

## 松突圆蚧种群耐寒性的季节变化

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:** 采用过冷却点、低温暴露死亡率、冷识别温度和致死中低温累积等指标评价不同季节松突圆蚧的耐寒性。结果表明: 各季节松突圆蚧的过冷却点波动在  $-22.4 \sim -3.1$  °C 之间, 以冬季雌成虫的平均过冷却点最低 ( $-14.83$  °C), 显著低于夏季雌成虫、冬季 1 龄若虫和初孵若虫 ( $P < 0.01$ ), 但其它发育阶段在冬、夏季之间均无显著差异; 冬季 1 龄若虫、2 龄性分化前若虫、2 龄性分化后雄若虫、雌成虫和种群总体在  $-20 \sim 0$  °C 下的死亡率、冷识别温度和致死中低温累积均明显低于夏季; 1 龄若虫、2 龄性分化后雄若虫和种群总体的致死中低温累积与季节性平均气温均呈显著正相关 ( $R > R_{0.05} = 0.950, n - 2 = 2$ ), 但各发育阶段的过冷却点与其致死中低温累积的相关性均未达显著水平。松突圆蚧冬季种群耐寒性最强, 夏季种群最弱; 该虫耐寒性的这一季节适应性并不依赖于过冷却点, 而与气温的季节变化密切相关。

**关键词:** 松突圆蚧; 耐寒性; 季节变化; 过冷却点; 低温暴露

文章编号: 1000-0933(2009)11-5813-10 中图分类号: S763.3, Q968 文献标识码: A

## Seasonal variation in cold tolerance of the population of pine armored scale, *Hemiberlesia pitysophila* Takagi (Homoptera: Diaspididae)

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(11): 5813 ~ 5822.

**Abstract:** The pine armored scale, *Hemiberlesia pitysophila* Takagi is a dangerous pine forest pest which mainly attacks needle leaves, cones and twigs of various evergreen pines, and has led to great damage in south China since early 1980s. The parameters of supercooling point (SCP), mortality exposed to designated low temperature (ME), discriminating temperature (DT) and median lethal sum of low temperature ( $LST_{50}$ ) of the pest collected in different seasons in Quanzhou, Fujian Province, China from 2007 to 2008 were measured and compared. The results showed that individual SCP of this pest fluctuated from  $-22.4$  °C to  $-3.1$  °C. Among all the developmental stages of the pest in every season, winter female adults had the lowest SCP with the mean value of  $-14.83$  °C, which was significantly lower than those of summer female adults, winter newly hatched nymph and 1<sup>st</sup> instar nymph ( $P < 0.01$ ). However, SCPs of other developmental stages in winter and summer all showed no markedly differences ( $P > 0.05$ ). Experiments exposed to low temperature indicated that the parameters of ME, DT and  $LST_{50}$  of 1<sup>st</sup> instar nymph, 2<sup>nd</sup> instar nymph before sex differentiation, 2<sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation, female adults and population were all obviously lower in winter than in summer. A linear correlative analysis showed that there were significantly positive correlations between seasonal mean air temperature and  $LST_{50}$ s of 1<sup>st</sup> instar nymph, 2<sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation and the pest population ( $R > R_{0.05} = 0.950, n - 2 = 2$ ), but no significant correlations between SCPs and  $LST_{50}$ s in each developmental stage ( $R < R_{0.05} = 0.950, n - 2 = 2$ ). Therefore, it is concluded that the cold tolerance of *H. pitysophila* population seems to peak in winter and drop in summer. The adaptability to low air temperature in winter may be independent of SCP, but is nearly correlative with seasonal mean air temperature.

**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; 2009J060007)

收稿日期: 2009-02-20; 修订日期: 2009-02-20

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

**Key Words:** *Hemiberlesia pitysofila* Takagi; cold tolerance; seasonal variation; supercooling point; exposure to low temperature

耐寒性(cold tolerance)是昆虫主要的生态学特征之一,对种群地理分布、生活史对策和消长动态等均有重要影响。昆虫耐寒性的强弱不仅与其自身固有遗传性状有关,还受外界环境因子的显著影响,如地理纬度<sup>[1-3]</sup>、海拔<sup>[4]</sup>、食物<sup>[5-7]</sup>、光周期<sup>[8]</sup>、季节性气候<sup>[9,10]</sup>、低温驯化和降温速率<sup>[11,12]</sup>等,具有较大可塑性。在这些因子中,季节既对食物、光周期和气温变化等有直接影响,还决定昆虫在特定时期所需忍受的低温胁迫强度,因而是最重要的影响因子。许多昆虫在冬季的耐寒能力比夏季强,这些昆虫在进入冬季前,能够通过一系列生理调节机制增强耐寒性,表现出明显的季节变化节律和低温适应能力<sup>[13-18]</sup>,从而有利于其种群保存、繁衍乃至扩张与暴发<sup>[10,19]</sup>。

松突圆蚧(*Hemiberlesia pitysofila* Takagi)是我国南方最主要的危险性森林害虫,该虫原产日本冲绳和先岛诸岛,20世纪80年代初传入我国大陆珠海,后扩张至广东大部分地区、福建沿海地区和广西北部地区,造成大面积松林衰退和枯死<sup>[20]</sup>。由于松突圆蚧可为害包括马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*P. elliotii*)和火炬松(*P. taeda*)等在内的多种重要松属植物<sup>[21]</sup>,种群增殖力强、传播速度快、危害大且防治困难<sup>[20]</sup>,国家林业局于2005年将其列入16种林业检疫性有害生物名录。作为一种危险性外来入侵害虫,松突圆蚧的耐寒性与其地理分布、生态适应性、入侵力和种群扩张、暴发等均有密切联系。然而未见相关研究报道。鉴于此,本文通过过冷却点测定和低温暴露试验,研究了该虫耐寒性的季节变化特征,以期深入分析其种群动态、生境适应机制和潜在地理分布等提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源和季节划分

