

气候变化对白蜡窄吉丁在中国不同地区的化性影响研究*

党英侨** 王小艺*** 宋学雨

(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】探究当前以及未来气候变暖条件下白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* 在中国各地区的世代发育特性, 明确该虫对不同地区气候条件的响应规律, 为其现有发生区和潜在分布区的精准监测与防控提供指导。【方法】基于白蜡窄吉丁天津种群的野外实际发育数据, 以及 2010-2020 年全国各地的累年日均温、日最高温和最低温数据, 采用双正弦模型估算当前以及未来温度升高 1.5 和 2 °C 情景下白蜡窄吉丁整个世代的有效积温。在该虫的化性进行预测的基础上, 进一步评估当前累年年均温、年均最高温和最低温与其化性之间的关系。【结果】(1) 以白蜡窄吉丁天津种群的实测数据为计算依据, 其整个世代众数种群所需的有效积温为 2 519.9 日·度。(2) 当前气候条件下, 白蜡窄吉丁在我国青海的年有效积温和化性最低, 分别为 1 109.89 日·度和 2 年 1 代; 在海南最高, 分别为 5 535.88 日·度和 1 年 2 代; 其他地区则均表现出随纬度降低而增加的趋势。白蜡窄吉丁在各省(自治区、直辖市)的化性与累年年均温、年均最高温和最低温之间均呈明显的线性相关关系, 并与昆虫自身的纬度和海拔分布存在负相关关系。(3) 未来温度升高 1.5 和 2 °C 情境下, 白蜡窄吉丁在我国各地区的年有效积温和化性均明显增加, 其中年有效积温介于 1 000-3 000 日·度的省(自治区、直辖市)数量均减少, 高于 3 000 日·度的均增加; 化性也呈类似的变化规律, 在我国中南部表现尤为明显。【结论】若白蜡窄吉丁扩散到我国中南部等未发生区, 则该虫很可能在当地建立种群并迅速发展。未来气候变暖条件下, 该虫在我国各地区的发生和危害风险将进一步增加。

关键词 白蜡窄吉丁; 全球变暖; 双正弦模型; 有效积温; 化性

The effects of climate change on voltinism of the emerald ash borer in different regions of China

DANG Ying-Qiao** WANG Xiao-Yi*** SONG Xue-Yu

(Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration;
Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract 【Aim】The generational characteristics of the emerald ash borer (EAB), *Agrilus planipennis*, were explored under current and future global warming scenarios in China to determine the responses of EAB to various climatic conditions across different provincial administrative districts. The findings of this study will provide guidance for effective monitoring and control of EAB in areas currently affected by EAB infestations and those at risk of future spread. 【Methods】Based on the developmental data of EAB in Tianjin, and the annual mean daily temperature, daily maximum, and minimum temperatures across China from 2010 to 2020, the double-sine-wave model was used to assess the effective accumulated temperature (EAT) throughout the entire lifecycle of EAB under current conditions, and 1.5 and 2 °C global warming scenarios. Additionally, we estimated the current correlations between EAB voltinism and the annual mean, maximum, and minimum temperatures after predicting the voltinism of the pest in different provincial administrative districts in China. 【Results】1) Using the Tianjin

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金面上项目 (31971666)

**第一作者 First author, E-mail: yqdang126@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xywang@caf.ac.cn

收稿日期 Received: 2023-04-07; 接受日期 Accepted: 2023-06-29

population as an example, the EAT of the entire EAB generation was estimated to be 2 519.9 degree·days. 2) Under current conditions, Qinghai Province recorded the lowest values for both EAT and voltinism, with 1 109.89 degree·days and one generation every two years, respectively. Conversely, Hainan Province recorded the highest EAT and voltinism values with 5 535.88 degree·days and two generations per year, respectively. Additionally, for the remaining 32 districts, EAT and voltinism increased with increasing latitude and altitude. There was a linear relationship between current voltinism of EAB and the three different annual temperatures. Additionally, there was a negative correlation between current voltinism and the latitudinal and altitudinal distributions of EAB. 3) Under 1.5 and 2 °C global warming scenarios, there was an increase in both the EAT and voltinism of EAB across China. When the EAT ranged between 1 000 and 3 000 degree·days, there was a decrease in the number of provincial administrative districts. However, an increase was observed when the EAT exceeded 3 000 degree·days. Similar changes in voltinism were observed, particularly in central and southern China. **[Conclusion]** If EAB spreads into its potential distribution areas such as central and southern China, its population will likely establish rapidly, and continued global warming will exacerbate the risks of its spread and damage.

Key words *Agrilus planipennis*; global warming; double-sine-wave model; effective accumulated temperature; voltinism

随着全球工业化不断发展,以气候变暖为主要特征的全球气候变化逐渐引起人类的广泛关注。2015 年,《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约方经过讨论一致通过《巴黎协定》,将全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2 °C 之内,并努力把升温控制在 1.5 °C 以内 (Iyakaremye *et al.*, 2021)。然而,IPCC (2022) 报告显示,1.5 °C 的全球升温仍将导致热浪增加、温暖季节延长、寒冷季节缩短。而在全球变暖 2 °C 的情况下,极端高温甚至将达到农业和健康的临界耐受阈值。因此,在农林业生产和发展过程中,气候变暖将导致害虫等多种有害生物的适生区拓宽、个体发育速率加快、年发生世代数增加等现象,农林业生产和人类生活或将遭受重大威胁。在此背景下,及早预测当前以及未来全球气候变暖条件下,农林业重要害虫在我国各地区的发生发展规律,评估其发生和危害风险,对于指导各地提前制定应对策略进行防控具有重要意义。

作为变温动物,昆虫的生长、发育、繁殖和扩散等一系列生命活动都受温度的影响。满足发育起点温度和有效积温是昆虫适应环境的重要基础。在理想的恒温条件下,昆虫的有效积温与发育起点温度呈较为稳定的关系,即有效积温是某一发育阶段内高于发育起点温度的环境温度累积 (有效积温法则) (Suppo *et al.*, 2020)。对于易饲养观察的昆虫,在室内设置相对稳定的温度条件,通过人为饲养,观察并记录其各阶段

