



亲本体色及环境因子对长绿飞虱成虫体色、 寿命与繁殖的影响

尹海辰^{1,2}, 李建洪², 刘超华³, 万鹏^{1,*}

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 农业部华中作物有害生物综合治理重点实验室/
农作物重大病虫害防控湖北省重点实验室, 武汉 430064; 2. 华中农业大学植物科学技术学院,
武汉 430070; 3. 宜昌市夷陵区白蚁防治所, 湖北宜昌 443100)

摘要:【目的】明确亲本体色和环境因素对长绿飞虱 *Saccharosydne procerus* F1 代成虫体色的影响及不同体色成虫个体在不同环境中产卵量、交配率、成虫寿命的变化。【方法】长绿飞虱不同体色(黑化与非黑化)亲本所产若虫在室内经不同温度(30℃和22℃)和光周期(20L:4D和16L:8D)组合处理,观察成虫黑化率;将不同体色的成虫同样经历这些温度和光周期组合处理,记录成虫寿命、产卵量和交配率变化,分析不同因素对其的贡献率。【结果】长绿飞虱不同体色亲本所产若虫在实验室内经过上述温度和光周期组合处理后,成虫黑化率变化范围为18.6%~60.8%。若虫期高温、长光照以及黑化亲本均显著增加子代中黑化个体的比例。低温短光照条件下非黑化个体寿命显著长于黑化个体,高温长光照则相反;黑化个体交配率与产卵量随着温度和光照时间的下降而下降,非黑化个体的交配率与产卵量则主要受到光周期影响。统计分析表明,在几种因子中,温度对长绿飞虱的交配率变化贡献率最高,为39.1%;光周期对长绿飞虱体色及产卵量变化贡献率最高,分别达到42.5%和47.4%。体色与温度交互作用对长绿飞虱雌、雄成虫寿命的贡献率最高,分别可达50.3%和60.6%。【结论】本研究表明,若虫期光周期对长绿飞虱成虫体色变化影响最显著,且该虫体色变化在一定程度上改变了其成虫生物学特性,提高了该虫对环境的适应性。

关键词: 长绿飞虱; 黑化; 体色; 温度; 光周期; 生物学特性

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2019)10-1197-08

Effects of parental body color and environmental factors on the body color, longevity and reproduction of *Saccharosydne procerus* (Hemiptera: Delphacidae) adults

YIN Hai-Chen^{1,2}, LI Jian-Hong², LIU Chao-Hua³, WAN Peng^{1,*} (1. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Central China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Key Laboratory of Crop Diseases Insect Pests and Weeds Control, Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Institute of Yiling Termite Control, Yichang, Hubei 443100, China)

Abstract: 【Aim】 This study aims to investigate the effects of parental body color and environmental factors on the body color of F1 generation adults and the changes of the fecundity, mating rate and longevity of *Saccharosydne procerus* adults with different body colors in different environments. 【Methods】 The nymphs from *S. procerus* parents with different body colors (melanic and non-melanic) were

基金项目: 湖北省农业科技创新项目(2016-620-003-03-03); 湖北省农业科学院青年基金项目(2018NKYJJ06)

作者简介: 尹海辰, 男, 1988年7月生, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 助理研究员, 研究方向为作物害虫抗性治理研究, E-mail: 22830884@qq.com

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

收稿日期 Received: 2019-05-23; 接受日期 Accepted: 2019-07-17

subjected to treatments of different ambient temperature (30°C and 22°C) and photoperiod (20L:4D and 16L:8D) combinations in the laboratory, and the melanism rate of adults was observed. The adults with different body colors were also subjected to treatments of these same temperature and photoperiod combinations, the changes in the body color, longevity, fecundity and mating rate of adults were recorded, and the contribution rates of different factors on these indicators were analyzed. 【Results】 The results showed that the variation range of melanism rate of *S. procerus* adults was 18.6% – 60.8% when the nymphs from the parents with different body colors were subjected to treatments of the above temperature and photoperiod combinations in the laboratory. High temperature, long photophase in the nymphal stage and melanic parents significantly increased the proportion of melanic individuals in the offspring. The longevity of non-melanic individuals was significantly longer than that of melanic individuals under low temperature or short photophase conditions in the adult stage, while it was opposite under high temperature and long photophase conditions. The mating rate and fecundity of melanic individuals decreased with the decrease of temperature and photophase, while the mating rate and fecundity of non-melanogenic individuals were mainly affected by photoperiod. The statistical analysis showed that temperature had the highest contribution rate to the mating rate of *S. procerus* (39.1%), photoperiod had the highest contribution rate to the change of body color and fecundity of *S. procerus* (42.5% and 47.4%, respectively), and the interaction between body color and temperature had the highest contribution rate to the longevity of male and female adults (50.3% and 60.6%, respectively). 【Conclusion】 This study demonstrates that photoperiod in the nymphal stage has the most significant influence on the body color of *S. procerus* adults, changing their biological characteristics in certain extent and improving their adaptability to the environment.

