

引进天敌花角蚜小蜂成虫耐寒性的季节变化

张飞萍*, 钟景辉, 江宝福, 梁光红, 苏 军, 任媛媛

(福建农林大学, 福州 350002)

摘要:通过测定过冷却点和低温暴露试验,比较了松突圆蚧引进天敌花角蚜小蜂成虫不同季节的耐寒性。结果表明:雌虫在春、夏、秋、冬 4 个季节的平均过冷却点分别为 -13.7559 、 -11.9700 、 -12.7936 $^{\circ}\text{C}$ 和 -13.6000 $^{\circ}\text{C}$,冬、春季显著低于夏季;雄虫在春、夏、秋 3 个季节的平均过冷却点分别为 -15.3917 、 -13.8400 $^{\circ}\text{C}$ 和 -13.2143 $^{\circ}\text{C}$,春季显著低于夏、秋季;春、夏季雌虫的平均过冷却点显著高于雄虫。 -15 $^{\circ}\text{C}$ 暴露下,各季雌虫均不能存活; 0 $^{\circ}\text{C}$ 暴露下,春季的死亡率显著低于夏季, -5 $^{\circ}\text{C}$ 和 -10 $^{\circ}\text{C}$ 暴露下,春季的死亡率均显著低于夏、秋季。各季雌虫低温累积-死亡率关系均服从改进的 Logistic 模型(方程 1),但不同季节的致死中低温累积(LST_{50})有显著差异($df=2,33, F=30.45, P<0.01$),春季显著低于夏、秋季,秋季低于夏季,但无显著差异;雌虫的过冷却点、 LST_{50} 随季节极端低温下降和极端温差增加表现出下降趋势;其 LST_{50} 也随着过冷却点降低表现下降趋势。结果显示:花角蚜小蜂成虫耐寒性具有明显的季节适应性,降低过冷却点是增强其耐寒性的重要策略。

关键词:花角蚜小蜂;成虫;耐寒性;季节变化;松突圆蚧

文章编号:1000-0933(2009)09-4604-09 中图分类号:Q142, Q965, Q968 文献标识码:A

Seasonal variation in cold tolerance of *Coccobius azumai* Tachikawa (Hymenoptera: Aphelinidae), a parasitoid of pine armored scale introduced from Japan

ZHANG Fei-Ping*, ZHONG Jing-Hui, JIANG Bao-Fu, LIANG Guang-Hong, SU Jun, REN Yuan-Yuan

Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4604 ~ 4612.

Abstract: The parasitic chalcid, *Coccobius azumai* Tachikawa, was introduced from Japan at the end of 1980's. The parasitoid was an important biological agent used to control the pine armored scale, *Hemiberlesia pitysophila* Takagi in southern China. The parameters of supercooling point (SCP), mortality exposed to designated low temperature, and median lethal sum of low temperature (LST_{50}) of the chalcid adults collected from different seasons, were measured and compared in Quanzhou, Fujian Province, China in 2007 and 2008.

Mean SCP value for female adults collected in spring, summer, fall and winter was -13.7559 、 -11.9700 、 -12.7936 and -13.6000 $^{\circ}\text{C}$, respectively, indicating females collected in spring and winter had a significantly lower SCP value than female adults collected in summer. Mean SCP value for male adults collected in spring was -15.3917 $^{\circ}\text{C}$, which is significantly lower than that for male adults collected in summer (-13.8400 $^{\circ}\text{C}$) and autumn (-13.2143 $^{\circ}\text{C}$). For adults collected in spring and summer, mean SCP value for females were considerably lower than those for males. However, this value was almost equal for both males and females collected in fall. When exposed to different constant temperatures, no female adults survived under -15 $^{\circ}\text{C}$. Mortality (under 0 $^{\circ}\text{C}$) was clearly lower for females collected in spring than females collected in summer. However, under -5 and -10 $^{\circ}\text{C}$ females collected in spring had lower mortality than that in summer and fall. The relationships between the sum of exposed low temperature and mortality of female adults collected in

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30671690);福建省自然科学基金资助项目(B0610003, 2006F5007)

收稿日期:2009-02-09; **修订日期:**2009-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fpzhang1@163.com

each season fits very well to a revised logistic model (equation 1).

Significant differences were observed between LST_{50} s estimated by this model for female adults from different seasons ($df=2,33$, $F=30.45$, $P<0.01$). Mean LST_{50} for the spring female adults was significantly lower than those for the summer and fall female adults. The SCP and LST_{50} for female adults decreased as the seasonal extreme low air temperature drops off and as the seasonal extreme difference in air temperature increases. The LST_{50} for the female adults also decreased with drop of SCP. These results suggested that, in terms of cold tolerance, *C. azumai* adults have obvious adaptability to seasonal variation of air temperature. One important strategy for the wasp to increase cold tolerance is to lower the SCP, which may be the results of its exposure to lower extreme low air temperature and high extreme difference in air temperature in fall.

Key Words: *Coccobius azumai* Tachikawa; adult; cold tolerance; seasonal variation; *Hemiberlesia pitysohila* Takagi

在亚热带、温带或寒带地区,冬季的持续低温和春季突发性低温是影响昆虫存活和种群动态的重要因子。长期生存在特定地区的昆虫,往往具有抵抗季节性低温的行为对策或生活史对策,如寻找避难场所、进入滞育或休眠等;许多昆虫在低温季节来临之前能够增强自身的耐寒能力以提高种群的存活率^[1~4]。在气温较低的月份,飞蝗(*Locusta migratoria*)越冬卵中过冷却点在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的比例显著增加^[5];松墨天牛(*Monochamus alternatus*)可通过秋季的低温驯化降低过冷却点、冷伤害上限温度和致死中有效低温累积^[6];莴苣根蚜(*Pemphigus bursarius*)冬季种群的致死中温度显著较低^[7]; *Celatoblatta quinquemaculata* 致死中温度的季节性变化与其栖境温度的变化相一致^[8]; *Phauloppia* spp. 在1月份的平均过冷却点可达 $-35.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,在7月份则仅为 $-9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9];中华通草蛉(*Chrysoperla sinica*)成虫的过冷却点在越冬前期和中期显著低于其它时期^[10]。上述与耐寒性有关指标的季节性变化体现了昆虫对季节性气温变化的适应^[11],这无疑是自然界昆虫种群生存与繁荣的重要基础。

