



陈晓, 赵远鹏, 李欣, 肖春, 李正跃, 张立敏. 基于广义可加模型分析温湿度因子对斑翅果蝇田间种群动态的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (4): 858–866.

基于广义可加模型分析温湿度因子对斑翅果蝇田间种群动态的影响

陈晓^{1,2}, 赵远鹏^{3*}, 李欣⁴, 肖春^{1,2}, 李正跃^{1,2}, 张立敏^{1,2**}

(1. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2. 省部共建云南生物资源保护与利用国家重点实验室, 昆明 650201;
3. 昆明英茂花卉产业有限公司, 昆明 650000; 4. 云南农业大学大数据 (信息工程) 学院, 昆明 650201)

摘要: 探究温湿度因子对田间斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* Matsumura 种群发生动态的影响, 为进一步开展环境胁迫下斑翅果蝇适应性机制研究提供前期基础和参考。本文监测统计了 2016–2017 年田间斑翅果蝇成虫种群动态数据, 并利用广义可加模型 (Generalized Additive Models, GAM) 分析温湿度因子对成虫种群发生动态的影响。结果表明, 通过模型检验和广义交叉验证值 (Generalized Cross-Validation, GCV) 对比, 得出温湿度因子显著影响了 2016–2017 年斑翅果蝇田间成虫种群发生动态 ($P < 0.05$), 斑翅果蝇雌成虫、雄成虫、总种群数量的 GAM 模型参数 α 分别为 2.21346、2.55606 和 3.08316; 雌成虫、雄成虫、总种群数量与温湿度因子关联的 GCV 值分别为 0.57299、0.74501、0.64611, 因此雌成虫种群数量与温湿度因子拟合的模型最优; 结合温湿度预测曲线分析, 斑翅果蝇成虫种群发生动态与温湿度因子之间呈非线性相关, 其中温度在 23℃ 以下呈局部负相关, 在 23℃ 以上呈局部正相关; 与湿度呈正相关, 但影响程度较低, 因此温度是影响斑翅果蝇成虫种群数量动态的关键生态因子。本文通过探究环境因子对田间斑翅果蝇种群消长规律的影响, 为斑翅果蝇的种群发生机制提供了生态学理论基础。

关键词: 斑翅果蝇; 环境因子; 广义可加模型; 种群动态

中图分类号: Q968.1; S433 文献标识码: A 文章编号: 1674-0858 (2021) 04-0858-09

Analysis of the effects of temperature and humidity factors on the population dynamics of *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera: Drsophilidae) based on generalized additive model

CHEN Xiao^{1,2}, ZHAO Yuan-Peng^{3*}, LI Xin⁴, XIAO Chun^{1,2}, LI Zheng-Yue^{1,2}, ZHANG Li-Min^{1,2**} (1. Plant Protection College, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-Resources in Yunnan, Kunming 650201, China; 3. Kunming Yinmore Flower Industry Co., Kunming 650000, China; 4. Big data (Information Engineering) College, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To investigate the correlation between temperature-humidity factor and the population dynamics of *Drosophila suzukii* in the field, thus to provide a preliminary basis and reference for further research on the adaptive mechanisms under environmental stresses. In this study, the monitored field population dynamics' data of *D. suzukii* from 2016 to 2017 were selected, and the correlation between temperature-

基金项目: 云南农业大学博士科研启动项目 (A2032002502)
作者简介: 陈晓, 女, 1990 年生, 云南昆明人, 博士, 讲师, 主要研究方向为入侵生物学与生态学, E-mail: x.chn@ynau.edu.cn
* 共同第一作者: 赵远鹏, 男, 硕士, 主要研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: 863719366@qq.com
** 通讯作者 Author for correspondence: 张立敏, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为昆虫数量生态学, E-mail: limin0789@126.com
收稿日期 Received: 2021-04-15; 接受日期 Accepted: 2021-06-11

humidity factor and the population sizes was analyzed by the generalized additive model (GAM). The model test and generalized cross-validation (GCV) showed that temperature-humidity factor significantly affected the field population dynamics of *D. suzukii* from 2016 to 2017 ($P < 0.05$), with the GAM model parameters α of 2.21346, 2.55606 and 3.08316 for the female, male, and total population sizes respectively. Because of GCV scores of female, male, and total population sizes were 0.57299, 0.74501 and 0.64611 respectively, *D. suzukii* female adults populations were best fitted with temperature-humidity factor. Combined with temperature-humidity prediction curve analysis, there was a non-linear correlation between temperature-humidity factor and population sizes, of which there being a local negative correlation below 23°C and a local positive correlation above 23°C with temperature factor, and there was a positive correlated with humidity factor, but this impact was lower than that of temperature, which was the key ecological factor affecting the population dynamics of *D. suzukii* adults. This paper provides a theoretical ecological basis for the occurrence mechanism of *D. suzukii* through a preliminary investigation with the effects of environmental factors on the population dynamics.