Key words: *Saccharosydne procerus*; melanism; body color; temperature; photoperiod; biological characteristics

昆虫的黑化(melanism)是指其表皮部分或者全部颜色变暗的现象,昆虫的幼虫、成虫、蛹等各个发育阶段都有可能出现黑化现象,黑化现象既包括体色由浅变深的连续性变化,也存在可将体色划分为有限几种类型的非连续性变化(Clusella-Trullas *et al.*, 2007)。昆虫体色变化常与温度、湿度、光周期、种群密度以及栖息地背景颜色等环境条件密切相关,体色的变化对于昆虫躲避天敌捕食、配偶选择、体温调节等行为有非常重要的影响,不同体色个体生活史特征及环境适应性也可能存在一定的差异,从而导致其地理分布、田间种群发生规律改变,因此研究体色变化对于指导害虫的防治工作具有十分重要的意义(Alho *et al.*, 2010; Castella *et al.*, 2013)。

长绿飞虱 *Saccharosydne procerus*, 属半翅目(Hemiptera)蜡蝉总科(Fulgoridae)飞虱科(Delphacidae)。该虫寄主包括水稻、茭白、野茭白等,是为害茭白的主要害虫之一,该虫主要聚集在叶鞘和叶片中脉附近取食,刺吸茭白汁液,以心叶、倒1叶和倒2叶受害最为严重,该虫成虫在叶鞘内产卵导致植株出现伤口后失水。受害茭白叶片卷曲,

出现不规则的黄白色或褐色斑点,叶面表面被排泄物覆盖形成煤污状,为害严重时整株枯死或萎缩并可能导致茭白锈病、茭白胡麻叶斑病的发生(匡晶, 2012)。长绿飞虱繁殖速度极快,一旦防治不及时种群数量会迅速增加,造成十分严重的损失,危害严重时可导致茭白减产20%以上(陈金安, 1993)。

长绿飞虱具有体色分化现象,调查表明有部分成虫个体在前翅端区后缘有黑褐色斑纹,而另一部分个体则通体绿色或蓝绿色且前翅透明,该虫若虫期体色分化现象不明显。目前研究表明该虫成虫的体色分化与其若虫期的温度光周期相关,若虫期处于高温长光照条件下会导致该虫羽化后成虫黑化个体比例显著增加,而羽化后成虫体色就不再发生变化(毛舜, 2008; 匡晶, 2012)。然而何种因素在长绿飞虱黑化过程中起了主要作用目前仍不明确,亲本体色是否对后代体色产生了影响尚缺乏研究,此外环境因素与长绿飞虱体色变化对其生物学特性的综合作用也不清楚。本研究调查和分析了若虫期温度、光周期以及上一代亲本体色三者综合作用对于长绿飞虱F1代成虫体色变化的影响,以及成虫自身

体色、环境因素与其成虫产卵量、交配率、成虫寿命等之间的关系,以期找出影响长绿飞虱体色及生物学特性变化的主要影响因素,为更深入地了解长绿飞虱体色分化现象、掌握长绿飞虱的发生规律奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

试验用长绿飞虱采集自华中农业大学茭白试验田,在其生长期不接触任何化学杀虫剂。在田间剪取带有卵块的茭白叶片,底部用湿润的脱脂棉包裹,放入玻璃指形管内,在 26℃、光周期 16L: 8D 条件下培养,待其孵化后挑取若虫均匀分配到各个试验处理中。

1.2 处理设置

表 1 所示为研究长绿飞虱亲本/自身体色、若虫期温度及光周期对长绿飞虱成虫体色、寿命及繁殖力影响的试验设置,本试验为三因子组合试验。

表 1 长绿飞虱成虫体色、寿命及繁殖力影响因素的试验组合

Table 1 Experimental combinations of influencing factors on the body color, longevity and fecundity of *Sacchaarosydne procerus* adults

亲本/自身体色 Parental/self body color	温度(℃) Temperature	光周期 Photoperiod
黑化 Melanic	30	20L: 4D
	30	8L: 16D
	22	20L: 4D
	22	8L: 16D
非黑化 Non-melanic	30	20L: 4D
	30	8L: 16D
	22	20L: 4D
	22	8L: 16D

1.3 若虫期不同因素对长绿飞虱成虫种群黑化率的影响

田间采集的卵块置于实验室内饲养(饲养条件同 1.1 节),成虫羽化后按照体色分为黑化组和非黑化组分别饲养,收集两种体色亲本所产的卵,当卵块孵化后用毛笔挑取 1 龄若虫放入指形管内,分别置于表 1 所示 4 种光温处理(高温长光照、低温短光照、高温短光照、低温长光照)中;每一指形管内放入一片底部用脱脂棉包裹的茭白叶片和 5 头 1 龄若虫,每个重复 4 个指形管共计 20 头若虫,每个亲本光温组合处理设置 5 次重复共计 100 头若虫。当有若虫死亡后,立即补充在相同环境内饲养的若虫,保

