茶小绿叶蝉第一峰发生程度预测方法的构建与应用*

江宏燕[1**] 陈世春[1] 白先丽[2] 赵丰华[3] 黄 海[4]
廖姝然[1] 陈亭旭[1] 彭 萍[1] 王晓庆[1***]

（1. 重庆市农业科学院茶叶研究所，重庆 402160；2. 广西茶叶科学研究所，桂林 541000；
3. 信阳市农业科学院，信阳 464000；4. 安庆市农业技术推广中心，安庆 246007）

摘 要 **【目的】** 小贯小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 是在全国各大茶区均严重危害的一种害虫，建立适用于各地的预测方法并构建预警信息系统，可为茶小绿叶蝉的测报技术标准化和及时防控提供技术支撑。**【方法】** 通过长期系统监测全国四大茶区代表性茶园的叶蝉发生动态，基于 2011-2017 年茶小绿叶蝉的发生动态和气候数据，利用模糊综合评价法建立全国四大茶区叶蝉第一峰发生程度预测方法，并基于 Web 构建了茶树病虫害监测预警平台。**【结果】** 本研究掌握了茶小绿叶蝉近年在 4 个代表茶区的发生规律，其发生动态曲线以单峰型和双峰型为主，第一发生高峰期主要集中在 5-7 月，是全年的主要危害期。通过筛选影响发生的越冬虫口量和气象数据关键因子（2 月平均气温和上年 12 月至 2 月最低气温之和），构建出叶蝉第一峰发生程度预测方法和预警平台，进一步利用 2018-2022 年的叶蝉实际发生程度对预测方法的应用效果进行外延检测，总体测报准确率达到 83.64%。**【结论】** 建立的茶小绿叶蝉第一峰发生程度预警方法准确率较高，利用预警平台可实现监测数据信息分析、传递、查询共享以及预警发布一体化等综合服务功能，茶叶管理部门、农技人员可以在茶小绿叶蝉的预测预报工作中推广应用。

关键词 茶小绿叶蝉；发生动态；预警；应用

A new method to predict the first population peak of the tea green leafhopper

JIANG Hong-Yan[1**] CHEN Shi-Chun[1] BAI Xian-Li[2] ZHAO Feng-Hua[3] HUANG Hai[4]
LIAO Shu-Ran[1] CHEN Ting-Xu[1] PENG Ping[1] WANG Xiao-Qing[1***]

(1. Tea Research Institute of Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China; 2. Tea Science and Research Institute of Guangxi, GuiLin 541000, China; 3. Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Xinyang 464000, China; 4. Anqing Agricultural Technology Extension Center, Anqing 246007, China)

Abstract **[Aim]** To develop an accurate prediction method suitable for local conditions and thereby improve the prevention and control of the tea green leafhopper (*Empoasca onukii*), a major pest of tea in all tea-growing regions of China. **[Methods]** We conducted long-term investigations of leafhopper density in representative tea gardens in four major regions. Based on climate data and the population dynamics of the species (2011 to 2017), we used a fuzzy comprehensive evaluation method to develop a prediction method for the first population peak of leafhoppers in each region. A Web-based monitoring and early warning platform for tea plant diseases and insect pests was also established. **[Results]** This study identified the occurrence patterns of tea green leafhoppers in four representative tea-growing areas from 2011 to 2017. This species generally had either

*资助项目 Supported projects：财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系（CARS-19）；重庆市永川区自然科学基金（2021yc-jckx20009）

**第一作者 First author，E-mail：jianghy925@sina.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：wangxiaoqing2891@126.com

收稿日期 Received：2024-06-26；接受日期 Accepted：2025-03-25

single, or double, peaks of abundance. The first peak was usually between May and July, which was the most severe period of crop damage in a year. By identifying key factors influencing the overwintering population, and analyzing meteorological data (specifically, the average February temperature and the sum of the lowest temperatures from December to February), we developed both a prediction method and an early warning platform for the first peak of abundance of this pest. Testing this method with actual leafhopper abundance data from 2018 to 2022 indicates that it has an overall accuracy rate of 83.64%. **[Conclusion]** The new early warning method has high accuracy and the early warning platform provides various services, including data analysis, data transmission, query sharing, and early warning of peak abundance. Tea management departments and agricultural technicians can promote the use of this method for predicting and forecasting peak abundance of the tea green leafhopper.

Key words *Empoasca onukii*; occurrence dynamic; early warning; application

茶园小绿叶蝉是我国茶园中发生最普遍、年发生时间最长且危害最为严重的一类害虫。该类害虫虫体小，体色和形态特征相似，难以区分。有研究证实我国主产茶区的小绿叶蝉种类主要有 8 种，包括小贯小绿叶蝉 *Empoasca onukii*、烟翅小绿叶蝉 *Empoasca limbifera* 、拟小茎小绿叶蝉 *Empoasca paraparvipenis* 等，小贯小绿叶蝉数量占 98%以上（孟召娜等，2018）。本研究以小贯小绿叶蝉（简称为茶小绿叶蝉）为研究对象。茶小绿叶蝉以成、若虫刺吸茶树嫩茎、嫩叶汁液为害，且雌成虫产卵于嫩茎皮层内，致芽梢养分水分丧失，影响茶营养物质的正常输送，其危害可造成长江中下游茶园夏秋茶减产 10%-50%，严重影响茶叶的产量和品质（陈宗懋等，2020；李金玉等，2022a）。测报是害虫科学防控和有效防治的基础，监测与预报工作的质量直接影响着害虫防控的成效，对茶叶生产的管理和决策具有重要作用（彭萍等，2010；姜玉英等，2021）。

我国茶树病虫害测报工作相较于其他粮食作物起步较晚，其发展历程大致可以分为三个发展阶段：首先是以生物学方法为主的起步发展期；其次是以数理统计方法为主的平稳发展期；最后随着信息技术的发展，进入以预测预报平台为主的快速发展期（彭萍等，2013a；陈宗懋等，2020）。20 世纪 80 年代，农牧渔业部全国植保总站曾组织人员对浙江、江苏、安徽、四川和福建 5 个省茶叶主产区开展叶蝉的调查，并初步制定了适用于我国部分茶区使用的小绿叶蝉测报方法（农牧渔业部全国植保总站，1986；农业部全国植物保护总站，1988），但该项工作持续时间较短。此后，我国茶树植保研究人员亦开展了茶小绿叶蝉的种群动态监测和虫情测报工作，利用线性回归、列表联、时间序列分析等模型来预测害虫发生趋势及其发生时期，建立了适用于特定区域的叶蝉预测预报模型（秦华光等，2008；谢小群等，2020；李艳华等，2023）。然而，现有资料数据缺乏系统性，存在监测方法不统一（秦华光等，2008；彭萍等，2013b；杨春等，2021）、预报不规范、适用范围小等问题。因此，本团队联合全国茶叶主产区开展了茶小绿叶蝉的系统监测工作，筛选出影响其发生的越冬虫口量和气象数据关键因子，利用模糊综合评价法预测全国各大茶区叶蝉第一峰发生程度。同时，基于 Web 构建了茶树病虫害监测预警平台，实现了监测数据信息分析、传递、查询共享以及预警发布一体化等综合服务功能，旨在统一规范茶树害虫的测报预警体系，为全国茶小绿叶蝉的系统监测、预警、测报标准的制定和精准防控提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点