或龄期所需的发育历期,可以计算其发育起点温度和有效积温。陈亚丽等 (2016) 和黄芊等 (2018) 设置恒温条件,采用直接回归法分别算出了榆黄毛萤叶甲 *Pyrrhalta maculicollis* 和劳氏粘虫 *Leucania loreyi* 的发育起点温度和有效积温。这一方法也同样被应用于自然变温条件下,其中环境温度一般取日平均温度。马玉辉等 (2018) 对室内自然变温环境中鼻胃蝇 *Gasterophilus nasalis* 的发育起点温度和有效积温进行了计算。封孝兰等 (2013) 采用回归法和加权法研究了短翅豆芎菁 *Epicauta aptera* 在自然变温下的发育起点温度和有效积温。

然而,用日均温作为当日温度计算发育起点温度和有效积温的方法虽然简单,但对于昼夜温差较大的地区则可能不准确。在自然条件下,环境温度通常处于持续的波动状态,因而上述 2 个指标的计算就变得比较复杂。Zalom 等 (1983) 基于每日最高温和最低温数据对自然条件下昆虫日度 (积温) 的计算方法进行了总结,由简单到复杂依次为平均法 (Averaging)、单三角形法 (Single triangulation)、双三角形法 (Double triangulation)、单正弦法 (Single sine) 和双正弦法 (Double sine) 5 种。在这些方法中,利用当日最高温和最低温构建正弦曲线进行计算逐渐成为常用的更加准确的方法 (李典谟和王莽莽, 1986; 咎庆安等, 2010; Elliott *et al.*, 2011; Suppo *et al.*, 2020)。

白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* 隶属于鞘翅

目 (Coleoptera) 吉丁甲科 (Buprestidae), 是我国本土一种危害木犀科 (Oleaceae) 白蜡属 (*Fraxinus*) 树木的蛀干害虫。20 世纪 60 年代起, 该虫先后在我国东北和华北地区暴发成灾; 2016 年以来, 白蜡窄吉丁在新疆、山东、内蒙古和山西等地被发现 (党英侨和王小艺, 2021; 刘义龙等, 2022)。目前, 该害虫已在我国北方 10 个省 (自治区、直辖市) 有分布记载, 成为白蜡树的重要害虫。研究发现, 白蜡窄吉丁对外界不利环境具有较强适应性。该虫未成熟阶段均在树体内生存, 受外界环境影响小 (Goebel *et al.*, 2010); 即使是暴露于寄主体外的成虫期, 也对高温高湿具有一定耐受性 (党英侨等, 2021)。此外, 尽管是冬季专性滞育昆虫, 但白蜡窄吉丁并不一定需要低温解除滞育 (Suppo *et al.*, 2020; Duan *et al.*, 2021), 表明白蜡窄吉丁自身具有很强的生存潜力, 即使在夏季和冬季温度均相对较高的中南部地区, 也可能正常生存和繁殖 (Dang *et al.*, 2021)。因此推测在全球气候变暖条件下, 该虫在我国各地区的发生和危害情况将变得更加严重。

基于此, 本研究在明确白蜡窄吉丁各发育阶段所需温度阈值和有效积温的基础上, 结合 2010-2020 年我国各省 (自治区、直辖市) 累年逐日气象数据, 以及全球气温升高 1.5 和 2 °C 情境下各省 (自治区、直辖市) 的累年逐日气象数据, 采用正弦法估算当前以及未来气候变化下白蜡窄吉丁在各省 (自治区、直辖市) 的年有效积温和化性。研究结果对于预测白蜡窄吉丁在气候变暖条件下的种群发展规律, 填补白蜡窄吉丁

发育生物学和生态学空白, 指导我国北部现有发生区的野外监测和各虫期的预判及精准防控, 以及中南部潜在发生区的及时有效监测具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

基于已发表文献中关于白蜡窄吉丁发育的研究数据, 获得白蜡窄吉丁各发育阶段的发育起点温度和上限温度 (表 1)。结合王小艺 (2005) 对白蜡窄吉丁在天津地区整个生活史 (幼虫期、预蛹期、蛹期、成虫期和卵期) 的观测数据, 估算各发育阶段的有效积温。上述样地实验年每日平均温度、最高温和最低温气象数据来自国家气象数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。我国 34 个省 (自治区、直辖市) (以行政中心城市为代表) 2010-2020 年累年逐日气温数据来自美国国家气候数据中心 (National Climatic Data Center, www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/integrated-surface-database); 各省 (自治区、直辖市) 2010-2020 年累年年平均气温 (累年年均温)、累年年均最高温和累年年均最低温数据均由 2010-2020 年累年逐日气温数据计算获得; 此外, 各省 (自治区、直辖市) 未来温度升高 1.5 和 2 °C 情境下的逐日平均温度、平均最高温和最低温数据分别由 2010-2020 年累年逐日气温数据增加 1.5 和 2 °C 计算获得。中国国界地图下载自自然资源部标准地图服务网站 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。

表 1 白蜡窄吉丁各发育阶段的发育起点温度和上限温度

Table 1 The developmental threshold temperature and upper temperature threshold for different developmental stages of *Agrilus planipennis*

发育阶段 Developmental stage	发育起点温度 (°C) Developmental threshold temperature (°C)	发育上限温度 (°C) Upper temperature threshold (°C)	参考文献 Reference
幼虫-预蛹 Larva-Prepupa	7	42	Dearborn <i>et al.</i> , 2020
蛹 Pupa	14.7	38	Lyons and Jones, 2005; Discua Duarte, 2013
成虫-卵 Adult-Egg	13.6	38	Lyons and Jones, 2005; Discua Duarte, 2013; 党英侨等, 2021
全世代 The whole generation	10	42	Poland <i>et al.</i> , 2011; Jones <i>et al.</i> , 2020

