

文章编号:1001-7380(2024)02-0014-07

南京城区美国白蛾发生规律探析

戴伟¹, 奚月明¹, 游琳琳¹, 刘贺佳¹, 冯婷^{2*}

(1. 南京市林业站, 江苏 南京 210000; 2. 南京沐森林业科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:2019—2023年对美国白蛾在南京市主城4区(鼓楼区、建邺区、秦淮区、玄武区)的发生规律进行了调查和分析,根据这5a内美国白蛾成虫种群动态变化、幼虫危害情况及每年越冬蛹基数的调查,总结得出南京市主城区美国白蛾生活史。根据气象因子的数据汇总,并选取几种气象因子与每代成虫发生量进行相关性分析得出:与越冬代成虫羽化量最显著相关的气象因子为旬平均相对湿度,相关性 $R^2=0.9125$;与第1代成虫羽化量最显著相关的气象因子为旬平均相对湿度,相关性 $R^2=0.6124$;与第2代成虫羽化量最显著相关的气象因子为旬总降雨量, $R^2=0.9998$ 。利用回归法建立了南京市主城区美国白蛾发生期预测模型,以期为长江中下游其他城市地区预测美国白蛾发生趋势和开展防治工作提供一定参考。

关键词:美国白蛾;发生规律;气象因子;南京城区

中图分类号:S763.42

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.02.003

Analysis of the occurrence patterns of *Hyphantria cunea* Drury in urban areas of Nanjing

Dai Wei¹, Xi Yueming¹, You Linlin¹, Liu Hejia¹, Feng Ting^{2*}

(1. Nanjing Forestry Work Station, Nanjing 210000, China; 2. Nanjing Musen Forestry Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: From 2019 to 2023, an investigation was conducted on the occurrence patterns of *Hyphantria cunea* Drury in the four main urban areas of Nanjing City (Gulou District, Jianye District, Qinhuai District, and Xuanwu District). Based on the dynamic changes of the adult population, larval infestation status, and the annual overwintering pupal counts of *H. cunea* Drury over these five years, the author has summarized the life history of the pest in Nanjing. By summarizing the meteorological factor data and performing a correlation analysis between several factors and the number of emerging adults in each generation, it was found that the meteorological factor most significantly correlated with the emergence of the overwintering generation was the decadal average relative humidity, with R^2 value of 0.9125. The most significant meteorological factor correlated with the emergence of the first generation adults was also the decadal average relative humidity, with R^2 value of 0.6124. For the second generation, the most significant factor was the decadal total rainfall, with an R^2 value of 0.9998. A forecasting model for the occurrence period of *H. cunea* Drury in Nanjing was established using regression methods, aiming to providing a reference for predicting the trend of the *H. cunea* Drury occurrence and carrying out prevention and control efforts in other cities and regions in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Key words: *Hyphantria cunea* Drury; Occurrence pattern; Meteorological factor; Urban area of Nanjing

美国白蛾,又名美国灯蛾、秋幕毛虫,是一种严重危害林木和农作物的世界检疫性有害生物,具有喜食行道树、繁殖率高、适应性广、传播蔓延快、易爆发成灾等特点,严重影响城区生态效益与人文景

收稿日期:2023-10-16;修回日期:2023-12-18

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目“沿江苏南美国白蛾智能监测及精准化防控技术集成与示范”(LYKJ[2019]04)

作者简介:戴伟(1993-),男,江苏东台人,工程师,硕士。主要从事林业有害生物检疫防控工作。

*通信作者:冯婷(1986-),女,江苏南京人,工程师,硕士。主要从事森林保护及林业有害生物防控工作。E-mail:652825994@qq.com

观^[1]。自2015年在本市首次发现以来,经过发展蔓延,美国白蛾已分布于8个疫区,目前主城区(玄武区、秦淮区、建邺区、鼓楼区)均为国家林草局公布的美国白蛾疫区^[2]。随着对长江中下游流域环境适应性逐渐增强,美国白蛾有继续向南扩散的趋势,整体防控形势十分严峻^[3]。

严密监测是做好美国白蛾等本地主要林业有害生物防控的基础性工作,是及时捕捉疫情、及早发现灾情、适时科学防控的前提^[4]。为充分掌握美国白蛾在南京城区的发生规律和发生趋势,分析比较不同年份、各区间的发生危害差异,实现以最小的监测成本达到最大的防控成效,2019—2023年在主城区开展了美国白蛾全世代、各虫态监测调查工作。通过监测数据,结合气象、寄主、环境等相关因子,对南京主城区美国白蛾发生规律进行研究分析,建立了主城区美国白蛾发生期预测模型,以期为分析研究不同区间美国白蛾发生规律差异和指导长江中下游其他城市地区美国白蛾监测预报及防治作业提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 监测区域概况

南京市玄武、秦淮、建邺、鼓楼4城区位于南京中部,区域总面积259.62 km²,西临长江,东傍紫金山,秦淮河穿境而流,区位优势明显。境地属北亚热带湿润气候区,四季分明,雨水充沛,年温差较大,灾害性气象灾害较少。区域内人口密集,交通发达,内含南京火车站、汽车客运站,拥有宁杭、宁沪、宁马、绕城等十多条对外高速通道,是沟通苏、沪、浙、皖的重要交通节点。