松突圆蚧虫源地为福建省泉州市洛江区仙公山的马尾松林(25°6.158' N, 118°38.255' E,海拔368 m)。该林分属中龄林,针阔混交(比例9:1),马尾松密度6570株/hm<sup>2</sup>,平均株高10.75 m,郁闭度0.9,林下灌木层平均高1.3 m,松突圆蚧有虫株率达100%,平均虫口密度4.3头/每针束。定期在该林分中随机剪取受松突圆蚧危害的松枝,用塑料袋封装带回,不做任何处理,以此为供试虫源,并在4 h内进行各项测试。

根据泉州市气象要素和天气现象的相似性,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 过冷却点的测定

过冷却点测定采用热电偶法<sup>[22]</sup>;低温环境用海尔BCD228-WBSS冰箱(青岛海尔)制备,降温速率控制在1℃/min左右。由于松突圆蚧在广东无明显越冬现象,而福建的冬季种群由各发育阶段组成<sup>[20,23]</sup>,因此测定所有发育阶段的过冷却点,具体有:初孵若虫、1龄若虫、2龄性分化前若虫、2龄性分化后雌若虫、2龄性分化后雄若虫、雌成虫和雄成虫。测定时,在双目解剖镜下选择未受寄生且生活的蚧虫,挑除蚧壳后,用滤纸将体表水分吸干,通过透明胶将其固定在热电偶探针上,保证虫体与探针充分接触,后用棉花包裹带虫探针以调节降温速率,放入冰箱内测定。各季节、各发育阶段均重复测定17~192头。

### 1.3 低温暴露试验

低温暴露设8处理,分别为:(1)10℃处理:10℃×12 h(由于除1龄若虫外各虫态的发育起点温度均接近10℃<sup>[23]</sup>,故设为对照);(2)5℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h;(3)0℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h→0℃×6 h;(4)-5℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h→0℃×6 h→-5℃×4 h;(5)-10℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h→0℃×6 h→-5℃×4 h→-10℃×4 h;(6)-15℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h→0℃×6 h→-5℃×4 h→-10℃×4 h→-15℃×4 h;(7)-20℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h→0℃×6 h→-5℃×4 h→-10℃×4 h→-15℃×4 h→-20℃×4 h;(8)-25℃处理:10℃×12 h→5℃×6 h→0℃×6 h→-5℃×

4 h → -10 °C × 4 h → -15 °C × 4 h → -20 °C × 4 h → -25 °C × 4 h。5 °C 及以上温度环境由 PYY-1250Q-A 型号人工气候箱(广东韵关科力)制备,0 °C 及以下温度环境由海尔 BCD228-WBSS 冰箱制备。

从松枝上随机抽取 8 × 100 束带蚧针叶(100 束针叶上松突圆蚧各发育阶段的个体数均大于 30),将每 100 束针叶用 1 层废报纸包扎,作为 1 个处理对象。将 8 个处理对象分别进行上述 7 种低温暴露和 1 种对照处理,结束后放入人工气候箱内(25 °C,70% RH,16 L:8 D)恢复,直至最后 1 种处理(-25 °C 处理)结束,并恢复 24 h 后,在解剖镜下检查并统计针叶上松突圆蚧各发育阶段和种群总体的死亡和存活个体数。以虫体饱满、色泽光亮作为存活标准;以虫体皱缩、体色褐色、带有深色斑点、斑带和口针与松针脱离作为低温致死标准;虫体干瘪、残缺、蚧壳内无虫、蚧壳上有寄生蜂羽化孔和被寄生痕迹的均不作统计。各季节、各处理均设 3 重复。选择个体数较多的 1 龄若虫、2 龄性分化前若虫、2 龄性分化后雄若虫、2 龄性分化后雌若虫、雌成虫等发育阶段和种群总体分别进行耐寒性分析。

## 1.4 数据分析

### 1.4.1 过冷却点和低温暴露死亡率

采用方差分析(ANOVA)结合 Duncan 法比较各季节的过冷却点和低温暴露死亡率,死亡率用校正死亡率替代,并经反正弦平方根转换后进行统计分析。如果个别虫态因试验误差或在 10 °C 处理中继续发育而导致校正死亡率为负值,则视为 0 死亡,以校正死亡率值为 0 进行数据转换和差异检验。

### 1.4.2 耐寒性评价

#### (1) 致死中低温累积

参考前人的方法,应用稍作改进后的逻辑斯谛方程评价松突圆蚧耐寒性<sup>[25,26]</sup>。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, $t_i$  为特定阶段暴露时间, $T_i$  为特定阶段暴露温度, $i$  为变化温度梯度数, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $\sum t_i T_i$  为各处理的低温累积; $a, b$  为常数,  $-a/b$  为造成昆虫 50% 个体死亡的低温累积,称为致死中低温累积(median lethal sum of low temperature,  $LST_{50}$ ),以此指标比较昆虫的耐寒性。

由于 0 °C 下的低温累积无法反应温度和时间的交互作用,因此对所设置的各温度重新赋值。令  $T(5^\circ\text{C}) = -1, T(0^\circ\text{C}) = -6, T(-5^\circ\text{C}) = -11, T(-10^\circ\text{C}) = -16, T(-15^\circ\text{C}) = -21, T(-20^\circ\text{C}) = -26, T(-25^\circ\text{C}) = -31$ , 则 1.3 中(2) ~ (7) 处理的低温累积分别为 -6、-42、-86、-150、-234 和 -338。因 -25 °C 下松突圆蚧各季节、各发育阶段的死亡率均为 1,故采用 -20 ~ 5 °C 下的低温暴露死亡率数据拟合方程(1),并据此计算  $LST_{50}$ 。死亡率同样采用平均校正死亡率代替。