花角蚜小蜂(*Coccobius azumai* Tachikawa)是我国20世纪80年代末期从日本冲绳引进,用于防治松林危险性害虫松突圆蚧(*Hemiberlesia pitysohila* Takagi)的专一性寄生蜂^[12,13],其寄生和摄食寄主的能力强^[14],在广东和福建等地应用,取得了良好防效,已是我国控制松突圆蚧最有效和应用面积最大的天敌^[15,16]。目前,松突圆蚧在我国大陆地区主要分布在福建、广东和广西等地,但存在进一步向长江以南松林主产区扩散的风险。作为控制松突圆蚧最重要的外来引进天敌,花角蚜小蜂能否向北跟随控害?这是一个关系到松突圆蚧持久控制,乃至我国松林生态安全的重要问题。研究花角蚜小蜂的耐寒性有利于明确其潜在应用区域和制定松突圆蚧扩散的科学应对预案,然而未见相关研究报道。已有的研究表明:该蜂雌虫的发育起点温度为 $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,有效积温为 $448.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,在广东省一年发生9~10代,世代重叠严重,越冬虫态多样,以蛹的比例较大^[17]。但由于该蜂虫体极小,对蛹过冷却点的测定和饲养观察等方面存在困难,而成虫既是越冬虫态之一,也是直接控制松突圆蚧的重要虫态,且在补充营养条件下的寿命远长于蛹的发育历期^[17],因此本文选择成虫作为研究对象,通过过冷却点测定和低温暴露试验,比较和分析了其不同季节的耐寒性,以期为该蜂种群动态和持续利用等方面研究提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源和季节划分

供试虫源采自福建省泉州市洛江区仙公山马尾松林中,林中花角蚜小蜂种源于2002年5月从日本冲绳引进,已定殖5a以上。在林中随机剪取受松突圆蚧危害的带枝松针,带回并放入密闭、有向阳玻璃窗户的室内收蜂。每日8:00~17:00每隔3h用 $12\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 的玻璃试管收蜂,每日收蜂3次,每管收蜂8~10只,后放入2条浸有20%蜂蜜的滤纸条饲养,室温下4h后进行各项试验。

根据泉州市气象要素和天气现象相似性将3~6月份划分为春季、7~9月份为夏季、10~11月份为秋季、12~2月份为冬季。春季试验在2007年5月和2008年4月进行,夏季在2007年8~9月进行,秋季在2007

年 10~11 月进行,冬季在 2007 年 12 月和 2008 年 1~2 月进行。

1.2 过冷却点测定

过冷却点测定采用铜-铜镍热电偶(江苏森意经济发展有限公司)进行,通过数据采集器和电脑相连,即时记录测定;低温环境用 BCD228-WBSS 冰箱(青岛海尔)模拟,降温速率控制在 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 左右。测定时,用透明胶带固定花角蚜小蜂成虫背部,后粘附于热电偶探针上,保证虫体腹部与探针充分接触,用棉花包裹带虫探针,放入冰箱内测定。对雌成虫,测定了春、夏、秋、冬 4 个季节的过冷却点,各季重复测定 23~59 头;对雄成虫,由于冬季收蜂少,只测定了春、夏、秋 3 个季节的过冷却点,各季重复测定 12~30 头。

1.3 低温暴露试验

以花角蚜小蜂雌成虫(优势性别)为对象,选择春、夏、秋 3 个收蜂量大的季节进行试验。低温暴露处理设 8 组别,其中 1 个为对照(室内自然条件),7 个为模拟自然降温过程的处理,分别为:(1) 10°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$; (2) 5°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h}$; (3) 0°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h}$; (4) -5°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow -5^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h}$; (5) -10°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow -5^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h}$; (6) -15°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow -5^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h} \rightarrow -15^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h}$; (7) -20°C 处理: $10^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \times 6\text{ h} \rightarrow -5^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h} \rightarrow -15^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h} \rightarrow -20^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h}$ 。其中 5°C 及以上温度环境由 PYX-1250Q-A 型号人工气候箱(广东韵关科力)模拟, 0°C 及以下温度环境由 BCD228-WBSS 冰箱模拟。以装于同一试管并喂食 20% 蜂蜜的 1 日龄雌成虫 9~10 头为 1 重复,分别进行 8 种处理,后将试虫取出并置入人工气候箱内(25°C , 70% R.H., 16 L:8 D) 12 h, 即时统计试虫存活情况,以用松针触动后能进行协调活动为存活的标准。春、夏、秋 3 个季节分别进行了 9、16 次和 11 次重复。

1.4 数据分析

1.4.1 过冷却点和低温暴露死亡率分析

采用方差分析法(ANOVA)分析各季节的过冷却点和低温暴露死亡率,采用 Tukey's 多重比较或 Duncan 新复极差法比较其间差异,采用 Student's t 测验比较各季节雌、雄蜂过冷却点的差异,所有死亡率原始数据均经反正弦平方根转换后进行统计处理,过冷却点频次分布正态性采用 χ^2 法检验。

1.4.2 耐寒性比较

参考 Nedvéd 等^[18]、Ma 等^[6]、Jing 等^[19] 和 Chen 等^[20,21] 的方法,应用稍作改进后的 Logistic 方程评价耐寒性。方程如下:

$$S(t, T) = \exp(a + b \sum t_i T_i) / [1 + \exp(a + b \sum t_i T_i)] \quad (1)$$