1.2 白蜡窄吉丁在野外变温条件下的有效积温

以 2004 年 6 月 11 日至 2005 年 6 月 10 日白蜡窄吉丁天津种群的实测数据为计算依据, 获得该虫不同发育阶段中发育进度为 10%-85% 的发育进度百分率及其对应日期, 再将百分比数据用生物统计机率值 (<https://www.renrendoc.com/paper/110193493.html>) 代替。以各发育日期为横坐标, 其相对应的机率值为纵坐标, 参考戴志一 (1980) 测定幼虫龄期的方法, 获得白蜡窄吉丁不同发育阶段的众数虫期。参考 Suppo 等 (2020) 和 Zalom 等 (1983) 运用双正弦法估算白蜡窄吉丁各发育阶段 (众数虫期) 所需的有效积温, 即

通过比较该虫各发育阶段中每日最高温和最低温值与其发育起点温度和发育上限温度之间的关系 (表 2), 计算每日有效积温, 各发育阶段中单日有效积温的累积即为该发育阶段总的有效积温。对于白蜡窄吉丁全世代的有效积温, 由于昆虫每个发育阶段都有其对应的温度阈值和积温要求, 并且昆虫发育不是线性的, 不同发育阶段之间可能存在相互依赖和影响, 而将所有虫态的有效积温加和可能会忽略这种复杂关系。因此, 本研究中白蜡窄吉丁全世代的有效积温同样根据全世代的发育起点温度、发育上限温度和发育历期等进行计算, 而非所有虫态有效积温的简单加和 (Li *et al.*, 2020)。

表 2 基于双正弦法计算昆虫的有效积温

Table 2 The effective accumulated temperature of *Agrilus planipennis* based on double-sine method

条件 Term	有效积温 (日·度) Effective accumulated temperature (degree·day)
$T_u < T_{\min} < T_{\max}$	$T_u - T_l$
$T_l < T_{\min} < T_u < T_{\max}$	$\frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_l \right) \left(\theta_2 + \frac{\pi}{2} \right) + (T_u - T_l) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) - [\alpha \cos(\theta_2)] \right\}$
$T_{\min} < T_l < T_u < T_{\max}$	$\frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_l \right) (\theta_2 - \theta_1) + (T_u - T_l) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) + \alpha [\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)] \right\}$
$T_{\min} < T_l < T_{\max} < T_u$	$\frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_l \right) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) + \alpha \cos(\theta_1) \right]$
$T_l < T_{\min} < T_{\max} < T_u$	$\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_l$
$T_{\min} < T_{\max} < T_l < T_u$	0

$T_{\max}$: 日最高温; $T_{\min}$: 日最低温; T_u : 发育上限温度; T_l : 发育起点温度; $\theta_1 = \sin^{-1} \left[\left(T_l - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right]$;

$\theta_2 = \sin^{-1} \left[\left(T_u - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right]$; $\alpha = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$ 。

$T_{\max}$: Daily maximum temperature; $T_{\min}$: Daily minimum temperature; T_u : Upper temperature threshold; T_l : Developmental threshold temperature; $\theta_1 = \sin^{-1} \left[\left(T_l - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right]$; $\theta_2 = \sin^{-1} \left[\left(T_u - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right]$; $\alpha = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$ 。

1.3 当前和未来温度升高 1.5 和 2 °C 情境下白蜡窄吉丁的年有效积温和化性

基于白蜡窄吉丁全世代的发育起点温度 (10 °C) 和发育上限温度 (42 °C), 结合全国各省 (自治区、直辖市) 2010-2020 年累年逐日温度 (日均温、日最高温和最低温) 数据, 采用双正弦法 (表 2) 估算白蜡窄吉丁在各地全年

积累的有效温度之和 (年有效积温)。各地年有效积温与天津种群全世代有效积温的比值即为白蜡窄吉丁在该地区的化性。未来温度升高 1.5 和 2 °C 情境下, 白蜡窄吉丁在我国各地区的年有效积温和化性的计算方法同上。

1.4 数据处理与分析

2010-2020 年以及未来温度升高 1.5 和 2 °C

情境下,白蜡窄吉丁在我国各地区的年有效积温和化性等值线图分别用 ArcGIS 10.8 进行绘制,使用反距离权重插值法 (Inverse distance weighting, IDW) 对上述数据分别进行插值分析,并使用 3D 分析工具中的 Contour 绘制等值线 (Shi *et al.*, 2012)。当前白蜡窄吉丁在我国各省 (自治区、直辖市) 的化性与其经度、纬度和海拔分布之间的关系分别用 JMP10.0 进行分析,选用标准最小二乘法进行模型构建。当前各地区的化性与 2010-2020 年累年年均温、年均最高温和最低温之间的关系分别用 Sigmapot 12.5 进行分

析,并用 Excel 2019 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 白蜡窄吉丁各发育阶段众数种群的有效积温

以 2004-2005 年天津的实测数据为例,得到白蜡窄吉丁完成整个生活史所需的有效积温为 2 519.9 日·度。白蜡窄吉丁各发育阶段的发育历期及所需有效积温见表 3,其中上述 2 项指标在幼虫-预蛹期相对最高,发育历期约占全世代发育历期的 82.19%,所需有效积温为 2 433.5 日·度。

表 3 白蜡窄吉丁各发育阶段的发育历期及有效积温
Table 3 The development time and effective accumulated temperature for different developmental stages of *Agrilus planipennis*

发育阶段 Developmental stage	发育起始日期 Start date for the development	发育完成日期 Finish date for the development	发育历期 (d) Development time (d)	有效积温 (日·度) Effective accumulated temperature (EAT) (degree·day)
全世代 The whole generation	2004.06.11	2005.06.10	365	2 519.9
幼虫-预蛹 Larva-Prepupa	2004.06.11	2005.04.6	300	2 433.5
蛹 Pupa	2005.04.7	2005.05.13	37	118.8
成虫-卵 Adult-Egg	2005.05.14	2005.06.10	28	247.3

