

柑橘大实蝇物候对气候变暖的响应

蔡普默^{1,2}, 赵梦婷¹, 宋蕴哲¹, 张华猛^{1,3}, 孟李涛¹, 林嘉², 聂传朋¹, 李焰焰¹, 季清娥^{2*}

¹武夷学院茶与食品学院园艺系, 福建武夷山 354300; ²福建农林大学作物病虫生物防治研究所/生物农药与化学教育部重点实验室/闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福建福州 350002; ³南京农业大学昆虫分子生态与进化实验室, 江苏南京 210000

摘要:【目的】明确实蝇对气候变暖的响应特征, 研究未来气候变化背景下柑橘大实蝇的灾变规律及防控措施优化。【方法】以湖北省宜昌市为例, 收集该地区柑橘大实蝇历年的物候数据与同期温度数据, 通过线性回归模型分析成虫羽化始期、羽化高峰期、羽化结束期、产卵始期、产卵高峰期和产卵结束期的年际变化情况和与温度升高的关系。【结果】1981—2020年, 宜昌市年均温和四季均温均有不同程度的上升, 春季均温升温最为显著。近20年间, 柑橘大实蝇在宜昌市呈羽化发生提前且产卵有害延迟的态势, 且羽化和产卵历期呈缩短的态势。若宜昌市年均温提升1℃, 柑橘大实蝇羽化始期和高峰期分别延迟0.4746和1.026 d, 羽化结束期提前0.0227 d, 总体呈羽化延迟且缩短趋势; 产卵始期提前4.286 d, 高峰期和结束期分别延迟1.173和1.081 d, 总体呈产卵提前且延长趋势。【结论】气候变暖对宜昌市柑橘大实蝇的羽化和产卵产生一定的影响, 对未来气候变化背景下柑橘大实蝇的灾变规律及防控措施的优化具有重要意义。

关键词: 柑橘大实蝇; 物候; 温度升高; 羽化; 产卵



开放科学标识码
(OSID 码)

Response of *Bactrocera minax*'s phenology to climate warming

CAI Pumo^{1,2}, ZHAO Mengting¹, SONG Yunzhe¹, ZHANG Huameng^{1,3}, MENG Litao¹, LIN Jia², NIE Chuanpeng¹, LI Yanyan¹, JI Qing'e^{2*}

¹Department of Horticulture, College of Tea and Food Science, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China;

²Biological Control Research Institute, Fujian Agriculture and Forestry University/Key Laboratory of Biopesticide and Chemical Biology, Ministry of Education/State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Fuzhou, Fujian 350002, China; ³Lab of Insect Molecular Ecology and Evolution, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210000, China

Abstract: 【Aim】 Due to their short life cycle and rapid reproduction, the development, survival, and distribution of insects will be significantly affected by global warming. 【Method】 Taking Yichang City, Hubei Province as a case, data on the occurrence of the tephritid fly *Bactrocera minax* as well as local temperature over 20 years were collected and analyzed. The annual changes in the beginning, peak, end of adult emergence and oviposition, and their relationship with increasing temperature were analyzed by linear regression to clarify the phenological response of *B. minax* to climate warming. 【Result】 From 1981 to 2020, the annual and four-season average temperatures in Yichang increased but at different levels, the biggest increase being in the average spring temperature. In the last 20 years, the emergence of *B. minax* in Yichang occurred early, the egg laying was delayed, and the emergence and oviposition duration was shortened. In the scenario of the annual average temperature increase by 1℃, the beginning and peak of the emergence of *B. minax* were delayed by 0.4746 days and 1.026 days, respectively. The end of the emergence was 0.0227 days earlier. Overall, the period of emergence started later but was shortened. The oviposition duration was advanced and prolonged; it started 4.3 days earlier, peaked 1.2 days later and ended 1.1 days later as well. 【Conclusion】 This study demonstrated that climate warming

收稿日期(Received): 2021-10-02 接受日期(Accepted): 2021-12-29

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2022J011198); 福建省自然科学基金青年项目(2020J05216); 福建省一流专业(园艺)(SJZY2020002); 福建省大学生创新创业项目(S202110397033, S202210397072); 贵州省教育厅特色领域项目(黔教合KY字[2019]078); 武夷学院服务产业专项(2021XJFWCY01)

作者简介: 蔡普默, 男, 副教授。研究方向: 害虫防治。E-mail: caipumo@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 季清娥, E-mail: jiqing@yeah.net

exerted the certain impacts on the emergence and oviposition of citrus fruit fly in Yichang, which is of great significance to clarify the occurrence regularity of this fly pest and optimize the control measures under climate change in the future.