#### (2) 冷识别温度

Powell 和 Bale 将导致昆虫种群死亡 80% 左右的特定时间低温暴露强度定义为冷识别温度(discriminating temperature, DT),以此评价麦长管蚜(*Sitobion avenae*)的耐寒性,获得了理想结果<sup>[11]</sup>。本文参考该法,结合致死中低温累积和低温暴露死亡率 2 个指标,综合评价松突圆蚧的耐寒性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同季节松突圆蚧的过冷却点

从松突圆蚧的过冷却点测定结果(表 1)可看出,在各季节、各发育阶段过冷却点的平均值中,以冬季雌成虫最低,为 -14.83 °C,以冬季初孵若虫最高,为 -11.28 °C;个体最低值出现在冬季 2 龄性分化后雌若虫中,为 -22.4 °C,最高值则出现在春季 2 龄性分化后雄若虫中,为 -3.1 °C。从差异显著性检验结果看,雄成虫、2 龄性分化后雄若虫、2 龄性分化前若虫的过冷却点均无显著的季节差异,但雌成虫在冬季的过冷却点显著低于夏、秋季,2 龄性分化后雌若虫在春季的过冷却点显著低于夏季,1 龄若虫和初孵若虫在春、秋季的过冷却点显著低于冬季( $P < 0.01$ )。比较各发育阶段松突圆蚧在冬季和夏季过冷却点的差异可知,除雌成虫外,其余发育阶段的过冷却点在 2 个季节间均无显著差异。总体上,松突圆蚧种群过冷却点的季节变化节律不明显。

表 1 不同季节松突圆蚧的过冷却点(°C)

Table 1 Supercooling points of *H. pitysofila* from different seasons

发育阶段 Developmental stage	季节 Season	样本数 Sampling number	均值 ± 标准误 Mean SCP ± SE	变异系数 CV	最高值 Max	最低值 Min	极差 Range	95% 置信限 95% fiducial limit
雌成虫 Female adult	春季 Spring	192	-13.57 ± 0.15 ab AB	-0.15	-8.1	-21.6	13.50	-13.86 ~ -13.28
	夏季 Summer	30	-13.16 ± 0.30 a A	-0.12	-9.3	-15.4	6.10	-13.77 ~ -12.55
	秋季 Autumn	37	-12.99 ± 0.34 a A	-0.16	-6.9	-16.3	9.40	-13.69 ~ -12.30
	冬季 Winter	115	-14.83 ± 0.24 b B	-0.18	-10	-21.4	11.40	-15.31 ~ -14.35
雄成虫 Male adult	春季 Spring	30	-13.10 ± 0.27 a A	-0.11	-10	-15.9	5.90	-13.64 ~ -12.55
	夏季 Summer	17	-12.81 ± 0.28 a A	-0.09	-9.9	-14.6	4.70	-13.40 ~ -12.22
	秋季 Autumn	32	-13.77 ± 0.25 a A	-0.10	-9.5	-16.5	7.00	-14.29 ~ -13.26
2 龄性分化后雌若虫 2nd instar female nymph after sex differentiation	春季 Spring	31	-14.28 ± 0.20 b A	-0.08	-12.2	-17.1	4.90	-14.69 ~ -13.87
	夏季 Summer	30	-12.24 ± 0.41 a A	-0.18	-7.7	-16	8.30	-13.08 ~ -11.40
	秋季 Autumn	36	-13.30 ± 0.30 ab A	-0.14	-7.6	-16.5	8.90	-13.91 ~ -12.69
2 龄性分化后雄若虫 2nd instar male nymph after sex differentiation	春季 Spring	55	-12.67 ± 0.35 a A	-0.21	-3.1	-15.9	12.80	-13.38 ~ -11.96
	夏季 Summer	30	-13.47 ± 0.36 a A	-0.14	-9	-16.8	7.80	-14.20 ~ -12.74
	秋季 Autumn	38	-13.24 ± 0.30 a A	-0.14	-8.3	-15.5	7.20	-13.85 ~ -12.63
2 龄性分化前若虫 2nd instar nymph before sex differentiation	春季 Spring	42	-13.66 ± 0.47 a A	-0.22	-9.9	-21.7	11.80	-14.61 ~ -12.72
	夏季 Summer	30	-14.07 ± 0.36 a A	-0.14	-10.2	-17.6	7.40	-14.81 ~ -13.34
	秋季 Autumn	32	-13.04 ± 0.26 a A	-0.11	-10.6	-15.7	5.10	-13.56 ~ -12.52
1 龄若虫 1st instar nymph	春季 Spring	34	-12.99 ± 0.32 a A	-0.14	-9.1	-17	7.90	-13.65 ~ -12.34
	夏季 Summer	32	-13.02 ± 0.39 a A	-0.17	-9.2	-21.6	12.40	-13.81 ~ -12.24
	秋季 Autumn	32	-13.02 ± 0.39 a A	-0.17	-9.2	-21.6	12.40	-13.81 ~ -12.24
初孵若虫 Newly hatched nymph	春季 Spring	41	-13.56 ± 0.18 c B	-0.08	-10.8	-15.4	4.60	-13.91 ~ -13.20
	夏季 Summer	30	-12.45 ± 0.22 ab AB	-0.10	-9.9	-15.5	5.60	-12.90 ~ -12.01
	秋季 Autumn	35	-13.19 ± 0.34 bc B	-0.15	-8	-16.2	8.20	-13.87 ~ -12.51
初孵若虫 Newly hatched nymph	冬季 Winter	25	-11.90 ± 0.30 a A	-0.13	-9	-14.8	5.80	-12.51 ~ -11.28
	春季 Spring	35	-12.86 ± 0.26 b B	-0.12	-9.9	-14.8	4.90	-13.39 ~ -12.32
	夏季 Summer	30	-12.24 ± 0.23 ab AB	-0.10	-9	-14.4	5.40	-12.71 ~ -11.77
初孵若虫 Newly hatched nymph	秋季 Autumn	34	-12.86 ± 0.35 b B	-0.16	-7.6	-15.8	8.20	-13.56 ~ -12.16
	冬季 Winter	17	-11.28 ± 0.39 a A	-0.14	-7.8	-13.9	6.10	-12.10 ~ -10.47