2.2 当前白蜡窄吉丁在我国的年有效积温和化性

采用双正弦法估算结果如图 1 (A) 可知,白蜡窄吉丁在我国各省 (自治区、直辖市) 的年有效积温之间存在较大差异,其中介于 1 000-2 000 日·度的省 (自治区) 有 9 个,包括东三省、内蒙古以及西部的新疆、青海、甘肃、宁夏和西藏;介于 2 000-3 000 日·度的有 12 个,主要分布于我国华北中南部、华中北部、华东东北部和西南东部部分地区;介于 3 000-4 000 日·度的有 7 个,主要分布于华中中南部和华东中南部;高于 4 000 日·度的有 6 个,主要分布于华南地区。其中,青海年有效积温最低,为 1 109.89 日·度;海南年有效积温最高,为 5 535.88 日·度。

我国各省 (自治区、直辖市) 中白蜡窄吉丁的化性在不同纬度 ($df = 1,32$, $F = 62.2757$, $P < 0.001$) 和海拔分布 ($df = 1,32$, $F = 14.1209$, $P = 0.0007$) 之间均存在显著差异,而与经度则无明

显关系 ($df = 1,32$, $F = 2.0623$, $P = 0.1607$)。白蜡窄吉丁在海南的化性最高,约为 1 年 2 代;台湾、香港、广东、澳门和广西的化性次之,约为 1 年 1.5-2 代;湖南、江西和福建地区的化性约为 1 年 1-1.5 代;东北、内蒙古、西藏和西北部分地区的化性较低,约为 2 年 1 代或 3 年 2 代;其余华北、华中、华东和西南部分地区则主要为 1 年 1 代 (图 1: B)。白蜡窄吉丁在各省 (自治区、直辖市) 的化性与当地 2010-2020 年间累年年均温 ($df = 1,32$, $F = 189.8939$, $P < 0.001$)、年均最高温 ($df = 1,32$, $F = 240.9448$, $P < 0.0001$) 和最低温 ($df = 1,32$, $F = 90.6995$, $P < 0.0001$) 之间均呈明显的线性相关关系,各地区化性均随温度升高而呈逐渐上升趋势 (图 2)。

2.3 未来温度升高 1.5 和 2 °C 情境下白蜡窄吉丁在我国的年有效积温和化性

由图 3 (A) 和图 3 (C) 可知,未来温度升高 1.5 °C 情境下,白蜡窄吉丁在我国各省 (自治

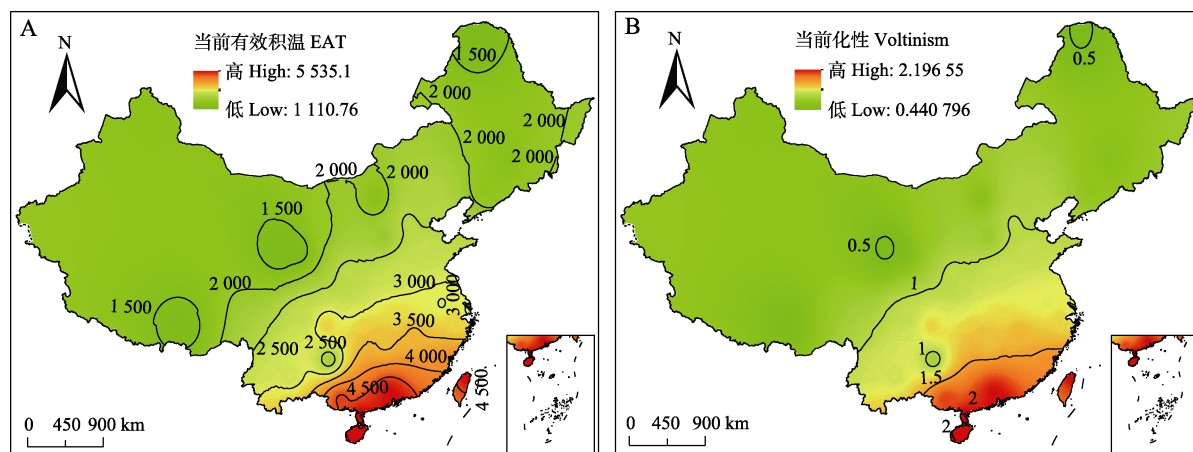


图 1 当前白蜡窄吉丁在我国的年有效积温和化性 [审图号: 京审字 (2024) G 第 1255 号]

Fig. 1 The effective accumulated temperature and voltinism of *Agrilus planipennis* in current conditions in China

A. 年有效积温; B. 化性。

A. Effective accumulated temperature (EAT); B. Voltinism.

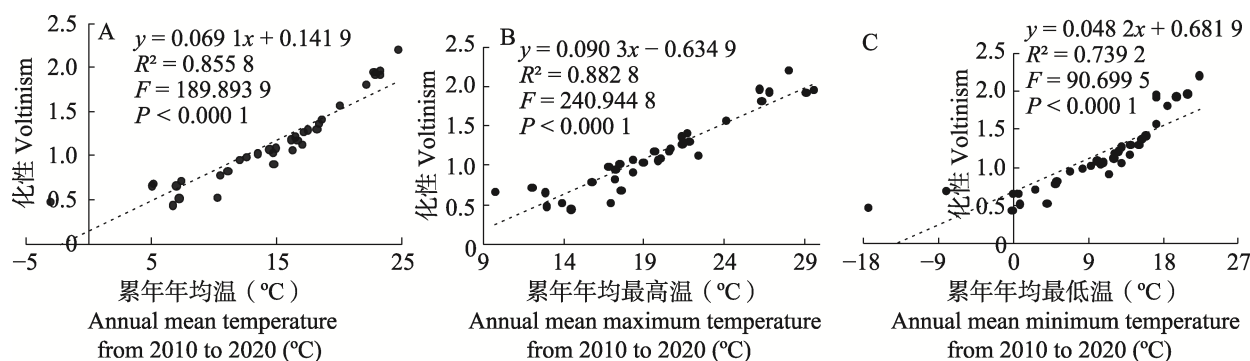


图 2 白蜡窄吉丁在我国的化性与各省 (自治区、直辖市) 累年温度之间的关系

Fig. 2 Relationships between voltinism of *Agrilus planipennis* and annual temperatures from 2010 to 2020 in different provinces (autonomous regions and municipalities) in China

A. 累年年均温; B. 累年年均最高温; C. 累年年均最低温。

A. Annual mean temperature from 2010 to 2020; B. Annual mean maximum temperature from 2010 to 2020; C. Annual mean minimum temperature from 2010 to 2020.