Key words: *Bactrocera minax*; phenology; temperature increasing; emergence; oviposition

全球气候变化是近年来备受关注的热点问题之一,政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)最新报告预估未来20年全球平均温度升高将达到或超过1.5℃(IPCC, 2021)。昆虫作为生物多样性重要的组成部分,对全球气候变暖的响应极为敏感,环境温度的改变必然会影响其生长发育、生存繁殖和扩散分布等生命活动(陈瑜和马春森, 2010; 董兆克和戈峰, 2011; 戈峰, 2011; 张鹤和林进添, 2015)。研究表明,气候变暖会加速昆虫各虫态的发育,使得其物候期如始见期、迁飞期和种群高峰期提前,如蝴蝶(Forster & Shapiro, 2003)、蜻蜓(Dingemanse & Kalkman, 2008)、蚜虫(Wu *et al.*, 2020)等。但也有例外, Gordo & Sanz (2005)发现橄榄实蝇 *Bactrocera oleae* Gmelin 的羽化始期于1975年前呈推迟趋势,而后则提前发生,但50年间该害虫羽化始期总体上提前,西方蜜蜂 *Apis mellifera* L. 和菜粉蝶 *Pieris rapae* L. 的始见期也表现出相同的气候变化响应模式。

柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* Enderlein 属双翅目Diptera实蝇科Tephritidae离腹寡毛实蝇属 *Bactrocera* (陈世骧和谢蕴贞, 1955), 是我国重要的对外检疫对象之一(黄秀琴等, 2012)。柑橘大实蝇是柑橘类的一种重要害虫,在我国一年仅发生一代,主要以雌虫产卵于果实内,幼虫孵化后钻蛀取食,使果实完全丧失经济价值和食用价值(汪兴鉴和罗禄怡, 1995)。在我国,柑橘大实蝇主要分布于湖北、湖南、四川、贵州、重庆等省(市)(李杖黎等, 2012),其中,湖北省宜昌市是危害重灾区(杨文寿等, 2013)。在宜昌市,柑橘大实蝇主要以蛹在橘园土壤中越冬,通常在翌年5月上旬开始羽化,羽化成虫以晨露或蜜源为食发育至性成熟,5月中旬达羽化高峰期,6月上旬至中旬为其成虫交配和产卵期(张小亚, 2007)。

揭示以温度升高为主要特征的气候变暖对昆虫物候影响的生态学机制,不仅在理论上可阐明昆虫对全球气候变化响应的一般规律,而且在生产应用中可预测害虫未来的发生趋势,提高预测预报的准确性和害虫防治决策的科学性。本研究以柑橘大实蝇物候记录较为丰富的地区——湖北省宜昌

市为研究区域,通过20余年(1997—2020年)柑橘大实蝇的物候记录数据和同期气象数据,分析成虫田间羽化和产卵的年际变化情况、发生地区温度变化情况及其二者的关系,旨在阐明湖北宜昌地区柑橘大实蝇田间物候对气候变暖的响应特征,为探讨柑橘大实蝇对气候变化的响应与适应、优化气候变化情境下的防控方案提供参考。

1 材料与方法

1.1 实蝇发生数据收集与处理

本研究中的柑橘大实蝇物候数据和发生数据均来源于中国知网数据库的文献记录。检索时,以物种拉丁学名或中文名为主检索词,如柑橘大实蝇、橘大实蝇、柑桔大实蝇、桔大实蝇、橘大果实蝇、桔大果实蝇、*Bactrocera minax* 等,再分别结合其他检索词如种群动态、田间动态、发生和高峰等。多次使用以上检索词的不同组合进行检索,摘录出所需数据,建立数据库。本研究所涉及的实蝇生活史特征参数如下:以田间首次观察到成虫羽化的日期为羽化始期;以田间观测到成虫羽化量达到最大值的日期为羽化高峰期;以田间观测到最后一头成虫羽化的日期为羽化结束期;以首次观察到产卵行为的日期为产卵始期;以观察到产卵行为次数达最大值的日期为产卵高峰期;以最后一次观测到成虫产卵的日期为产卵结束期。