植被区属北亚热带常绿成分的落叶阔叶混交林,绿化主要是沿江、绕城公路防护林,以及城市道路、绿地公园、小区广场等地。主要绿化树种有悬铃木、香樟、栎树、榉树、雪松、水杉、银杏、广玉兰、樱花、桂花、女贞、枫杨等。2019—2023年南京4城区美国白蛾发生面积分别为0, 200, 5 133, 667, 0 m²,喜食树种为悬铃木、水杉、桑树、枫杨,危害占比在80%以上。

1.2 材料和工具

桶式性信息素诱捕器和性信息素诱芯(北京中捷四方生物科技有限公司)、铁丝、老虎钳、铁锹、镊子、集虫瓶、高枝剪、望远镜、放大镜、记录本(表)、记号笔、档案盒等。

1.3 监测方法

1.3.1 成虫监测 采用性诱法:根据4城区的美国白蛾具体发生情况,选择公园景区、新建绿化带、滨江沿河绿地、重点交通干线等美国白蛾传入或定殖风险高的区域设置监测点。每年4月10日前完成400个性信息素诱捕器挂设工作,每1代成虫监测前更换1次诱芯。成虫期内每日由专人定时定点调查,记录诱集情况。

1.3.2 幼虫监测 采用踏查和详查方式:基于成虫诱集数据,以诱集到成虫的监测点位为中心,向周边绿地(公园)、交通干线、村庄分散调查。发现幼虫网幕后,再以发现点为中心,调查周边成片林、行道树或四旁树,同步记录周边环境情况。每周调查1次,填写幼虫期调查表。

1.3.3 蛹期监测 采用人工挖蛹方式:选择历代幼虫虫口密度较大的区域作为样地,每块样地挑选寄主树种10株,每株设置标准地(1 m²)调查,在树皮缝、砖瓦块等越冬场所采集越冬蛹,越冬前后各调查1次,记录有蛹株率、蛹存活率、每株蛹数等。寄主统一按每公顷900株折算,平均株蛹数(头/株)=平均每平方米蛹数×11.1 m²/株。

1.4 气象因子采集

在4城区各设立林间气候观测站1台,采集记录4城区的气象资料:最高温度、最低温度、日平均温度、相对湿度、降水量等,每日数据同步传输到计算机数据库中,用于统计和分析。

1.5 统计方法

各项试验所得结果均采用SPSS19.0中文版统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 美国白蛾生活史

美国白蛾在南京城区一般发生3代,蛹在树缝、枯枝落叶下、砖瓦石块缝隙、地表浅土内、建筑物缝隙及角落等处越冬,于翌年4月中旬至5月中旬羽化,5月上旬进入羽化盛期。第1代美国白蛾幼虫在4月下旬孵化,5月下旬为网幕危害高峰期,6月上旬开始下树化蛹,6月下旬至7月上旬进入化蛹盛期,6月中旬至7月下旬为第1代成虫羽化期,6月下旬至7月上旬进入羽化盛期。第2代美国白蛾幼虫6月底初孵,7月中下旬为网幕危害高峰期,7月下旬第2代老熟幼虫开始陆续下树化蛹,8月中旬开始羽化,下旬进入羽化盛期,8月中下旬为第3

代幼虫孵化盛期,9月上旬至下旬为第3代幼虫网幕危害高峰期。第2代与第3代美国白蛾有世代重叠现象,9月中旬老熟幼虫下树化蛹,持续至10月

下旬,绝大部分以蛹越冬,但也有少量9月中旬化蛹,于9月下旬至10月初羽化(见图1)。

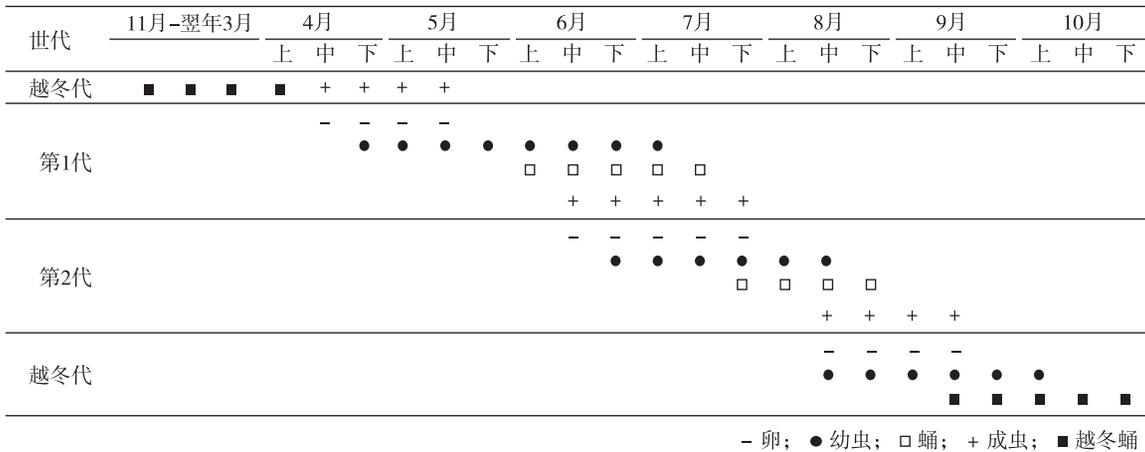


图1 南京市主城区美国白蛾生活史

2.2 美国白蛾成虫种群动态变化

如图2所示,时间特征上:针对年度诱集量分析来看,2019—2023年,南京城区美国白蛾整体种群数量呈现先增长后下降的趋势,其中2021年诱集到的数量最多;针对每一世代诱集量分析来看,美国白蛾越冬代种群数量大于第1代和第2代,第1代