Key words: *Drosophila suzukii*; environmental factors; GAM; population dynamics

斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* Matsumura, 又称櫻桃果蝇, 隶属双翅目 Diptera 环裂亚目 Cylorrhapha 果蝇科 Drsophilidae 果蝇属 *Drosophila* 水果果蝇亚属 *Sophophora* (孙鹏等, 2011)。斑翅果蝇寄主范围非常广泛, 已知寄主涉及 100 多种, 主要包括蓝莓、櫻桃、草莓、葡萄等 (Kenis *et al.*, 2016), 且该果蝇的主要寄主植物为高密度单一种植模式, 并且该果蝇能以其它野生寄主和观赏植物作为庇护场所和再侵染源 (Klick *et al.*, 2012), 所以容易导致该果蝇种群数量在种植区域内快速增长甚至爆发。近年来, 随着各国之间的贸易往来加深, 在世界范围内, 斑翅果蝇除了在适宜的自然或管理环境中扩散, 也随着人为的商品运输及交通工具的携带进行传播, 还有以具潜在风险的有害生物为载体进行协同扩散, 利用广泛分布于边境地带的贸易商品进行扩散, 更有甚者附带于农副产品和废弃物中进行快速地分布扩散 (Hauser *et al.*, 2009)。现已有多个国家相关检疫部门高度重视斑翅果蝇日渐增长的危害, 发布了相关预警或将其列入检疫性有害生物名单 (孙鹏等, 2011)。

光照、温度、湿度、降雨等气象因子可综合作用于昆虫的生长发育、生殖繁衍、行为活动、生存分布等, 其中温度是影响上述生物学指标的关键气象因子, 自然环境中温度的变化直接影响昆虫新陈代谢、生长以及繁殖等生命活动的速率, 从而对昆虫的发生数量、体形大小、行为变异以及活动期长短产生十分重要的直接作用 (石保坤,

2012); 环境湿度 (包括空气相对湿度和土壤含水量) 的变化可直接导致昆虫体内含水量的变化, 影响虫体的水分平衡、生长发育及繁殖速率、抗逆性、行为诱导信号等, 进而对其个体发育及群体发生产生影响 (常晓娜等, 2008)。因此, 外界环境温度、湿度的变化是昆虫种群随着季节消长变化的主要因素, 且温度与湿度因子联合作用下可增强上述现象的表达, 在高温和低相对湿度的双重影响下, 不育或可育斑翅果蝇的生存和繁殖均受到负面影响 (Krüger *et al.*, 2021)。

在解释生物学原理和自然种群规律方面, 非线性模型均优于线性模型, 非线性模型已经广泛应用于昆虫生长发育和种群动态研究。早期研究人员对昆虫种群动态研究以描述性为主, 并进行种群聚集与扩散迁移的研究, 现在则应用模型模拟来研究昆虫与环境之间的相互作用关系, 目的是为了加强理解昆虫种群的生命系统, 改进对昆虫种群的监测调查和防治的具体措施。而关于斑翅果蝇种群动态模型研究的文章较少, 例如, 整合与温度相关的生命表数据并通过矩阵投影模型来估算斑翅果蝇的种群动态 (Wiman *et al.*, 2014); 或应对入侵北美地区的斑翅果蝇开发了一个连续的时间阶段种群结构模型 (Langille *et al.*, 2016)。Hastie 和 Tibshirani (1986) 提出并发展了广义可加模型 (generalized additive models, GAM), 该模型可拟合响应变量与解释变量之间的非线性关系, 但模型需要考虑曲线的拟合优度、光滑度, 需要克服解释变量之间共曲线性关系导致的系数

标准误偏差, 并利用两个解释变量之间的 Pearson 相关系数 R 来判别两者之间的相关性程度。若要求得到的拟合曲线平稳变化, 不出现非剧烈快速波动的情况, 则需要通过响应变量与解释变量之间的关系曲线粗糙度来度量拟合光滑度 (欧阳芳和戈峰, 2013)。

本研究在昆明市云南农业大学后山设置诱捕点, 调查统计 2016 年至 2017 年连续两年斑翅果蝇成虫的种群动态变化, 明确调查期内斑翅果蝇成虫种群数量动态, 分析斑翅果蝇成虫种群数量分布, 通过广义可加模型 (GAM) 分析斑翅果蝇成虫种群数量与温湿度因子间的关系, 并判别是何种关键因子显著影响斑翅果蝇成虫种群数量动态变化。不仅从生态学角度探寻了温湿度因子对斑翅果蝇成虫种群动态消长规律起到重要作用, 也为后续研究斑翅果蝇产生何种适应性应对环境因子变化提供了重要的依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2016 至 2017 年, 在云南农业大学校园后山自然果林 (N25°8'16", E102°45'15", 海拔 1 970 m) 进行连续两年的斑翅果蝇成虫种群动态调查。所选果林树势良好, 主要以梨树为主, 夹杂少量桃树, 果林无化学药剂喷施, 地面生长有龙葵、蛇莓等野生浆果。

1.2 田间诱捕及温湿度记录

诱剂配制比例参照优化配比, 即糖 (g): 酒 (mL): 醋 (mL): 水 (mL) = 1:3:1:6 (伍苏然等, 2007)。采用五点取样法, 将自制诱捕器放置在离地面 1.2~1.5 m 处, 不同取样点之间距离至少间隔 10 m。温湿度记录仪 (GGL-20) 由深圳宇问加壹传感系统有限公司生产提供, 悬挂位于果林较为隐蔽处。

春、冬两季因自然环境气温较低, 诱剂不易挥发, 故收集频率为 1 周一次, 夏、秋两季因自然环境气温较高, 诱剂易挥发, 故收集频率为 2 或 3 d 一次。将诱捕到的所有昆虫样本带回实验室, 在解剖镜下进行分类鉴定, 并统计斑翅果蝇雌雄成虫数量。