## 2.2 松突圆蚧不同发育阶段过冷却点比较

从松突圆蚧不同发育阶段过冷却点的差异显著性检验结果(表 2)可看出,在春季,2 龄性分化后雌若虫和 2 龄性分化前若虫的平均过冷却点最低,显著低于 2 龄性分化后雄若虫( $P < 0.01$ ),但与其它发育阶段均无显著差异;在夏、秋季,各发育阶段的平均过冷却点之间均无显著差异;在冬季,雌成虫的平均过冷却点最低,显著低于初孵若虫和 1 龄若虫( $P < 0.01$ ),与其它发育阶段则均无显著差异,而初孵若虫的平均过冷却点最高,显著高于除 1 龄若虫外的各发育阶段( $P < 0.01$ )。

## 2.3 不同季节松突圆蚧低温暴露的死亡率和冷识别温度

不同季节和发育阶段松突圆蚧在低温暴露下的死亡情况见图 1。各季节中,各发育阶段的死亡率均随暴露温度下降而增大;除夏季雌成虫在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下不能存活外,其余季节各发育阶段在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下均有一定个体存活,在  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  下则均不能存活,说明该虫存活的极限低温在  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间。

从图中还可看出,松突圆蚧在低温暴露下的死亡率表现出显著的季节差异,冬季 1 龄若虫死亡率在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下均显著小于夏季;冬季 2 龄性分化前若虫死亡率在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下显著小于夏、秋季,在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  下显著小于秋季;冬季 2 龄性分化后雌若虫死亡率在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  下显著小于秋季,在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下显著小于春、夏季;冬季 2 龄

性分化后雄若虫死亡率在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  下显著小于夏季;夏季雌成虫死亡率在  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下均显著大于其它季节;秋季雌成虫死亡率在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  下显著小于夏季;种群总体在  $-15\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,冬季的死亡率基本上均显著小于夏季。

表 2 松突圆蚧不同发育阶段过冷却点的差异显著性

Table 2 Duncan's honestly significant differences between the various developmental stages of *H. pitysohila*

发育阶段 Developmental stage	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	5% Sig.	1% Sig.						
雌成虫 Female adult	ab	AB	a	A	a	A	c	C
雄成虫 Male adult	ab	AB	a	A	a	A	bc	BC
二龄性分化后雌若虫 2 <sup>nd</sup> instar female nymph after sex differentiation	b	B	a	A	a	A	bc	BC
二龄性分化后雄若虫 2 <sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation	a	A	a	A	a	A	bc	BC
二龄性分化前若虫 2 <sup>nd</sup> instar nymph before sex differentiation	b	B	a	A	a	A	bc	BC
一龄若虫 1st instar nymph	ab	AB	a	A	a	A	ab	AB
初孵若虫 Newly hatched nymph	ab	AB	a	A	a	A	a	A

就冷识别温度,夏季 1 龄若虫处于  $-10\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,春、秋季均处于  $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,冬季则处于  $-20\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间;春、夏、秋季 2 龄性分化前若虫均处于  $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,冬季则处于  $-20\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间;夏季 2 龄性分化后雄若虫处于  $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,其余季节均处于  $-25\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间;夏季雌成虫处于  $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,其余季节均处于  $-20\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间;种群总体在冬季处于  $-25\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,在其余季节则均处于  $-20\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间。总体上,除 2 龄性分化后雌若虫的冷识别温度在各个季节均处于  $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间外,冬季松突圆蚧其余发育阶段及种群总体的冷识别温度均明显比夏季低。

#### 2.4 不同季节松突圆蚧的致死中低温累积

采用方程(1)拟合各季节、各发育阶段松突圆蚧的低温累积-死亡率关系,结果见表 3。从  $F$  检验可看出,拟合的各方程的  $F$  值均较大, $P$  值均小于 0.05, $R^2$  值均大于 0.6,说明该改进方程适用于变温条件下松突圆蚧耐寒性的评价。根据方程拟合结果计算致死中低温累积,从表 3 可看出,不同季节雌成虫和种群总体的致死中低温累积大小序列相同,均为冬季 < 秋季 < 春季 < 夏季,1 龄若虫和 2 龄性分化后雄若虫也相同,均为冬季 < 春季 < 秋季 < 夏季,2 龄性分化前若虫为冬季 < 春季 < 夏季 < 秋季,2 龄性分化后雌若虫为夏季 < 冬季 < 秋季 < 春季。总体上,除 2 龄性分化后雌若虫外,松突圆蚧其余发育阶段和种群总体在冬季的致死中低温累积均明显低于夏季。

#### 2.5 松突圆蚧过冷却点、致死中低温累积和气象因子之间的关系

采用 Pearson 相关性分析法,以季节为序列,计算松突圆蚧过冷却点、致死中低温累积和气象因子的相关系数,结果见表 4 和表 5。从表 4 可看出,季节性平均气温与 1 龄若虫、2 龄性分化后雄若虫和种群总体致死中低温累积均呈显著正相关( $R > R_{0.05} = 0.950, n - 2 = 2$ ),说明季节性平均气温是影响松突圆蚧相应发育阶段和种群耐寒性的重要因子,该虫种群耐寒性对气温的季节变化具有显著的适应性。