持实验种群密度的稳定,待成虫羽化后观察记录黑化个体的比例。

1.4 成虫期不同因素及其交互作用对长绿飞虱成虫生物学特性的影响

田间收集若虫在实验室内饲养(饲养条件同 1.1 节),待成虫羽化后,根据其体色分为黑化和非黑化两组,每一试管内放入一片底部用脱脂棉包裹的茭白叶片及一对黑化或非黑化成虫,置于表 1 所示的 4 种温度和光周期组合条件下培养(同 1.3 节),每个重复 20 对成虫,每个处理 5 次重复共计 100 对成虫,每天观察一次记录成虫寿命、交配率、产卵量,直至其死亡。

1.5 数据分析

实验数据采用有交互作用的多因素方差分析及 *t* 检验进行分析,所有数据分析均由 SPSS Statistics 17.0 软件完成。

2 结果

2.1 不同因素对长绿飞虱成虫黑化率的影响

在相同的光周期条件下,若虫期温度越高长绿飞虱种群内黑化个体的比例越高,而当温度不变时,若虫期长光照有利于黑斑的出现,若亲本为黑化个体,则后代中羽化后成为黑化个体的比例也越大。8 组处理中,黑化亲本后代若虫置于 30℃,光周期 20L: 4D 条件下饲养羽化后黑化个体比例最高(60.8%);而非黑化亲本后代置于 22℃,光周期 8L: 16D 条件下羽化后黑化个体比例(18.6%)低于其他处理组(表 2)。

表 2 亲本体色及若虫期温度和光周期对长绿飞虱成虫黑化的影响

Table 2 Influence of the parental body color, and temperature and photoperiod in the nymphal stage on the melanism of *Sacchaarosydne procerus* adults

亲本体色 Parental body color	温度(℃) Temperature	光周期 Photoperiod	成虫黑化率(%) Melanism rate of adults
黑化 Melanic	22	20L: 4D	46.2 ± 3.8
		8L: 16D	25.2 ± 3.4
	30	20L: 4D	60.8 ± 1.5
		8L: 16D	48.2 ± 1.5
非黑化 Non-melanic	22	20L: 4D	42.6 ± 3.2
		8L: 16D	18.6 ± 2.3
	30	20L: 4D	44.4 ± 3.8
		8L: 16D	34.8 ± 3.7

表中成虫黑化率数据为平均值 ± 标准误。Data of the melanism rate of adults in the table are mean ± SE.

通过分解离差平方和,计算各实验因素对长绿飞虱体色变化的贡献率,定量比较了各因素变化对实验结果影响的大小,结果见表3。在各种因素中光周期对长绿飞虱黑化的影响最大,贡献率达到42.5%;对总变异贡献率排在第2位的是温度的变

化,贡献率为29.1%;亲本体色对长绿飞虱黑化的影响较小,贡献率仅为15.1%;若虫期温度与光周期交互作用及亲本体色与若虫期温度交互作用对长绿飞虱体色虽有显著影响($P < 0.05$),但贡献率极低(表3)。

表3 亲本体色、若虫期温度与光周期及其交互作用对长绿飞虱成虫体色影响的贡献率及显著性

Table 3 Contribution rate and significance of the effects of parental body color, temperature and photoperiod in the nymphal stage and their interactions on the body colour of *Saccharosydne procerus* adults

		PBC	TNS	PNS	TNS × PNS	PBC × TNS	PBC × PNS	PBC × TNS × PNS
F1 代成虫体色	CR	15.1%	29.1%	42.5%	4.8%	3.6%	0	0.3%
Body color of F1 generation adults	<i>P</i> 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.13
	<i>P</i> -value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.13

CR: 贡献率 Contribution rate; PBC: 亲本体色 Parental body color; TNS: 若虫期温度 Temperature in the nymphal stage; PNS: 若虫期光周期 Photoperiod in the nymphal stage. ×: 表示两种或3种因素的交互作用 Interaction of two or three factors.

2.2 成虫期温度和光周期及其交互作用对不同体色长绿飞虱成虫寿命的影响

由图1可知,在温度为22℃时,光周期20L:4D和8L:16D条件下,非黑化雄成虫寿命分别为19.5 d和20.2 d,雌成虫寿命分别为19.9 d和22.9 d,高于同条件下黑化成虫;而在30℃时,非黑化个体雄成虫寿命在光周期20L:4D和8L:16D条件下分别降低至11.4 d和10 d,非黑化个体雌成虫寿命分别降低至11.9 d和9.0 d左右,黑化个体成虫寿命则

下降较小,雄虫分别为15.8和15.2 d,雌虫分别为16.2和15.3 d。

多因素方差分析表明,雌雄成虫寿命变化主要受到成虫自身体色与温度交互作用影响,其贡献率分别为60.6% (雄虫)和50.3% (雌虫);温度对雌雄成虫寿命变化的贡献率大小排在第2位,分别为21.7% (雄虫)和20.8% (雌虫);而体色,体色与光周期交互作用,温度与光周期的交互作用等环境因素虽有显著影响($P < 0.05$),但贡献率较低(表4)。