式中, S 为死亡率, t_i 为特定低温暴露时间,其单位可根据试验具体情况选择日、小时或分钟等时间单元, T_i 为特定低温暴露温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$, i 为变化温度处理数, $i = 1, 2, 3, \dots$, $\sum t_i T_i$ 为变化低温处理的低温累积; a 、 b 为常数,其中 $-a/b$ 的生物学意义为造成昆虫 50% 个体死亡的低温累积(median lethal sum of low temperature, LST_{50})。式中 $\sum t_i T_i$ 可以通过各温度下的暴露时间计算, S 可通过试验测定。

与前人的方法相比,修改后方程既充分考虑了低温暴露强度和暴露时间 2 个因素的互作影响,又克服了不能评价变化低温暴露试验中昆虫耐寒性的缺点。但该方程没有考虑造成昆虫冷伤害的上限低温累积,因此只适用于不同研究对象耐寒性的比较或在已知试验中设置的低温累积必然造成冷伤害的条件下昆虫耐寒性的评价。

由于 0°C 下的低温累积无法反应温度和时间的互作,因此在暴露温度高于或等于 0°C 时,需对所设置各温度进行赋值。本文将 10°C 赋值为 -1,在此基础上每降 1°C ,赋值相应减 1,具体为: $T(10^{\circ}\text{C}) = -1$ 、 $T(5^{\circ}\text{C}) = -6$ 、 $T(0^{\circ}\text{C}) = -11$ 、 $T(-5^{\circ}\text{C}) = -16$ 、 $T(-10^{\circ}\text{C}) = -21$ 、 $T(-15^{\circ}\text{C}) = -26$ 、 $T(-20^{\circ}\text{C}) = -31$ 。采用该方法拟合花角蚜小蜂雌成虫死亡率和低温累积的 Logistic 方程,据此计算得出的 LST_{50} 只用于不同季节耐寒性的差异比较。死亡率采用校正死亡率替代。各季节的各处理各重复均采用方程(1)进行拟合,在此基础上计

算各季节平均 LST_{50} , 并进行差异显著性检验, 数据分析方法同 1.4.1。

2 结果与分析

2.1 不同季节花角蚜小蜂成虫的过冷却点

不同季节的花角蚜小蜂雌成虫过冷却点间存在显著差异 ($df=3, 155, F=4.571, P<0.01$), 具体结果见表 1。夏季的平均过冷却点最高, 显著高于冬季和春季 ($P<0.05$); 春季的平均过冷却点最低, 比夏季低 1.8859°C ; 但春季、秋季和冬季之间、秋季和夏季之间均无显著差异 ($P>0.05$)。总体上, 各季节过冷却点波动在 $-26.3 \sim -8.7^{\circ}\text{C}$ 之间, 最低过冷却点个体出现在冬季, 最高过冷却点个体出现在夏季和冬季, 二者相差 17.6°C 。

表 1 不同季节花角蚜小蜂雌成虫的过冷却点

Table 1 The supercooling point of *Coccobius azumai* female adults from different seasons

季节 Season	样本数 Sample number	Scp 均值 $\pm$ 标准误 Mean Scp $\pm$ SE ($^{\circ}\text{C}$)	最高值 Max ($^{\circ}\text{C}$)	最低值 Min ($^{\circ}\text{C}$)
春季 Spring	59	-13.7559 ± 0.2720 b ^①	-9.3	-21.4
夏季 Summer	30	-11.9700 ± 0.2604 a	-8.7	-15.0
秋季 Autumn	47	-12.7936 ± 0.2995 ab	-9.2	-18.4
冬季 Winter	23	-13.6000 ± 0.8054 b	-8.7	-26.3

①不同的字母指显著性差异, 表 2、3、4 和图 2 与此同 The different letters denote significant differences. Same for the table 2, 3, 4 and the figure 2

与雌成虫相近, 不同季节雄成虫的过冷却点间亦存在显著差异 ($df=2, 67; F=8.204; P<0.01$), 具体见表 2。在春、夏、秋 3 个季节中, 春季的平均过冷却点显著低于夏、秋季 ($P<0.05$), 但秋季和夏季之间无显著差异 ($P>0.05$); 总体上, 雄成虫的过冷却点波动在 $-17.8 \sim -9.5^{\circ}\text{C}$ 之间, 其最低过冷却点个体也出现在冬季, 最高过冷却点个体则出现在秋季, 二者相差 8.3°C 。

表 2 不同季节花角蚜小蜂雄成虫的过冷却点

Table 2 The supercooling point of *Coccobius azumai* male adults from different seasons

季节 Season	样本数 Sample number	Scp 均值 $\pm$ 标准误 Mean Scp $\pm$ SE ($^{\circ}\text{C}$)	最高值 Max ($^{\circ}\text{C}$)	最低值 Min ($^{\circ}\text{C}$)
春季 Spring	12	-15.3917 ± 0.3974 b	-13.9	-17.8
夏季 Summer	30	-13.8400 ± 0.2604 a	-10.2	-15.9
秋季 Autumn	28	-13.2143 ± 0.3310 a	-9.5	-16.3

Student's t 测验结果显示: 春、夏季雌成虫的平均过冷却点均显著高于雄成虫 (春季: $t=2.6389, P<0.01$; 夏季: $t=5.0777, P<0.01$), 而秋季二者间无显著差异 ($t=0.9423, P>0.05$)。