广西桂林茶园（25°29′N，110°35′E，海拔 116.1 m），调查时间为 2011-2021 年。茶树品种为福云 6 号，只采春茶和秋茶，5 月进行深修剪，10 月不修剪或轻修剪，调查期间不施用农药。

安徽安庆茶园（30°45′N，115°52′E，海拔 176 m），调查时间为 2018-2022 年。茶树品种为龙井 43、皖茶 91 和龙井长叶，采春茶、夏茶和秋茶，4-5 月进行轻修剪，调查期间不施用农药。

河南信阳茶园（32°31′N，114°21′E，海拔 99 m），调查时间为 2011-2017 年。茶树品种为信阳群体种，只采春茶，5 月进行深修剪，调查期间不施用农药。

重庆永川茶园（29°22′N，105°53′E，海拔 570 m），调查时间为 2011-2022 年。茶树品种为福鼎大白、南江 1 号和巴渝特早，只采春茶和夏茶，5 月进行轻修剪，10-11 月深修剪，调查期间不施用农药。

1.2 调查方法

每年 3 月利用振落法调查田间每 667 m^2 面积的成虫虫口量，具体参考彭萍等（2013a）的调查方法。4-10 月采用百叶数虫法调查，具体如下：采用 5 点取样法，在每个茶园样地设置 20 个样点，每样点为 1 m 茶行，调查 30 个嫩梢，以下简称百叶。在晨露未干前或傍晚调查，阴天全天都可进行。在选定的调查点查看茶树中上部 30 枝嫩梢芽下 1-3 叶正反面的叶蝉数量。调查过程需动作轻快，以避免昆虫逃脱漏数或重复计数。

1.3 气象资料

气象数据：2011-2022 年，采用各个监测点上年 12 月到当年的 1-3 月的最低温度、最高温度、平均气温、降水量、相对湿度、日照时长等数据，数据来源于当地气象局统计资料。

1.4 模糊综合评判法

1.4.1 关键预测因子的筛选 基于 2011-2017 年各监测点的气象数据和田间调查数据，利用逐步回归分析法筛选预测因子，设 Y 为第一峰峰值虫量，当地各气象因子为自变量，包括上年 12 月及当年 1-3 月的最低温度、最高温度、平均气温、降水量、相对湿度、日照时长、上年 12 月至 2 月最低气温之和、上年 12 月至 3 月最低气温之和等 26 个气象因子。利用 SPSS 22 软件进行逐步筛选，按照选取显著水平较高的变量作为预测式的因子，对筛选后的各个 X（气象因子）和 Y（第一峰峰值）分别进行回归分析的结果，通过对决定系数 R^2 和 F 统计量这两个指标进行筛选，决定系数尽量大（肖留斌等，2015），通过筛选、优化模型，最终确定 3 月田间虫口量、上年 12 月至 2 月最低气温之和、2 月平均气温作为关键预测因子。

1.4.2 确定评价因素集 T 根据专家经验确定 3 月田间虫口量和上年 12 月至 2 月最低气温之和的临界值，同时根据等差分级法确定 2 月平均气温的临界值[（即最高 2 月平均气温 - 最低 2 月平均气温）/3]，各个关键预测因子的临界值分别是：（1）X_1 为 3 月田间越冬虫口量（头/667 m^2），其临界值为 550 和 1 100，2 个临界值分为 3 个值域区段，T_1 为 $0 \leqslant X_1 \leqslant 550$，$T_2$ 为 $550 < X_1 \leqslant 1\,100$，$T_3$ 为 $X_1 > 1\,100$。（2）X_2 为上年 12 月至 2 月最低气温之和，其临界值为 0 和 6 ℃，这 2 个临界值将温度划分为 3 个值域区段，T_4 为 $X_2 \leqslant 0$，T_5 为 $0 < X_2 \leqslant 6$，T_6 为 $X_2 > 6$。（3）X_3 为 2 月平均气温，其临界值为 5 和 10 ℃，将温度划分为 3 个值域区段，T_7 为 $X_3 \leqslant 5$，T_8 为 $5 < X_3 \leqslant 10$，T_9 为 $X_3 > 10$。

1.4.3 建立评语集 参考彭萍等（2013a）的分级方法，将叶蝉发生程度分为 3 个等级：轻发生（每百叶 12 头以下），中等发生（每百叶 12-24 头），重发生（每百叶 24 头以上）。

1.4.4 确定各评价因子权重 根据知识库网状模型的知识结构，不同影响因子的每个区段进行组合，根据每个判别条件组合可以设定虫害各个等级发生的概率，并基于以往的专家经验进行定权。通过理论发生值回测和实际发生值预测，检验所组建预测方法的适用性与准确度。

1.5 系统构建

茶小绿叶蝉数字化预警（Digital forcasting of tea green leafhopper）是基于“茶树病虫害监测预警信息系统”的 Web 平台，实现茶小绿叶蝉第一峰发生趋势的预测，即各监测点通过“数据管理系统”填报的田间调查茶小绿叶蝉越冬虫口量和气象资料，于每年 4 月利用其平台中基于模糊综合评判法建成的“专家经验系统”来预测茶小绿叶蝉第一峰发生趋势。

1.6 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据处理，利用 SPSS

22 软件逐步筛选关键预测因子，利用 R 语言的 ggplot2 包、RColorBrewer 包、reshape2 包和 ggalt 包作图。

2　结果与分析

2.1　茶小绿叶蝉的发生动态

2.1.1　广西桂林茶区　从桂林茶区 2011-2021 年监测的茶小绿叶蝉数据来看（图 1），5-6 月的虫口发生量较大，2011 年茶小绿叶蝉发生盛期在 5 月中旬-6 月中旬，平均百叶虫口最高为 53 头；2013、2017 和 2018 年茶小绿叶蝉发生盛期均在 4 月下旬-5 月，2012、2014-2016 和 2019-2021 年茶小绿叶蝉发生盛期均在 5 月。总体来看，桂林地区茶小绿叶蝉第一虫口高峰期在 4 月下旬-6 月上中旬，且每年的最大发生量均超过 24 头/百叶，茶小绿叶蝉第一峰发生程度均为重度。