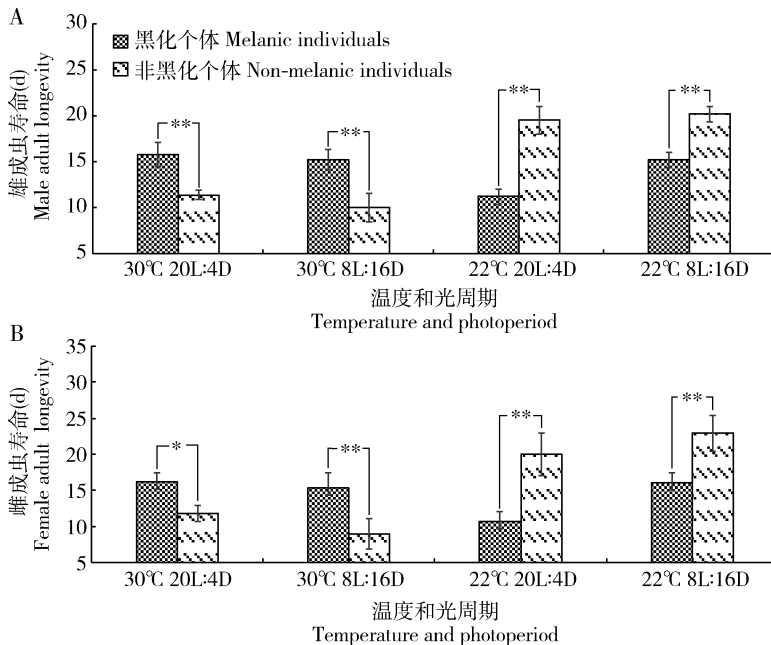


图1 体色、成虫期温度和光周期对长绿飞虱成虫寿命的影响

Fig. 1 Influence of body color, and temperature and photoperiod in the adult stage on the longevity of *Saccharosydne procerus* adults A: 雄成虫寿命 Male adult longevity; B: 雌成虫寿命 Female adult longevity. 图中数据为平均值 ± 标准误,柱上星号和双星号分别表示各环境处理组合内两种体色个体间差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) (*t* 检验),图2和3同。Data in the figure are mean ± SE. The asterisk and double asterisk above bars represent significant difference ($P < 0.05$) and extremely significant difference ($P < 0.01$) (*t*-test), respectively, between adults of two body colours under each environmental treatment combination. The same for Figs. 2 and 3.

表 4 体色、成虫期温度与光周期及其交互作用对长绿飞虱成虫寿命影响的贡献率及显著性

Table 4 Contribution rate and significance of the effects of body color, temperature and photoperiod in the adult stage and their interactions on the longevity of *Sacchaarosydne procerus* adults

		BC	TAS	PAS	BC × TAS	BC × PAS	TAS × PAS	BC × TAS × PAS
ML	CR	1.60%	21.70%	0.80%	60.60%	1.90%	5.20%	0.70%
	P 值 P-value	0.01	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	0.09
FL	CR	2.00%	20.80%	1.50%	50.30%	1.50%	10.20%	0.00%
	P 值 P-value	0.04	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	0.86

CR: 贡献率 Contribution rate; ML: 雄虫寿命 Male longevity; FL: 雌虫寿命 Female longevity; BC: 体色 Body color; TAS: 成虫期温度 Temperature in the adult stage; PAS: 成虫期光周期 Photoperiod in the adult stage. ×: 表示两种或 3 种因素的交互作用 Interaction of two or three factors.

2.3 温度、光周期及其交互作用对不同体色长绿飞虱成虫交配率的影响

由图 2 可以看出,在高温(30℃)的两种光照条件下,黑化个体的交配率高于非黑化个体;但在低温(22℃)条件下则相反。黑化个体交配率对于温度的变化非常敏感,随着温度的降低交配率从 89% 逐渐降低至 42%;而非黑化个体的交配率明显受到光周期的影响,在光周期 20L:4D 长光照条件下,30℃ 与 22℃ 时非黑化个体交配率分别为 78% 和 75%,当光周期 8L:16D 时,30℃ 与 22℃ 下交配率分别为

57% 和 50%。

多因素方差分析表明,除体色-温度-光周期三者交互作用外,其余因素对长绿飞虱交配率均有显著影响($P < 0.05$)。在这些环境因素中温度对该虫交配率影响最大,其贡献率为 39.1%;光周期的影响排在第 2 位,贡献率为 27.2%;而自身体色对交配率的影响很小,贡献率仅为 1.0%,然而体色与温度表现出了较强的交互作用,其贡献率为 21.7%,其他因素组合对交配率的贡献率较低(表 5)。