2.2 不同季节花角蚜小蜂成虫过冷却点的频次分布

不同季节花角蚜小蜂成虫的过冷却点频次分布见图 1。 χ^2 检验结果表明: 雌、雄成虫的过冷却点在各个季节均呈正态分布 ($P>0.05$)。但不同性别、不同季节成虫过冷却点的变化范围、正态峰出现区域和集中度等均有所不同。就雌成虫 (图 1), 冬、春季的过冷却点分布范围较宽, 其过冷却点极差分别达到 12.1°C 和 17.6°C , 但春季大多数个体分布在 $-15.35 \sim -10.47^{\circ}\text{C}$ 之间, 冬季则在 $-17.50 \sim -8.65^{\circ}\text{C}$ 之间, 春季比冬季更集中; 夏、秋季的过冷却点分布范围较窄, 其过冷却点极差分别为 6.3°C 和 9.2°C , 明显小于冬、春季; 但夏季大多数个体分布在 $-13.77 \sim -10.57^{\circ}\text{C}$ 之间, 秋季则在 $-15.66 \sim -10.08^{\circ}\text{C}$ 之间, 夏季比秋季更集中。就雄成虫 (图 1), 秋季的过冷却点分布范围比夏季略宽, 二季节的过冷却点极差分别达到 6.8°C 和 5.7°C , 秋季有大多数个体分布在 $-15.66 \sim -10.83^{\circ}\text{C}$ 之间, 夏季则在 $-15.37 \sim -12.76^{\circ}\text{C}$ 之间, 夏季比秋季更集中。对比雌雄成虫, 夏、秋季雌成虫的过冷却点分布范围均比对应季节雄成虫的宽, 大多数个体的过冷却点相对更高, 也更集中。

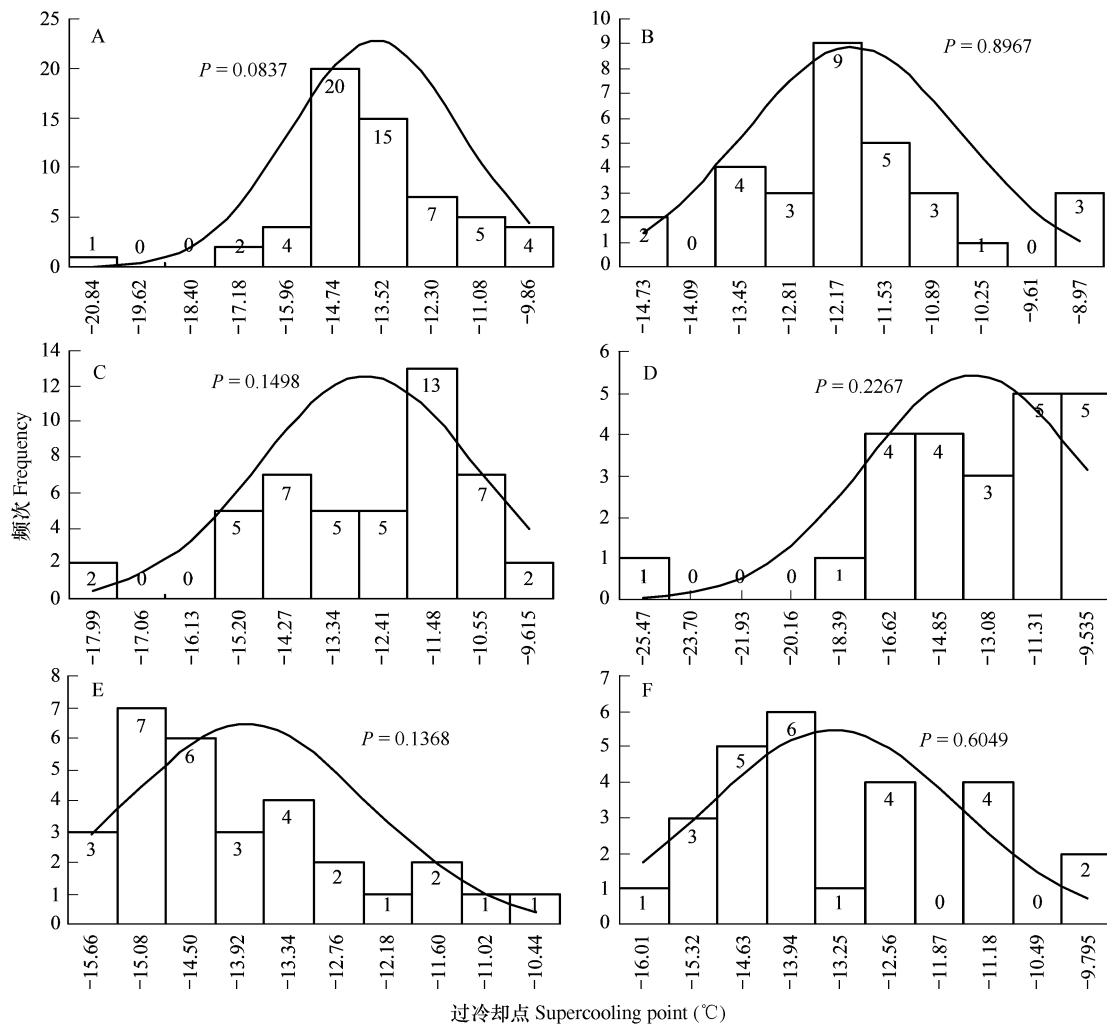


图1 不同季节花角蚜小蜂雌成虫过冷却点的频次分布^①

Fig. 1 Frequency distribution for SCPs of *Coccobius azumai* adults from different seasons

① 图中字母A、B、C、D、E和F分别指春季雌成虫、夏季雌成虫、秋季雌成虫、冬季雌成虫、夏季雄成虫和秋季雄成虫 The letters of A, B, C, D, E and F denote the female adult from spring, summer, autumn, winter, and male adult from summer and autumn in this figure, respectively

2.3 不同季节低温暴露下花角蚜小蜂雌成虫的死亡率

不同季节不同低温暴露下花角蚜小蜂雌成虫的死亡情况见图2。随着暴露温度的下降,各季节的死亡率均逐渐增大,当暴露温度达到 -10°C 时,死亡率均接近或超过90%,当暴露温度达到 -15°C 时,各季节的雌成虫均不能存活。可见 -10°C 接近其存活的极限温度。在暴露温度为10、5、 -15 和 -20°C 时,不同季节之间的死亡率均无显著差异($P > 0.05$),但暴露温度为0、 -5 或 -10°C 时,不同季节之间死亡率均表现出显著差异($P < 0.05$);当暴露温度为 0°C 时,夏季的死亡率显著大于春、秋季($P < 0.05$),而春、秋季之间则无显著差异($P > 0.05$);当暴露温度为 -5 和 -10°C 时,春季的死亡率均显著小于夏、秋季($P < 0.05$),而夏、秋季之间无显著差异($P > 0.05$)。这说明不同季节花角蚜小蜂雌成虫的死亡率仅在 $-10 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间暴露下存在显著差