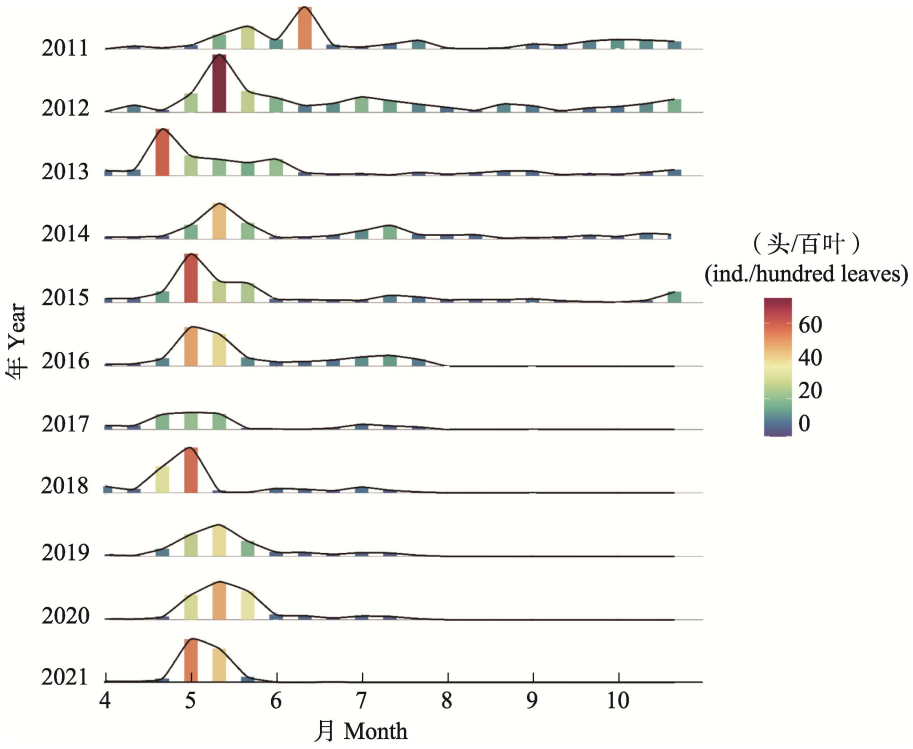


图 1　广西桂林地区茶小绿叶蝉发生动态

Fig. 1　Occurrence dynamics of *Empoasca onukii* in Guilin, Guangxi

2.1.2　安徽安庆茶区　安庆茶区 2018-2022 年的茶小绿叶蝉虫口数据显示（图 2），2018、2021 和 2022 年茶小绿叶蝉发生的高峰期均在 7 月上中旬，2019 和 2020 年茶小绿叶蝉发生高峰在 6 月中旬。总体来看，安庆地区茶小绿叶蝉第一虫口高峰在 6 月中旬-7 月中旬，但最大发生量均低于 12 头/百叶，茶小绿叶蝉第一峰发生程度较轻。

2.1.3　河南信阳茶区　信阳茶区 2011-2017 年茶小绿叶蝉的虫口数据显示（图 3），2011-2017 年整体虫口密度较大，第一高峰发生量均超过 18 头/百叶，但不同年份差异较大。2011 和 2012 年危害期持续较长，2011 年前期茶小绿叶蝉发生量小，从 8 月上旬开始虫口上升，发生危害一直持续到 10 月下旬；2012 年从 6 月中旬持续到 10 月中旬，高峰发生量均超过 24 头/百叶；2013 年茶小绿叶蝉的发生盛期在 6 月下旬-7 月中旬，2014 年在 7 月上中旬，第一高峰最大发生量均超过 24 头/百叶；2015 年呈明显双峰型，第一峰发生盛期在 6 月上旬-7 月上旬，第二峰在 8 月中旬-9 月上旬，第一高峰最大发生量超过 32 头/百叶；2016 年高峰期发生量较其他年份小，发

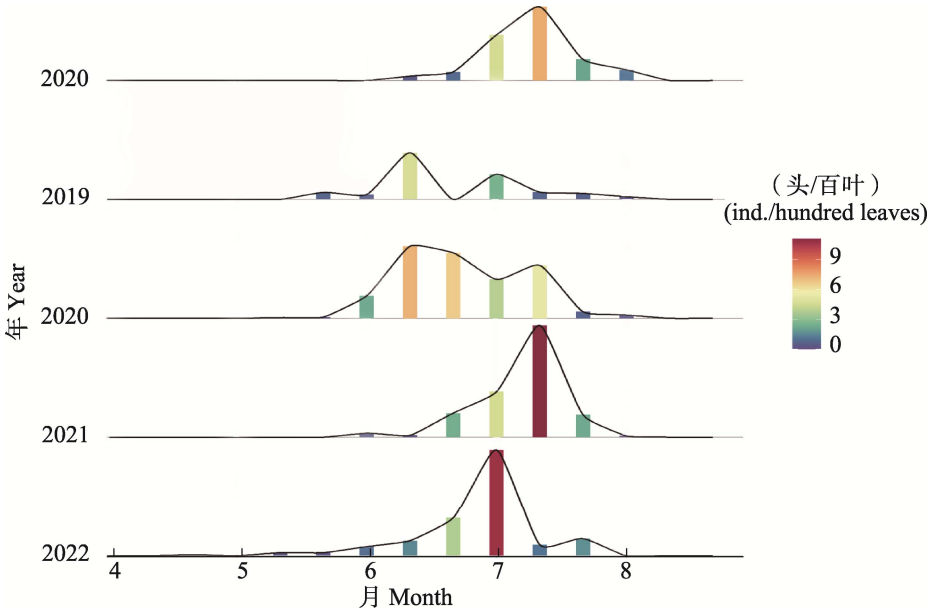


图 2　安徽安庆地区茶小绿叶蝉发生动态

Fig. 2　The occurrence dynamics of *Empoasca onukii* in Anqing, Anhui

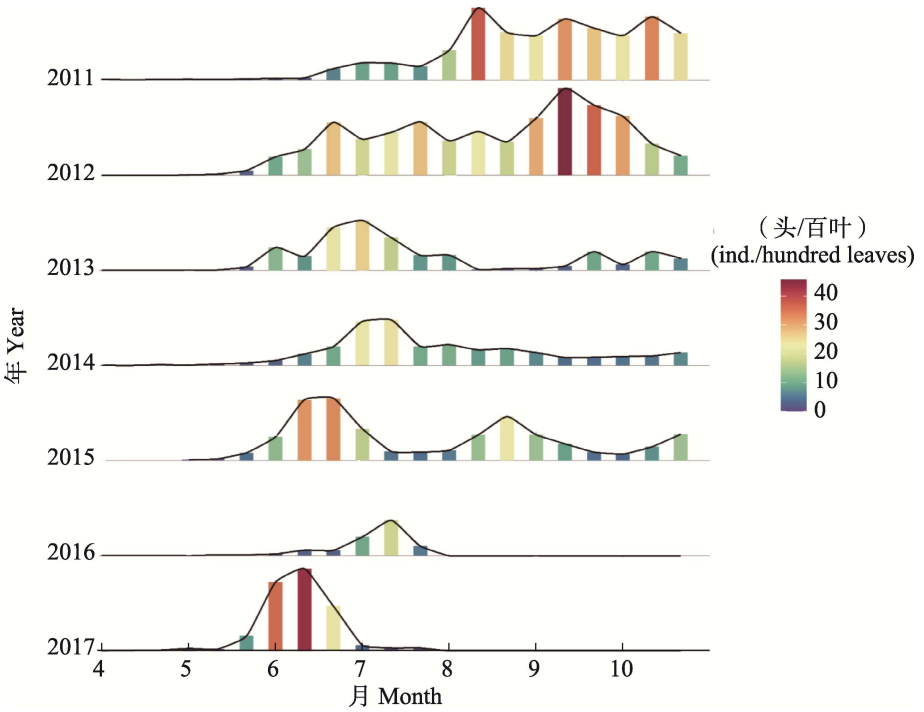


图 3　河南信阳地区茶小绿叶蝉发生动态

Fig. 3　Occurrence dynamics of *Empoasca onukii* in Xinyang, Henan

生盛期为 7 月上中旬，最大发生量约 19 头/百叶；2017 年第一虫口高峰明显提前，从 5 月下旬开始虫口逐渐增加，峰值出现在 6 月中旬，茶小绿叶蝉发生量超过 43 头/百叶。总体来看，信阳地区茶小绿叶蝉第一虫口高峰在 6 月上旬-7 月下旬，除 2011 和 2016 年外，其他年份高峰期最大发生量均超过 24 头/百叶，茶小绿叶蝉第一峰发生程度偏中度和重度。