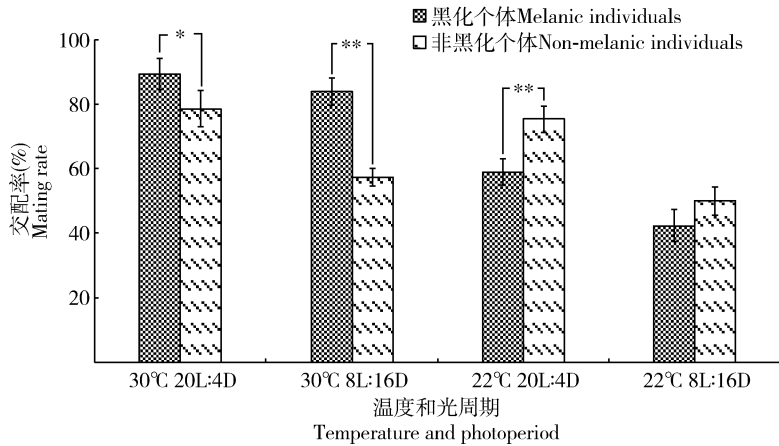


图 2 体色、成虫期温度和光周期对长绿飞虱成虫交配率的影响

Fig. 2 Influence of body color, and temperature and photoperiod in the adult stage on the mating rate of *Saccharosydne procerus* adults

表 5 体色、成虫期温度与光周期及其交互作用对长绿飞虱成虫交配率影响的贡献率及显著性

Table 5 Contribution rate and significance of the effects of body color, temperature and photoperiod in the adult stage and their interactions on the mating rate of *Sacchaarosydne procerus* adults

		BC	TAS	PAS	BC × TAS	BC × PAS	TAS × PAS	BC × TAS × PAS
MR	CR	1.00%	39.10%	27.20%	21.70%	3.50%	1.40%	0.30%
	P 值 P-value	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.22

CR: 贡献率 Contribution rate; MR: 交配率 Mating rate; BC: 体色 Body color; TAS: 成虫期温度 Temperature in the adult stage; PAS: 成虫期光周期 Photoperiod in the adult stage. ×: 表示两种或 3 种因素的交互作用 Interaction of two or three factors.

2.4 体色、成虫期温度和光周期及其交互作用对不同体色长绿飞虱产卵量的影响

由图 3 可以看出,产卵量的变化趋势与交配率

类似,在高温(30℃)的两种光照条件下,黑化个体的产卵量高于非黑化个体,但在低温(22℃)条件下产卵量低于非黑化个体。随着温度的降低和光照时

间的缩短,黑化个体产卵量从 111.7 粒/雌降低至 38.2 粒/雌;非黑化个体产卵量主要随着光周期变化,当光周期 20L:4D 时,30℃ 和 22℃ 条件下产卵量分别为 80.9 粒/雌和 78 粒/雌,当光周期 8L:16D 时,30℃ 和 22℃ 条件下产卵量分别为 33.6 粒/雌和 40.4 粒/雌。

多因素方差分析表明,除温度与光周期的交互作用,体色、温度和光周期的交互作用外,其余因素

对产卵量变化均有显著影响($P < 0.05$)。其中光周期变化对产卵量的影响最大,贡献率为 47.4%;而自身体色与温度的交互作用也对产卵量变化产生了较为显著的影响,产卵量变化中有 20.4% 可以由此解释。此外温度与体色单独作用对产卵量变化的贡献率分别为 17.1% 和 9.9%,而自身体色与光周期的交互作用对产卵量的影响较小,仅为 1.8% (表 6)。

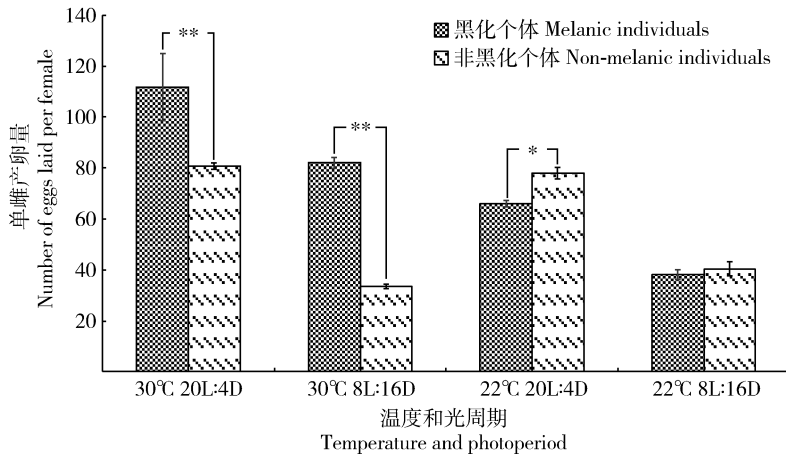


图 3 体色、成虫期温度与光周期对长绿飞虱雌成虫产卵量的影响

Fig. 3 Influence of body color, and temperature and photoperiod in the adult stage on the fecundity of female adults of *Saccharosydne procerus*

表 6 体色、成虫期温度与光周期及其交互作用对长绿飞虱产卵量影响的贡献率及显著性

Table 6 Contribution rate and significance of the effects of body color, temperature and photoperiod in the adult stage and their interactions on the fecundity of *Sacchaarosydne procerus* adults

		BC	TAS	PAS	BC × TAS	BC × PAS	TAS × PAS	BC × TAS × PAS
FD	CR	9.90%	17.10%	47.40%	20.40%	1.80%	0.30%	0.10%
	P 值 P-value	0	0	0	0	0	0.08	0.23

CR: 贡献率 Contribution rate; FD: 产卵量 Fecundity; BC: 体色 Body color; TAS: 成虫期温度 Temperature in the adult stage; PAS: 成虫期光周期 Photoperiod in the adult stage. ×: 表示两种或 3 种因素的交互作用 Interaction of two or three factors.