区、直辖市) 的年有效积温和化性均有所增加。其中年有效积温介于 1 000-2 000 日·度的省 (自治区) 有 7 个, 包括黑龙江、吉林、内蒙古, 以及西部的新疆、青海、甘肃和西藏; 介于 2 000-3 000 日·度的有 8 个, 主要分布于我国华北中南部, 以及辽宁、宁夏、陕西和贵州; 介于 3 000-4 000 日·度的有 11 个, 主要分布于华中、华东北部和西南中部地区; 高于 4 000 日·度有 8 个, 主要分布于华东南部和华南地区。温度升高 1.5 °C 时, 白蜡窄吉丁在海南、台湾、香港和澳门的化性最高, 约为 1 年 2 代; 云南、湖南、江

西、福建、广西和广东的化性次之, 为 1 年 1.5-2 代; 东北、内蒙古、西藏和西北部分地区的化性较低, 约为 2 年 1 代或 3 年 2 代; 其余华北、华中、华东和西南部分地区则为 1 年 1-1.5 代。

从图 3 (B) 和图 3 (D) 可以看出, 未来温度升高 2 °C 情境下, 白蜡窄吉丁在我国各地区的年有效积温和化性均明显增加。其中, 年有效积温介于 1 000-2 000 以及 2 000-3 000 日·度的省 (自治区、直辖市) 数量均有所减少, 总数仅为 13 个; 介于 3 000-4 000 以及 4 000 日·度以上的

则进一步增加, 共有 21 个。此外, 白蜡窄吉丁的化性在华东南部和华南地区最高, 为 1 年 2-2.5 代; 华中、华东北部和西南部分地区次之, 为 1

年 1.5-2 代; 东北北部、内蒙古、西藏和西北中部地区的化性较低, 约为 2 年 1 代或 1 年 1 代; 其余地区则为 1 年 1-1.5 代。

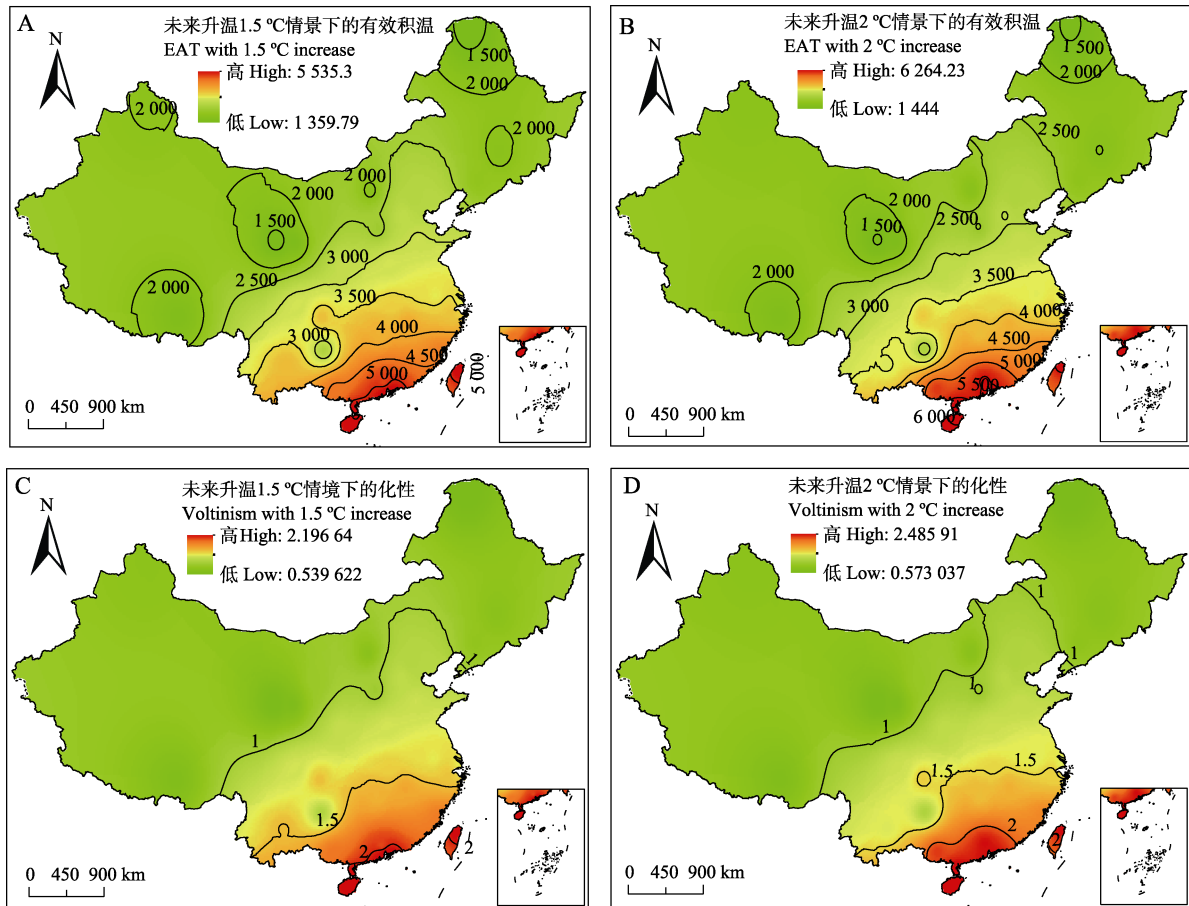


图 3 未来温度升高 1.5 和 2 °C 情境下白蜡窄吉丁在我国的年有效积温和化性

[审图号: 京审字 (2024) G 第 1255 号]

