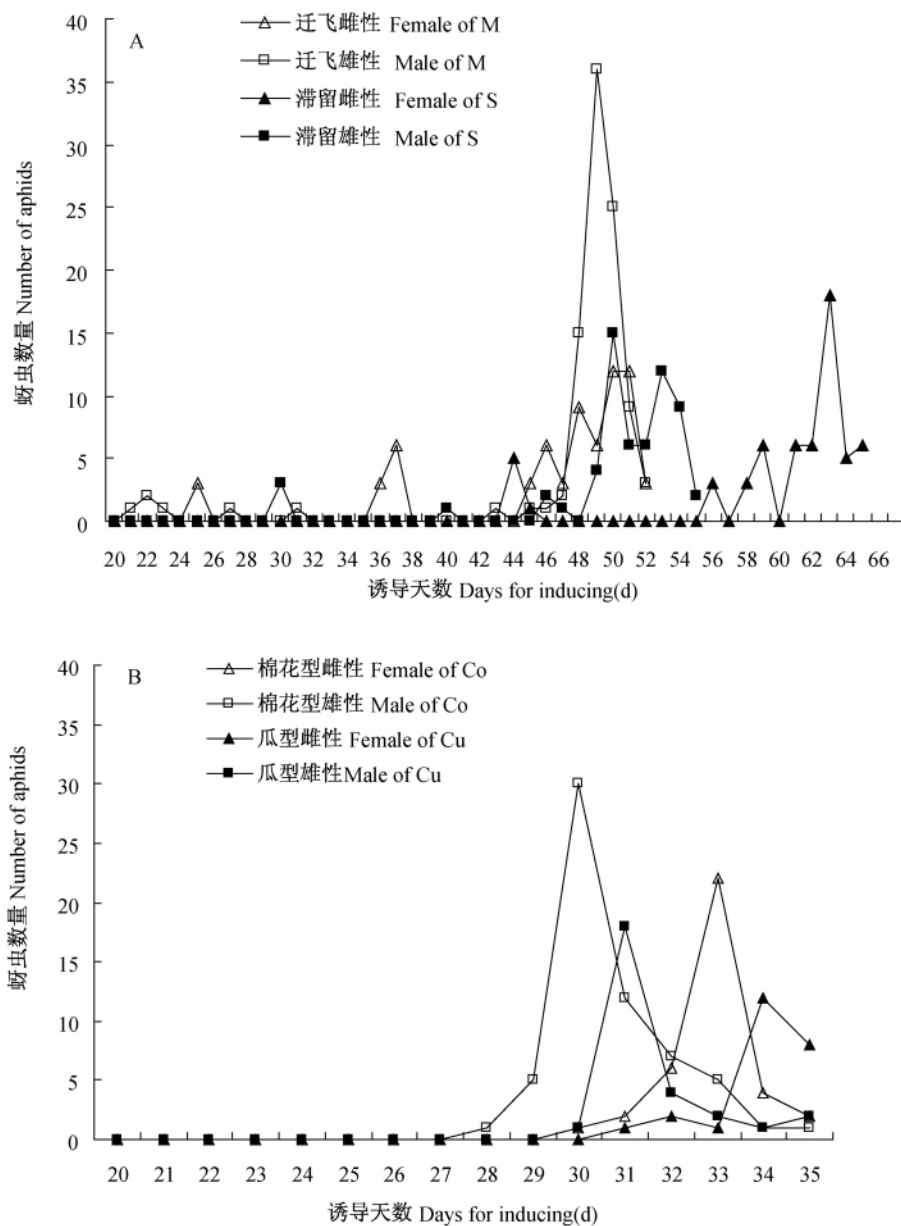


图 1 不同品系棉蚜性蚜产生的数量动态

Fig. 1 Number of female and male aphids induced from the migratory and host-specialized aphids

A: 迁飞型和滞留型棉蚜; B: 棉花型和瓜型棉蚜。

A: migratory (M) and sedentary (S) aphid; B: cotton-(Co) and cucurbits-specialized (Cu) aphid.