种群数量大于第2代。

如图3所示,空间特征上:美国白蛾种群呈现聚集分布,在南京不同城区之间的分布存在较大的差异,其中建邺区发生危害最重、秦淮和玄武区次之,鼓楼区最轻。发生区域集中在与疫区交界处、江岸河道周边、交通要道及管理松散的绿化工地。

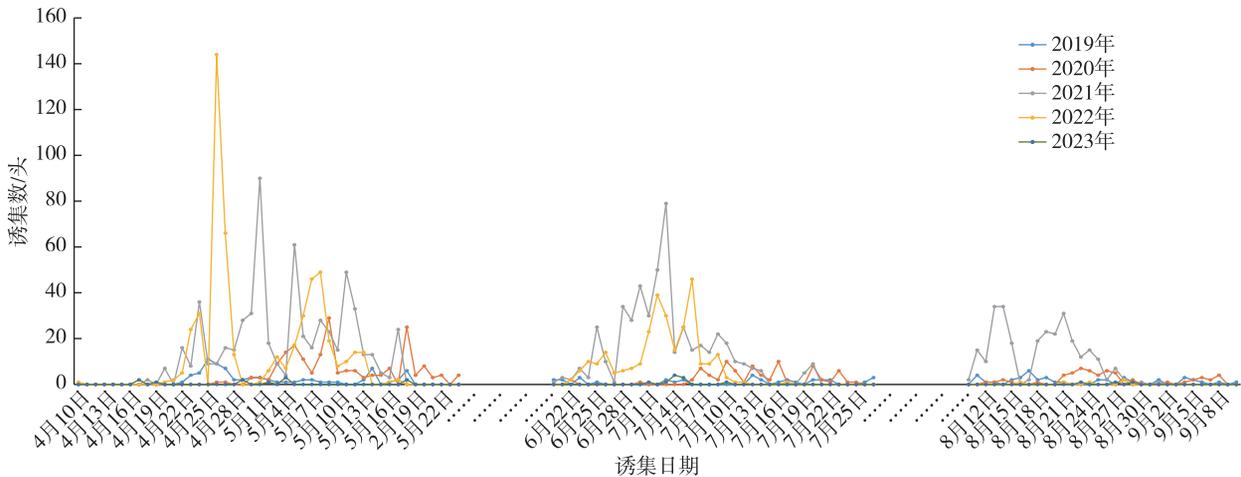


图2 2019—2023年南京主城区美国白蛾羽化动态

2.3 幼虫踏查及越冬蛹调查结果

林间幼虫调查发现,主城区整体危害较轻,均未暴发成灾。2019—2023年,美国白蛾发生危害呈现一定波动性,2021年相对其他4个年份发生面积最大,其中建邺区发生面积大于其他3区。

2020年和2021年分别在秦淮区七桥瓮生态湿地公园和玄武区运粮河西路附近的寄主树种上监

测到美国白蛾第3代幼虫,虫龄在2—5龄不等,为2区首次发现,并上报国家林业和草原局。

2020—2022年,对设置的40块样地、总计400株寄主树种进行美国白蛾越冬代调查。调查中发现,有蛹株率均低于5%,其中2021年12月调查数据最高为3.5%;平均每株存在越冬蛹头数低于1头,其中2020年12月调查数据最高为0.44头/株;美国白蛾越冬蛹

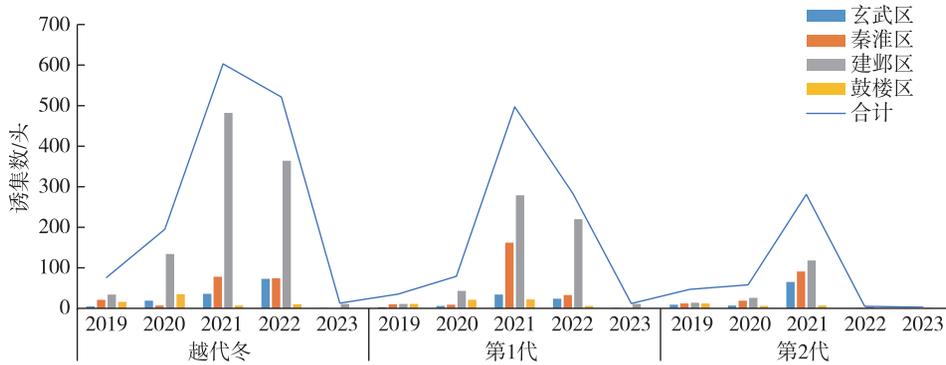


图 3 2019—2023 年南京主城区成虫诱集量对比

存活率较高,在不同年份中均高于 50%。

2.4 气象因子关联性分析

选取 2021—2022 年南京主城区美国白蛾 3 代

成虫羽化期间气象因子数据对成虫羽化进行分析,通过 EXCEL 软件进行气象因子与诱虫量相关性分析,得出相关性 R^2 值,见表 1。

表 1 气象因子对各世代成虫羽化相关性数据 (R^2) 汇总

世代	R^2 值						
	旬极值高温	旬极值低温	旬平均温度	旬最高相对湿度	旬最低相对湿度	旬平均相对湿度	旬累计降雨量
越冬代	0.463 6	0.501 5	0.401 8	0.039 2	0.146 6	0.912 5	0.220 3
第 1 代	0.179 9	0.195 8	0.311 5	0.326 6	0.193 0	0.612 4	0.259 3
第 2 代	0.923 4	0.523 1	0.096 6	0.489 0	0.251 0	0.797 8	0.999 8