3 讨论

本研究测定了若虫期温度、光周期以及亲本体色对于长绿飞虱体色变化的影响,以及自身体色、环境因素与长绿飞虱成虫生物学特性之间的关系。结果表明,若虫期高温长光照有利于长绿飞虱的黑化,这点与前人研究(毛舜, 2008; 匡晶, 2012)一致,此外亲本体色对后代体色也有显著影响。在这些影响黑化的因素中我们发现比于遗传因素,长绿飞虱的体色主要受到环境的影响,其中光周期的影响大于温度的影响;该虫体色的变化在一定程度上也反映了其对环境变化的适应性,体色对长绿飞虱雌雄成

虫寿命、交配率、产卵量均有显著影响($P < 0.05$),然而体色对成虫生物学特性变化的贡献率远小于环境因素及环境因素与体色的交互作用,例如其成虫寿命主要受到自身体色与温度交互作用的影响;而温度变化对交配率的影响最大,产卵量的变化则主要受到光周期的影响。

昆虫体色的变化是抵御环境伤害的一种重要手段,昆虫对于紫外光则十分敏感。因此在田间当光照时间变长时,昆虫受到紫外线辐射伤害的可能性也随之增加。有研究表明,过量的紫外辐射对昆虫的伤害很大,可以影响其飞行取食等许多重要的生理活动,甚至可能破坏核酸分子,造成碱基突变 (Veteli *et al.*, 2003; Ji *et al.*, 2012)。而黑色素具有

吸收紫外辐射的特性,因此黑化个体与体色较浅的个体相比往往具有较强的抗紫外线伤害的能力,同时光照增加也可以诱导昆虫个体合成更多的黑色素使体色加深(Debecker *et al.*, 2015)。而高温环境则可能使昆虫被病原菌侵染的概率升高(Catalán *et al.*, 2012),与昆虫免疫功能密切相关的酚氧化酶(phenoloxidase, PO)在体壁黑化过程中也起着十分重要的作用,因此在被感染部位 PO 酶活性往往会升高并使得黑色素大量合成,从而导致黑化现象的发生(Kutch *et al.*, 2014)。

除了温度、光周期等环境因素,昆虫的体色往往也会受到遗传因素的调控。例如,虎凤蝶 *Luehdorfia puziloi* 的黑化现象被证明是受到雌性连锁的 *black* 基因控制的,因此雌性黑化个体所产的后代也全部表现为黑化型(Koch *et al.*, 2000)。本研究表明,长绿飞虱亲本体色对于后代体色也有较为显著的影响,实际上自然界中生物体的表型通常是不同环境条件下基因选择性表达的结果,因此包括体色分化在内的表型变化是自然环境与个体遗传背景两方面因素共同作用的产物(陈倩等, 2006)。

本研究发现,长绿飞虱成虫体色主要与若虫阶段环境变化有关,而反过来成虫体色变化在一定程度上也影响了长绿飞虱的生物学特性,例如其成虫寿命主要受到体色与温度交互作用的影响。前人研究表明温度可以对昆虫种群生命参数产生显著影响,例如研究表明红铃虫甲腹茧蜂 *Chelonus pectinophorae* 最适温度为 28℃,在 20~36℃ 范围内,该虫卵-幼虫历期、羽化率、蛹重、化蛹率等各生命参数均随温度的变化表现出先升后降的趋势(丛胜波等, 2019)。然而对于一种昆虫的不同体色个体,温度胁迫下的表现可能不同,例如研究表明桃蚜 *Myzus persicae* 红色型个体相比于绿色型个体对高温胁迫更为敏感,高温时死亡率高于绿色型,且生殖力显著降低(林露露, 2017)。根据热平衡假说(Thermal Melanism Hypothesis),通常认为相对于体色较浅的个体,黑化个体具有较高的吸热效率,因此黑化个体在高海拔、高纬度地区或在春秋季节的相对较低的温度下会表现出较好的环境适应性(Musolin *et al.*, 2009; Fedorka *et al.*, 2013)。但是环境温度与昆虫体色的关系也不是一成不变的,热平衡假说也并非能解释所有的黑化现象,例如 Valimäki 等(2015)研究表明一种尺蛾科昆虫 *Chiasmia clathrata* 的黑化幼虫在高温环境下相比于浅色个体会表现出较高的环境适应性,其原因推测为黑化幼虫具有较