后开始出现雄蚜,雄蚜出现高峰在诱导后的 45 ~ 49 d,雌蚜在诱导后的 25 d 出现,高峰出现在 45 ~ 51 d。滞留型棉蚜在诱导后的第 30 天出现雄蚜,高峰出现在第 50 ~ 55 天,雌蚜在诱导后的 44 d 出现,高峰出现在第 60 ~ 65 天(图 1:A)。对棉花型和瓜型棉蚜进行诱导显示,棉花型和瓜型棉蚜出现雌、雄性蚜的时间较为接近,雄蚜在诱导后的第 28 ~ 35 天出现,雌性蚜在诱导后的第 30 ~ 38 天出现(图 1:B)。

2.2 迁飞型和滞留型棉蚜的交配行为

对迁飞型和滞留型棉蚜进行正交(M♀×S♂)、反交(S♀×M♂)及其自交(M♀×M♂,S♀×S♂)实验结果表明,杂交实验中正交与反交分别完成 22 对和 19 对,正交中有 12 对发生了交配

行为,反交实验中有 8 对发生了交配行为,两者之间没有显著差异($\chi^2 = 0.6315$, $df = 1$, $P = 0.4628$);自交实验分别进行 9 对(M♀×M♂)和 4 对(S♀×S♂),其中滞留型的自交仅 1 对发生了交配行为,而迁飞型棉蚜有 6 对发生了交配行为,经卡方检测,两者之间没有显著差异($\chi^2 = 1.9345$, $df = 1$, $P = 0.1643$)。迁飞型和滞留型棉蚜正反交与自交的 4 个交配组合下,发生交配行为的比率无显著差异($\chi^2 = 2.081$, $df = 3$, $P = 0.556$)。不过,无论是正反交还是自交,在实验条件下交配后雌性蚜的产卵量均极低,仅在迁飞型和滞留型的正交中,以及迁飞型棉蚜的自交中雌性蚜产下了一粒卵,并且该卵未孵化(表 1)。

表 1 迁飞型与滞留型棉蚜的交配率

Table 1 Incidence of mating of the sedentary (S) and migratory (M) biotypes of *Aphis gossypii*

交配组合 Cross group	数量 No.	交配数 Mating males	产卵量 Number of eggs	卵孵化数 Hatching egg	交配率 Incidence of mating
M♀×S♂	22	12	1	0	55%
S♀×M♂	19	8	0	0	42%
M♀×M♂	9	6	1	0	67%
S♀×S♂	4	1	0	0	25%

2.3 迁飞型和滞留型棉蚜雄蚜的寻偶时间及交配的持续时间

由表 2 可知,迁飞型和滞留型自交时,雄蚜寻偶所花的时间要显著短于两品系性蚜杂交所花的时间($F_{3,50} = 22.113$, $P < 0.0001$)。迁飞型雄蚜的行为要比滞留型雄蚜活跃,寻找配偶的能力强于滞留型雄蚜,表现为自交时的寻偶时间显著地

短于滞留型雄蚜($t = 2.53$, $P = 0.0282$)。迁飞型与滞留型进行杂交时,雄蚜的寻偶时间在正交(M♀×S♂)和反交(S♀×M♂)中无显著差异($t = 1.20$, $P = 0.2387$),由此表明,在异型交配组合下,雄蚜定位异型雌性蚜的能力并没有表现出迁飞型比滞留型强。

迁飞型与滞留型之间进行杂交时,交配过程

表 2 迁飞型和滞留型棉蚜自交与杂交时的寻偶时间及交配持续时间

Table 2 Time for finding mates and duration of copulation for inter-and intra-biotype crosses between migratory and sedentary biotypes

交配组合 Inter-and intra-biotype crosses	雄蚜寻偶时间 Time for finding mates (min)	交配持续时间 Duration of copulation (min)
S♀×S♂	76.0 ± 6.7b	20.0
M♀×M♂	56.7 ± 14.4c	21.2 ± 7.5b
S♀×M♂	100.3 ± 12.1a	26.2 ± 4.8b
M♀×S♂	106.8 ± 21.0a	34.8 ± 5.9a

注:同列数据后标有不同小写字母表示经 Duncan's 多重比较,交配组间差异显著($P < 0.05$)。

Data followed by different lowercase in the same column indicate significant difference among inter-and intra-biotype crosses at 0.05 level by Duncan's multiple range test.