2.1.4　重庆永川茶区　永川茶区 2011-2022 年茶小绿叶蝉监测数据显示（图 4），2011 年第一峰

持续时间较长，为 6 月中旬-8 月上旬，但发生量不大，均小于 17 头/百叶，第二峰出现在 9 月中旬，峰值最高达 45 头/百叶；2012 年发生盛期为 5 月下旬-8 月上旬，持续时间长且最大虫量超过 33 头/百叶；2013、2015-2016 和 2018 年茶小绿叶蝉发生量较小，其中 2016 年前期虫口数量小，7 月中旬虫口增多，但未超过 16 头/百叶；2014 年发生盛期为 6 月上旬-7 月中旬，最大虫量约 20 头/百叶；2017 年发生盛期为 6 月中旬-7 月下旬，最大发生量超过 24 头/百叶；2019-2022 年茶小绿叶蝉的发生盛期均在 6 月，第一峰虫口危害较重，2020 年第一峰虫口发生量最大，达 43 头/百叶。总体来看，永川地区茶小绿叶蝉第一虫口高峰在 5 月上旬-7 月下旬，除 2013、2015 和 2018 年发生较轻外，其他年份高峰期最大发生量均高于 12 头/百叶，其中 2012、2017 和 2019-2021 年高峰期最大虫量均超过 24 头/百叶。

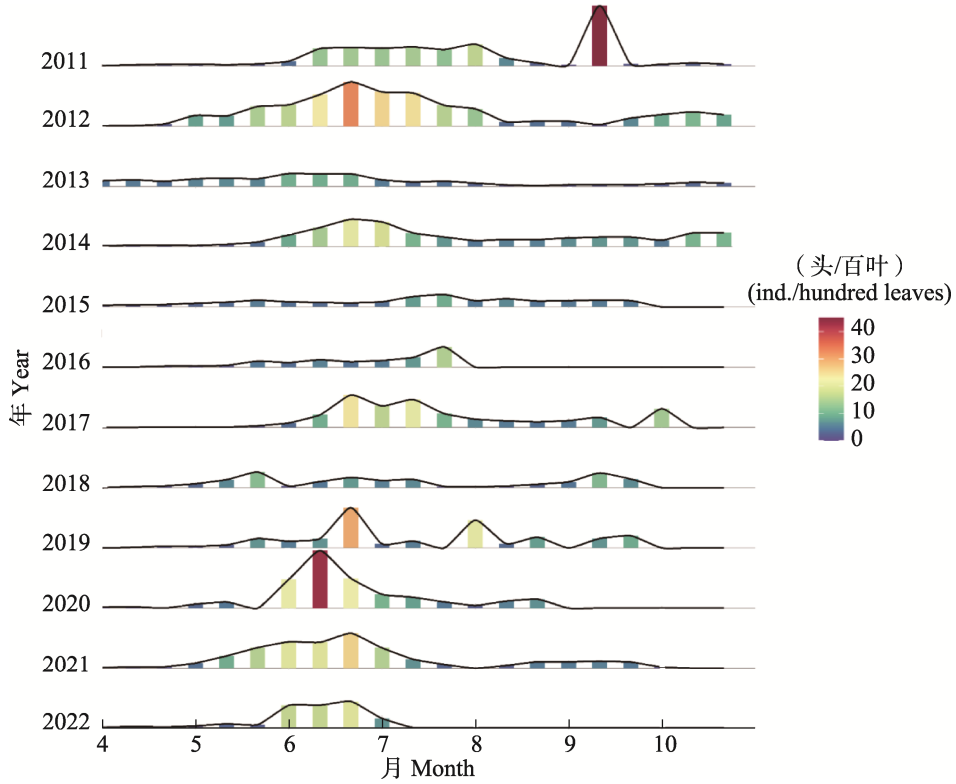


图 4　重庆永川地区茶小绿叶蝉发生动态

Fig. 4　Occurrence of *Empoasca onukii* in Yongchuan, Chongqing

2.2　模糊综合评价法相关要素的确立

2.2.1　关键气象因子　根据逐步筛选结果，选定了包括 2 月平均气温、上年 12 月至 2 月最低气温之和、12 月降水量、1 月日照时数和 2 月日照时数在内的 5 个气象因子（R^2 = 0.687），对这 5 个气象因子和 Y（第一峰峰值）分别进行回归分析的结果，得到 R^2 分别为 0.325、0.205、0.110、0.109 和 0.040，其中 2 月均温和上年 12 月至 2 月最低气温之和的回归方程达到极显著水平（P < 0.01），因此确定其为关键气象因子，同时引入越冬虫量作为关键预测因子。

2.2.2　评价因子权重　评价因子的权重对评价结果的影响较大，专家定权大多数是基于以往的经验进行定权，对于权值的确定具有很大的参考意义，通过专家经验设定的评价因素集，根据判别条件组合得出虫害发生程度轻、中和重的概率（表 1），从而实现茶小绿叶蝉第一峰发生程度的预测。如影响因子组合 T_1+T_4+T_7，表示每 667 m^2 茶园的越冬虫口量小于 550 头，上年 12 月至 2 月最低气温之和低于 0 ℃，2 月平均气温

表 1 不同判别条件下茶小绿叶蝉发生程度的概率值

Table 1 Probability value of occurrence degree of *Empoasca onukii* under different discriminant conditions

影响因子组合 Combination of impact factors	概率值（%） Probability value (%)		
	轻 Light	中 Medium	重 Heavy
T_1+T_4+T_7	63	20	17
T_1+T_4+T_8	33	49	18
T_1+T_4+T_9	30	47	23
T_1+T_5+T_7	28	60	12
T_1+T_5+T_8	25	63	12
T_1+T_5+T_9	11	32	57
T_1+T_6+T_7	30	50	20
T_1+T_6+T_8	33	31	36
T_1+T_6+T_9	20	32	48
T_2+T_4+T_7	35	53	12
T_2+T_4+T_8	18	31	51
T_2+T_4+T_9	17	35	48
T_2+T_5+T_7	33	45	22
T_2+T_5+T_8	28	31	41
T_2+T_5+T_9	29	22	49
T_2+T_6+T_7	24	45	31
T_2+T_6+T_8	11	31	58
T_2+T_6+T_9	5	34	61
T_3+T_4+T_7	14	28	58
T_3+T_4+T_8	11	29	60
T_3+T_4+T_9	17	16	67
T_3+T_5+T_7	26	22	52
T_3+T_5+T_8	15	25	60
T_3+T_5+T_9	9	22	69
T_3+T_6+T_7	17	10	73
T_3+T_6+T_8	6	16	78
T_3+T_6+T_9	1	16	83