Fig. 3 The effective accumulated temperature and voltinism of *Agrilus planipennis* under 1.5 and 2 °C global warming scenarios in China

A. 未来温度升高 1.5 °C 情境下的有效积温; B. 未来温度升高 2 °C 情境下的有效积温;

C. 未来温度升高 1.5 °C 情境下的化性; D. 未来温度升高 2 °C 情境下的化性。

A. Effective accumulated temperature with 1.5 °C increase; B. Effective accumulated temperature with 2 °C increase;

C. Voltinism with 1.5 °C increase; D. Voltinism with 2 °C increase.

3 结论与讨论

温度是影响昆虫行为活动和生长发育的最直接因素, 满足一定的温度积累是昆虫完成相应阶段发育的重要基础。本研究基于我国各省 (自治区、直辖市) 的累年日均温、日最高温和最低温数据, 采用双正弦法获得当前及未来气候变化下白蜡窄吉丁在各地的年有效积温, 明确了该虫

在不同地区的年世代发生规律及其与地理位置、各地累年温度之间的相关性, 研究结果有助于确定昆虫发育、繁殖等种群动态, 掌握昆虫对温度变化的响应规律, 对指导各地区白蜡窄吉丁的监测及精准防控具有重要作用。

昆虫的发育起点温度与其所处虫态和龄期存在一定关联性, 不同发育阶段的昆虫所需发育起点温度不相同。如粘虫赤眼蜂 *Trichogramma*

leucaniae 幼虫和预蛹期发育起点温度较高, 而卵期和蛹期则相对较低 (张晨等, 2019)。云眼斑螳 *Creobroter nebulosa* 的 1 龄幼虫发育起点温度最低, 之后波动上升, 末龄时相对最高, 而该虫幼虫各个龄期的发育起点温度均低于卵期 (刘钦朋等, 2020)。本研究结果显示, 白蜡窄吉丁不同虫态所需发育起点温度同样存在差异, 具体表现为幼虫和预蛹阶段较低, 而蛹期、成虫期和卵期则相对较高。这可能与不同发育阶段所经历的外界气候条件不同有关, 是昆虫长期适应外界环境的结果。此外, 尽管白蜡窄吉丁以老熟幼虫状态于冬季进行专性滞育, 但与一些进入专性滞育后必须经历一定条件低温才能解除滞育的昆虫不同 (Fisher, 1997; Zhou *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2017; Hiroyoshi *et al.*, 2018), 作者经室内外研究发现, 该虫滞育解除的条件并不严格, 中高温同样可以促使至少约三分之一的个体解除滞育, 顺利发育至蛹和成虫。考虑到具有不同滞育解除特性的个体长期共存于同一环境中, 且外部形态特征并无差异 (另文发表), 其被意外携带而扩散至其他地区的可能性大致均等, 因而本研究在数据处理和分析时并未考虑滞育因素的影响。类似的, 象甲 *Ceratopion basicorne* (Smith and Park, 2022)、红壁蜂 *Osmia rufa* (Wasielewski *et al.*, 2011) 和蜜蜂 *Plebeia droryana* (Dos Santos *et al.*, 2016) 等也都具有与白蜡窄吉丁相类似的滞育特性。

尽管此前已有关于白蜡窄吉丁物候学特性的研究, 但其主要针对该虫成虫期进行, 且其中有效积温的计算方法并不适用于化性估算。如 Poland 等 (2011) 通过观察诱捕器内白蜡窄吉丁的诱集数量确定成虫的羽化期, 进而采用正弦模型确定该虫的羽化动态。该方法虽然较为简便, 但研究结果受限于诱捕器的质量和诱集效率, 观察到的羽化时间较成虫的实际羽化时间可能存在滞后性。Jones 等 (2020) 通过定期解剖观察, 确定了白蜡窄吉丁及其 2 种天敌昆虫的发育动态, 但后期对昆虫发育所需有效积温的计算则从实验当年 1 月 1 日起开始进行统计, 而非昆虫完成卵至成虫发育的起始时间。此外, 为确保研究

结果的准确性, 在本研究的预实验阶段, 作者分别采用日均温、日最高温及最低温计算了白蜡窄吉丁年有效积温, 发现基于日均温得到的年有效积温值相对较低, 而基于日最高温和最低温数据、运用正弦法得到的年有效积温和化性更符合当前白蜡窄吉丁在我国的发生规律。造成这一现象的原因可能是野外变温条件下, 白天和夜间的温度波动较大, 仅用日均温并不能准确反映当日所有高于昆虫发育起点温度的情况。即当日均温低于发育起点温度、但有数小时时段高于发育起点温度时, 此时昆虫实际上也会发育, 也会进行有效积温累积, 但若使用日均温计算有效积温, 则不会考虑这种情况, 而这恰恰是运用正弦法基于日最高温和最低温进行计算的优势所在。Elliott 等 (2011) 采用半日间隔下的正弦模型, 计算麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* 寄生蜂稀毛大眼金小蜂 *Macroglanes penetrans* 种群中不同比例个体羽化所需积温。基于日最高温、最低温等数据, Suppo 等 (2020) 构建双正弦模型计算了加拿大盒树蛾 *Cydalima perspectalis* 的累积生长日度, 并取得了较为准确的结果。

本研究中白蜡窄吉丁当前的化性数据结果显示, 若被意外传播到我国中南部等未发生区, 则该虫在我国自北向南的世代发生规律大致为 2 年 1 代、3 年 2 代、1 年 1 代、2 年 3 代和 1 年 2 代。即除青海、西藏和贵州等部分地区具有较为独特的小气候 (田睿等, 2021; 赵美亮等, 2021), 致使白蜡窄吉丁在这些地区发育较慢外, 其他地区均表现出化性随纬度和海拔降低而逐渐增加的趋势。目前, 山东青岛为白蜡窄吉丁在我国自然分布的最南端, 而在山东以南的河南、江苏、浙江、湖北、云南等地也有绒毛白蜡 *Fraxinus velutina*、洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica* 等易受白蜡窄吉丁危害的寄主分布 (Dang *et al.*, 2022)。结合本研究结果, 可以推测白蜡窄吉丁一旦传播到这些地区, 就很可能适应当地环境条件, 迅速建立种群。此外, 在全球气候变暖条件下, 白蜡窄吉丁在我国各地区的发生发展速度将明显加快, 其对各地区林业和园林绿化树木将构成严重威胁。