在量化实蝇物候指标时,注意数据的标准化,文献中一些较为模糊的时间概念,如7月下旬、8月中旬等,以取中间值的方式将模糊的时间量化。如:上旬为每月前10 d,取5日;中旬为每月11—20日,取15日;下旬为每月最后10或9 d,取25日。若时间跨度较广取中间值,如4月20日—5月6日,取中间值4月28日。部分文献中记录了同一地区不同观测点柑橘大实蝇的物候数据,则取这些数据的均值作为该地区的观测值。本研究将柑橘大实蝇物候数据量化为数字,以发生时间与当年1月1日之间相差的天数表示。如2017年记录的柑橘大实蝇羽化高峰期为5月17日(王前涛等, 2018),该日期与当年1月1日之间相差的天数为136 d,则2017年宜昌市柑橘大实蝇的羽化高峰期以136表示。

1.2 数据处理与分析

本文所有的气象数据均来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 数据集为中国国际交换站地面气候标准值月值数据集及年值数据集。利用一元线性拟合方法, 建立一元回归模型, 分析湖北宜昌市 40 年 (1981—2020 年) 年平均温及不同季节平均温度的变化趋势, 计算相关系数和温度变化速率。同样地, 分析柑橘大实蝇成虫羽化始期、羽化高峰期、羽化结束期、产卵始期、产卵高峰期和产卵结束期随着年际推移或年均温升高的变化趋势。其中, 回归系数为负值表明物候期在年际间或随着年均温升高有提前趋势, 若为正值则说明有延迟趋势; 回归关系显著 ($P < 0.05$) 说明提前或延迟趋势显著, 反之则表示趋势不显著。最后, 通过 Pearson 相关函数分析柑橘大实蝇物候期对不同季节均温的响应特征。所有数据分析使用 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 柑橘大实蝇物候记录的文献收集

截至 2021 年 8 月, 在中国知网数据库中共找到 134 篇与柑橘大实蝇物候记录相关的文献, 涉及

四川、重庆、贵州、云南、湖北、湖南、陕西、浙江、广东、广西 10 个省(市、自治区)。其中, 关于湖北省柑橘大实蝇发生的文献最多, 且主要集中在宜昌市, 有 39 篇, 共提取出 115 条有关宜昌市柑橘大实蝇物候发生的有效数据。

2.2 湖北宜昌市温度变化特征与趋势

1981 年以来, 湖北宜昌市年均温、春季均温、夏季均温、秋季均温及冬季均温均呈不同程度地上升趋势(图 1)。其中, 湖北宜昌市春季均温升温趋势最显著, 升温速率达 $(0.0243 \pm 0.0117) \text{ } ^\circ\text{C}$ ($F_{1,38} = 4.351, P = 0.044, Y = 0.02431X - 31.64, R^2 = 0.1027$)。而年均温及夏季、秋季和冬季均温有升温趋势, 但是不显著, 年增温速率分别为 (0.0095 ± 0.0117) 、 (0.0056 ± 0.0112) 、 (0.0034 ± 0.0111) 、 $(0.0083 \pm 0.0120) \text{ } ^\circ\text{C}$ (全年: $F_{1,38} = 1.804, P = 0.187, Y = 0.009487X - 1.954, R^2 = 0.04533$; 夏季: $F_{1,38} = 0.250, P = 0.620, Y = 0.005632X + 15.52, R^2 = 0.006534$; 秋季: $F_{1,38} = 0.946, P = 0.760, Y = 0.003421X + 11.11, R^2 = 0.002484$; 冬季: $F_{1,38} = 0.474, P = 0.492, Y = 0.008255X - 10.09, R^2 = 0.002484$)。