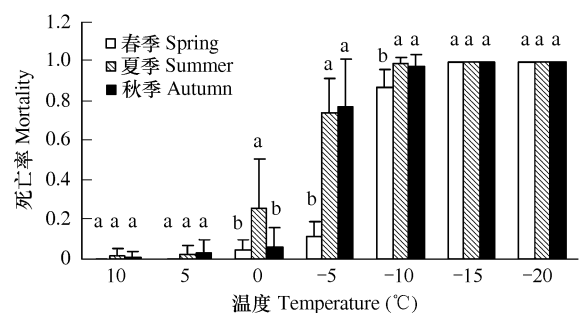


图2 不同季节低温暴露处理下花角蚜小蜂雌成虫的死亡率

Fig. 2 Mortality of *Coccobius azumai* female adult exposed to low temperature from different seasons

异,在这一温度范围内,春季雌成虫存活的几率显著更大。从图中还可看出,当暴露温度从 -5°C 下降到 -10°C 时,春季的死亡率由11.23%突然跃升到86.95%,当暴露的温度从 0°C 下降到 -5°C 时,夏季的死亡率由25.50%突然跃升到73.62%,秋季的死亡率由5.68%突然跃升到76.89%,这说明春季雌成虫的冷识别温度(死亡率为80%左右的暴露温度)^[22]处于 $-10\sim-5^{\circ}\text{C}$ 之间,而夏、秋季则均处于 $-5\sim0^{\circ}\text{C}$ 之间,前者明显低于后者。

方差分析(结果略)表明:不同强度低温暴露下各季节花角蚜小蜂雌成虫的死亡率均具显著差异($P<0.01$),但不同季节死亡率随温度下降出现显著变化的规律并不完全一致(Tukey's 多重比较结果见表3);春季, 0.5°C 和 10°C 之间的死亡率无显著差异, 0 和 -5°C 之间也无显著差异,但 0°C 的死亡率显著大于 5°C 和 10°C ($P<0.05$), -10°C 的死亡率显著大于 -5°C ($P<0.05$), -15°C 的死亡率显著大于 -10°C ($P<0.05$),这说明 $-15\sim0^{\circ}\text{C}$ 是春季雌成虫死亡的敏感温度范围(死亡率出现显著差异的低温范围);夏季, 5°C 和 10°C 之间的死亡率无显著差异, 0°C 的死亡率显著大于 5°C 和 10°C ($P<0.05$),但显著小于 -5°C ($P<0.05$), -10°C 的死亡率显著大于 -5°C ($P<0.05$),但与 -15°C 以下温度无显著差异,这说明 $-10\sim5^{\circ}\text{C}$ 是夏季成虫死亡的敏感温度范围;秋季, 0.5°C 和 10°C 之间的死亡率无显著差异, -5°C 的死亡率显著大于 0°C 及以上各温度($P<0.05$),但显著小于 -10°C ($P<0.05$),而 -10 、 -15 、 -20°C 之间的死亡率无显著差异,这说明 $-10\sim0^{\circ}\text{C}$ 是秋季雌成虫死亡的敏感温度范围;综上所述,花角蚜小蜂春季死亡的敏感温度范围的下限低于夏、秋季,上限则低于夏季,而与秋季相同;秋季死亡的敏感温度范围的下限与夏季相同,均高于春季,而上限则低于夏季,与春季相同。

表3 不同低温暴露下各季节花角蚜小蜂雌成虫死亡率比较(Tukey's 多重比较)

Table 3 Tukey's honestly significant difference between mortalities of *Coccobius azumai* female adult at different low temperature from each season

季节 Season	重复组数 Replicates	暴露温度 Exposed temperature ($^{\circ}\text{C}$)						
		-20	-15	-10	-5	0	5	10
春季 Spring	9	a	a	b	c	cd	d	d
夏季 Summer	16	a	a	a	b	c	d	d
秋季 Autumn	11	a	a	a	b	c	c	c

应用改进的 Logistic 方程拟合低温累积-花角蚜小蜂雌成虫死亡率之间的关系,并计算致死中低温累积(LST_{50}),结果见表4。各季节各重复的 Logistic 方程的决定系数(R^2)均大于0.97, P 值均小于0.01,说明各方程拟合效果均很好,不同季节花角蚜小蜂雌成虫低温累积-死亡率的关系均高度服从改进后的 Logistic 模型;但不同季节的平均 LST_{50} 之间具有显著差异($df=2, 33, F=30.45, P<0.01$),春季的平均 LST_{50} 最低,夏季最高,二者相差 $74.09\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$;Tukey's 多重比较表明:春季的平均 LST_{50} 显著低于夏、秋季($P<0.01$),秋季比夏季低 $18.78\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$,但二者间无显著差异($P>0.05$);3个季节中 LST_{50} 最低值出现在春季,为 $-252.65\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$,最高值出现在夏季,为 $-94.85\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$,二者相差 $157.8\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$;从 LST_{50} 95%置信区间看,春季 LST_{50} 区间上下限的差值为 $32.51\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$,夏季为 $29.56\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$,秋季为 $20.24\text{ h}\cdot^{\circ}\text{C}$,这说明春季的 LST_{50} 变幅最宽,然后依次是夏季和秋季。

表4 各季节花角蚜小蜂雌成虫致死中低温累积($\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$)

Table 4 LST_{50} of *Coccobius azumai* female adult exposed to low temperature from each season($\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$)