1.3 广义可加模型

广义可加模型分析可分为以下 3 个步骤, 依

次为: 变量预分析、模型构建、模型预测。广义可加模型是根据具体情况将广义线性模型和可加模型结合起来, 其中, 广义线性模型是改变响应变量条件期望的函数形式, 将它记为 $g(muY)$, 其中 $muY = E(Y/X_1, \dots, X_n)$, 可表示为: $g(muY) = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_n X_n + \varepsilon$, 还可使用非参数的形式来描述响应变量条件期望与解释变量的对应关系, 用 $f(x)$ 表示, 可表示为: $E(Y/X) = f(x)$, 将其推广到多个解释变量时, 则记为可加模型 $E(Y/X_1, \dots, X_n) = f(X_1) + \dots + f(X_n)$ 。将两种方式结合起来, 则广义可加模型可表达为: $g(muY) = \alpha_0 + f_1(X_1) + \dots + f_n(X_n) + \varepsilon$ 。其中, 在 $g(muY)$ 项中, muY 是 Y 的期望值, $g(\dots)$ 是连接函数, α_0 是截距, 在 $f_n(X_n)$ 项中, $f_n(\dots)$ 是解释变量 X_n 的单变量函数, ε 为随机变量。模型评价指标选用广义交叉验证值 (Generalized Cross-Validation, GCV), GCV 值最小的模型最优 (欧阳芳和戈峰, 2013)。

1.4 数据分析

使用 Excel 对数据进行整理和预处理, 利用 R (version 4.0.5) 对斑翅果蝇种群数量数据进行对数预处理, mgcv 数据包拟合广义可加模型并进行分析。

2 结果与分析

2.1 成虫田间种群发生动态

2016 年至 2017 年, 两年中全年均有斑翅果蝇发生, 斑翅果蝇成虫种群数量均从 6 月开始明显增加至 10 月种群数量回落, 高峰期分别出现在 7 月、8 月、9 月, 在 11 月至次年 5 月斑翅果蝇成虫种群数量都维持在较低水平, 尤其在 2~5 月种群数量呈全年最低水平。雌、雄成虫的种群动态变化也呈现先升高后降低的趋势; 其中, 雄成虫种群动态变化与总种群动态变化趋势一致。2016 年种群变化趋势呈单峰型, 而 2017 年呈双峰型; 其中, 雌成虫种群变化趋势在两年中均呈单峰型, 最高峰分别出现在 2016 年 7 月、2017 年 8 月。2017 年斑翅果蝇成虫数量, 尤其是高峰期数量相较于 2016 年明显降低。2016 年、2017 年最高峰期斑翅果蝇成虫总量分别为 587 头、236 头, 雄成虫数量分别为 356 头、130 头; 雌成虫数量分别为 312 头、106 头 (图 1)。

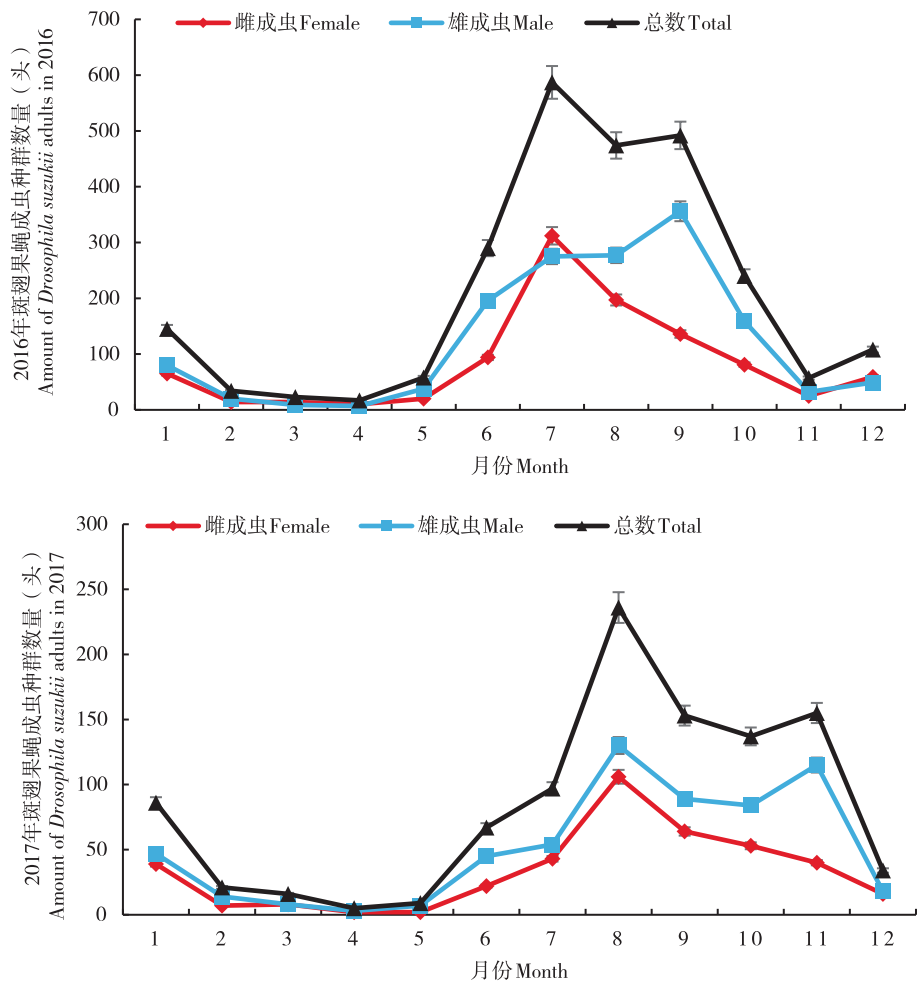


图1 2016–2017 年斑翅果蝇成虫种群动态
Fig. 1 Population dynamics of *Drosophila suzukii* adults from 2016 to 2017

2.2 广义可加模型分析温湿度因子与斑翅果蝇成虫种群数量之间的关系

2.2.1 变量预分析

对 2016–2017 年斑翅果蝇雌成虫、雄成虫和总种群数量取对数并绘制 QQ 图和频次分布图 (图 2、图 3、图 4)，并初步判定种群数量 (响应变量) 的分布特征为正态分布类型，Identity link 可作为连接函数，进而将种群数量作为相应变量 Y，温度 (Temperature)、湿度 (Humidity) 因子作为解释变量构建模型。