好的耐受脱水及饥饿的能力。本研究中长绿飞虱体色与温度交互作用对其成虫寿命的影响模式同样不遵循经典热平衡假说,其背后的机理仍有待研究。

与成虫寿命不同,温度和光周期等环境条件是长绿飞虱的繁殖的首要影响因素,其影响大于体色或体色与环境因素的交互作用。昆虫个体间的交配成功依赖于两性的交配节律,而温度会对昆虫生理节律产生非常重要的影响(Baužienė *et al.*, 2004)。其原因可能是温度会影响雌虫性激素的释放和雄虫个体的活力、传输精子的速度、交配持续时间及交配次数等(孙计拓等, 2012)。因此当昆虫个体处于不适宜的温度条件下时,就可能出现交配率下降的情况。光周期也同样是昆虫行为的重要影响因素,光周期可能影响了昆虫的视觉光学系统从而产生了昼夜节律现象(Helfrich-Förster, 2004),并影响了昆虫的生物学特性。例如研究发现,赤星瓢虫 *Coelophora saucia* 在长日照和白光条件下具有较低的羽化前死亡率,以及较强的繁殖力,而在短日照和红光条件下幼虫期会延长(Omkar and Pathak, 2006);邱小芳等(2016)研究则表明,暗期位点和长度对毛健夜蛾 *Brithys crini* 交配和产卵行为有影响,产卵行为主要发生在暗期,且当暗期短于 40 min 时不能发生交配行为。而本研究表明,长光照有利于提高该虫交配率和产卵量,这表明该虫交配产卵行为有可能发生在昼间。此外我们发现当处于低温短光照条件时,该虫黑化个体交配率和产卵量会显著下降,而非黑化个体交配率和产卵量则主要是随着光周期变化。这种差异的原因可能是黑色素的合成需要消耗较多的能量,这一合成过程对于其他生理活动会产生一定的影响,因此促进黑化现象发生的环境胁迫(高温,长光照等)消失后,黑化个体的优势也就随之消失(Roulin, 2015),这可能是黑化个体在低温短光照时繁殖受到影响的原因。本研究表明,虽然多因素方差分析显示体色对长绿飞虱繁殖有显著影响($P < 0.05$),但这并非影响该虫繁殖力变化的首要因素,因此黑化现象只在一定程度上提升了该虫环境适应性。

综上所述,长绿飞虱的体色、成虫寿命及繁殖力受环境因子显著影响,高温长光照可以增加种群内黑化个体比例,而黑化个体一定程度上也更加适应高温长光照环境,由此我们认为长绿飞虱黑化现象是其应对不良环境的手段,由于黑化个体所具有的这种特性,因此夏季田间黑化个体数量会有所上升,而这两者对药剂敏感性是否存在差异尚不清楚,这

些问题的研究将有利于科学合理地进行长绿飞虱的防治工作。

参考文献 (References)