季节 Season	重复组数 Replicates	平均 $LST_{50} \pm \text{SE}$ Mean $LST_{50} \pm \text{SE}$	最高值 Max	最低值 Min	Logistic 模型 R^2 R^2 from Logistic model	极差 Range	变异系数 CV	95% 置信区间 95% fiducial limit
春季 Spring	9	$-218.84 \pm 7.05\text{ b}$	-185.36	-252.65	$0.9924 \sim 1.0000$	67.29	-0.10	$-235.09 \sim -202.58$
夏季 Summer	16	$-144.75 \pm 6.93\text{ a}$	-94.85	-180.37	$0.9752 \sim 1.0000$	85.53	-0.19	$-159.53 \sim -129.97$
秋季 Autumn	11	$-163.53 \pm 4.54\text{ a}$	-145.75	-188.35	$0.9770 \sim 1.0000$	42.60	-0.09	$-173.65 \sim -153.41$

2.4 季节性气象因子和花角蚜小蜂成虫过冷却点、致死中低温累积的关系

泉州市近 5 年的平均气温、极端低温、极端温差和月均降水量等气象因子的季节变化情况见图 3^①。以季节为序列,计算花角蚜小蜂成虫的过冷却点、 LST_{50} 和气象因子之间的线性相关系数,结果见表 5。雌成虫的过冷却点与极端低温、极端温差的相关系数均大于 0.97,接近显著水平($r_{0.05}=0.997,n-2=1$);雌成虫 LST_{50} 和极端低温、极端温差的相关系数均大于 0.9,而雄成虫的过冷却点与各气象因子的相关系数,以及月均降水量与雌、雄成虫的过冷却点和雌成虫 LST_{50} 的相关系数均较低。综上认为,花角蚜小蜂雌成虫的过冷却点、 LST_{50} 的季节性变化和气温,尤其是极端低温和极端温差的季节性变化有较密切关系,随着季节性极端低温下降和极端温差增加,其过冷却点和 LST_{50} 表现出随之下降的趋势;而雄成虫的过冷却点季节性变化与各气象因子未表现出明显相关性,降水量的季节性变化也未与雌、雄成虫的过冷却点和雌成虫 LST_{50} 表现出明显相关性;此外,雌成虫的过冷却点与其 LST_{50} 的相关系数也大于 0.97,接近显著水平,这说明二者之间具有较密切关系,随着过冷却点的降低,其 LST_{50} 表现出随之下降趋势。

3 结论与讨论

3.1 花角蚜小蜂成虫耐寒性的季节性变化

花角蚜小蜂夏季雌成虫的过冷却点显著较高,秋季则低于夏季,高于冬、春季,但未达显著水平,雄成虫也与雌成虫类似,说明该蜂成虫的过冷却点具有明显的季节性节律,而秋季是这一节律形成的重要过渡季节。特定低温范围内($-10\sim0\text{ }^{\circ}\text{C}$),春季雌成虫的死亡率显著低于夏季,且该季冷识别温度范围、死亡敏感温度的上、下限和致死中低温累积(LST_{50})等指标均较低;秋季雌成虫在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的死亡率也显著低于夏季,在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则显著高于春季,其死亡敏感温度范围的下限高于春季,上限低于夏季,致死中低温累积也低于夏季,高于春季;由此可见,该蜂低温暴露死亡情况的季节变化与过冷却点基本一致。综上认为:花角蚜小蜂成虫的耐寒性具有明显的季节性规律,秋季是其耐寒性由弱变强的过渡季节;在春季经常出现突发性低温的地区(图 3),花角蚜小蜂雌成虫春季耐寒性的增强,对于其种群的保存与繁衍具有重要意义。在福建沿海一带,3~6 月份是松突圆蚧种群数量的高峰期^[23],因此其耐寒性的增强,对于发挥有效的控害作用也有重要的生态学意义。

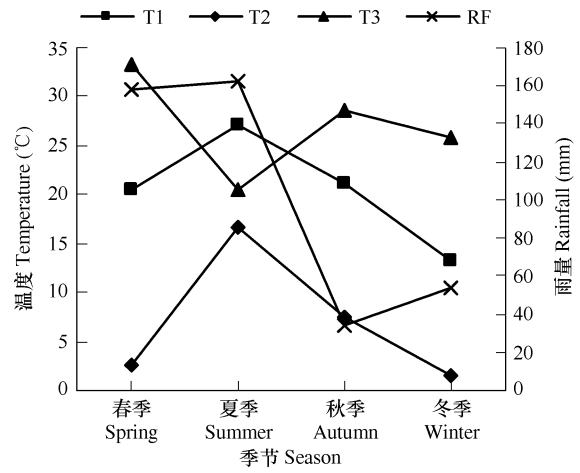


图3 泉州市近 5a 主要气候因子的季节性变化
Fig. 3 Seasonal variation of the main climate factors in recent five years in Quanzhou City, Fujian Province
图中 T1、T2、T3 和 RF 分别指季节性平均气温、极端低温、极端温差和月均降水量 The letters of T1, T2, T3 and RF in this figure denote seasonal mean air temperature, lowest air temperature, extreme difference in air temperature and mean monthly rainfall, respectively

表 5 季节性气象因子和花角蚜小蜂成虫过冷却点、致死中低温累积的相关性

Table 5 Correlative coefficients between seasonal climate factors, SCP and LST_{50} of *Coccobius azumai* adult

季节性气象因子 Seasonal climate factors	雌成虫过冷却点 SCP of female adult	雄成虫过冷却点 SCP of male adult	雌成虫 LST_{50} LST_{50} of female adult
平均气温 Mean air temperature	0.8901	0.3297	0.7611
极端低温 Lowest air temperature	0.9772	0.5607	0.9020
极端温差 Extreme difference in temperature	-0.9807	-0.5747	-0.9092
月均降水量 Mean monthly rainfall	-0.0100	-0.6973	-0.2401
雌成虫过冷却点 SCP of female adult	-	-	0.9731