2.2.2 模型构建

分析调查周期内温度与湿度因子间 Pearson 相关系数，得知两个解释变量间 Pearson 相关系数小于 0.5，故本研究将斑翅果蝇雌成虫、雄成虫、总种群数量作为响应变量，温度 (Temperature)、湿度 (Humidity) 作为解释变量构建广义可加模型。对于多变量数据集，模型构建时可构造一个或多个可行模型，以不同解释变量的组合构成多个分析模型。因此，初步构建响应变量与解释变量间的分析模型是包括多个可能模型的模型组，再通过模型评估筛选最优拟合结果。

$$\begin{aligned} g(\text{Female}) &= \alpha_F + f_{1F}(\text{Temperature}) + f_{2F}(\text{Humidity}) + \varepsilon_F \\ g(\text{Male}) &= \alpha_M + f_{1M}(\text{Temperature}) + f_{2M}(\text{Humidity}) + \varepsilon_M \\ g(\text{Total}) &= \alpha_T + f_{1T}(\text{Temperature}) + f_{2T}(\text{Humidity}) + \varepsilon_T \end{aligned}$$

其中， $g(\text{Female})$ 、 $g(\text{Male})$ 、 $g(\text{Total})$ 分别是指斑翅果蝇雌成虫、雄成虫以及总种群动态的连接函数； α 是函数截矩；在 $f_n(X_n)$ 项中， f_n

($\cdots$) 是解释变量 X_n 的单变量函数； ε 是随机变量。3 个下角标 F 、 M 、 T 分别是指雌成虫、雄成虫以及总种群。

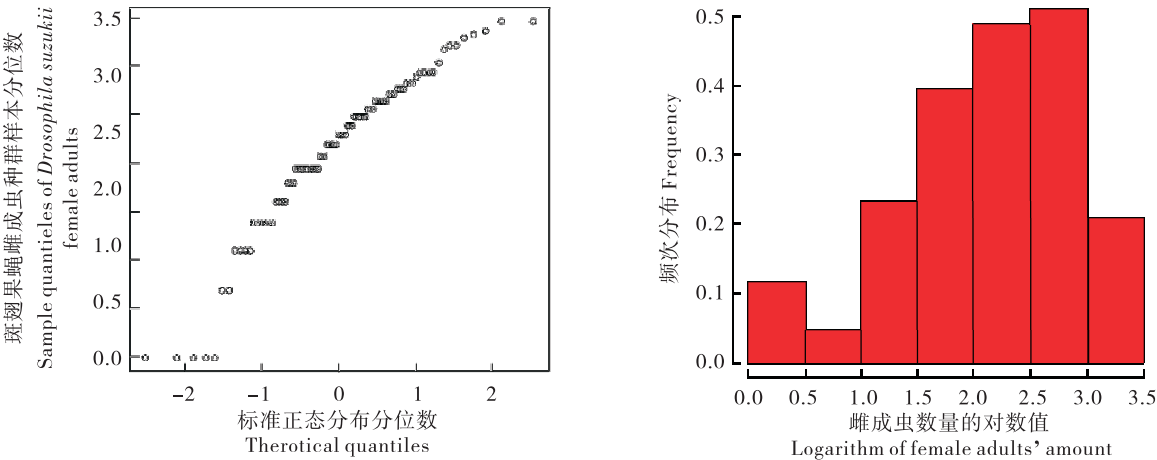


图2 斑翅果蝇雌成虫种群数量正态 QQ 图和频次分布图
Fig. 2 Normal QQ plot and frequency distribution diagram of *Drosophila suzukii* female adults

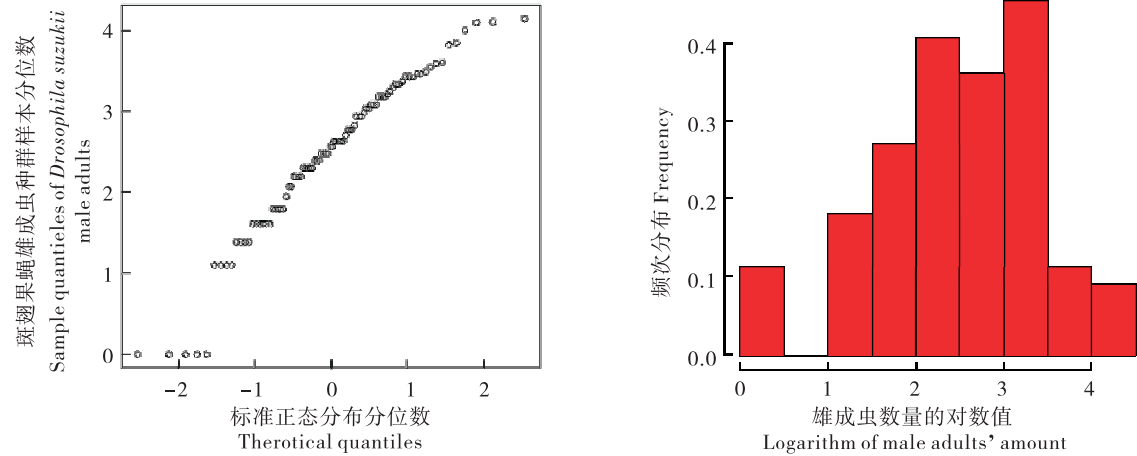


图3 斑翅果蝇雄成虫种群数量正态 QQ 图和频次分布图
Fig. 3 Normal QQ plot and frequency distribution diagram of *Drosophila suzukii* male adults

