

# 美国白蛾入侵江西省及其各市的综合风险分析



常祥琪<sup>1</sup> 严璇<sup>2</sup> 严婧<sup>1</sup> 李冬<sup>1</sup> 梁玉勇<sup>1,3</sup> 曾菊平<sup>1\*</sup>

(1. 江西农业大学林学院, 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 南昌 330045;

2. 樟树市生态林场保护中心, 江西 宜春 331200; 3. 江西省农业科学院植物保护研究所, 南昌 330200)

**摘要:** 为实现对入侵江西省的美国白蛾 *Hyphantria cunea* 进行差异化风险等级管理与分类施策, 基于原指标体系确定美国白蛾入侵江西省及各市的综合风险值, 通过原指标体系的准则层、指标层新增传入途径、扩散路径和寄主植物资源 3 要素, 用加权系数对原指标体系的相关指标值进行校正, 得到美国白蛾入侵江西省及各市的校正综合风险值, 并对校正前后美国白蛾入侵江西省及各市的综合风险值及风险等级变化。结果显示, 新增传入途径、扩散路径和寄主植物资源 3 要素明显影响美国白蛾入侵江西省及各市的风险评估结果。利用寄主植物资源加权校正后, 美国白蛾入侵江西省的综合风险从特别危险级降为高度危险级。而同时利用以上 3 个要素加权校正后, 美国白蛾对江西省上饶、九江、宜春和南昌市的入侵风险从原有的特别危险级降为高度危险级, 对抚州、鹰潭和新余市的入侵风险从原有的特别危险级降为中度危险级, 对萍乡市的入侵风险从原来的高度危险级降为低度危险级, 上饶市仍是江西省风险最高的市, 表明改进后的方法更符合江西省的实际情况。

**关键词:** 美国白蛾; 传播途径; 扩散路径; 寄主植物资源; 加权法

## Comprehensive risk analysis of fall webworm *Hyphantria cunea* invasion in Jiangxi Province and its cities

Chang Xiangqi<sup>1</sup> Yan Xuan<sup>2</sup> Yan Jing<sup>1</sup> Li Dong<sup>1</sup> Liang Yuyong<sup>1,3</sup> Zeng Juping<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grass and Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi Province, China; 2. Zhangshu City Ecological Forest Farm Protection Center, Yichun 331200, Jiangxi Province, China;

3. Institute of Plant Protection, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, Jiangxi Province, China)

**Abstract:** To develop risk-level management and classification strategies for the invasion of the fall webworm *Hyphantria cunea*, comprehensive risk values for its invasion into Jiangxi Province and its cities were initially determined using an original index system. Subsequently, three additional elements (invasive pathway, diffusion path, and host plant resources) were incorporated into both the criteria and indicator layers of the original system. Some relevant indices were then corrected by using a weighting method. A comparison was made between the comprehensive risk values before and after adjustments, along with changes in risk evaluation rankings. The results showed that including the elements of invasive way, diffusion path, and host plant resources significantly affected the outcome of the pest risk assessment for the fall webworm in Jiangxi Province. Following the weighting and adjustment based on host plant resources, the overall risk of fall webworm invasion into Jiangxi decreased from the highest risk level to the sub-high risk level. Utilizing the above three elements together for weighted correction,

the invasion risk of the fall webworm decreased from the original highest risk level to the sub-high risk level in Shangrao, Jiujiang, Yichun, and Nanchang cities. Similarly, in Fuzhou, Yingtan, and Xinyu cities, the risk level decreased from the highest to the middle, while in Pingxiang City, it decreased from the highest to the low risk level. However, Shangrao remained at the highest risk level, and it was the city with the highest risk in Jiangxi Province. This indicates that the improved method better reflects the actual situation in Jiangxi Province.