① 数据来源于泉州市气象局

3.2 花角蚜小蜂成虫过冷却点和低温暴露死亡率间的相关性

过冷却点是衡量昆虫耐寒性的一个重要指标,也被认为是昆虫存活的低温下限。一些昆虫在高于过冷却点的低温暴露下出现大量死亡,而另一些昆虫则在低于过冷却点的低温暴露下仍然有较高的存活率,因此将昆虫的抗寒策略划分为耐受结冰型和避免结冰型两类^[20]。各季节花角蚜小蜂雌成虫在 -10°C 这一高于平均过冷却点的低温暴露下的死亡率均大于80%,在 -15°C 以下温度时则不能存活,说明其耐寒策略属于避免结冰型或不耐结冰型。在进行低温暴露试验的3个季节中,雌成虫的过冷却点和冷识别温度范围、死亡敏感温度范围、 LST_{50} 随季节的变化趋势均相近,与 LST_{50} 在季节序列上的线性相关系数也较高,达0.9731,这在一定程度上说明过冷却点与耐寒性具有密切关系,降低过冷却点是增强耐寒性的一种重要策略,不同季节过冷却点的变化可能是导致其耐寒性发生变化的主要原因。

3.3 花角蚜小蜂成虫耐寒性与季节性气候变化的关系

许多研究表明,季节性气温的逐渐变化是影响昆虫耐寒性的重要原因,昆虫在经过秋季逐渐降温过程的锻炼后,往往能够获得显著增强的耐寒能力^[1-4];还有一些研究认为,昆虫在经过一定强度的高低温变换锻炼后,也能使其耐寒性得到增强^[24]。因此季节性平均气温、极端低温和温差的变化均有可能影响昆虫的耐寒性。本文季节序列上气候因子与花角蚜小蜂成虫过冷却点、致死中低温累积的线性相关分析表明:雌成虫的过冷却点、 LST_{50} 和平均气温、极端低温、极端温差具有较密切的关系,随着季节性平均气温、极端低温下降和极端温差的增加,雌成虫的过冷却点和 LST_{50} 表现出随之下降的趋势,这说明上述3个气候因子的季节性变化可能是引起其耐寒性变化的重要因素。该蜂在冬、春季节所具有的较低过冷却点和 LST_{50} ,与其在秋季受到较低气温、极端低温和较高极端温差的适应性锻炼有关。

3.4 花角蚜小蜂耐寒性对其利用的影响

花角蚜小蜂因其优良的生物学性状和成功的控害实践已成为目前中国南方控制松突圆蚧最主要的生物防治手段。由于松突圆蚧存在继续向我国北部松林主产区扩散危害的潜在风险,那么作为这一重要害虫天敌互作系统主要构件的花角蚜小蜂能否跟随北移控害,已成为一个重要的议题。目前,松突圆蚧主要分布在广东和福建两省,根据中国气象局和福建省气象局发布的气象资料,该虫在广东分布的最北部韶关($24^{\circ}46'\text{N}$,海拔61 m)的年极端低温为 -4.4°C ,在福建分布的最北部闽侯($26^{\circ}11'\text{N}$,海拔270 m)的年极端低温为 -4°C ,而各季节花角蚜小蜂雌成虫在 0°C 暴露下的死亡率均较低(图2),春季在 -5°C 下的死亡率也较低,只在 -10°C 下的死亡率接近90%,因此单从雌成虫的角度看,该小蜂在松突圆蚧目前的分布区内可以越冬,但其在福建和广东两省分布区北部的高海拔地带能否顺利越冬尚不清楚。

就松突圆蚧尚未侵入的潜在分布地区,以福建省主要林区三明、南平地区以及与福建、广东相邻的江西和湖南两省份的低温情况为例,在南平的北部邵武($27^{\circ}20'\text{N}$)、光泽($27^{\circ}32'\text{N}$)和浦城($27^{\circ}55'\text{N}$)、三明的西北部泰宁($26^{\circ}54'\text{N}$)和建宁($26^{\circ}49'\text{N}$)、江西吉安($27^{\circ}06'\text{N}$)、湖南芷江($27^{\circ}26'\text{N}$)等地区的个别年份极端低温均接近或低于 -10°C ,可见在这些地区,花角蚜小蜂的潜在利用价值将受低温的限制。进一步分析 28°N 附近及其以北地区的低温情况,江西南昌($28^{\circ}44'\text{N}$)、湖南长沙($28^{\circ}12'\text{N}$)和常德($29^{\circ}02'\text{N}$)、湖北武汉($30^{\circ}33'\text{N}$)和老河口($32^{\circ}24'\text{N}$),以及浙江衢州($28^{\circ}58'\text{N}$)等地个别年份极端低温基本均低于 -10°C ,推测花角蚜小蜂在这些地区基本上不能越冬。综上所述,在不考虑海拔高度、气候类型和大气环流等对气温变化的影响下,花角蚜小蜂的潜在利用区域应在 28°N 以南,而在 $27^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 之间,花角蚜小蜂的利用将受到海拔、气候异常年份等限制。

本文的上述分析仅依据花角蚜小蜂成虫耐寒性的评价结果,采用的低温资料也未全面考虑海拔高度、气候类型、植被、生境等其它重要的温度影响因子;而在福建和广东等地,花角蚜小蜂成虫也只是其越冬虫态之一;同时该蜂在不同纬度地区的生活史及越冬虫态亦会因环境的改变而有所不同。因此,在今后的相关研究中,需进一步深入研究该小蜂其它虫态的耐寒性,全面考虑区域性气温变化规律,开展综合性评价分析。

References:

- [1] Lee R E. Insect cold hardiness to freeze or not to freeze. *Bioscience*, 1989, 39(5): 308—313.
- [2] Baust J G, Rojas R R. Review-insect cold hardiness: Facts and fancy. *Journal of Insect Physiology*, 1985, 31(10): 755—759.
- [3] Bale J S. Insect cold hardiness: Freezing and supercooling-an ecophysiological perspective. *Journal of Insect Physiology*, 1987, 33(12): 899—908.
- [4] Danks H V. Insect adaptations to cold and changing environments. *Canadian Entomology*, 2006, 138(1): 1—23.
- [5] Jing X H, Kang L. Seasonal changes in the supercooling point of overwintering eggs of *Locusta migratoria*. *Entomological Knowledge*, 2003, 40(4): 326—328.
- [6] Ma R Y, Hao S G, Tian J, Sun J H, Kang L. Seasonal variation in cold-hardiness of the Japanese pine sawyer *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Environmental Entomology*, 2006, 35(4): 881—886.
- [7] Phillips S W, Bale J S, Tatchell G M. Overwintering adaptations in the lettuce root aphid *Pemphigus bursarius* (L.). *Journal of Insect Physiology*, 2000, 46(3): 353—363.
- [8] Sinclair B J. Seasonal variation in freezing tolerance of the New Zealand alpine cockroach *Celatoblatta quinquemaculata*. *Ecological Entomology*, 1997, 22(4): 462—467.
- [9] Sjørnsen H, Sømme L. Seasonal changes in tolerance to cold and desiccation in *Phauloppia* sp. (Acari: Oribatida) from Finse, Norway. *Journal of Insect Physiology*, 2000, 46(10): 1387—1396.
- [10] Guo H B, Xu Y Y, Ju Z, Li M G. Seasonal changes of cold hardiness of the green lacewing, *Chrysoperla sinica* (Tjeder) (Neuroptera: Chrysopidae). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3238—3244.
- [11] Jing X H, Kang L. Research progress in insect cold hardiness. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2202—2207.
- [12] Pan W Y, Tang Z Y. Process of introduced *Coccobius azumai*. *Natural Enemies of Insects*, 1994, 16(3): 123—126.
- [13] Pan W Y, Tang Z Y, Xie G L, Lian J H, Ding D C. Studies on introduction and application of *Coccobius azumai*. *Forest Pest and Disease*, 1993, (1): 15—18.
- [14] Ding D C, Pan W Y, Tang Z Y, Xie G L, Lian J H. Biology of *Coccobius azumai* (Hymenoptera: Aphelinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 1995, 38(1): 46—53.
- [15] Xie G L, Pan W Y, Tang Z Y, Ding D C, Lian J H. Evaluation on the effective and stable control of *Hemiberlesia pitysohila* Takagi with *Coccobius azumai* Tachikawa. *Acta Entomologica Sinica*, 1997, 40(2): 135—144.
- [16] Tong G J, Huang M J, Xu S D, Xu S C, Cai W Q. Application of techniques for controlling *Hemiberlesia pitysohila* with *Coccobius azumai*. *Forest Pest and Disease*, 1998, (2): 23—24.
- [17] Zhang X Y, Luo Y Q. Major forest diseases and insect pests in China. Beijing: Forestry Press of China, 2003. 256—275.
- [18] Nedv d O, Lavy D, Verhoef H A. Modeling time-temperature relationship in cold injury and effect of high temperature interruptions on survival in a chill sensitive Collembolan. *Functional Ecology*, 1998, 12(5): 816—824.
- [19] Jing X H, Kang L. Geographical variation in egg cold hardiness: a study on the adaptation strategies of the migratory locust *Locusta migratoria* L. *Ecological Entomology*, 2003, 28(2): 151—158.
- [20] Chen B, Kang L. Cold hardiness and supercooling capacity in the pea leafminer *Liriomyza huidobrensis*. *Cryo-Letters*, 2002, 23(3): 173—182.
- [21] Jing X H, Kang L. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Entomological Knowledge*, 2004, 41(1): 7—10.
- [22] Powell S J, Bale J S. Cold shock injury and ecological costs of rapid cold hardening in the grain aphid *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Insect Physiology*, 2004, 50(4): 277—284.
- [23] Tong Y H, Chen S L, Zhang F P. Dynamic of *Hemiberlesia pitysohila* population and the relationships with climate factor. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2006, 26(2): 107—110.
- [24] Colinet H, Renault D, Hance T, Vernon P. The impact of fluctuating thermal regimes on the survival of a cold-exposed parasitic wasp, *Aphidius colemani*. *Physiological Entomology*, 2006, 31(3): 234—240.

参考文献:

- [5] 景晓红, 康乐. 飞蝗越冬卵过冷却点的季节性变化及生态学意义. *昆虫知识*, 2003, 40(4): 326—328.
- [10] 郭海波, 许永玉, 鞠珍, 李明贵. 中华通草蛉成虫抗寒能力季节性变化. *生态学报*, 2006, 26(10): 3238—3244.
- [11] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性的研究. *生态学报*, 2002, 22(12): 2202—2207.
- [12] 潘务耀, 唐子颖. 花角蚜小蜂诱引程序概要. *昆虫天敌*, 1994, 16(3): 123—126.
- [13] 潘务耀, 唐子颖, 谢国林, 连俊和, 丁德诚. 松突圆蚧花角蚜小蜂引进和利用的研究. *森林病虫通讯*, 1993, (1): 15—18.
- [14] 丁德诚, 潘务耀, 唐子颖, 谢国林, 连俊和. 松突圆蚧花角蚜小蜂的生物学. *昆虫学报*, 1995, 38(1): 46—53.
- [15] 谢国林, 潘务耀, 唐子颖, 丁德诚, 连俊和. 花角蚜小蜂对松突圆蚧的控制效能及其稳定作用的评估. *昆虫学报*, 1997, 40(2): 135—144.
- [16] 童国健, 黄茂俊, 许世多, 许少嫦, 蔡卫群. 花角蚜小蜂防治松突圆蚧技术的应用. *森林病虫通讯*, 1998, (2): 23—24.
- [17] 张星耀, 骆有庆. 中国森林重大生物灾害. 北京: 中国林业出版社, 2003. 256—275.
- [21] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性的测定与评价方法. *昆虫知识*, 2004, 41(1): 7—10.
- [23] 童应华, 陈顺立, 张飞洋. 松突圆蚧种群动态及与气象因子的关系. *福建林学院学报*, 2006, 26(2): 107—110.