从表 5 可看出,在气象因子与松突圆蚧过冷却点的相关性中,仅 2 龄性分化后雌若虫的平均过冷却点与极端低温呈显著正相关( $R > R_{0.05} = 0.950, n - 2 = 2$ ),其余发育阶段的相关性均未达显著水平,说明极端低温对该发育阶段的过冷却点有显著影响,但总体上季节尺度的气温和降雨等因子的变化对松突圆蚧过冷却点的影响并不明显。

进一步计算松突圆蚧雌成虫、2 龄性分化后雄若虫、2 龄性分化后雌若虫、2 龄性分化前若虫、1 龄若虫的过冷却点和致死中低温累积的相关系数,分别为 0.3597、0.0361、-0.6503、-0.0663、-0.4778,均未达显著水平。可见在季节序列上,该虫的过冷却点与耐寒性的关系并不密切。因此认为:松突圆蚧耐寒性的季节性

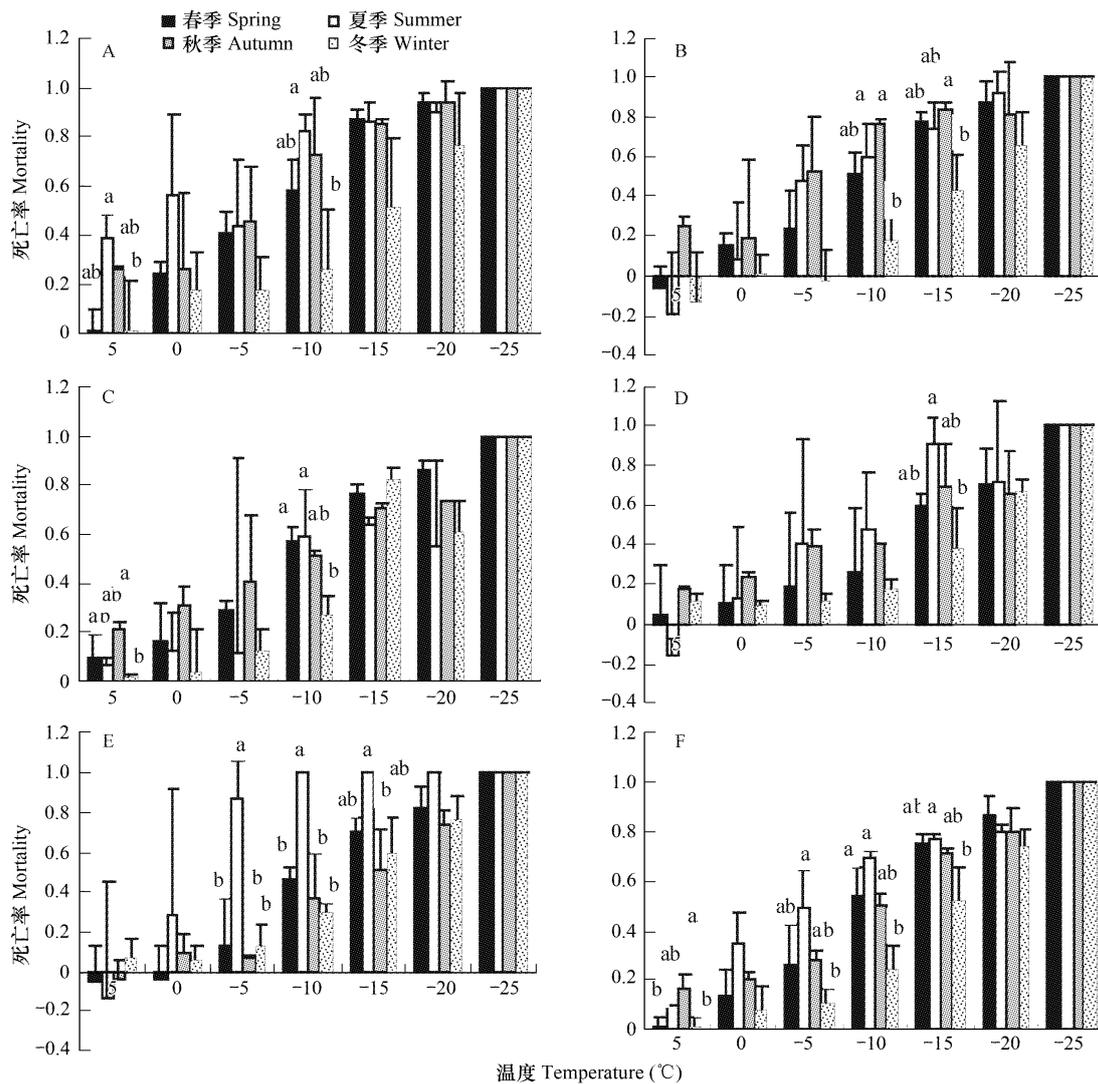


图1 不同季节低温暴露下松突圆蚧的死亡率<sup>①</sup>

Fig. 1 Mortality of *H. pitiesophila* exposed to low temperature in different seasons

① A、B、C、D、E 和 F 分别指 1 龄若虫、2 龄性分化前若虫、2 龄性分化后雌若虫、2 龄性分化后雄若虫、雌成虫和种群总体；图中各季节间未标注显著性检验结果的指差异不显著性 The letters of A, B, C, D, E and F in this figure denote the pest developmental stage of 1<sup>st</sup> instar nymph, 2<sup>nd</sup> instar nymph before sex differentiation, 2<sup>nd</sup> instar female nymph after sex differentiation, 2<sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation, female adult and population, respectively; There are no significant differences between the seasons without necessary labels in the same developmental stage