(1)在越冬代成虫羽化量(头)与旬极值高温、旬极值低温、旬平均温度、旬最高相对湿度、旬最低相对湿度、旬平均相对湿度、旬累计降雨量这 7 种气象因

子相关性中,旬平均相对湿度影响相关性 $R^2 = 0.9125$ > 旬极值低温相关性 $R^2 = 0.5015$ > 旬极值高温 $R^2 = 0.4636$,其他影响指数相关性较低(见图 4)。

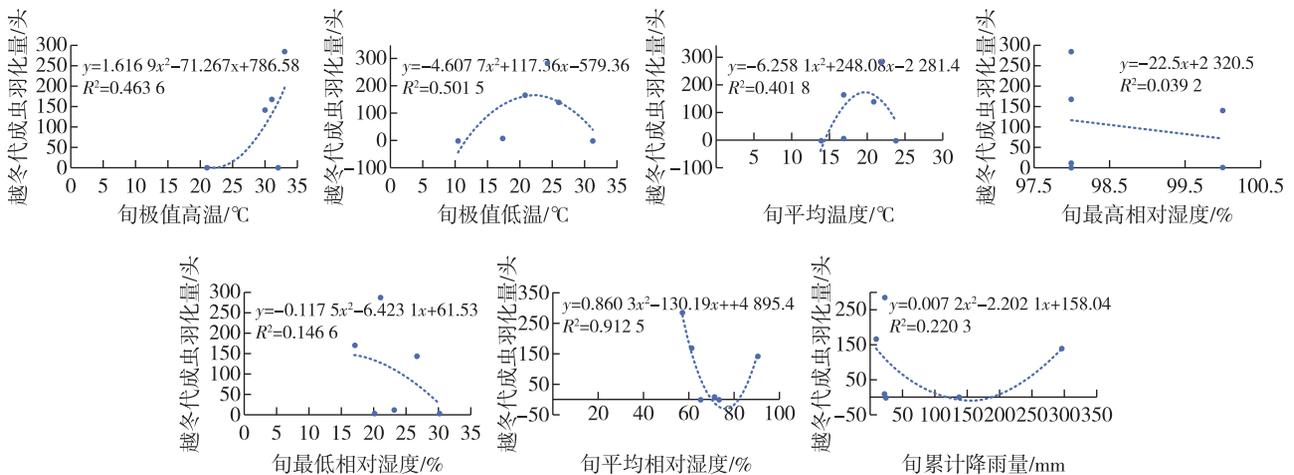


图 4 各气象因子与越冬代成虫羽化量相关性

(2)在第 1 代成虫羽化量与旬极值高温、旬极值低温、旬平均温度、旬最高相对湿度、旬最低相对湿度、旬平均相对湿度、旬累计降雨量这 7 种气象因子中,旬平均相对湿度影响相关性 $R^2 = 0.6124$ > 旬最高相对湿度相关性 $R^2 = 0.3266$ > 旬平均温度 $R^2 = 0.3115$,其他影响指数相关性较低(见图 5)。

(3)在第 2 代成虫羽化与旬极值高温、旬极值低温、旬平均温度、旬最高相对湿度、旬最低相对湿度、旬平均相对湿度、旬累计降雨量这 7 种气象因子中,旬累计降雨量相关性 $R^2 = 0.9998$ > 旬极值高温相关性 $R^2 = 0.9234$ > 旬平均相对湿度相关性 $R^2 = 0.7978$,其他影响指数相关性较低(见图 6)。