的持续时间表现为滞留型雄蚜与迁飞型雌性蚜的杂交组合($M♀ \times S♂$)显著长于迁飞型雄蚜与滞留型雌性蚜杂交组合($S♀ \times M♂$)($t = 3.38, P = 0.0033$)。迁飞型雄蚜无论是与滞留型雌性蚜的杂交,还是与迁飞型雌性蚜的自交,其交配持续的时间基本相同($t = 1.55, P = 0.148$)。虽然实验中滞留型棉蚜内的自交只有一对观察到了交配行为,但表现出的交配持续时间与迁飞型的自交较为相仿(表2)。迁飞型和滞留型棉蚜性蚜的交配在同型间容易完成,表现为寻偶所花时间少和交配持续时间短。由此说明,迁飞型和滞留型棉蚜的性蚜存在一定的同型交配倾向。

2.4 棉花型棉蚜和瓜型棉蚜的交配行为

由图2可知,棉花型与瓜型性蚜间的正交和反交,在雄蚜的寻偶时间及交配的持续时间上均无显著差异。棉花型雌性蚜与瓜型雄蚜交配时,雄蚜寻偶时间平均为(108.08 ± 20.78) min,稍短于瓜型雌性蚜与棉花型雄蚜交配时的寻偶时间(114.25 ± 22.03) min,但两者之间没有显著差异($t = 1.03, P = 0.307$)。

在棉花型雌蚜与瓜型雄蚜杂交组合中有14对观察到了交配行为,在瓜型雌性蚜与棉花型雄蚜的杂交组合中有13对观察到了交配行为,两杂交组合供试配对的交配率分别为58.3%和46.4%,两者之间没有显著差异($\chi^2 = 0.734, df = 1, P = 0.392$)。同时,交配持续时间在棉花型雌性蚜与瓜型雄蚜的杂交组合为(32.93 ± 7.19) min,以及瓜型雌性蚜与棉花型雄蚜的杂交组合为(30.15 ± 4.91) min间无显著差异($t = 1.16, P = 0.257$) (图2)。

3 讨论

蚜虫中存在2种繁殖方式,即无性繁殖和有性繁殖。蚜虫在长光周期下进行孤雌生殖,而在短光周期条件下,一般繁殖两代后会产生性蚜,而进行有性生殖(Simon *et al.*, 2002)。本研究发现在低温短光照条件的诱导下,棉蚜的迁飞型和滞留型,以及棉花型和瓜型等不同品系均能产生性蚜,这与先前的研究结果一致(高雪和刘向东, 2008; 耿桃兰和刘向东, 2010)。进一步对寄主型和迁飞型的交配行为观察发现,迁飞型棉蚜的雄蚜较为活跃,寻找雌性蚜时积极主动,喜好爬行、

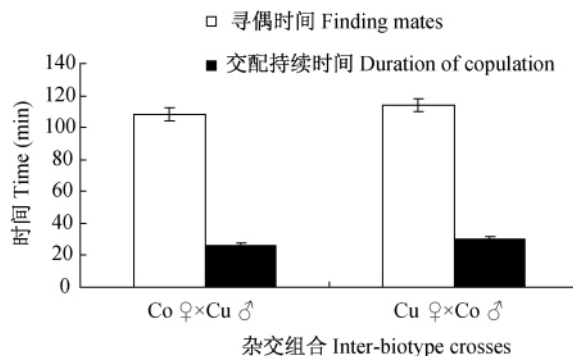


图2 棉蚜型和瓜型棉蚜杂交时的寻偶时间和交配持续时间

Fig. 2 The time consumption for male to find mates and duration of copulation in the crosses between cotton and cucurbit-specialized biotypes

触角摆动频繁,但滞留型蚜则相对喜好静止,因此自交过程中寻偶时间迁飞型要显著短于滞留型。迁飞型和滞留型之间,同型交配时寻偶时间和交配时间都要显著短于异型交配,这说明两品系棉蚜在交配行为上已产生了分化,并且这种分化有利于迁飞型和滞留型的长期保持。因为,迁飞型棉蚜在秋季会迁回到冬寄主上,与滞留型棉蚜的性蚜共同存在,如果迁飞型和滞留型仅同型交配,则不易发生两者间的杂交,从而减少两品系间的基因交流。不过,本研究仅在人工配对条件下,比较了迁飞型和滞留型棉蚜的杂交与自交行为,而对雄蚜在两品系雌性蚜共存情况下的配偶选择趋向,还没有研究。