T_1-T_3（T_1：$0 \leqslant X_1 \leqslant 550$，$T_2$：$550 < X_1 \leqslant 1\ 100$，$T_3$：$X_1 > 1\ 100$）：3 月田间越冬虫口量（头/667 m^2）；T_4-T_6（T_4：$X_2 \leqslant 0$，T_5：$0 < X_2 \leqslant 6$，T_6：$X_2 > 6$）：上年 12 月至 2 月最低气温之和；T_7-T_9（T_7：$X_3 \leqslant 5$，T_8：$5 < X_3 \leqslant 10$，T_9：$X_3 > 10$）：2 月平均气温。

T_1-T_3 (T_1: $0 \leqslant X_1 \leqslant 550$, T_2: $550 < X_1 \leqslant 1\ 100$, T_3: $X_1 > 1\ 100$): The overwintering insect population/667 m^2 in tea garden in March. T_4-T_6 (T_4: $X_2 \leqslant 0$, T_5: $0 < X_2 \leqslant 6$, T_6: $X_2 > 6$): The sum of the lowest temperature from last December to February; T_7-T_9 (T_7: $X_3 \leqslant 5$, T_8: $5 < X_3 \leqslant 10$, T_9: $X_3 > 10$): The average temperature in February.

低于或等于 5 ℃，那么茶小绿叶蝉的第一峰发生程度概率为轻发生 63%，中等发生 20%，重发生 17%。

2.3 系统构建与应用

“茶小绿叶蝉监测预警信息系统”实现了监测数据信息分析、传递、查询共享以及预警发布一体化等综合服务功能。本研究中数据管理系统是一种基于网络的数据管理系统，能够处理数据的上报、审核、发布和统计。数据可利用 Web 页面表单和 Excel 格式进行输入，实现信息数据的集中管理，同时亦可于数据管理系统导出 Excel 格式文件保存于计算机里。该数据管理系统集合了田间气象资料和茶小绿叶蝉田间调查数据的管理，网址：http://183.230.58.137:121/admin/index/index（图 5）。

专家经验系统是一种模拟专家的经验解决叶蝉预测预报的计算机程序系统。该系统由专家知识库、推理机及解释机等重要部件组成，将上述模糊综合评价法集成于系统作为专家知识库，实现茶小绿叶蝉预测预报功能，开展全国主要茶区叶蝉数字化预警。用户登录系统，输入 3 个影响因子的数值后，系统根据输入的值自动生成判别条件，来预测叶蝉第一峰发生趋势的概率，最终结果以 Fusion charts 图表控件生成柱状图和饼图的形式呈现，实施叶蝉的数字化监测预警。2018-2022 年，依据各地监测数据，应用构建的叶蝉专家经验知识库进行预测，以重庆永川 2022 年叶蝉的预测结果为例（图 6）。

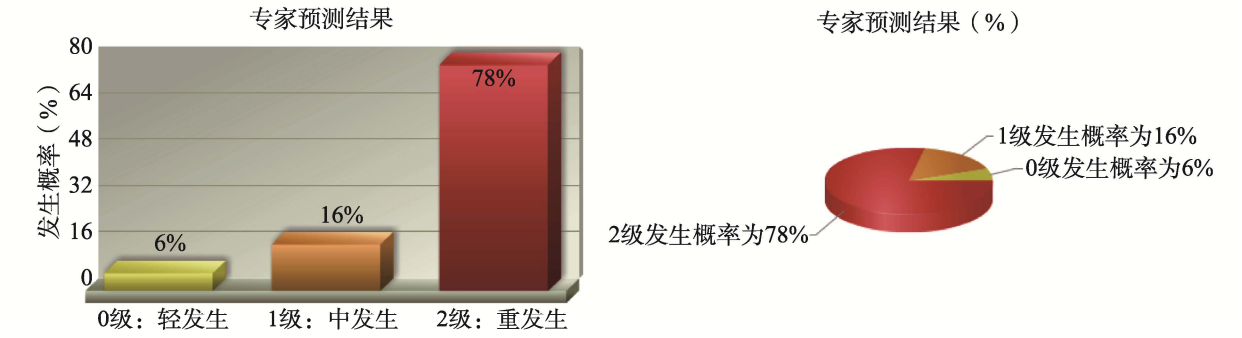
2.4 叶蝉预测与实际发生程度验证

2018-2022 年，全国四大茶区共有 12 个监测点进行系统监测叶蝉田间发生趋势动态。应用研发的“专家经验系统”对叶蝉的发生趋势进行数字化预警。在上述地区预测茶小绿叶蝉第一峰发生趋势，根据各地叶蝉实际发生情况，对预测的结果进行验证（表 2）。华南茶区 4 次监测的实际发生与预测结果完全符合；在江南茶区 23 次监测中，有 6 次与预测结果不符；江北茶区的 5 次监测中，有 1 次结果与预测不符合；西南茶区进行 23 次监测，有 2 次结果与预测结果不符。



图 5　茶体系主要病虫害监测预警信息系统后台界面

Fig. 5　The background interface of the main pest monitoring and early warning information system of tea system



输入参数	
3月虫口（667 m²虫量）：	2 145 头
上年12月至2月份最低气温之和：	7.40 ℃
2月份平均气温：	8.44 ℃
发生区域：	重庆市 永川
病虫害：	茶小绿叶蝉
专家经验库：	茶小绿叶蝉发生程度预测（最新）
专家预测等级：	2级
判别组合：	3月虫口(667 m²虫量)；≥1 100&上年12月至2月份最低气温之和；≥6&5≤2月份均气温<10

等级	发生概率	程度标准	描述
0	6	12头以下	轻发生
1	16	12-24头	中发生
2	78	24头以上	重发生

专题图



图 6　茶小绿叶蝉发生程度预测结果

Fig. 6　Prediction results of occurrence degree of *Empoasca onukii*

总体而言，叶蝉发生程度预测结果的准确率约83.64%。

3　结论与讨论

茶小绿叶蝉的种群动态受多方面因素影响，包括气候、茶园生境、农艺措施、品种及天敌等（陈李林等，2019；李金玉等，2020，2022b；杨春等，2021；孟泽洪等，2022；陆宴辉等，2023），但其分布主要受气候和寄主植物茶树的影响，其中气温和降水量是主导因子（姜明鑫等，2022）。桂林茶区属于亚热带季风气候，冬季最低气温一般不低于 0 ℃，平均气温约 10 ℃，因此叶蝉第一峰发生的时期相对较早，2017 年冬季温度较低且 5 月降水量较大，导致叶蝉虫口数量偏低；安庆茶区是亚热带季风性湿润气候，降水充沛，因此叶蝉虫口数量普遍较低；信阳茶区属于亚热

表 2 叶蝉预测与实际发生验证结果

Table 2 Verification results of *Empoasca onukii* prediction and actual occurrence