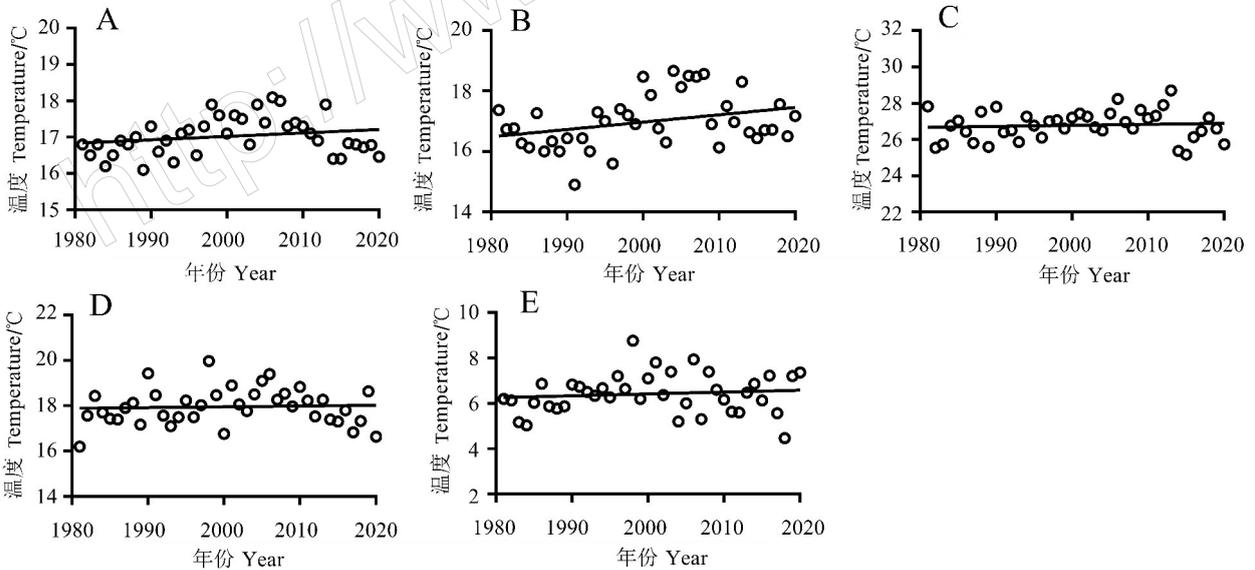


图 1 近 40 年湖北省宜昌市季节均温和年均温的变化特征

Fig.1 Variation of seasonal and annual mean temperature in Yichang City, Hubei Province at recent 4 decades

A: 全年; B: 春季; C: 夏季; D: 秋季; E: 冬季。

A: Annual; B: Spring; C: Summer; D: Autumn; E: Winter.

2.3 柑橘大实蝇成虫田间物候年变化趋势

通过汇总历年的柑橘大实蝇成虫田间物候数据, 发现 1997—2020 年, 湖北宜昌市柑橘大实蝇的年平均羽化始期为 5 月 9 日, 年平均羽化高峰期为

5 月 16 日, 年平均羽化结束期为 5 月 28 日。对柑橘大实蝇成虫羽化始期、羽化高峰期和羽化结束期与对应的年份进行线性回归分析(图 2), 发现该地区柑橘大实蝇羽化始期和羽化结束期与年份皆呈

负回归关系,说明近 20 余年柑橘大实蝇羽化始期在湖北宜昌市平均每年提前(0.1235±0.2066) d,但未达显著水平($F_{1,22}=0.357, P=0.556, Y=-0.1235X+377.1, R^2=0.01597$),而羽化结束期则显著提前,平均每年提前(0.3269±0.1572) d ($F_{1,22}=6.325, P=0.031, Y=-0.3269X+805, R^2=0.1854$)。此外,柑橘大实蝇成虫羽化高峰期在湖北宜昌市发生延迟,但不显著($F_{1,22}=0.136, P=0.716, Y=0.06304X+9.836, R^2=0.006144$),平均每年延迟(0.063±0.171) d。

1997—2018 年,柑橘大实蝇在湖北宜昌市年平均产卵始期为 6 月 13 日,年平均产卵高峰期为 6

月 23 日,年平均产卵结束期为 7 月 1 日。由图 3 可知,该地区柑橘大实蝇产卵始期和年份呈正回归关系,说明近 20 余年柑橘大实蝇产卵始期在湖北宜昌市平均每年延迟(0.3715±0.4649) d,但未达显著水平($F_{1,12}=0.639, P=0.439, Y=0.3715X-583, R^2=0.05052$)。而柑橘大实蝇成虫产卵高峰期和结束期在湖北宜昌市提前,但均未达到显著水平(高峰期: $F_{1,8}=0.136, P=0.716, Y=-0.3566X+886.8, R^2=0.07723$;结束期: $F_{1,8}=0.002, P=0.963, Y=-0.04448X+281.2, R^2=0.0002878$),平均每年分别提前(0.357±0.4358)和(0.044±0.927) d。