参考文献 (References)

- Chen YL, Shataer A, Yu F, Niyazi M, Ma JH, Kong WJ, Ma B, He B, 2016. Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Pyrrhalta maculicollis* (Mots.). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(1): 185–190. [陈亚丽, 阿地力·沙塔尔, 喻峰, 买合木提·尼亚孜, 马建红, 孔文军, 马斌, 贺斌, 2016. 榆黄毛萤叶甲的发育起点温度与有效积温的测定. 应用昆虫学报, 53(1): 185–190.]
- Cheng WN, Long ZR, Zhang YD, Liang TT, Zhu-Salzman K, 2017. Effects of temperature, soil moisture and photoperiod on diapause termination and post-diapause development of the wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *Journal of Insect Physiology*, 103: 78–85.
- Dai ZY, 1980. Methods for determining the stages of insect larvae. *Chinese Bulletin of Entomology*, 17(4): 185–187. [戴志一, 1980. 昆虫幼虫种群数龄期的测定法. 昆虫知识, 17(4): 185–188.]
- Dang YQ, Wang XY, 2021. Prediction of potential geographic distributions of *Agrilus planipennis* in China based on an improved method. *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1368–1375. [党英侨, 王小艺, 2021. 利用改进方法预测白蜡窄吉丁在国内的适生区. 环境昆虫学报, 43(6): 1368–1375.]
- Dang YQ, Wei K, Wang XY, Duan JJ, Jennings DE, Poland TM, 2022. Introduced plants induce outbreaks of a native pest and facilitate invasion in the plants' native range: Evidence from the emerald ash borer. *Journal of Ecology*, 110(3): 593–604.
- Dang YQ, Zhang YL, Wang XY, Wei K, Yang ZQ, 2021. Tolerability of emerald ash borer to high temperature and humidity. *Scientia Silvae Sinicae*, 57(3): 189–194. [党英侨, 张彦龙, 王小艺, 魏可, 杨忠岐, 2021. 白蜡窄吉丁对高温高湿的耐受性. 林业科学, 57(3): 189–194.]
- Dang YQ, Zhang YL, Wang XY, Xin B, Quinn NF, Duan JJ, 2021. Retrospective analysis of factors affecting the distribution of an invasive wood-boring insect using native range data: The importance of host plants. *Journal of Pest Science*, 94(3): 981–990.
- Dearborn KW, Smith SM, MacQuarrie CJK, Inward DJG, 2020. Emerald ash borer development rates and modelling for potentially invaded regions of Canada and Britain. https://www.bfw.gv.at/wp-content/uploads/Dearborn_EAB_Poster_updated_2.pdf.
- Discua Duarte SA, 2013. Characterizing prepupal diapause and adult emergence phenology of emerald ash borer. Master dissertation. Ohio: The Ohio State University.
- Dos Santos CF, Nunes-Silva P, Blochtein B, 2016. Temperature rise and its influence on the cessation of diapause in *Plebeia droryana*, a eusocial bee (Hymenoptera: Apidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 109(1): 29–34.
- Duan JJ, Schmude JM, Larson KM, 2021. Effects of low temperature exposure on diapause, development, and reproductive fitness of the emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae): Implications for voltinism and laboratory rearing. *Journal of Economic Entomology*, 114(1): 201–208.
- Elliott RH, Mann L, Olfert O, 2011. Calendar and degree-day requirements for emergence of adult *Macroglenes penetrans* (Kirby), an egg-larval parasitoid of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Crop Protection*, 30(4): 405–411.
- Feng XL, Hu ZQ, Liang ZJ, 2013. Observations of temperature effects on the development of *Epicauta aptera*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 483–487. [封孝兰, 胡周强, 梁正杰, 2013. 短翅豆芎菁生长发育的温度效应观测. 应用昆虫学报, 50(2): 483–487.]
- Fisher JR, 1997. Embryonic diapause in *Aulocara elliotti* and *Ageneotettix deorum* (Orthoptera: Acrididae): Low-temperature relationships. *Environmental Entomology*, 26(4): 906–911.
- Goebel PC, Bumgardner MS, Herms DA, Sabula A, 2010. Failure to phytosanitize ash firewood infested with emerald ash borer in a small dry kiln using ISPM-15 standards. *Journal of Economic Entomology*, 103(3): 597–602.
- Hiroyoshi S, Reddy GVP, Mitsuhashi J, 2018. Effects of photoperiod, temperature and aging on adult diapause termination and post-diapause development in female Asian comma butterflies, *Polygonia c-aureum* Linnaeus (Lepidoptera: Nymphalidae). *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 204(9/10): 849–858.
- Huang Q, Jiang XB, Ling Y, Jiang T, Long D, Chen YC, Fu CQ, Wu BQ, Huang SS, Li C, Huang FK, Long LP, 2018. Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Leucania loreyi* (Duponchel) (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 865–869. [黄芊, 蒋显斌, 凌炎, 蒋婷, 龙迪, 陈玉冲, 符诚强, 吴碧球, 黄所生, 李成, 黄凤宽, 龙丽萍, 2018. 劳氏粘虫发育起点温度和有效积温研究. 应用昆虫学报, 55(5): 865–869.]
- IPCC, 2022. Climate change widespread, rapid, and intensifying. <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>.
- Iyakaremye V, Zeng G, Zhang GW, 2021. Changes in extreme temperature events over Africa under 1.5 and 2.0 °C global warming scenarios. *International Journal of Climatology*, 41(2): 1506–1524.
- Jones MI, Gould JR, Mahon HJ, Fierke MK, 2020. Phenology of emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae) and its introduced larval parasitoids in the northeastern United States. *Journal of Economic Entomology*, 113(2): 622–632.
- Li DM, Wang MM, 1986. Research on rapid estimation of developmental threshold temperature and effective accumulated temperature. *Chinese Bulletin of Entomology*, 23(4): 184–187.