茶区 Tea region	监测点 Monitoring site	年份 Year	5-7 月虫口高峰（头/百叶） Peak insect population from May to July (ind./hundred leaves)	实际发生 Actual occurrence	影响因子 Influence factor			预测结果 Forecast result
					X_1（头/667 m^2） (ind./667 m^2)	X_2 (℃)	X_3 (℃)	
华南茶区 South China tea region	广西桂林 Guilin, Guangxi	2018	56.9	重 Heavy	3 899.2	9.0	13.7	重 Heavy
		2019	39.6	重 Heavy	1 267.3	20.6	13.9	重 Heavy
		2020	47.8	重 Heavy	1 949.6	4.0	14.3	重 Heavy
		2021	54.2	重 Heavy	1 316.0	6.9	15.8	重 Heavy
江南茶区 Jiangnan tea region	安徽安庆 Anqing, Anhui	2018	7.7	轻 Light	433.3	- 15.6	5.4	轻偏中 Light to medium
		2019	7.1	轻 Light	0.0	- 7.1	4.4	轻偏中 Light to medium
		2020	7.3	轻 Light	195.0	- 2.2	8.8	轻偏中 Light to medium
		2021	11.3	轻 Light	65.0	- 12.6	10.7	轻偏中 Light to medium
		2022	10.7	轻 Light	1 170.0	- 5.0	4.2	重 Heavy
	安徽黄山 Huangshan, Anhui	2018	19.5	中 Medium	97.4	- 17.2	5.9	轻偏中 Light to medium
		2019	32.9	重 Heavy	0.0	- 3.3	6.5	轻偏中 Light to medium
		2020	22.6	中 Medium	0.0	- 6.0	9.3	轻偏中 Light to medium
		2021	13.4	中 Medium	4 581.0	- 13.1	11.5	重 Heavy
		2022	12.7	中 Medium	2 340.0	- 4.8	5.1	中偏重 Medium to heavy
	湖北恩施 Enshi, Hubei	2018	29.4	重 Heavy	382.9	- 9.8	5.7	轻偏中 Light to medium
		2019	6.8	轻 Light	191.5	- 5.6	5.6	轻偏中 Light to medium
		2020	11.3	轻 Light	1 723.2	6.1	9.7	重 Heavy
		2021	12.3	中 Medium	3 925.0	- 3.9	9.5	中偏重 Medium to heavy
	江西南昌 Nanchang, Jiangxi	2019	2.6	轻 Light	0.0	- 2.0	6.0	轻 Light
		2020	15.5	中 Medium	389.9	0	10.9	轻偏中 Light to medium
		2021	1.7	轻 Light	195.0	- 9.0	12.5	轻偏中 Light to medium
		2022	2.7	轻 Light	975.0	5.0	3.2	轻偏中 Light to medium
	江苏无锡 Wuxi, Jiangsu	2018	36.3	重 Heavy	1 520.5	- 16.3	5.2	中偏重 Medium to heavy
		2019	24.6	重 Heavy	2 626.3	- 7.4	5.8	重 Heavy
		2020	36.5	重 Heavy	12 906.0	- 6.1	8.2	重 Heavy
		2021	19.7	中 Medium	1 990.0	- 14.4	5.2	中偏重 Medium to heavy
		2022	9.6	轻 Light	1 935.0	- 13.7	5.1	重 Heavy
江北茶区 Jiangbei tea region	山东日照 Rizhao, Shandong	2018	2.8	轻 Light	0.0	- 25.0	1.9	轻 Light
		2019	14.9	中 Medium	0.0	- 22.0	2.6	轻 Light
		2020	7.8	轻 Light	0.0	- 16.0	4.6	轻 Light
		2021	11.5	轻 Light	0.0	- 36.0	1.6	轻 Light
		2022	8.5	轻 Light	0.0	- 24.0	1.3	轻 Light

续表 2 (Table 2 continued)

茶区 Tea region	监测点 Monitoring site	年份 Year	5-7 月虫口高峰（头/百叶） Peak insect population from May to July (ind./ hundred leaves)	实际发生 Actual occurrence	影响因子 Influence factor			预测结果 Forecast result
					X_1（头/667 m^2） (ind./667 m^2)	X_2 (℃)	X_3 (℃)	
西南茶区 Southwest tea region	四川成都 Chengdu, Sichuan	2018	20.5	中 Medium	1 382.3	- 3.0	8.0	中偏重 Medium to heavy
		2019	22.3	中 Medium	276.4	- 4.1	7.7	轻偏中 Light to medium
		2020	61.3	重 Heavy	138.0	2.0	9.9	中 Medium
		2021	21.0	中 Medium	898.5	- 13.1	11.5	中偏重 Medium to heavy
		2022	47.3	重 Heavy	1 659.0	4.0	5.9	重 Heavy
	贵州铜仁 Tongren, Guizhou	2018	11.2	轻 Light	127.6	- 9.6	8.1	轻偏中 Light to medium
		2019	14.0	中 Medium	0.0	- 4.8	5.2	轻偏中 Light to medium
		2020	33.5	重 Heavy	3 574.0	3.7	9.4	重 Heavy
		2021	18.4	中 Medium	1 021.0	- 5.9	9.1	中偏重 Medium to heavy
		2022	8.5	轻 Light	0.0	- 10.2	2.3	轻 Light
	重庆永川 Yongchuan, Chongqing	2018	15.0	中 Medium	1 657.2	5.0	9.0	中偏重 Medium to heavy
		2019	30.0	重 Heavy	1 754.6	4.0	10.5	重 Heavy
		2020	43.0	重 Heavy	3 022.0	3.0	10.8	重 Heavy
		2021	36.4	重 Heavy	4 159.0	4.8	11.4	重 Heavy
		2022	22.2	中 Medium	2 145.0	7.4	8.4	中偏重 Medium to heavy
	云南普洱 Puer, Yunnan	2018	31.0	重 Heavy	2 988.2	17.0	16.2	重 Heavy
		2021	12.3	中 Medium	0.0	14.0	15.8	中偏重 Medium to heavy
		2022	16.5	中 Medium	3 067.0	29.0	14.6	中偏重 Medium to heavy
	贵州遵义 Zunyi, Guizhou	2018	51.9	重 Heavy	649.9	- 5.0	7.6	中偏重 Medium to heavy
		2019	27.9	重 Heavy	194.9	- 10.0	5.5	轻偏中 Light to medium
		2020	60.2	重 Heavy	650.0	- 2.0	7.9	重 Heavy
		2021	8.1	轻 Light	78.0	- 6.0	9.7	轻偏中 Light to medium
		2022	20.3	中 Medium	390.0	- 8.9	2.51	轻偏中 Light to medium

X_1：3 月田间越冬虫口量（头/667 m^2）；X_2：上年 12 月至 2 月最低气温之和；X_3：2 月平均气温。

X_1: The overwintering insect population in tea garden in March (ind./667 m^2); X_2: The sum of the lowest temperature from last December to February; X_3: The average temperature in February.