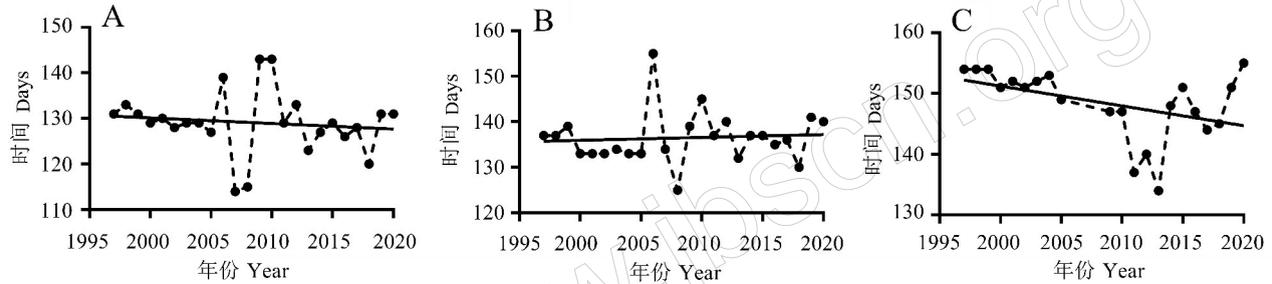


图 2 柑橘大实蝇田间羽化情况的年际变化

Fig.2 Inter-annual changes of emergence of *B. minax* in field

A: 羽化始期; B: 羽化高峰期; C: 羽化结束期。

A: The beginning of emergence; B: The peak of emergence; C: The end of emergence.

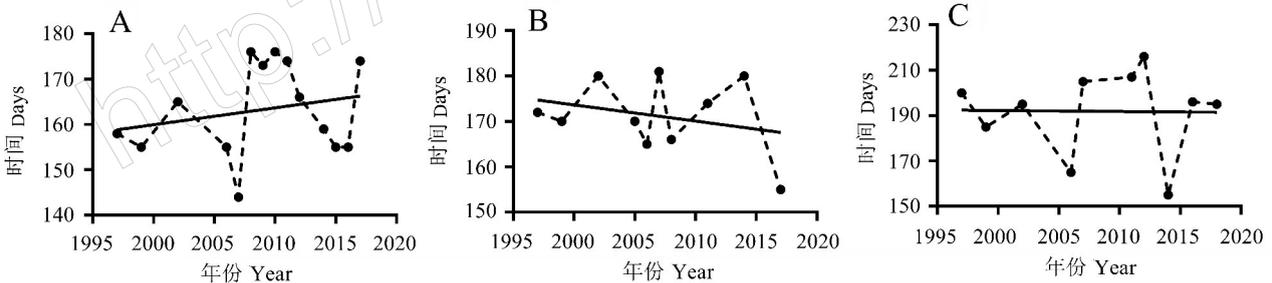


图 3 柑橘大实蝇田间产卵情况的年际变化

Fig.3 Inter-annual changes of oviposition of *B. minax* in field

A: 产卵始期; B: 产卵高峰期; C: 产卵结束期。

A: The beginning of oviposition; B: The peak of oviposition; C: The end of oviposition.

2.4 柑橘大实蝇成虫田间物候对气候变暖的响应

2.4.1 柑橘大实蝇田间物候对年均温的响应特征

对湖北省宜昌市柑橘大实蝇成虫羽化指标和对应年份的年平均温度进行回归分析,发现该地区柑橘大实蝇羽化始期和高峰期与年均温皆呈正回归关系,说明柑橘大实蝇羽化始期和羽化高峰期皆随年均温提升呈延迟的趋势,但延迟趋势未达显著水平(羽化始期: $F_{1,22}=0.028, P=0.868, Y=0.4746X+120.9, R^2=0.001276$;羽化高峰期: $F_{1,22}=0.195, P=$

0.663, $Y=1.024X+118.8, R^2=0.008777$,图 4A、B)。此外,柑橘大实蝇羽化结束期与年均温呈负回归关系,表示随着年均温增加,柑橘大实蝇在湖北宜昌市的羽化结束期呈提前趋势,但提前趋势未达显著水平($F_{1,19}=0.006, P=0.993, Y=-0.02269X+148.8, R^2=0.00376$,图 4C)。若湖北宜昌市年均温提高 1℃,当地柑橘大实蝇羽化始期延迟 0.4746 d,羽化高峰期推迟 1.024 d,羽化结束期提前 0.0227 d。

由图 5 可知,柑橘大实蝇产卵始期和年均温呈

负回归关系,即柑橘大实蝇产卵始期在湖北宜昌市随年均温提高呈提前的趋势,但该趋势未达显著水平($F_{1,12} = 0.590, P = 0.457, Y = -4.286X + 237, R^2 = 0.04687$)。随年均温提高,柑橘大实蝇产卵高峰期和结束期皆呈正回归关系,即湖北宜昌市柑橘大实蝇产卵高峰和结束期表现出延迟趋势,但趋势不显