变化并非通过调节过冷却点得以实现,过冷却点不能反映该虫耐寒性的实际情况。

此外,松突圆蚧各发育阶段的平均过冷却点在  $-15 \sim -11$  °C 之间(表 1),而该虫在此温度区间暴露下仍有较高存活率,在  $-20 \sim -15$  °C 之间也有一定的存活率,说明松突圆蚧是一种耐结冰型的昆虫。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 关于松突圆蚧耐寒性的季节适应性

低温暴露试验是评价昆虫耐寒性可信赖的方法<sup>[1-3,7,11-14,27,28]</sup>,对比冬、夏季松突圆蚧的试验结果:冬季 1 龄若虫、2 龄性分化前若虫、2 龄性分化后雄若虫、雌成虫及种群总体在特定范围低温暴露下的死亡率、冷识别温度和致死中低温累积均低于夏季(图 1 和表 3),说明上述发育阶段和种群总体在冬季的耐寒性均强于夏季。从种群的致死中低温累积(表 3)分析松突圆蚧耐寒性的季节变化节律,其致死中低温累积以夏季最高,

然后依次是春、秋和冬季,可见从夏季到冬季,该虫种群耐寒性逐渐增强,从冬季到夏季则逐渐减弱,这与气温的季节变化节律基本一致。综上,松突圆蚧种群耐寒性具有明显的季节适应性,秋季和春季分别是其耐寒性由弱变强和由强变弱的重要过渡季节。

表 3 不同季节松突圆蚧低温累积-死亡率逻辑斯谛方程和致死中低温累积 ( $LST_{50}$ )

Table 3 Logistic equation between the sum of low temperature and mortality of *H. pitiesophila* in different seasons and their  $LST_{50}$

发育阶段 Developmental stage	季节 Season	$a^{\text{①}}$	$b$	$F$	$P$	$R^2$	$LST_{50}$
一龄若虫 1 <sup>st</sup> instar nymph	春季 Spring	-2.0701	-0.0167	133.9568	0.0003	0.9710	-123.8845
	夏季 Summer	-0.4904	-0.0097	21.5257	0.0097	0.8433	-50.7084
	秋季 Autumn	-1.3485	-0.0140	199.4543	0.0002	0.9803	-96.5297
	冬季 Winter	-2.5930	-0.0112	159.4544	0.0002	0.9755	-231.7265
二龄性分化前若虫 2 <sup>nd</sup> instar nymph before sex differentiation	春季 Spring	-2.6841	-0.0172	87.1111	0.0007	0.9561	-155.8705
	夏季 Summer	-2.5607	-0.0189	21.7404	0.0096	0.8446	-135.2022
	秋季 Autumn	-1.3782	-0.0145	27.8750	0.0062	0.8745	-94.8493
二龄性分化后雌若虫 2 <sup>nd</sup> instar female nymph after sex differentiation	冬季 Winter	-3.9626	-0.0145	41.8789	0.0029	0.9128	-274.0353
	春季 Spring	-2.0570	-0.0140	180.4640	0.0002	0.9783	-146.6158
	夏季 Summer	-1.7890	-0.0081	7.9302	0.0480	0.6647	-220.0467
二龄性分化后雄若虫 2 <sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation	秋季 Autumn	-1.0885	-0.0072	79.8360	0.0009	0.9523	-150.3494
	冬季 Winter	-2.8075	-0.0138	13.8124	0.0205	0.7754	-203.1462
	春季 Spring	-2.5043	-0.0110	110.5381	0.0005	0.9651	-227.8744
雌成虫 Female adult	夏季 Summer	-2.6577	-0.0187	15.8729	0.0164	0.7987	-142.3492
	秋季 Autumn	-1.2899	-0.0070	26.9009	0.0066	0.8706	-185.0646
	冬季 Winter	-2.8901	-0.0104	189.3930	0.0002	0.9793	-277.3560
	春季 Spring	-3.3388	-0.0184	57.0584	0.0017	0.9345	-181.6529
种群 Population	夏季 Summer	-4.2445	-0.0751	156.8495	0.0002	0.9751	-56.5404
	秋季 Autumn	-2.8881	-0.0123	59.9735	0.0015	0.9375	-234.2344
	冬季 Winter	-2.8630	-0.0130	189.4812	0.0002	0.9793	-221.0795
	春季 Spring	-2.4026	-0.0155	142.4584	0.0003	0.9727	-154.8073
	夏季 Summer	-1.2515	-0.0115	27.9216	0.0062	0.8747	-109.1125
	秋季 Autumn	-1.6954	-0.0104	182.0465	0.0002	0.9785	-163.8106
	冬季 Winter	-3.0663	-0.0127	343.1241	0.0001	0.9885	-241.0613

① 表中 a 和 b 是指逻辑斯谛方程  $S = \exp(a + b \sum t_i T_i) / [1 + \exp(a + b \sum t_i T_i)]$  中的相应参数 The letters of a and b are the corresponding parameters in the Logistic equation:  $S = \exp(a + b \sum t_i T_i) / [1 + \exp(a + b \sum t_i T_i)]$

表 4 气候因子季节变化与松突圆蚧致死中低温累积的相关性

Table 4 Correlative coefficients between seasonal climate factors and  $LST_{50}$  of *H. pitiesophila*