带向暖温带过渡的季风气候区，冬季低温对叶蝉发生动态的影响较为显著，在 2011 和 2016 年冬季，气温较低，导致第一峰虫口的发生时期延后，虫口数量整体偏低；永川茶区属于亚热带季风性湿润气候，茶小绿叶蝉第一峰发生期与梅雨季节重叠，如冬季温度低于 0 ℃，5-6 月雨量较多的年份，叶蝉的第一峰发生量均较低。由此可见，冬季低温和叶蝉发生期的降雨量是影响叶蝉发生规律的主要因素，其中冬季低温直接影响越冬成虫的成活率和第一峰发生的早迟，过多降雨则会大量杀死茶小绿叶蝉若虫，直接使虫口下降。本研究结果表明近年来茶小绿叶蝉发生规律仍然以单峰型和双峰型为主，第一虫口高峰发生的早迟和峰值虫量在各地差异较大。总体来看，茶小绿叶蝉第一峰发生期向前推移，集中在 5-7 月，部分地区可危害春茶，但主要为害夏秋茶。

茶小绿叶蝉以成虫越冬，低温是导致其越冬死亡的关键因素（乔利等，2015）。本研究将茶

小绿叶蝉的越冬虫量、筛选出的上年 12 月至 2 月最低气温之和和 2 月平均气温作为主要影响因子，利用模糊综合评判法构建茶小绿叶蝉第一峰发生程度预警方法，并基于此方法建立了茶树病虫害监测预警系统。该系统操作简单、实用性强、适用范围广。该预测方法选取的关键因子均在春茶生产之前，即 4 月上旬可发布预警结果，为提前做好防控叶蝉的准备提供参考。

近年来，随着互联网、物联网、人工智能等技术的快速发展，农作物病虫害测报预警领域出现了一系列创新性的技术、方法和智能监测装备，对农业测报预警体系在系统性、完整性和智能化等方面提出了更高的要求（萧玉涛等，2019；张金锋和胡白雨，2021；封洪强等，2023；Chen *et al.*，2024；Xiong *et al.*，2024）。边磊等（2022）研发了茶小绿叶蝉田间图像采集设备及搭载 AI 物联网的远程拍照系统，通过该设备识别黄色诱虫板上诱集的叶蝉成虫数量，从而远程监测叶蝉成虫的发生动态。然而，目前茶小绿叶蝉在田间的防治指标仍基于人工调查的若虫虫口数量。因此，今后将继续联合各大茶区，结合本研究的方法和经验，开展系统性和大尺度的监测工作，以期建立基于该虫远程智能监测的预警方法和防治指标。旨在为各项标准的制定和建立远程自动化的茶园主要病虫害测报预警平台和动态开放的专家系统提供基础。

致谢：感谢安徽省农业科学院茶叶研究所丁勇及团队成员、恩施土家族苗族自治州农业科学院张强及团队成员、江西省经济作物研究所杨普香及团队成员、四川农业科学院茶叶研究所罗凡及团队成员、普洱市茶叶科学研究所赵远艳及团队成员、贵州省铜仁职业技术学院田景涛及团队成员、贵州省农业科学院茶叶研究所王家伦及团队成员、日照市农业科学研究院丁仕波及团队成员和江苏省茶叶研究所邵元海等对本研究工作的支持。

参考文献 (References)

Bian L, He XD, Ji HH, Cai XM, Luo ZX, Chen HC, Chen ZM, 2022. Research and application of intelligent identification of *Empoasca onukii* based on machine vision. *Journal of Tea Science*, 42(3): 376–386. [边磊, 何旭栋, 季慧华, 蔡晓明, 罗宗秀, 陈华才, 陈宗懋, 2022. 基于机器视觉的小贯小绿叶蝉智能识别的研究与应用. 茶叶科学, 42(3): 376–386.]

Chen LL, Chen P, Wang Y, Ma X, Lin JK, Zhao ZH, 2019. Cover crops mediate abundance and egg density of tea green leafhopper (Hemiptera: Cicadellidae) in a tea plantation. *Journal of Plant Protection*, 46(5): 989–996. [陈李林, 陈平, 王优, 马旭, 林金科, 赵紫华, 2019. 茶园间作功能植物对茶小绿叶蝉的调控作用. 植物保护学报, 46(5): 989–996.]

Chen XY, Hassan MM, Yu JH, Zhu AF, Han Z, He PH, Chen QS, Li HH, Ouyang Q, 2024. Time series prediction of insect pests in tea gardens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(9): 5614–5624.

Chen ZM, Cai XM, Zhou L, Bian L, Luo ZX, 2020. Developments on tea plant pest control in past 40 years in China. *China Tea*, 44(1): 1–8. [陈宗懋, 蔡晓明, 周利, 边磊, 罗宗秀, 2020. 中国茶园有害生物防控 40 年. 中国茶叶, 42(1): 1–8.]

Feng HQ, Yao Q, Hu C, Huang WJ, Hu XP, Liu J, Zhang YH, Zhang Z, Qiao HB, Liu W, 2023. Recent advances in intelligent techniques for monitoring and prediction of crop diseases and insect pests in China. *Plant Protection*, 49(5): 229–242. [封洪强, 姚青, 胡程, 黄文江, 胡小平, 刘杰, 张云慧, 张智, 乔红波, 刘伟, 2023. 我国农作物病虫害智能监测预警技术新进展. 植物保护, 49(5): 229–242.]

Jiang MX, Zhong WY, Hu HQ, Zheng ZQ, Chen YT, You MS, Chen LL, 2022. Prediction of potential suitable regions of tea green leafhopper in China in the context of climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 41(10): 2008–2016. [姜明鑫, 钟文玉, 胡海琴, 郑志强, 陈燕婷, 尤民生, 陈李林, 2022. 气候变化背景下茶小绿叶蝉在中国的潜在适生区预测. 生态学杂志, 41(10): 2008–2016.]

Jiang YY, Liu J, Zeng J, Xia B, Lu XH, 2021. Monitoring and forecast of cotton pests in China: A review over the past 70 years. *Journal of Plant Protection*, 48(5): 940–946. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 夏冰, 陆宴辉, 2021. 中国棉花害虫测报: 70 年回顾. 植物保护学报, 48(5): 940–946.]

Li JY, Niu DS, Chen J, You SJ, You MS, 2020. Effects of landscape pattern around tea plantation on population genetic structure of the tea green leafhopper, *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(10): 1242–1259. [李金玉, 牛东升, 陈杰, 尤士骏, 尤民生, 2020. 茶园周边景观格局对茶小绿叶蝉种群遗传结构的影响. 昆虫学报, 63(10): 1242–1259.]

Li JY, Liu FJ, Huang HS, Zhang H, Li HL, Wu GY, Wang QS, 2022a. Research progress on environmentally friendly control of tea green leafhoppers in China. *Acta Tea Sinica*, 63(4): 283–292. [李金玉, 刘丰静, 黄火水, 张辉, 李慧玲, 吴光远, 王庆森, 2022a. 我国茶小绿叶蝉绿色防控技术研究进展. 茶叶学报, 63(4): 283–292.]

Li JY, Wang QS, Li LD, Wang DF, Zeng MS, Wu GY, 2022b.

Research progress on the dominant species identification of tea green leafhopper and the relationship between its population and the biological and ecological environment. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 37(1): 123–130. [李金玉, 王庆森, 李良德, 王定锋, 曾明森, 吴光远, 2022b. 茶小绿叶蝉种名变更及其种群发生与生物生态环境关系的研究进展. 福建农业学报, 37(1): 123–130.]