著(产卵高峰期: $F_{1,8} = 0.044, P = 0.839, Y = 1.173X + 151, R^2 = 0.005465$;产卵结束期: $F_{1,8} = 0.008, P = 0.930, Y = 1.081X + 173.2, R^2 = 0.001018$)。若湖北宜昌市年均温提高 1 °C,当地柑橘大实蝇成虫产卵始期提前 4.286 d,产卵高峰期延迟 1.173 d,产卵结束期延迟 1.081 d。

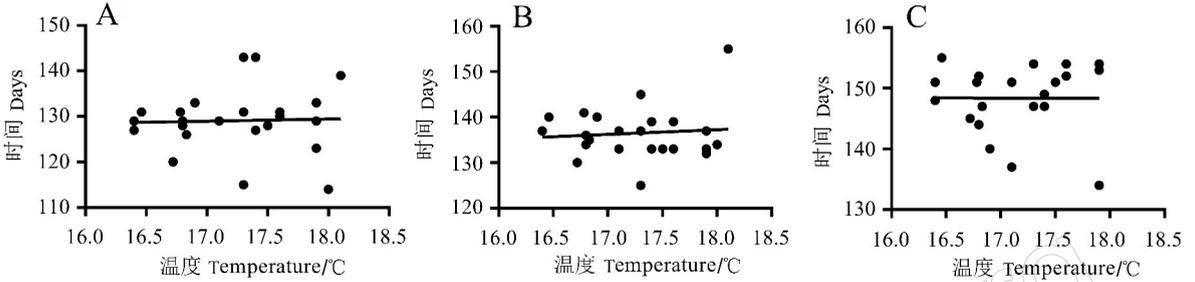


图 4 柑橘大实蝇田间羽化随年均温提升的变化

Fig.4 Changes of emergence of *B. minax* as the increased annual average temperature in the field

A:羽化始期;B:羽化高峰期;C:羽化结束期。

A: The beginning of emergence; B: The peak of emergence; C: The end of emergence.

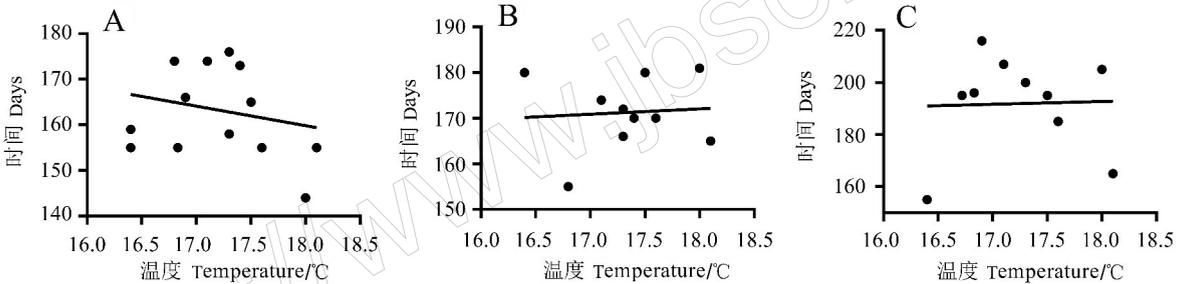


图 5 柑橘大实蝇田间产卵随年均温提升的变化

Fig.5 Changes of oviposition of *B. minax* as the increased annual average temperature in the field

A:产卵始期;B:产卵高峰期;C:产卵结束期。

A: The beginning of oviposition; B: The peak of oviposition; C: The end of oviposition.

2.4.2 柑橘大实蝇田间物候对季节均温的响应特征 由表 1 可知,通过 Pearson 相关函数分析近 20 年柑橘大实蝇对不同季节平均温度的响应特征,发现柑橘大实蝇羽化始期在湖北宜昌市与春季均温呈显著负相关($P = 0.039$),羽化高峰期与四季均温

未发现显著相关性,羽化结束期与冬季均温显著负相关($P = 0.044$)。此外,柑橘大实蝇产卵始期和高峰期在湖北宜昌市与四季均温无显著相关性,仅产卵结束期与冬季均温呈显著负相关($P = 0.046$)。

表 1 柑橘大实蝇物候指标与年均温和不同季节均温的相关系数

Table 1 The coefficients between the phenological parameters of *B. minax* and annual and seasonal mean temperatures