发育阶段 Developmental stage	平均气温 Mean air temperature	极端低温 Lowest air temperature	极端温差 Extreme difference in temperature	月均降水量 Mean monthly rainfall
一龄若虫 1 <sup>st</sup> instar nymph	0.9800 *	0.8221	-0.2627	0.4972
二龄性分化前若虫 2 <sup>nd</sup> instar nymph before sex differentiation	0.7863	0.5501	0.0690	0.1773
二龄性分化后雌若虫 2 <sup>nd</sup> instar female nymph after sex differentiation	-0.1276	-0.5125	0.9107	-0.1970
二龄性分化后雄若虫 2 <sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation	0.9669 *	0.9281	-0.4813	0.3958
雌成虫 Female adult	0.7831	0.8303	-0.6638	0.7948
种群 Population	0.9875 *	0.8022	-0.2512	0.6777

表 5 气候因子季节变化与松突圆蚧过冷却点的相关性

Table 5 Correlative coefficients between seasonal climate factors and SCP of *H. pityophila*

发育阶段 Developmental stage	平均气温 Mean air temperature	极端低温 Lowest air temperature	极端温差 Extreme difference in temperature	月均降水量 Mean monthly rainfall
雌成虫 Female adults	0.8620	0.6469	-0.0338	0.2718
雄成虫 Male adults	0.2907	0.3435	-0.4404	0.8149
二龄性分化后雌若虫 2 <sup>nd</sup> instar female nymph after sex differentiation	0.7223	0.9603 *	-0.8928	0.1934
二龄性分化后雄若虫 2 <sup>nd</sup> instar male nymph after sex differentiation	0.2029	-0.2774	0.8024	0.4352
二龄性分化前若虫 2 <sup>nd</sup> instar nymph before sex differentiation	-0.0068	0.4185	-0.7504	-0.5761
一龄若虫 1 <sup>st</sup> instar nymph	-0.3474	0.1074	-0.7219	-0.2495
初孵若虫 Newly hatched nymph	-0.5753	-0.1791	-0.4879	-0.2529

### 3.2 关于过冷却点作为耐寒性指标的适用性

过冷却点是评价昆虫耐寒性的指标之一,在许多昆虫和螨类耐寒性的评价中,该指标与低温暴露试验的结果一致<sup>[14,16,17]</sup>,因而可作为有效指标;然而对另一些昆虫,两种方法的评价结果并不一致,由于这些昆虫不耐结冰而在高于过冷却点的低温下出现大量死亡,因此不可信赖<sup>[17,29]</sup>。从本文看,松突圆蚧除冬季雌成虫的过冷却点显著低于夏季外,其它各发育阶段在冬、夏季之间均无显著差异(表 1),而低温暴露试验显示其耐寒性具有明显的季节性节律,冬季的耐寒性强于夏季,可见两者的评价结果不一致;季节序列上,过冷却点与致死中低温累积的相关性也未达显著水平。因此认为:过冷却点不能如实反映松突圆蚧的耐寒性,不适合作为其耐寒性评价的有效指标。这可能与该虫在高于过冷却点的低温暴露下仍然存在不可忽略的死亡率有关。

### 3.3 关于松突圆蚧的种群动态和地理分布

对福建沿海一带的定位观察表明:松突圆蚧在春季、秋末和冬季的种群密度均较大,而在夏季较小<sup>[23]</sup>,这与该虫耐寒性的季节性节律相一致,因此在该区域,低温并非限制松突圆蚧种群发展的主要因素,而该虫耐寒性的季节适应性则有利于其种群在冬季保持较高的基数。

从低温暴露下冬季松突圆蚧的死亡情况看,在  $-5 \sim 0$  °C 下各发育阶段和种群总体的死亡率均在 10% 左右,在  $-10$  °C 下处于 20% ~ 40% 之间,在  $-15$  °C 下大于 60%,在  $-20$  °C 下则接近或高于 90%。根据这一结果,将  $0 \sim -5$  °C 定义为松突圆蚧能够越冬,低温对冬季种群影响不明显的温度范围;将  $-10$  °C 左右定义为部分松突圆蚧能够越冬,但温度将显著地影响冬季种群存活温度范围;将  $-20 \sim -15$  °C 定义为少量松突圆蚧能够越冬,低温将极大地限制种群越冬的温度范围。

目前,松突圆蚧在我国分布的最北部为福建闽侯一带( $26^{\circ}\text{N}$  左右),在广东省分布的最北部为韶关( $25^{\circ}\text{N}$  左右)。根据中国气象局发布的资料,两地近几十年来的冬季极端低温均不低于  $-5$  °C,因此认为松突圆蚧在这些区域均可越冬,冬季低温对种群的限制作用不大。在松突圆蚧尚未侵入的区域,分析福建省主要林区三明、南平以及与福建、广东相邻的江西、湖南和浙江 3 省的低温情况。在南平北部的邵武( $27^{\circ}20'\text{N}$ )、光泽( $27^{\circ}32'\text{N}$ )和浦城( $27^{\circ}55'\text{N}$ )、三明北部的泰宁( $26^{\circ}54'\text{N}$ )和建宁( $26^{\circ}49'\text{N}$ )、江西吉安( $27^{\circ}06'\text{N}$ )和南昌( $28^{\circ}44'\text{N}$ )、湖南芷江( $27^{\circ}26'\text{N}$ )和长沙( $28^{\circ}12'\text{N}$ )、浙江衢州( $28^{\circ}58'\text{N}$ )等  $26.5 \sim 29^{\circ}\text{N}$  的区域内,近些年的冬季极端低温均在  $-10$  °C 左右,因此认为松突圆蚧能够突破现有的分布纬度( $26^{\circ}\text{N}$  左右),但在  $26.5 \sim 29^{\circ}\text{N}$  区域内,冬季低温将对其种群存活产生显著影响。进一步分析  $29^{\circ}\text{N}$  以北和  $37^{\circ}\text{N}$  以南地区的低温情况( $37^{\circ}\text{N}$  是主要寄主马尾松在我国分布的地理北界),湖南常德( $29^{\circ}02'\text{N}$ )、湖北武汉( $30^{\circ}33'\text{N}$ )、老河口( $32^{\circ}24'\text{N}$ )、山东济南( $36^{\circ}39'\text{N}$ )和成头山( $37^{\circ}23'\text{N}$ )等地的极端低温基本均处于  $-20 \sim -15$  °C 之间,因此认为松突圆蚧在这一区域也能越冬,但冬季低温将极大地限制其种群的扩张。