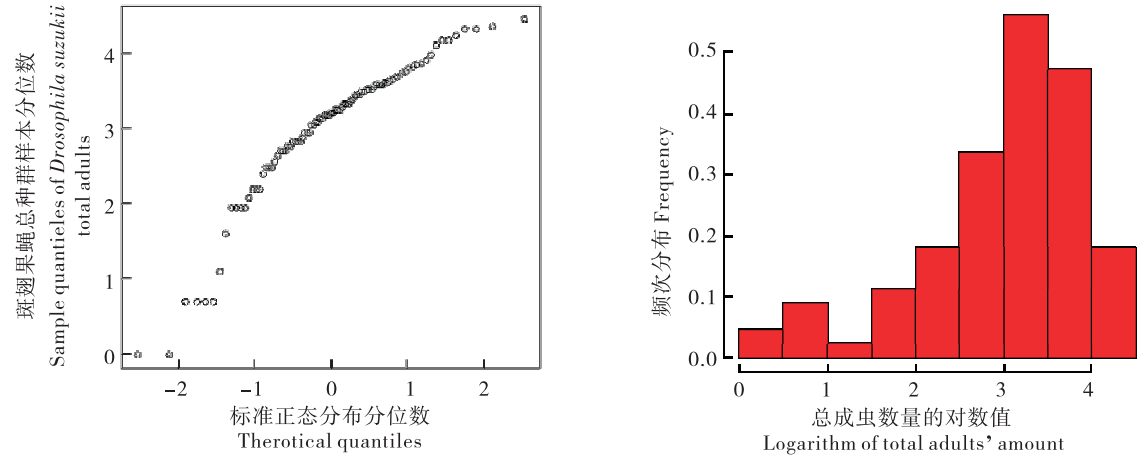


图4 斑翅果蝇总种群数量正态 QQ 图和频次分布图
Fig. 4 Normal QQ plot and frequency distribution diagram of *Drosophila suzukii* total adults

模型参数拟合结果表明，温湿度因子显著影响了 2016 – 2017 年斑翅果蝇田间成虫种群动态 ($P < 0.05$)，雌成虫、雄成虫、总种群数量的 GAM 模型参数 α 分别为 2. 21346、2. 55606 和 3. 08316；雌成虫、雄成虫和总种群数量与温湿度

因子关联的 GCV 值分别为 0. 57299、0. 74501 和 0. 64611，其中雌成虫的 GCV 值最小，因此说明斑翅果蝇雌成虫种群数量与温湿度因子进行拟合的模型最优（表 1）。

表 1 基于温湿度因子的斑翅果蝇种群动态广义可加模型参数拟合及检验

Table 1 Generalized additive model parameter fitting and test for the population dynamics of <i>Drosophila suzukii</i> based on temperature-humidity factor			
参数 Parameter	雌成虫 Female	雄成虫 Male	总种群 Total
模型 α	2. 21346	2. 55606	3. 08316
标准误 (Error)	0. 07854	0. 08888	0. 08283
t	28. 18	28. 76	37. 22
P	<0. 05	<0. 05	<0. 05
GCV	0. 57299	0. 74501	0. 64611

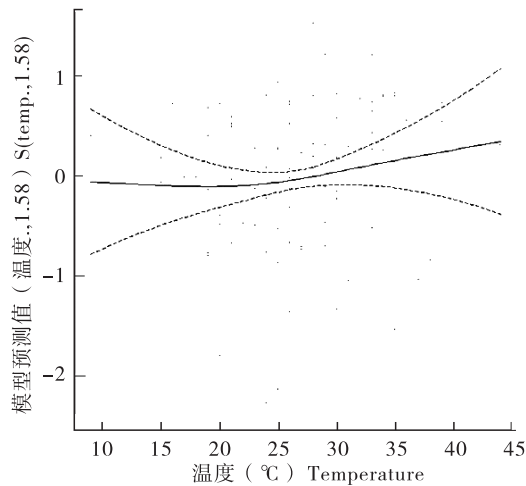


图 5 斑翅果蝇雌成虫种群数量与温湿度因子之间的相关性

Fig. 5 Population sizes of *Drosophila suzukii* female adults correlated with temperature-humidity factor

注：Y 轴标题括号中的数值为模型拟合的光滑度参数，该数值接近 1，预测变量与目标变量间的相关关系越接近水平直线，反之曲线呈现不同相关关系。图 6 – 图 7 同。Notes : The value in the brackets of Y – axis heading is the smoothness parameters of the prediction model. If the smoothness parameter is close to 1, the relationship between the predictor variables and dependent variables would be closer to a horizontal straight line, otherwise, the relationship would be different correlations. Same to Fig. 6 – Fig. 7.

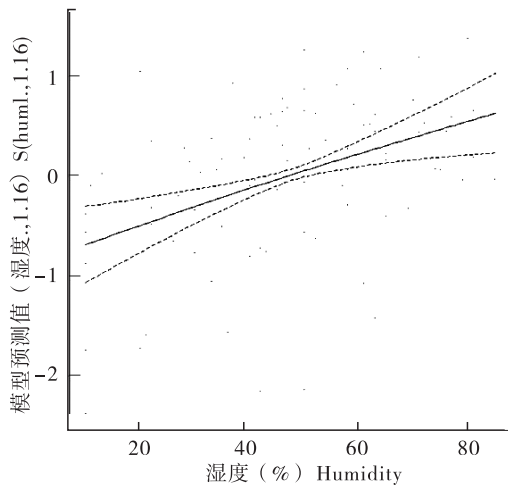
3 结论与讨论

3.1 斑翅果蝇成虫全年种群数量动态规律及分析

种群动态调查是昆虫种群生态学研究的核心问题，尤其是为研究昆虫田间种群的适应性在环境因子变化下发生何种改变提供了基础和前提。国外已有对斑翅果蝇的种群动态变化及寄主的调查研究，例如，在比利时对斑翅果蝇种群发生进行调查，结果表明 2014 年的早春（非常温和的冬季之后），已经发现了斑翅果蝇的存在（Belien