发育历期 Development duration	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Whole year
羽化始期 Beginning of emergence	-0.4227*	0.1769	0.1891	0.2741	0.0357
羽化高峰期 Peak of emergence	-0.2575	0.1420	0.2219	0.2316	0.0937
羽化结束期 End of emergence	-0.1131	0.4438	0.1168	-0.5207*	-0.0019
产卵始期 Beginning of oviposition	-0.2215	0.2288	-0.0547	-0.0530	-0.2165
产卵高峰期 Peak of oviposition	-0.0565	-0.2731	0.0816	-0.1731	0.0739
产卵结束期 End of oviposition	0.0249	0.3819	-0.2448	-0.5996*	0.0319

*表示在 $P < 0.05$ 水平下显著相关(皮尔逊相关分析)。

* indicated that the significantly correlated at the level of $P < 0.05$ (Pearson correlation analysis).

3 讨论

年均温显著升高是气候变暖最明显的特征之一(Gomi *et al.*, 2010)。大多数害虫受到气候变暖的影响,生长发育速率加快,羽化和首次飞行时间提前,进而危害期提前,且每年繁育的昆虫代数增多,加重了有害生物的发生强度和频率,使得害虫防治难上加难(唐继洪, 2011; 张翠英等, 2008; Braune *et al.*, 2008; Trnka *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2020)。

本研究基于文献记载的柑橘大实蝇历年田间物候数据,发现 1997—2020 年,柑橘大实蝇在湖北宜昌市的羽化呈提前且产卵呈延迟的态势,而其羽化和产卵都呈缩短的态势。此外,本研究发现,随着年均温升高,柑橘大实蝇在湖北宜昌市总体上羽化延迟且缩短,产卵危害提前且延长。除了年均温对柑橘大实蝇物候期产生影响之外,季节均温也对其产生影响。研究表明,阿波罗绢蝶 *Parnassius apollo* L. 种群数量与冬季和春季均温存在显著的负相关关系,冬季越冬温度和春季孵化温度是影响该蝴蝶数量的重要气候因素(于非等, 2012)。本研究也发现,柑橘大实蝇羽化始期与春季均温呈显著负相关,羽化结束期与冬季均温显著负相关,而产卵结束期与冬季均温呈显著负相关。通常,柑橘大实蝇在 11—12 月至翌年 4—5 月以滞育蛹在土壤中越冬,越冬蛹在 6℃ 以下经过约 30 d 后,才能解除滞育羽化为成虫。地温达 19℃ 以上开始羽化(李红丽等, 2014)。冬季均温和翌年春季均温的提升使得土壤温度更快达到柑橘大实蝇蛹解除滞育所需的温度要求,影响实蝇的羽化情况。因此,冬季均温和春季均温是影响柑橘大实蝇在湖北宜昌市发生和危害的关键气候因素。全球气候变暖的特征除年均温和季节均温提升之外,还有最高温升高、日温度积累、昼夜温差变化、CO₂ 浓度升高、O₃ 浓度提升等因素(陈瑜和马春森, 2010; 戈峰, 2011), 而本研究仅考虑柑橘大实蝇对年均温和季节均温的响应。因此,未来需要综合分析多个环境气候因素对柑橘大实蝇的影响,才能准确掌握未来全球气候变化下柑橘大实蝇灾变规律及对其发生提出精准预警。

本研究基于文献中的柑橘大实蝇发生数据和同期气候数据的回归模型分析,对研究气候变暖对柑橘大实蝇的长期效应有一定的参考价值。然而,

研究仍存在一定的局限性,如某些历史文献提供的时间信息较模糊,时间的量化具有不确定性等。国内缺乏长期监测柑橘大实蝇发生的数据,只能通过检索文献数据库来获取信息。在不同的研究论文中,柑橘大实蝇田间物候调查的方法不同造成的系统误差较大、数据质量欠佳,如赵巍巍等(2020)将柑橘大实蝇蛹预埋在柑橘园土壤中,观察其羽化出土的时期;而李杖黎等(2012)则是通过在监测点悬挂装有蛋白饵剂的引诱装置监测柑橘大实蝇的发生情况。全球气候变暖对柑橘大实蝇的影响是长期的生态效应,除能改变其物候期之外,还可能扩大其地理分布区,增加向两极或高海拔扩散的机会,协助其向新领地入侵定殖、扩大寄主范围等(陈瑜和马春森, 2010; 戈峰, 2011; 张鹤和林进添, 2015; 张花龙等, 2015; Raza *et al.*, 2015), 这些都是在全球气候变暖背景下防控柑橘大实蝇所必须考虑的,需进一步深入研究。