Li YH, Feng YB, Su HF, Zhao YY, Shi S, 2023. Occurrence regularity of tea green leafhopper in Pu'er tea area. *Newsletter of Sericulture and Tea*, 2023(3): 25–28, 31. [李艳华, 冯彦波, 苏红飞, 赵远艳, 石尚, 2023. 普洱地区茶小绿叶蝉发生规律. 蚕桑茶叶通讯, 2023(3): 25–28, 31.]

Lu YH, Liu Y, Yang XM, Jing YP, Hu G, Luan JB, Guo ZJ, Ma G, Yan S, Liang P, Liu J, Xiao HJ, 2023. Advances in integrated management of agricultural insect pests in China: 2018–2022. *Plant Protection*, 49(5): 145–166. [陆宴辉, 刘杨, 杨现明, 荆玉谱, 胡高, 栾军波, 郭兆将, 马罡, 闫硕, 梁沛, 刘杰, 肖海军, 2023. 中国农业害虫综合防治研究进展: 2018 年-2022 年. 植物保护, 49(5): 145–166.]

Meng ZH, Yang C, Li S, Chen ZW, Zhou YF, 2022. Relationships between leaf structure of tea plants and resistance to tea stick thrip and tea green leafhopper. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 51(6): 94–102. [孟泽洪, 杨春, 李帅, 陈正武, 周玉锋, 2022. 茶树对茶棍蓟马和茶小绿叶蝉抗性与叶片结构的关系. 河南农业科学, 51(6): 94–102.]

Meng ZN, Bian L, Luo ZX, Li ZQ, Xin ZJ, Cai XM, 2018. Taxonomic revision and analysis of the green tea leafhopper species in China's main tea production area. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(3): 514–526. [孟召娜, 边磊, 罗宗秀, 李兆群, 辛肇军, 蔡晓明, 2018. 全国主产茶区茶树小绿叶蝉种类鉴定及分析. 应用昆虫学报, 55(3): 514–526.]

National Plant Protection Station of Ministry of Agriculture, 1988. Pests and diseases forecast. National Plant Protection Station of Ministry of Agriculture of 'Pests and Diseases Forecast' Editing Department. 12–60. [农业部全国植物保护总站, 1988. 病虫测报. 农业部全国植物保护总站《病虫测报》编辑部. 12–60.]

National Plant Protection Station of Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Fisheries, 1986. Forecasting Method of Tea Pests and Diseases in China. Hefei: Anhui Science and Technology House Press. 52–560. [农牧渔业部全国植保总站, 1986. 中国茶树病虫害测报方法. 合肥: 安徽科学技术出版社. 52–60.]

Peng P, Wang XQ, Li PW, 2013a. Forecasting and Control Technology of Tea Pests and Diseases. Beijing: China Agricultural Publishing House Press. 1–17. [彭萍, 王晓庆, 李品武, 2013a. 茶树病虫害测报与防治技术. 北京: 中国农业出版社. 1–17.]

Peng P, Wang XQ, Hu X, Lin Q, 2013b. Experimental study on population growth and decline of tea green leafhopper by yellow board in field. *China Plant Protection*, 33(7): 40–43. [彭萍, 王晓庆, 胡翔, 林强, 2013b. 黄板监测假眼小绿叶蝉田间种群消长试验研究. 中国植保导刊, 33(7): 40–43.]

Peng P, Wang XQ, Xiao YH, Xu YL, 2010. Review and prospect on forecasting of tea pests and diseases. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 23(5): 1742–1745. [彭萍, 王晓庆, 肖玉华, 徐雅丽, 2010. 茶树病虫害预测预报方法的回顾与展望. 西南农业学报, 23(5): 1742–1745.]

Qiao L, Qin DZ, Lu ZC, Liu XC, Lü LZ, Wu JX, 2015. Effects of temperature on survival rate and protection enzymes of *Empoasca onukii* Matsuda. *Journal of Plant Protection*, 42(2): 223–228. [乔利, 秦道正, 卢兆成, 刘祥臣, 吕立哲, 仵均祥, 2015. 温度对茶小绿叶蝉成虫存活率及保护酶系的影响. 植物保护学报, 42(2): 223–228.]

Qin HG, Li JC, Mu D, Hu Q, Huang Y, Han BY, 2008. Discussion on forecasting on population dynamics of tea green leafhopper based on temporal sequence autoregression model. *Journal of Anhui Agricultural University*, 35(4): 564–570. [秦华光, 李家才, 穆丹, 胡强, 黄毅, 韩宝瑜, 2008. 时间序列自回归模型预测茶园小绿叶蝉种群动态的探讨. 安徽农业大学学报, 35(4): 564–570.]

Xiao LB, Wang FL, Chen H, Wang Z, Bai LX, 2015. Development and application of a medium-term prediction model for *Apolygus lucorum* (Hemiptera: Miridae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(3): 623–630. [肖留斌, 王凤良, 陈华, 王震, 柏立新, 2015. 绿盲蝽中期预测模型的组建与应用. 应用昆虫学报, 52(3): 623–630.]

Xiao YT, Wu C, Wu KM, 2019. Agricultural pest control in China over the past 70 years: Achievements and future prospects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1115–1124. [萧玉涛, 吴超, 吴孔明, 2019. 中国农业害虫防治科技 70 年的成就与展望. 应用昆虫学报, 56(6): 1115–1124.]

Xie XQ, He WX, Shi XP, Peng YF, Li YS, Peng H, Yang PX, 2020. Studies on occurrence characteristics of *Empoasca onukii* and its regression forecasting. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 32(3): 87–91. [谢小群, 贺望兴, 石旭平, 彭玉辅, 李延升, 彭华, 杨普香, 2020. 小贯小绿叶蝉发生规律与预测预报研究. 江西农业学报, 32(3): 87–91.]

Xiong B, Li DL, Zhang Q, Desneux N, Luo C, Hu ZQ, 2024. Image detection model construction of *Apolygus lucorum* and *Empoasca* spp. based on improved YOLOv5. *Pest Management Science*, 80(6): 2577–2586.

Yang C, Meng ZH, Li S, Guo Y, Liang SH, Qiao DH, Chen ZW, 2021. Population dynamics of *Dendrothrips minowai* Priesner and *Empoasca onukii* Matsuda and host resistance of major tea varieties in Guizhou. *Journal of Southern Agriculture*, 52(3): 671–681. [杨春, 孟泽洪, 李帅, 郭燕, 梁思慧, 乔大河, 陈正武, 2021. 贵州茶园茶棍蓟马和小贯小绿叶蝉种群动态及主栽茶树品种寄主抗性. 南方农业学报, 52(3): 671–681.]

Zhang JF, Hu BY, 2021. Analysis on the current status of standardization in monitoring and forecast system of agricultural diseases and insects. *Biological Disaster Science*, 44(4): 477–481. [张金锋, 胡白雨, 2021. 农业病虫害测报预警体系标准化现状分析及建议. 生物灾害科学, 44(4): 477–481.]