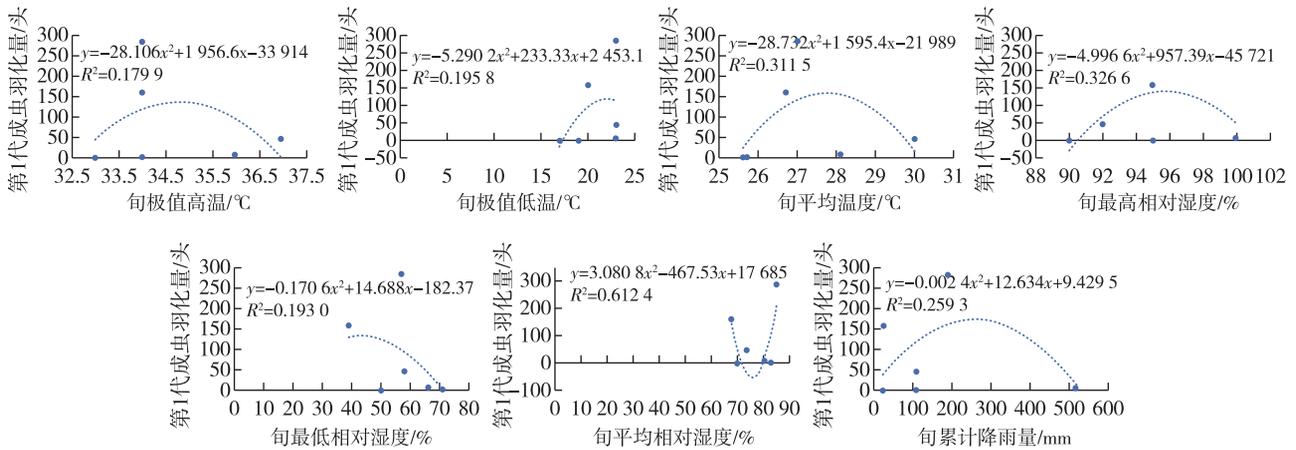


图 5 各气象因子与第 1 代成虫羽化量相关性分析

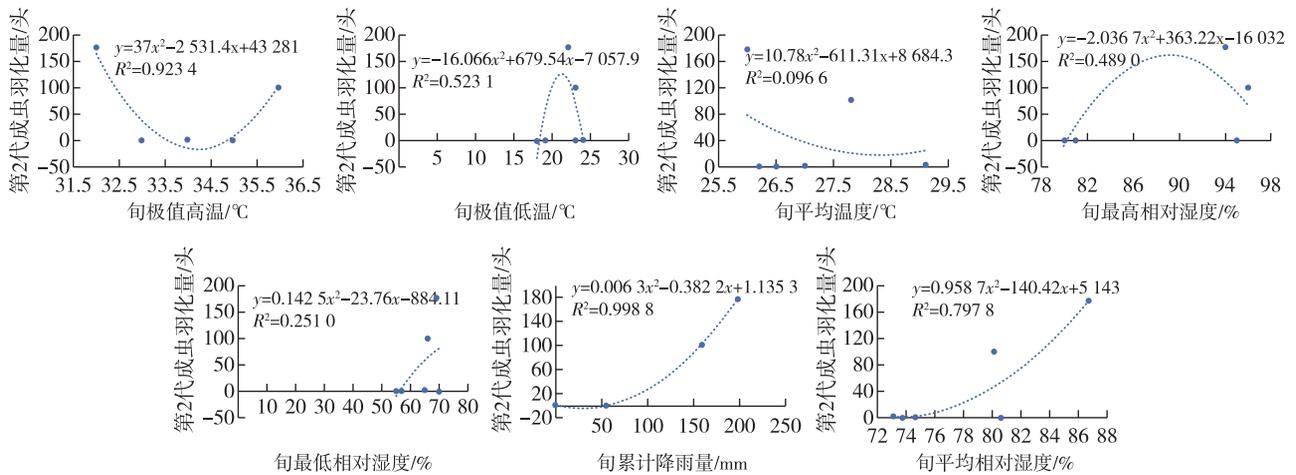


图 6 各气象因子与第 2 代成虫羽化量相关性分析

2.5 利用回归法构建美国白蛾发生期预测模型

2.5.1 预测模型

(1) 越冬代成虫始见期预测模型: 选取 2019—2023 年 4 月 1 日起至成虫始见期平均温度 X_1 、1 月 1 日至成虫始见期平均温度 X_2 、4 月 1 日至成虫始见期平均相对湿度 X_3 、1 月 1 日至成虫始见期平均相对湿度 X_4 、4 月 1 日至成虫始见期累计降水量 X_5 、1 月 1 日至成虫始见期累计降水量 X_6 、4 月 1 日至成虫始见期有效积温 X_7 、1 月 1 日至 4 月中旬有效积温 X_8 作为建立模型的气象因子, Y_1 为越冬代成虫始见期, 将历年成虫始见期用自然数表示 (4 月 1 日设定为 1)。通过 SPSS 软件分析, 得出 4 月 1 日至成虫始见期的平均温度 X_1 、1 月至始见期降雨量 X_6 、1 月初至 4 月中旬有效积温 X_8 和越冬代成虫羽化始见期具有显著相关性。

(2) 第 1 代虫害发生期预测模型: 选取 5 月平均温度 X_9 、5 月平均相对湿度 X_{10} 、5 月累计降雨量

X_{11} 、5 月有效积温 X_{12} 、越冬代成虫始见期 X_{13} 作为建立模型的气象因子 (5 月 1 日设定为 1), Y_2 为第 1 代发生期 (越冬代成虫产卵高峰期)。通过 SPSS 软件分析, 得出 5 月降雨量 X_{11} 、5 月有效积温 X_{12} 、越冬代成虫始见期 X_{13} 和第 1 代发生期有显著相关性。

(3) 第 2 代虫害发生期预测模型: 选取 6 月平均温度 X_{14} 、6 月平均相对湿度 X_{15} 、6 月累计降雨量 X_{16} 、6 月有效积温 X_{17} 、7 月平均温度 X_{18} 、7 月平均相对湿度 X_{19} 、7 月累计降雨量 X_{20} 、7 月有效积温 X_{21} 、第 1 代成虫始见期 X_{22} 作为建立模型的气象因子 (6 月 1 日设定为 1), Y_3 为第 2 代发生期 (第 1 代成虫产卵高峰期)。通过 SPSS 软件分析, 得出第 1 代成虫始见期 X_{22} 、7 月累计降雨量 X_{20} 、7 月有效积温 X_{21} 和第 2 代发生期有显著相关性。

(4) 第 3 代虫害发生期预测模型: 选取 8 月平均温度 X_{23} 、8 月平均相对湿度 X_{24} 、8 月累计降雨量 X_{25} 、8 月有效积温 X_{26} 、第 2 代成虫始见期 X_{27} 作为建

立模型的气象因子(8月1日设定为1), Y_4 为第3代发生期(第2代成虫产卵高峰期)。通过SPSS软件分析,得出8月平均温度 X_{23} 、8月累计降雨量 X_{25} 、第2代成虫始见期 X_{27} 和第3代发生期有显著相关性。