**Key words:** *Hyphantria cunea*; invasive way; diffusion path; host plant resource; weighting method

美国白蛾 *Hyphantria cunea* 属鳞翅目灯蛾科白蛾属 *Hyphantria*, 原产北美洲, 1940年后随二次大战军用物质先后传入中欧(Szalay-Marzso, 1971)、东亚(Umeya & Itô, 1977), 并快速扩散到多个国家和地区, 成为世界检疫性害虫。美国白蛾入侵力强, 主要表现在其气候生态位宽; 幼虫耐低温和饥饿, 在-5℃可存活2周(鞠珍, 2007), 在饥饿8~13 d后仍生活正常(乔秀荣, 2001; 鞠珍, 2007); 兼具夏滞育(Chen et al., 2014)与冬滞育, 善于应对不良环境; 繁殖力强, 单雌产卵量最高可达1 900粒(刘川等, 2009), 从而有利于在短时间定殖、建群, 并扩散蔓延(Perkins et al., 2013); 幼虫多食性, 能为害林木、灌木、果树、作物和花卉等200多种植物(季荣等, 2003; Schowalter & Ring, 2017), 且在进入新入侵地后其嗜食植物种类常发生变化。不仅如此, 美国白蛾复杂的生活史与多样的生存策略, 也有助于其入侵和扩散, 如美国白蛾有黑头型、红头型与中间型3类幼虫, 其中黑头型入侵力更强(Schowalter & Ring, 2017; 孙守慧等, 2017), 因此作为外来入侵有害生物, 需要对其进行有效防控。

在我国, 美国白蛾首先出现在与朝鲜半岛邻接的辽宁省丹东市(张生芳, 1980), 近些年受国内物流经济高速发展, 该害虫正由北向南加速扩散, 目前已到达安徽、湖北和上海等长江中下游省(市), 对长江南岸各省构成了严重威胁(丁子玮等, 2021)。因此根据防控关口或重点前移原则, 当前急需对长江南岸各省进行美国白蛾风险分析、评估, 推动当地有针对性的检疫管理等工作, 积极守住扩散防线(Hui & Richardson, 2017; 赵紫华等, 2019)。自20世纪90年代, 各国基于《实施动植物卫生检疫措施协议》有害生物风险分析准则(FAO, 1996)相继建立了定量评估风险的分析方法。如澳大利亚建立的半定量有害生物进境风险评估法, 该方法包括有害生物分类、进入可能性、定殖可能性、扩散可能性、传入后果与总体风险评估6步, 最后得出高、中、低、非常低、极低和忽略不计6个可能性等级(郭志永和吴杏霞,

2007); 欧洲和地中海植物保护组织根据专家列举的进入可能性、定殖可能性和经济影响等若干问题, 采用1~9的赋分答题法对风险进行定量评估(孙双艳等, 2022); 而我国蒋青等(1994; 1995)根据专家经验构建了基于有害生物指标体系的综合风险分析法, 对体系中的指标进行分级、赋分和量化, 分别获得分布 $P_1$ 、传入与定殖扩散 $P_2$ 、潜在危害 $P_3$ 、经济影响 $P_4$ 、危害管控 $P_5$ 五个准则层得分, 在此基础上计算有害生物的综合风险值 $R$ , 据此确定风险等级, 根据风险等级实施风险管理(宋玉双等, 2000; 国家林业局森林病虫害防治总站, 2014); 但赋分受专家经验、信息采集完整性等影响, 该方法有一定的不确定性(郭晓华等, 2007)。在实际应用综合风险分析法中, 结合有害生物的入侵特点采集必要信息, 根据采集的信息进行赋分, 并在评估时给予适当校正, 则能有效降低该方法的不确定性。

为实现对入侵江西省的美国白蛾 *Hyphantria cunea* 进行差异化风险等级管理与分类施策, 基于原指标体系确定美国白蛾入侵江西省及各市的综合风险值, 通过原指标体系的准则层、指标层新增传入途径、扩散路径和寄主植物资源(王辉等, 2020)三要素, 用加权系数对原指标体系中相关指标值进行校正, 利用校正后的指标体系确定美国白蛾入侵江西省及各市的综合风险值, 并对比较正前后美国白蛾入侵江西省及各市的综合风险值及风险等级变化, 以期对江西省美国白蛾的入侵预警与防控管理工作提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

风险分析区: 江西省(24°29'~30°04' N、113°34'~118°28' E)近邻长江北岸的安徽省、湖北省和上海市等美国白蛾疫区, 面临严峻的入侵风险, 选择其为风险分析区。江西省东邻浙江省和福建省, 南连广东省, 西接湖南省, 北毗长江, 共接湖北省和安徽省。江西省交通十分便利, 境内有京九铁路和浙赣铁路

纵横贯通,水路上接武汉三镇,下通南京市和上海市。

美国白蛾发生点数据来源:从相关文献、网站(如中国林业网 <http://www.forestry.gov.cn>)和搜索引擎等收集关于美国白蛾发生疫区、暴发为害和防治等信息,获得全国范围内的省-县区或乡镇发生点地名数据,基于百度地图等查询地名经纬度,得到美国白蛾发生点数据,并将数据保存为CSV文件,作为适生性分析基础数据。