- [李典谟, 王莽莽, 1986. 快速估计发育起点及有效积温法的研究. 昆虫知识, 23(4): 184–187.]
- Li WB, Gao Y, Cui J, Shi SS, 2020. Effects of temperature on the development and fecundity of *Atractomorpha sinensis* (Orthoptera: Pyrgomorphidae). *Journal of Economic Entomology*, 113(5): 2530–2539.
- Liu QP, Yuan ZL, Luo L, 2020. Study on the developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Creobroter nebulosa*. *China Plant Protection*, 40(3): 32–36, 44. [刘钦朋, 袁忠林, 罗兰, 2020. 云斑蝗发育起点温度和有效积温的研究. 中国植保导刊, 40(3): 32–36, 44.]
- Liu YL, Wang P, Zhang XL, Si Q, Zhang Y, Wang SJ, 2022. Biological characteristics and control methods of emerald ash borer in Hohhot City. *Inner Mongolia Forestry*, 2022(1): 32–34. [刘义龙, 王平, 张晓蓓, 斯琴, 张颖, 王树娟, 2022. 呼和浩特市白蜡窄吉丁生物学特性及防治方法探讨. 内蒙古林业, 2022(1): 32–34.]
- Lyons DB, Jones GC, 2005. The biology and phenology of the emerald ash borer//Gottschalk KW (ed.). Proceedings, 16th U.S. Department of Agriculture Interagency Research Forum on Gypsy Moth and Other Invasive Species. 62–63.
- Ma YH, Liu SH, Li K, Li H, Yan XF, Ba Y, Li XL, Ren XY, Gao L, 2018. Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature under nature poikilothermia for pupae of *Gasterophilus nasalis*. *Chinese Journal of Preventive Veterinary Medicine*, 40(8): 687–691. [马玉辉, 刘善辉, 李凯, 李海, 阎晓菲, 巴音查汗, 李新龙, 任晓艺, 高利, 2018. 自然变温条件下鼻胃蝇蛹发育起点温度及有效积温研究. 中国预防兽医学报, 40(8): 687–691.]
- Poland TM, McCullough DG, Anulewicz AC, 2011. Evaluation of double-decker traps for emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae). *Journal of Economic Entomology*, 104(2): 517–531.
- Shi PJ, Wang B, Ayres MP, Ge F, Zhong L, Li BL, 2012. Influence of temperature on the northern distribution limits of *Scirpophaga incertulas* Walker (Lepidoptera: Pyralidae) in China. *Journal of Thermal Biology*, 37(2): 130–137.
- Smith L, Park I, 2022. Conditions to terminate reproductive diapause of a univoltine insect: *Ceratopion basicorne* (Coleoptera: Apionidae), a biological control agent of yellow starthistle. *Environmental Entomology*, 51(1): 71–76.
- Suppo C, Bras A, Robinet C, 2020. A temperature- and photoperiod-driven model reveals complex temporal population dynamics of the invasive box tree moth in Europe. *Ecological Modelling*, 432(1): 109229.
- Tian R, Huang XH, Zhou YZ, 2021. Analysis on limiting factors of woody plant distribution in high altitude area of Tibet Plateau under the background of global warming. *Journal of Hunan Ecological Science*, 8(3): 15–22. [田睿, 黄晓慧, 周尧治, 2021. 全球变暖背景下西藏高原高海拔地区木本植物分布限制因子分析. 湖南生态科学学报, 8(3): 15–22.]
- Wang XY, 2005. Biology of the emerald ash borer and its biological control. Postdoctoral research report. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [王小艺, 2005. 白蜡窄吉丁的生物学及其生物防治研究. 博士后出站报告. 北京: 中国林业科学研究院.]
- Wasielewski O, Wojciechowicz T, Giejdasz K, Krishnan N, 2011. Influence of methoprene and temperature on diapause termination in adult females of the over-wintering solitary bee, *Osmia rufa* L. *Journal of Insect Physiology*, 57(12): 1682–1688.
- Zalom FG, Goodell PB, Wilson LT, Barnett WW, Bentley WJ, 1983. Degree-days: The calculation and use of heat units in pest management. University of California Division of Agriculture and Natural Resources, leaflet, 21373.
- Zan QA, Chen B, Sun YX, Chen HR, Li ZY, 2010. Evaluation the cumulative temperature of insect using the sine wave model. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 25(4): 476–482, 499. [咎庆安, 陈斌, 孙跃先, 陈海如, 李正跃, 2010. 利用正弦模型估算昆虫发育的有效积温. 云南农业大学学报, 25(4): 476–482, 499.]
- Zhang C, An SB, Hou YY, Li TH, Zang LS, 2019. Studies on developmental threshold temperature and thermal constant of *Trichogramma leucaniae* reared on *Antheraea pernyi* eggs. *Journal of Environmental Entomology*, 41(2): 283–287. [张晨, 安仕博, 侯洋阳, 李天昊, 臧连生, 2019. 柞蚕卵为繁育寄主的黏虫赤眼蜂发育起点温度和有效积温研究. 环境昆虫学报, 41(2): 283–287.]
- Zhao ML, Cao GC, Cao SK, Liu FG, Yuan J, Zhang Z, Diao EL, Fu JX, 2021. Spatial-temporal variation characteristics of land surface temperature in Qinghai Province from 1980 to 2017. *Arid Zone Research*, 38(1): 178–187. [赵美亮, 曹广超, 曹生奎, 刘富刚, 袁杰, 张卓, 刁二龙, 付建新, 2021. 1980–2017 年青海省地表温度时空变化特征. 干旱区研究, 38(1): 178–187.]
- Zhou XR, Gao JC, Pang BP, 2016. Effects of temperature on the termination of egg diapause and post-diapause embryonic development of *Galeruca daurica* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Entomology*, 45(4): 1076–1080.