上述相关性数学表达式见表2。

表2 美国白蛾预测模型

虫害发生期	发生期预测模型
越冬代成虫始见期	$Y_1 = 18.418 + 1.093X_1 + 0.025X_6 - 0.123X_8$
第1代虫害发生期	$Y_2 = -7.42 + 0.005X_{11} + 0.09X_{12} + 0.407X_{13}$
第2代虫害发生期	$Y_3 = 112.174 - 0.478X_{22} - 0.013X_{20} - 0.099X_{21}$
第3代虫害发生期	$Y_4 = 63.075 - 2.05X_{23} - 0.03X_{25} + 2.532X_{27}$

2.5.2 模型应用 预测美国白蛾各虫态的发生期,以便确定防治的最适时间。以2022年美国白蛾越冬代成虫始见期发生模型为例。将当年系统观测数据,累计4月初至始见期平均温度 $X_1 = 17\text{ }^\circ\text{C}$,1—4月累计降雨量 $X_6 = 339.2\text{ mm}$,1—4月有效积温 $X_8 = 288.5\text{ 日度}$,代入模型公式 $Y_1 = 18.418 + 1.093X_1 + 0.025X_6 - 0.123X_8$ 中得出 Y_1 为9.99。再将4月1日设为1,得出当年越冬代成虫始见期为4月10日,与实际监测数据相符合。根据越冬代成虫始见期,可进一步推算出第1代幼虫防治最佳时期。

3 结论与讨论

3.1 美国白蛾在南京城区的扩散趋势

参考官方公告及相关文献,2011—2022年,我国美国白蛾疫情呈现扩散蔓延趋势,其中13个省级单位均有不同数量的新增疫区^[5]。相关研究利用MaxEnt模型对美国白蛾的潜在适生区进行预测,发现江苏东南部属于中度适生区^[6]。因此,本市部分非疫区美国白蛾传入和定殖风险较高。

2020—2021年,本市相继在秦淮区和玄武区监测到美国白蛾幼虫危害^[7-8],初步认为疫情传入2区是自然传播和物流传播交叉影响结果^[9],一是2区疫情的发生地点寄主植物种类丰富,极适合美国白蛾定殖,且均与周边的老疫区相邻,美国白蛾自然传入的可能性极大;二是2地紧邻绕城高速、快速通道,周边有新建绿地和建筑工地,美国白蛾极易随货物、包装材料、交通工具传播。

但早在2019年秦淮和玄武2城区就监测到少量成虫,分析认为,外来入侵生物多具有“传入—定殖—潜伏—扩散—暴发”的特征,在初期能够诱集

到少量的美国白蛾成虫,证明其已经完成入侵,但一般需经3—5a的定殖和潜伏后,才能发现明显危害状(网幕)^[10]。

3.2 南京城区美国白蛾发生期的特殊现象

成虫监测发现,南京城区美国白蛾越冬代成虫出现2个羽化高峰,2个高峰间隔10d左右,第1个羽化高峰诱集数量大于第2个高峰。疑4月下旬本市城区短时间内的强降雨可能是造成这种现象的主要原因。相关研究同样认为早春季节如果雨量过多,会造成蛹大量死亡,不利于成虫羽化^[11]。此外,短光周期和低温也是美国白蛾越冬滞育的主要诱因^[12]。

南京城区美国白蛾一般1a发生3代,但在2021年10月监测到少量疑似美国白蛾第3代成虫。相关文献报道,美国白蛾发生世代与温湿度和光照有直接关系,在不同地区完成世代所需的有效积温不同,且完成1个世代的有效积温从约800日度减少为724.4日度^[13]。但也有分析认为,这些成虫亦属个例,至于其是否属第3代成虫,有待严谨验证,不排除是第1代滞育蛹、且很可能是第2代晚期蛹所羽化^[14]。

林间调查发现,美国白蛾发生期提前,发育进度不齐、世代重叠现象明显,分析认为,这与异常气候多发频发密切相关,尤其是近年来,包括我国在内的全球温室效应增强、暖冬现象、平均气温增高等环境因素,使包括美国白蛾在内的很多昆虫因应环境变化而出现虫态历期缩短、世代增加等方面的变化^[15-16]。

3.3 美国白蛾发生危害影响因素

3.3.1 气候 气象因子关联性分析结果显示,平均相对湿度和降水量与美国白蛾成虫羽化显著相关,这是因为在干燥的环境,昆虫的生长发育相对缓慢,甚至无法生存下去^[17]。另外,本研究还发现美国白蛾发生危害极易受高温气候影响,过高温度持续时间越长,对昆虫影响越大^[18],如2022年夏季持续高温炎热气候,导致当年第2代幼虫死亡率较高,进一步影响2023年整体虫口密度。此外,美国白蛾越冬基数调查数据显示,气候变暖,尤其冬季气温升高,有利于美国白蛾的越冬、繁殖等^[19]。

3.3.2 寄主 在我国不同地区的美国白蛾危害的寄主不同,并随地理环境的变化而变化。相关研究报告,美国白蛾寄主种类不断增多,主要有槭树、桑树、榆树、柳树、杨树等乡土落叶阔叶树种^[20]。林间