2.2.3 模型预测

斑翅果蝇雌成虫种群动态与温湿度因子之间呈非线性相关，其中雌成虫种群发生在温度 23℃ 以下呈局部负相关，在 23℃ 以上呈局部正相关且上涨趋势较为平缓；雌成虫种群发生与湿度呈正相关，但在湿度变幅大的情况下种群发生增量小（图 5）。斑翅果蝇雄成虫的种群动态与温湿度因子之间呈非线性相关，雄成虫种群发生在温度 23℃ 以下呈局部负相关，在 23℃ 以上呈局部正相关，且上涨趋势较为明显；雄成虫种群发生与湿度呈正相关，但在湿度变幅大的情况下种群发生增量小，斑翅果蝇总种群发生与雄成虫种群发生表现基本一致（图 6，图 7）。



et al. , 2014)；研究发现从 1 月开始，当休眠状态下的斑翅果蝇雌成虫有效积温达到 50 ~ 800℃ · d 时，则可在季节早期进行繁殖，而且可能会受到早期寄主植物可用性的限制（Wiman et al. , 2016）。而斑翅果蝇在国内的研究主要集中在果园内进行种群动态的监测调查以及为害特性观察的研究，例如，调查研究发现陕西灞桥樱桃果园里斑翅果蝇为优势种（郭丽娜等，2014）；陕西杨凌樱桃园中斑翅果蝇种群数量在 10 月中旬达到高峰期（常慧群等，2017）；在斑翅果蝇发生的高峰期，云南石屏果园中的杨梅果实被害率可达 100%

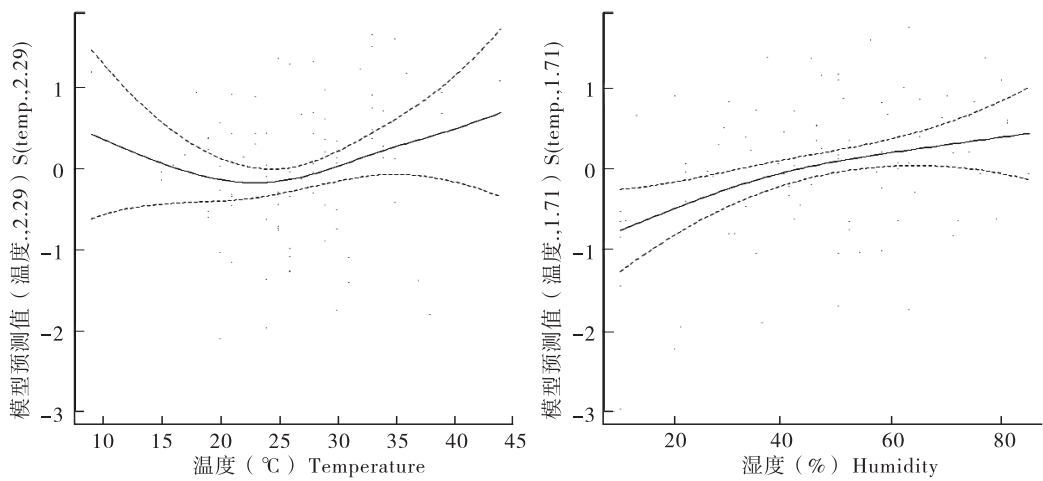


图 6 斑翅果蝇雄成虫种群数量与温湿度因子之间的相关性

Fig. 6 Population sizes of *Drosophila suzukii* male adults correlated with temperature-humidity factor

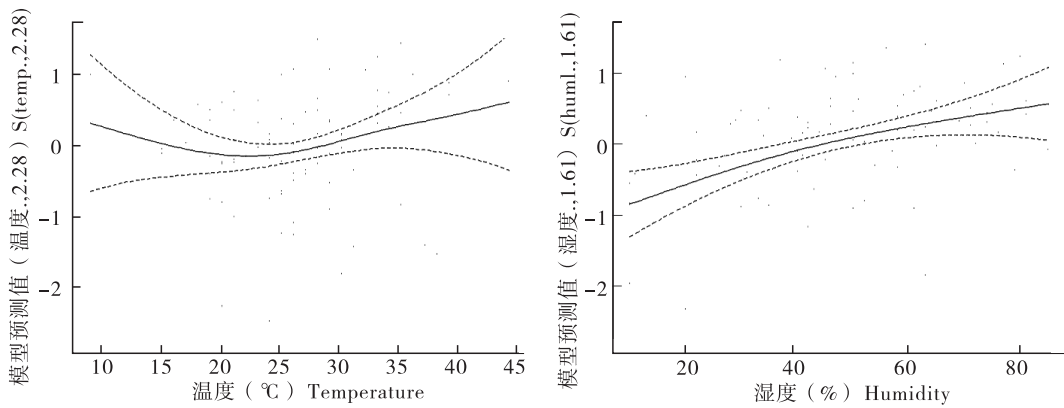


图 7 斑翅果蝇总种群数量与温湿度因子之间的相关性

Fig. 7 Population sizes of *Drosophila suzukii* total adults correlated with temperature-humidity factor