- Alho JS, Herczeg G, Söderman F, Laurila A, Jönsson KI, Merilä J, 2010. Increasing melanism along a latitudinal gradient in a widespread amphibian: local adaptation, ontogenic or environmental plasticity? *BMC Evol. Biol.*, 10: 317.
- Baužienė V, Buda V, Bernotienė R, 2004. Mating activity of the mammalophilic blackflies *Simulium (Wilhelmia) lineatum* (Meigen, 1804) (Diptera: Simuliidae) under laboratory conditions. *Acta Zool. Lituan.*, 14(4): 34–40.
- Castella BA, Golay J, Monney JC, Golay P, Mebert K, Dubey S, 2013. Melanism, body condition and elevational distribution in the asp viper. *J. Zool.*, 290(4): 273–280.
- Catalán TP, Niemeyer HM, Kalergis AM, Bozinovic F, 2012. Interplay between behavioural thermoregulation and immune response in mealworms. *J. Insect Physiol.*, 58(11): 1450–1455.
- Chen JA, 1993. Biological characteristics and control of *Saccharosydne procerus*. *Jiangxi Agric. Sci. Technol.*, (6): 33–34. [陈金安, 1993. 长绿飞虱生物学特性及防治的研究. 江西农业科技, (6): 33–34]
- Chen Q, Shen ZR, Wang YM, 2006. Phenotypic plasticity of aphids and its genetic basis. *Acta Entomol. Sin.*, 49(5): 859–866. [陈倩, 沈佐锐, 王永模, 2006. 蚜虫的表型可塑性及其遗传基础. 昆虫学报, 49(5): 859–866]
- Clusella-Trullas S, van Wyk JH, Spotila JR, 2007. Thermal melanism in ectotherms. *J. Therm. Biol.*, 32(5): 235–245.
- Cong SB, Xu D, Wang JT, Wang L, Wu HH, Li WJ, Yang NN, Wan P, 2019. Influence of temperature on development and fecundity of *Chelonus pectinophorae* Cushman. *Chin. J. Biol. Control*, 35(2): 180–184. [丛胜波, 许冬, 王金涛, 王玲, 武怀恒, 李文静, 杨妮娜, 万鹏, 2019. 温度对红铃虫甲腹茧蜂生长发育与繁殖的影响. 中国生物防治学报, 35(2): 180–184]
- Debecker S, Sommaruga R, Maes T, Stoks R, 2015. Larval UV exposure impairs adult immune function through a trade-off with larval investment in cuticular melanin. *Funct. Ecol.*, 29(10): 1292–1299.
- Fedorok KM, Lee V, Winterhalter WE, 2013. Thermal environment shapes cuticle melanism and melanin-based immunity in the ground cricket *Allonemobius socius*. *Evol. Ecol.*, 27(3): 521–531.
- Helfrich-Förster C, 2004. The circadian clock in the brain: a structural and functional comparison between mammals and insects. *J. Comp. Physiol. A*, 190(8): 601–613.
- Ji C, Yang B, Yang Z, Tu Y, Yang YL, He L, Bi ZG, 2012. Ultraviolet B (UVB)-induced skin cell death occurs through a cyclophilin D intrinsic signaling pathway. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 425(4): 825–829.
- Koch PB, Behnecke B, Ffrench-Constant RH, 2000. The molecular basis of melanism and mimicry in a swallowtail butterfly. *Curr. Biol.*, 10: 591–594.
- Kuang J, 2012. The Ecological Study and Chemical Insecticides Screening on the Green Slender Planthopper (*Saccharosydne procerus*) in Wuhan Area. MSc Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan. [匡晶, 2012. 武汉地区长绿飞虱的生态学研究及化学防治药剂的筛选. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文]
- Kutch IC, Sevgili H, Wittman T, Fedorka KM, 2014. Thermoregulatory strategy may shape immune investment in *Drosophila melanogaster*. *J. Exp. Biol.*, 217(20): 3664–3669.
- Lin LL, 2017. Influence of Thermal Stress on Fitness and Endosymbionts of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) in Different Body Colours. MSc Thesis, Zhejiang University, Hangzhou. [林露露, 2017. 高温胁迫对不同体色桃蚜适应性及其内共生菌影响的研究. 杭州: 浙江大学硕士学位论文]
- Mao S, 2008. Study on Biology, Ecology and Control of *Saccharosydne procerus* in Guiyang Region. MSc Thesis, Guizhou University, Guiyang. [毛舜, 2008. 贵阳地区茭白主要害虫长绿飞虱生物学、生态学及防治研究. 贵阳: 贵州大学硕士学位论文]
- Musolin DL, Tougou D, Fujisaki K, 2009. Too hot to handle? Phenological and life-history responses to simulated climate change of the southern green stink bug *Nezara viridula* (Heteroptera: Pentatomidae). *Glob. Change Biol.*, 16(1): 73–87.
- Omkar, Pathak S, 2006. Effects of different photoperiods and wavelengths of light on the life-history traits of an aphidophagous ladybird, *Coelophora saucia* (Mulant). *J. Appl. Entomol.*, 130(1): 45–50.
- Qiu XF, Xie JK, Wu LP, Yu Q, Zhang MM, Wang GY, Xu SH, Tu XY, 2016. Effects of varied photoperiods on the mating and oviposition of *Brithys crini* (Lepidoptera: Noctuidae) adults. *Acta Entomol. Sin.*, 59(10): 1103–1114. [邱小芳, 谢建坤, 吴丽萍, 喻琴, 张萌萌, 王光耀, 徐韶晖, 涂小云, 2016. 光周期变化对毛健夜蛾交配和产卵的影响. 昆虫学报, 59(10): 1103–1114]
- Roulin A, 2015. Condition-dependence, pleiotropy and the handicap principle of sexual selection in melanin-based colouration. *Biol. Rev.*, 91(2): 328–348.
- Sun JT, Deng L, Zhou KN, Zhang JL, Liu XP, 2012. Effects of temperature on mating behaviors of grape leaf beetles, *Oides decempunctata* Billberg (Coleoptera: Chrysomelidae). *Biol. Disaster Sci.*, 35(1): 50–54. [孙计拓, 邓礼, 周康念, 张爵龙, 刘兴平, 2012. 温度对葡萄十星瓢萤叶甲交配行为的影响. 生物灾害科学, 35(1): 50–54]
- Välimäki P, Kivelä SM, Raitanen J, Pakanen VM, Vatka E, Mäenpää MI, Keret N, Tammaru T, 2015. Larval melanism in a geometrid moth: promoted neither by a thermal nor seasonal adaptation but desiccating environments. *J. Anim. Ecol.*, 84(3): 817–828.
- Veteli TO, Tegelberg R, Pusenius J, Sipura M, Julkunen-Tiitto R, Aphalo PJ, Tahvanainen J, 2003. Interactions between willows and insect herbivores under enhanced ultraviolet-B radiation. *Oecologia*, 137(2): 312–320.