调查发现,美国白蛾主要喜食悬铃木、桑树、樱花、水杉、枫杨、杨树等树种。美国白蛾主要危害树种的差异是其能够根据气候和环境的不同改变生活习性、化性的特点决定的^[21-22]。这种在寄主上表现的生理可塑性,使得美国白蛾形成寄主适应性强的生理生态学特征,同时这也可能是该害虫成功入侵的重要机制之一^[23]。

3.3.3 环境 本研究发现,诱集到成虫监测点几乎都与滨江沿河、绿地(公园)、交通沿线等因素有关系,其中水系对美国白蛾的定殖及蔓延有着重要的环境因素影响^[24],例如主城区虫口基数较大的监测点集中在江心洲、秦淮河、运粮河附近。此外,与疫区交界处等交通便利区域虫口密度较大,如鼓楼与栖霞区和玄武与江宁区交界地带诱集到成虫数量较大。值得关注的是,管理相对松散、环境较差的绿地被认为是美国白蛾容易传入和定殖的区域^[25],如秦淮区七桥瓮湿地公园附近垃圾回收站是该区首次发现幼虫危害的地方。

3.3.4 人为干扰 北京地区研究发现美国白蛾的诱捕记录分布与常住人口密度高度一致^[26],而本研究发现人口密度同美国白蛾分布存在负相关,如鼓楼区人口密度较高的区域监测到美国白蛾的数量相对较少,建邺区人口密度较低的区域美国白蛾发生危害相对较重。但本研究未系统开展美国白蛾诱捕记录分布与常住人口分布叠加相关性研究,也缺少南京城区和周围郊区对比数据,同时,短期局部地区的美国白蛾成虫发生期资料难以完整、准确地反映林间美国白蛾的变化,不排除是其他环境因素造成这种差异。

3.4 南京地区美国白蛾预测模型

林业有害生物的发生受很多因素的影响,其中气象条件对害虫的发生趋势和危害程度起重要作用^[27-28],国内外文献对美国白蛾预测模型研究主要集中在气象因子与适生区方面^[29-31],本研究着重探讨了气象因子和发生历期的相关性,初步建立回归法预测模型,以便根据美国白蛾成虫监测数据,推测最佳幼虫防治窗口期及下一代成虫发生期,更加科学、精准、高效地指导监测及防治工作。但 5 a 监测样本数量依然较少,且美国白蛾发生期除受限于气象因子外,还受到各种环境、人为因子的影响。随着后期观测资料的逐步积累以及对预测预报结果的不断验证,可进一步提高预测模型精准度,更

好地服务于生产实际。

参考文献:

- [1] 徐明,唐登东,张利华,等.美国白蛾在江苏北部的发生规律及防治适期初步研究[J].江苏林业科技,2013,40(3):15-17,57.
- [2] 国家林业和草原局.国家林业和草原局公告(2023年第5号)(2023年美国白蛾疫区)[EB/OL].[2023-02-17]https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkzfwj/380006.jhtml.
- [3] 解春霞,徐丽丽,马骧,等.苏南地区美国白蛾成虫发生情况调查初报[J].江苏林业科技,2022,49(6):44-47.
- [4] 罗立平,王小艺,杨忠歧,等.美国白蛾防控技术研究进展[J].环境昆虫学报,2018,40(4):721-735.
- [5] 刘枫,李群.美国白蛾在中国发生情况,林间防治现状及展望[J].沈阳农业大学学报,2022,53(5):630-640.
- [6] 薛明宇,郝德君,赵旭东,等.极端气候对美国白蛾分布及潜在适生区的影响[J/OL].南京林业大学学报(自然科学版),2023.https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20230515.1302.002.html.
- [7] 国家林业和草原局.国家林业和草原局公告(2021年第7号)(2021年美国白蛾疫区)[EB/OL].[2021-03-24].https://www.forestry.gov.cn/main/3457/20210330/103234612628676.html.
- [8] 国家林业和草原局.国家林业和草原局公告(2022年第5号)(2022年美国白蛾疫区)[EB/OL].[2022-03-11].https://www.forestry.gov.cn/main/3457/20220318/111403539314228.html.
- [9] 李素霞,张杰,张斌,等.美国白蛾(*Hyphantria cunea*)分布、危害及防治研究进展[J].世界农药,2013,35(3):41-46.
- [10] 宋玉双.美国白蛾的综合管理[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2015.
- [11] 张连生,庞建军.美国白蛾生活史观察及防治技术研究[G].天津:天津园林科学研究所,1999:2-3.
- [12] 季荣,谢宝瑜,李欣海,等.外来入侵种——美国白蛾的研究进展[J].昆虫知识,2003,40(1):13-18.
- [13] GOMI T, TAKEDA M. Geographic variation in photoperiodic responses in an introduced insect, *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae) in Japan [J]. Applied Entomology & Zoology, 1991, 26(3): 357-363.
- [14] 闫家河,王涛,刘在哲,等.美国白蛾发生期的几个特殊现象的观察与思考[J].山东林业科技,2022,52(1):1-10.
- [15] 赵旭东,耿蕊舒,郝德君,等.美国白蛾防控技术的研究进展及展望[J].中国森林病虫,2022,41(5):44-52.
- [16] 闫家河,刘芹,王文亮,等.美国白蛾发生与防治研究综述[J].山东林业科技,2015(2):93-106.
- [17] 段玮.气象因子及气候变化对森林病虫害发生发展的影响[J].农业灾害研究,2021,11(2):108-109.
- [18] 陈景芸,蔡平,詹国辉,等.美国白蛾发生规律与防治技术研究进展[J].江苏农业科学,2012,40(12):149-151.