(赵超等, 2017)。在本研究中, 2016 – 2017 年调查发现斑翅果蝇成虫的种群数量通常在野生果林的果实进入成熟期后大幅增长, 高峰期集中在 7 月至 9 月, 与不同引诱剂对贵州麻江田间蓝莓果蝇诱捕结果基本一致 (徐芳玲等, 2012), 即 8 月蓝莓果实进入盛果期, 成熟的蓝莓对果蝇的诱集数量呈现高峰值; 在 2 月至 5 月, 斑翅果蝇成虫种群数量动态均维持在较低水平, 与陕西杨凌樱桃园中斑翅果蝇发生特点基本一致 (杨静, 2017); 斑翅果蝇雄成虫以及总种群数量动态变化趋势基本同步, 其中总种群发生动态与王华弟等研究浙江地区杨梅果蝇种群发生动态时监测得出的结果基本一致 (王华弟等, 2017)。

3.2 温湿度因子与斑翅果蝇成虫种群动态之间的相关性分析

温湿度变化对昆虫的生长发育速率、生殖能

力及存活率等种群数量构成的关键因子产生重大影响, 从而导致昆虫的种群数量发生变化 (陈瑜和马春森, 2010)。此前有研究报道, 结合 2016 – 2018 年气温和降水量资料, 分析大豆蚜虫 *Aphis glycines* 田间动态与气温和降水量的总体关系, 结果得出气温以 20℃ 为节点起伏, 田间温度越高大豆蚜虫发生量越大, 而降水量对大豆蚜虫田间种群动态影响不明显 (邵珊珊等, 2019)。滇中菜区小菜蛾 *Plutella xylostella* 成虫种群消长动态与温度显著相关 $r = 0.442$, 与降雨量成正相关 $r = 0.283$, 但相关程度弱 (赵雪晴等, 2016)。假眼小绿叶蝉 *Empoasca vitis* 的成虫虫口数量受田间气候条件影响较大, 其中温度影响最大 (李慧玲和林乃铨, 2012)。本研究中以温度 23℃ 为节点, 斑翅果蝇成虫种群发生数量与 23℃ 以下呈局部负相关, 与 23℃ 以上呈局部正相关, 与湿度呈正相关, 但在

湿度变幅大的情况下种群发生增量小，得出湿度对斑翅果蝇的种群影响较温度的影响低，温度是影响斑翅果蝇成虫种群数量动态的关键生态因子，这一结果与上述温湿度因子对其他昆虫种群发生的影响研究结果趋向一致。

本研究中斑翅果蝇种群数量在高峰期的时段，正处于气温较高的夏季，同时果园也具备了数量、品种较多的寄主植物，而在种群数量维持在较低水平的其它季节，寄主植物的数量及品种也减少，后续深入探索可参考寄主等因子对斑翅果蝇种群发生的影响研究，例如，墨西哥果实结实季节（8月至次年5月）是影响当地田间斑翅果蝇季节性活动的最主要因素之一（Dominguez-Monge *et al.*，2021）；相同温度条件下，豇豆蚜虫 *Aphis craccivora* 对于大豆（首选寄主）和棉花（次选寄主）表现不同，即在大豆中的内在增长率、繁殖率、每成年子代数 and 寿命均显著高于棉花，且温度波动到极端水平时，导致以棉花为食的蚜虫的上述各项参数迅速下降，而以大豆为食的蚜虫则没有下降，在一定程度上解释了夏初新疆棉区气温升高时豇豆蚜虫从棉花向大豆进行生态位转变的现象（Lu *et al.*，2017）。因此，在全球变暖的背景下，除了对害虫进行种群动态建模和风险分析之外，同时也应探索寄主等因子影响害虫如何调节自身应对极端环境，或发生了何种生态位转变的研究。

参考文献（References）

Belien T, Thys T, Fassotte C, *et al.* Population dynamics of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in Belgium in 2013 [J]. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 2014, 79 (2): 169 – 175.

Chang HQ, Yang J, Wu JX, *et al.* Population dynamics of *Drosophila suzukii* Matsumura and trapping method [J] *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26 (2): 323 – 328. [常慧群, 杨静, 仵均祥, 等. 铃木氏果蝇成虫种群动态与诱捕技术 [J]. 西北农业学报, 2017, 26 (2): 323 – 328]

Chang XN, Gao HJ, Chen FJ, *et al.* Effects of environmental humidity and rainfall on insects [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (4): 619 – 625. [常晓娜, 高慧璟, 陈法军, 等. 环境湿度和降雨对昆虫的影响 [J]. 生态学杂志, 2008, 27 (4): 619 – 625]

Chen Y, Ma CS. Effect of global warming on insect: A literature review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (8): 2159 – 2172. [陈瑜, 马春森. 气候变暖对昆虫影响研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30 (8): 2159 – 2172]

Dominguez-Monge S, Lopez-Martinez V, Martínez-Mirafuentes A, *et al.*

Population dynamics of *Zaprionus indianus* and *Drosophila suzukii* in fig in the state of Morelos, Mexico [J]. *Southwestern Entomologist*, 2021, 45 (4): 1161 – 1164.

Guo LN, Li BL, Dong LM, *et al.* Occurrence and trapping methods of fruit fly in cherry orchard [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23 (2): 55 – 60. [郭丽娜, 李伯辽, 董蓝蔓, 等. 樱桃果蝇发生与诱捕技术比较研究 [J]. 西北农业学报, 2014, 23 (2): 55 – 60]

Hastie TJ, Tibshirani RJ. Generalized additive models [J]. *Statistical Science*, 1986, 1 (3): 297 – 310.

Hauser M, Gaimari S, Damus M. *Drosophila suzukii* new to North America [J]. *Researchgate*, 2009, 43: 12 – 15 (2016.02.02) [2021.04.16]. <https://www.researchgate.net/publication/292585271>.