致谢:衷心感谢福建农林大学闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室黄晓磊教授指导收集气候数据。

参考文献

- 陈世骧, 谢蕴贞, 1955. 关于桔大实蝇的学名及其种征. 昆虫学报, 5(1): 123-126.
- 陈瑜, 马春森, 2010. 气候变暖对昆虫影响研究进展. 生态学报, 30(8): 2159-2172.
- 董兆克, 戈峰, 2011. 温度升高对昆虫发生发展的影响. 应用昆虫学报, 48(5): 1141-1148.
- 戈峰, 2011. 应对全球气候变化的昆虫学研究. 应用昆虫学报, 48(5): 1117-1122.
- 黄秀琴, 李正跃, 李传仁, BOITEAU G, 桂连友, 2012. 柑橘大实蝇成虫的翅载和额外负载能力. 昆虫学报, 55(5): 606-611.
- 李红丽, 田明华, 杨邦贵, 向玉蓉, 陈芳莉, 2014. 应用行为学防治柑橘大实蝇技术分析. 植物医生, 27(5): 9-11.
- 李杖黎, 李涛, 石章红, 陈政, 张宏宇, 2012. 柑橘大实蝇成虫的时空分布与产卵规律. 华中农业大学学报, 31(5): 609-612.
- 唐继洪, 2001. 我国草地螟对气候变暖的响应. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.
- 汪兴鉴, 罗禄怡, 1995. 桔大实蝇的研究进展. 昆虫知识, 32(5): 310-315.
- 王前涛, 胡光灿, 杨家祥, 2018. 宜昌市 2017 年柑橘大实蝇

- 发生特点与对策建议. 湖北植保 (2): 45-47.
- 于非, 王晗, 王绍坤, 张强, 季荣, 2012. 阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应. 生态学报, 32(19): 6203-6209.
- 张翠英, 刘继敏, 成兆金, 景安华, 2008. 气候变化对鲁西南棉铃虫的影响. 中国棉花, 35(9): 9-11.
- 张鹤, 林进添, 2015. 昆虫对全球气候变暖的响应. 环境昆虫学报, 37(6): 1280-1286.
- 张花龙, 杨念婉, 李有志, 万方浩, 2015. 气候变暖对农业害虫及其天敌的影响. 植物保护, 41(2): 5-15, 36.
- 张小亚, 2007. 柑橘大实蝇 (*Bactrocera minax*) 生物学、行为学及防治研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.
- 赵巍巍, 朱群, 宋晓宇, 易继东, 邓安石, 2020. 室内环境养蛹预测柑橘大实蝇成虫发生期. 植物保护, 46(4): 137-143, 160.
- BRAUNE E, RICHTER O, SNDGERATH D, SUHLING F, 2008. Voltinism flexibility of a riverine dragonfly along thermal gradients. *Global Change Biology*, 14(3): 470-482.
- DINGEMANSE N J, KALKMAN V J, 2008. Changing temperature regimes have advanced the phenology of Odonata in the Netherlands. *Ecological Entomology*, 33(3): 394-402.
- FORISTER M L, SHAPIRO A M, 2003. Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology*, 9: 1130-1135.
- GOMI T, NAGASAKA M, FUKUDA T, HAGIHARA H, 2010. Shifting of the life cycle and life-history traits of the fall webworm in relation to climate change. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 125(2): 179-184.
- GORDO O, SANZ J J, 2005. Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia*, 146(3): 484-495.
- IPPC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis. [2021-09-12]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- RAZA M M, KHAN M A, ARSHAD M, SAGHEER M, SATTAR Z, SHAFI J, HAQ E, ALI A, ASLAM U, MUSHTAQ A, ISHFAQ I, SABIR Z, SATTAR A, 2015. Impact of global warming on insects. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 48(1): 84-94.
- TRNKA M, MUŠKA F, SEMERÁDOVÁ D, DUBROVSKÝM, KOČMÁNKOVÁ E, ŽALUD Z, 2007. European corn borer life stage model: regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. *Ecological Modelling*, 207(2/3/4): 61-84.
- WU Y, LI J J, LIU H H, QIAO G X, HUANG X L, 2020. Investigating the impact of climate warming on phenology of aphid pests in China using long-term historical data. *Insects*, 11(3): 167.

(责任编辑: 郭莹)