(下转第 52 页)

- lings: effects on morpho-physiology and field performance[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68(3):543-553.
- [47] 施 曼,徐惠群,仲秀林,等.施肥对北美红栎幼苗生长的影响[J]. *浙江林业科技*, 2014, 34(4):25-28.
- [48] LI X Y, MING L J, FEI T D. Effects of water and nitrogen coupling under drip irrigation on tree growth and soil nitrogen content of *Populus × euramericana* cv. 'Guariento' [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7):2195-2202.
- [49] MAKA T Y, YEH D M. Nitrogen nutrition of *Spathiphyllum* 'Sensationgrown' in sphagnum peat-and-coir-based-media with two irrigation methods[J]. *HortScience*, 2001, 36(4):645-649.
- [50] 句 娇,李迎超,王利兵,等.水肥耦合效应对栓皮栎苗木生长的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(4):673-682.
- [51] 黄石嘉,李铁华,彭颖姝,等.施肥对青冈栎幼苗生长与光合作用的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(1):99-105.
- [52] 孙媛姣,陆秀君,曾莞棋,等.施肥对蒙古栎幼林生长及养分含量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2021, 52(4):409-418.
- [53] O'DONNELL L, PICKLES B J, CAMPBELL C M, et al. Native tree and shrub canopy facilitates oak seedling regeneration in semi-arid woodland[J]. *Ecosphere*, 2020, 11(2):e03017.
- [54] KAYAMA M. Growth and nutrient acclimation of evergreen oak seedlings infected with *Boletus reticulatus* in infertile colluvial soil in warm temperate monsoon Asia: Evaluation of early growth[J]. *Forests*, 2020, 11(8).
- [55] 高晓磊,张丽仔,唐 窈,等.接种外生菌根真菌对不同种源栓皮栎幼苗生长和生理特征的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(11):63-70.
- [56] 孙佳琦,曹文琪,冷平生,等.接种 4 种外生菌根真菌对榲桲幼苗生长、光合及营养元素含量的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(10):67-74, 101.
- [57] 兰士波.中国北方落叶栎类研究进展及前景[J]. *中国林副特产*, 2018(4):71-76.
- [58] XUN S, HANG K, CHEN H H, et al. Biogeographic patterns of nutrient resorption from *Quercus variabilis* Blume leaves across China. [J]. *Plant biology (Stuttgart, Germany)*, 2016, 18(3):505-513.
- [59] ANDIVIA E, FERNÁNDEZ M, VÁZQUEZ-PIQUÉ J, et al. Two provenances of *Quercus ilex* ssp. *Ballota* (Desf) Samp. nursery seedlings have different response to frost tolerance and autumn fertilization[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, 131(4):1091-1101.
- [60] 靳 微.几种栎树外生菌根真菌多样性及其对苗木生长和养分吸收的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
- [61] 关 媛,吕秀立,于泽群,等.基于 SSR 分子标记的栎属植物资源的亲缘关系分析[J]. *上海农业学报*, 2021, 37(5):20-25.
- [62] 张文文.栎属植物的引种历史与优良栎类的选育及推广[J]. *园林*, 2019(8):63-66.

(上接第 20 页)

- [19] 王 玮.美国白蛾滞育蛹越冬前的能量储备与越冬期温度变化对其能量消耗的影响[D].南京:南京林业大学,2020.
- [20] 赫传杰,李加正,王 越,等.美国白蛾发生情况及 2022 年趋势预测[J]. *中国森林病虫*, 2022, 41(1):46-48.
- [21] 鞠 珍.美国白蛾在不同树种上的生物学特性及抗寒性的研究[D].泰安:山东农业大学,2007.
- [22] HWANG S Y, LIU C H, SHEN T C. Effects of plant nutrient availability and host plant species on the performance of two Pieris butterflies (Lepidoptera: Pieridae) [J]. *Biochemical systematic and Ecology*, 2008, 36(7):505-513.
- [23] CARRASCO D, LARSSON M C, ANDERSON P. Insect host plant selection in complex environments[J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2015, 8:1-7.
- [24] 李德斌,卢修亮,何 姍,等.东北地区美国白蛾灾害扩散过程和趋势分析[J]. *中国森林病虫*, 2023, 42(2):9-15.
- [25] 张俊杰,董 琴,赵涵博,等.中国大陆美国白蛾的侵入分布、危害与防治概述[J]. *吉林林业科技*, 2013, 42(3):27-30, 47.
- [26] 杜晶晶,张 越,潘彦平,等.北京地区美国白蛾的时空分布变化及其影响因素研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(13):5480-5490.
- [27] 杨淑香,袁晓海,包兴华.林业有害生物与气象条件关系研究进展[J]. *现代农业科技*, 2013(16):252-253.
- [28] 张建新,钱锦霞,任慧龙,等.气象因素对林业有害生物发生发展的影响研究综述[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(3):458-461.
- [29] 杨明琪.不同气候情景下美国白蛾在我国的适生区预测[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
- [30] 纪烨琳,苏喜友,于治军.基于随机森林模型的美国白蛾在中国的潜在生境预测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(6):121-128.
- [31] 陆 霞,杜新民,安建梅.基于 GARP 的美国白蛾在中国的适生区预测[J]. *农业与技术*, 2016, 36(19):46-50.