Kenis M, Tonina L, Eschen R, *et al.* Non-crop plants used as hosts by *Drosophila suzukii* in Europe [J]. *Journal of Pest Science*, 2016, 89 (3): 735 – 748.

Klick J, Yang WQ, Hagler JR, *et al.* Using protein marker technology to determine spotted wing drosophila movement between border and field [J]. *Pacific Northwest Insect Management Conference*, 2012, (2017.06.05) [2021.04.16]. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/conference_proceedings_or_journals/9c67wp874.

Krüger A, Vieira J, Scheunemann T, *et al.* Effects of temperature and relative humidity on mating and survival of sterile *Drosophila suzukii* [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2021, (2021.04.16) [2021.04.26]. <https://doi.org/10.1111/jen.12894>.

Langille AB, Arteca EM, Ryan GD, *et al.* North American invasion of Spotted-Wing *Drosophila* (*Drosophila suzukii*): A mechanistic model of population dynamics [J]. *Ecological Modelling*, 2016, 336: 70 – 81.

Li HL, Lin NQ. The influence of temperature and humidity on the population dynamics of small green leafhopper at tea garden [J]. *Fujian Journal of Agricultural Science*, 2012, 27 (1): 55 – 59. [李慧玲, 林乃铨. 温、湿度对假眼小绿叶蝉种群数量及梢内着卵量的影响 [J]. 福建农业学报, 2012, 27 (1): 55 – 59]

Lu ZZ, Feng LK, Gao GZ, *et al.* Differences in the high-temperature tolerance of *Aphis craccivora* (Hemiptera: Aphididae) on cotton and soybean: Implications for ecological niche switching among hosts [J]. *Applied Entomology & Zoology*, 2017, 52 (1): 1 – 10.

Ou YF, Ge F. Nonlinear analysis of insect population dynamics based on generalized additive models and statistical computing using R [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (4): 1170 – 1177. [欧阳芳, 戈峰. 基于广义可加模型的昆虫种群动态非线性分析 R 语言实现 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (4): 1170 – 1177]

Shao SS, Zhou XW, Yu HT, *et al.* Effect of temperature and precipitation on the population dynamics of soybean aphid in field [J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2019, 8: 60 – 61. [邵珊珊, 周兴伟, 于洪涛, 等. 气温和降水量对大豆蚜虫田间种群动态的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2019, 8: 60 – 61]

Shi BK. Response of Biological Characteristics of *Nilaparvata lugens* (Stål) to Elevated CO₂ Concentration and Temperature [D].

- Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Master Dissertation, 2012. [石保坤. 褐飞虱生物学特性对 CO₂ 浓度和温度升高的响应 [D]. 北京: 中国农业科学院硕士论文, 2012]
- Sun P, Liao TL, Yuan K, *et al.* Fruit pests-spotted wings fly (*Drosophila suzukii* Matsumura) [J]. *Plant Quarantine*, 2011, 25 (6): 45–47. [孙鹏, 廖太林, 袁克, 等. 水果害虫——斑翅果蝇 [J]. 植物检疫, 2011, 25 (6): 45–47]
- Wang HD, Shen Y, Wang EG, *et al.* Monitoring and integrated control of population dynamics of bat fly on red bayberry [J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7 (6): 6–14. [王华弟, 沈颖, 汪恩国, 等. 杨梅果蝇种群发生动态监测与综合防治技术研究 [J]. 农学学报, 2017, 7 (6): 6–14]
- Wiman NG, Dalton DT, Anfora G, *et al.* *Drosophila suzukii* population response to environment and management strategies [J]. *Journal of Pest Science*, 2016, 89 (3): 653–665.
- Wiman NG, Walton VM, Dalton DT, *et al.* Integrating Temperature-Dependent life table data into a matrix projection model for *Drosophila suzukii* population estimation [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9 (9): e106909.
- Wu SR, Tai HK, Li ZY, *et al.* Field evaluation of different trapping methods of cherry fruit fly, *Drosophila suzukii* [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22 (5): 776–778. [伍苏然, 太红坤, 李正跃, 等. 樱桃果蝇田间诱捕方法比较 [J]. 云南农业大学学报, 2007, 22 (5): 776–778]
- Xu FL, Xie LH, Long PZ. Study on the effect of different lures on trapping blueberry fruit flies in the field [J]. *Southern China Fruit Trees*, 2012, 41 (6): 66. [徐芳玲, 谢莉华, 龙培仲. 不同引诱剂对蓝莓果蝇田间诱捕效果研究 [J]. 中国南方果树, 2012, 41 (6): 66]
- Yang J. The Characteristics of Harm that Fruit Flies Have and the Reach on the Technique of Trapping [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology Master Dissertation, 2017. [杨静. 樱桃果蝇发生特点与诱捕技术研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学硕士论文, 2017]
- Zhao C, Li P, Xie DS, *et al.* The seasonal abundance of *Drosophila suzukii* in orchards and seasonal variation in fruit damage caused by this pest [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2017, 54 (5): 724–729. [赵超, 李萍, 谢冬升, 等. 斑翅果蝇田间发生与为害特性观察 [J]. 应用昆虫学报, 2017, 54 (5): 724–729]
- Zhao XQ, Yin YQ, Shen AD, *et al.* Population dynamics of the diamondback moth in Tonghai, Yunnan [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2016, 53 (2): 298–304. [赵雪晴, 尹艳琼, 谌爱东, 等. 滇中菜区小菜蛾种群消长动态及其影响因子 [J]. 应用昆虫学报, 2016, 53 (2): 298–304]