**References:**

- [ 1 ] Shintani Y, Ishikawa Y. Geographic variation in cold hardiness of eggs and neonate larvae of the yellow spotted longicorn beetle *Psacotheta hilaris*. *Physiological Entomology*, 1999, 24(2): 158 – 164.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Hoffmann A A, Hallas R, Sinclair C, Mitrovski P. Levels of variation in stress resistance in drosophila among strains, local populations, and geographic regions: patterns for desiccation, starvation, cold resistance, and associated traits. *Evolution*, 2007, 55(8): 1621 – 1630.
- [ 4 ] Jing X H, Kang L. Research progress in insect cold hardiness. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (12): 2202 – 2207.
- [ 5 ] Zvereva E L. Effects of host plant quality on overwintering success of the leaf beetle *Chrysomela lapponica* (Coleoptera: Chrysomelidae). *European Journal of Entomology*, 2002, 99(2): 189 – 195.
- [ 6 ] Liu Z D, Gong P Y, Wu K J, Wei W, Sun J H, Li D M. Effects of larval host plants on over-wintering preparedness and survival of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Insect Physiology*, 2007, 53(10): 1016 – 1026.
- [ 7 ] Hunter M D, McNeil J N. Host-plant quality influences diapause and voltinism in a polyphagous insect herbivore. *Ecology*, 1997, 78(4): 977 – 986.
- [ 8 ] Jing X H, Kang L. Egg cold hardiness of the migratory locust *Locusta migratoria* L. under different photoperiod conditions. *Zoological Research*, 2003, 24 (3): 196 – 199.
- [ 9 ] Jing X H, Kang L. Seasonal changes in the cold tolerance of eggs of the migratory locust, *Locusta migratoria* L. (Orthoptera: Acrididae). *Environmental Entomology*, 2004, 33(2): 113 – 118.
- [ 10 ] Danks H V. Insect adaptations to cold and changing environments. *Canadian Entomology*, 2006, 138(1): 1 – 23.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Jing X H, Kang L. Seasonal changes in the supercooling point of overwintering eggs of *Locusta migratoria*. *Entomological Knowledge*, 2003, 40 (4): 326 – 328.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Phillips S W, Bale J S, Tatchell G M. Overwintering adaptations in the lettuce root aphid *Pemphigus bursarium* (L.). *Journal of Insect Physiology*, 2000, 46(3): 353 – 363.
- [ 16 ] Sinclair B J. Seasonal variation in freezing tolerance of the New Zealand alpine cockroach *Celatoblatta quinque maculata*. *Ecological Entomology*, 1997, 22(4): 462 – 467.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Chen B, Kang L. Insect population differentiation in response to environmental thermal stress. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(4): 289 – 296.
- [ 20 ] Zhang X Y, Luo Y Q. Major forest diseases and insect pests in China. Beijing: Forestry Press of China, 2003. 256 – 275.
- [ 21 ] Chen Z F. Preliminary studies on the resistance of fifteen pines to *Hemiberlesia pitysophila*. *Forest Pest and Disease*, 1988, (2): 1 – 2.
- [ 22 ] Lee R E Jr, Denlinger D L. Cold tolerance in diapausing and non-diapausing stages of the flesh fly, *Sarcophaga crassipalpis*. *Physiological Entomology*, 1985, 10(3), 309 – 315.
- [ 23 ] Tong Y H, Chen S L, Zhang F P. Dynamic of *Hemiberlesia pitysophila* population and the relationships with climate factor. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2006, 26(2): 107 – 110.
- [ 24 ] Hu Y H, Chen S L, Yang A M. A study on the threshold temperature for development and effective cumulative temperature of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2004, 31(2): 9 – 11.
- [ 25 ] Nedvéd 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.

- [26] Chen B, Kang L. Cold hardiness and supercooling capacity in the pea leafminer *Liriomyza huidobrensis*. *Cryo-Letters*, 2002, 23(3): 173–182.
- [27] Cole W E. Some risks and causes of mortality in mountain pine beetle populations: a long-term analysis. *Researches on Population Ecology*, 1981, 23(1): 116–144.
- [28] Amman G D. Population changes of the mountain pine beetle in relation to elevation. *Environmental Entomology*, 1973, 2(4): 541–546.
- [29] Hodkova M, Hodek I. Temperature regulation of supercooling and gut nucleation in relation to diapause of *Pyrrhocoris apterus* (L.) (Heteroptera). *Cryobiology*, 1997, 34(1): 70–79.

#### 参考文献:

- [5] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性的研究. *生态学报*, 2002, 22(12): 2202–2207.
- [9] 景晓红, 康乐. 光照与飞蝗卵耐寒性的关系. *动物学研究*, 2003, 24: 196–200.
- [13] 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.
- [18] 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.
- [19] 陈兵, 康乐. 昆虫对环境温度胁迫的适应与种群分化. *自然科学进展*, 2005, 15: 265–271.
- [20] 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] 陈择藩. 十五种松树对松突圆蚧抗性的初步研究. *森林病虫通讯*, 1988, (2): 1–2.
- [23] 童应华, 陈顺立, 张飞萍. 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.
- [24] 胡艳红, 陈顺立, 杨爱民. 松突圆蚧的发育起点温度与有效积温的测定. *福建林业科技*, 2004, 31(2): 9–11.