蚜虫对不同寄主植物专化型的产生,导致蚜虫倾向于在其喜好的植物上繁殖,这就导致了不同专化型蚜虫之间基因交流的减少(Via, 1999)。黑豆蚜的2个寄主亚种的有性繁殖在不同植物上进行,因此2寄主上的种群不会发生基因交流(Raymond *et al.*, 2001)。苹果实蝇的2个寄主专化型之间存在同型交配的现象(Feder *et al.*, 1994)。同型交配是同域同种昆虫不同生物型,如寄主型、迁飞型保持的重要机制之一。本研究发现的迁飞型与滞留型棉蚜存在同型交配趋向的结果,支持了这一观点。本研究发现雄蚜在没有同型的雌性蚜可选择条件下,棉花型雄蚜可以与瓜型雌性蚜发生交配行为,反之,瓜型雄蚜也能与棉花型雌性蚜发生交配行为,这在一定程度上可

说明棉花型和瓜型棉蚜间还可以发生基因交流,但基因交流的程度如何,还需要进一步研究。不过,由于本研究没有对棉花型和瓜型棉蚜间的自交行为进行观察,因此,还难以确定 2 寄主型棉蚜间是否存在同型交配的趋向。

参考文献 (References)

- Feder JL, Opp SB, Wlazole B, Reynolds K, Go W, Spisak S, 1994. Host fidelity is an effective premating barrier between sympatric races of the apple maggot fly. *PNAS*, 91 (17): 7990—7994.
- Guldemond JA, Tigges WT, De Vrijer PWF, 1994. Host race of *Aphis gossypii* (Homoptera:Aphididae) on cucumber and chrysanthemum. *Environ. Entomol.*, 23 (5): 1235—1240.
- Liu XD, Zhai BP, Zhang XX, 2008a. Specialized host-plant performance of the cotton aphid is altered by experience. *Ecol. Res.*, 23 (5): 919—925.
- Liu XD, Zhai BP, Zhang XX, Gu HN, 2008b. Variability and genetic basis for migratory behaviour in a spring population of the aphid, *Aphis gossypii* Glover in the Yangtze River Valley of China. *Bull. Entomol. Res.*, 98 (5): 491—497.
- Raymond B, Searle JB, Douglas AE, 2001. On the processes shaping reproductive isolation in aphids of the *Aphis fabae* (Scop.) complex (Aphididae:Homoptera). *Biol. J. Linn. Soc.*, 74 (2): 205—215.
- Simon JC, Risper C, Sunnucks P, 2002. Ecology and evolution of sex in aphids. *Trends Ecol. Evol.*, 17 (1): 34—39.
- Vanlerberghe-Masutti F, Chavigny P, 1998. Host-based genetic differentiation in the aphid species *Aphis gossypii* Glover, evidenced from RAPD fingerprints. *Mol. Ecol.*, 7 (7): 905—914.
- Via S, 1999. Reproductive isolation between sympatric races of pea aphids. I. Gene flow restriction and habitat choice. *Evolution*, 53 (5): 1446—1457.
- 高雪, 刘向东, 2008. 棉花型和瓜型棉蚜产生有性世代能力的分化. *昆虫学报*, 51 (1): 40—45.
- 耿桃兰, 刘向东, 2009. 夏季木槿上棉蚜的种群动态及其寄主利用能力. *中国农业科学*, 42 (4): 1452—1457.
- 耿桃兰, 刘向东, 2010. 冬寄主木槿上夏季滞留棉蚜产生有性世代的能力及繁殖模式. *南京农业大学学报*, 33 (5): 45—48.
- 刘向东, 翟保平, 梁圣爱, 许新华, 龚群辉, 2006. 棉蚜迁飞型和居留型及其杂交后代飞行特性的比较研究. *昆虫学报*, 49 (4): 619—624.
- 刘向东, 张立建, 张孝羲, 翟保平, 2002. 棉蚜对寄主的选择及寄主专化型研究. *生态学报*, 22 (8): 1281—1285.
- 刘向东, 翟保平, 张孝羲, 陆杨, 2004. 棉花型和瓜型棉蚜形态和生态适力的分化. *昆虫学报*, 47 (6): 768—773.
- 孟玲, 李保平, 2001. 新疆棉蚜生物型的研究. *棉花学报*, 13 (1): 30—35.
- 孟玲, 李保平, 董应才, 1998. 新疆棉蚜食物专化型的形态测量分析. *昆虫知识*, 35 (6): 326—330.
- 朱弘复, 张广学, 1958. 棉蚜寄主植物接种实验简报. *昆虫知识*, 4 (3): 182—183.