其他数据来源:从江西统计局(<http://www.jxstj.gov.cn>)采集2011—2015年江西省及各市防护林、薪炭林与四旁种植的防护林数据。

## 1.2 方法

### 1.2.1 基于原指标体系的美国白蛾综合风险值R

参考蒋青等(1994;1995)有害生物综合风险分析指标体系及其改进方法(李娟等,2013;国家林业局森林病虫害防治总站,2014),设置分布 $P_1$ 、传入与定殖扩散 $P_2$ 、潜在危害 $P_3$ 、经济影响 $P_4$ 和危害管控 $P_5$ 五个准则层,每个准则层设置若干个指标。准则层 $P_1$ 只设置1个指标,为区域分布情况 $P_{11}$ ,根据美国白蛾发生点分布,并结合江西省及各市的实际情况,对江西省及各市的 $P_{11}$ 赋分,赋分范围为0~3(表1)。准则层 $P_2$ 设置5个指标,分别为有害生物被截获可能性 $P_{21}$ 、运输过程中有害生物存活率 $P_{22}$ 、有害生物适生性 $P_{23}$ 、自然扩散能力 $P_{24}$ 和省内适生范围 $P_{25}$ ;根据收集的有关美国白蛾的生物学(乔秀荣,2001;季荣等,2003;鞠珍,2007)和生态学特征(Gomi et al., 2009; 刘川等, 2009; Schowalter & Ring, 2017)文献,并结合江西省及各市的实际情况,对江西省及各市的 $P_{21}$ 、 $P_{22}$ 、 $P_{23}$ 和 $P_{24}$ 分别赋分,赋分范围为0~3(表1);根据美国白蛾完成世代发育所需的有效积温(程桂林,2010)及江西省内美国白蛾适生性分析结果,对江西省及各市的 $P_{25}$ 赋分,详见1.2.2。准则层 $P_3$ 设置3个指标,分别为潜在经济危害性 $P_{31}$ 、非经济潜在危害性 $P_{32}$ 和官方重视程度 $P_{33}$ ;参考秦皇岛市(乔秀荣,2001)、唐山市(张雪松,2004)和济南市(杨宝山等,2010;2012)等地方案例,并结合江西省及各市的实际情况,对江西省及各市的 $P_{31}$ 、 $P_{32}$ 和 $P_{33}$ 赋分,赋分范围为0~3(表1)。准则层 $P_4$ 设置3个指标,分别为受害寄主种类 $P_{41}$ 、受害寄主的分布面积或产量 $P_{42}$ 和受害寄主的特殊经济价值 $P_{43}$ ;根据美国白蛾疫情省的受害寄主植物种类,并结合江西省及各市实际情况,对江西省及各市的 $P_{41}$ 和 $P_{43}$ 赋分,赋分范围为0~3(表1);从江西统计局(<http://www.jxstj.gov.cn>)收集江西省及各市寄主植

物资源状况、数据,根据此资料对江西省及各市的 $P_{42}$ 赋分,详见1.2.3。准则层 $P_5$ 设置3个指标,分别为检疫识别难度 $P_{51}$ 、除害处理难度 $P_{52}$ 和根除难度 $P_{53}$ ;同样参考已有的地方案例研究,如乔秀荣(2001)和杨宝山等(2010;2012),并结合江西省及各市的实际情况,对江西省及各市的 $P_{51}$ 、 $P_{52}$ 和 $P_{53}$ 赋分,赋分范围为0~3(表1)。

根据公式  $P_2 = \sqrt[5]{P_{21} \times P_{22} \times P_{23} \times P_{24} \times P_{25}}$ ,  $P_1 = P_{11}$ ,  $P_3 = 0.4 \times P_{31} + 0.4 \times P_{32} + 0.2 \times P_{33}$ ,  $P_4 = \text{Max}(P_{41}, P_{42}, P_{43})$ ,  $P_5 = (P_{51} + P_{52} + P_{53}) / 3$  计算准则层 $P_1 \sim P_5$ 值。按照公式计算江西省及各市的综合风险值R,  $R = \sqrt[5]{P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5}$ 。参照国家林业局森林病虫害防治总站(2014)方法,根据综合风险值R对江西省全省与各市的美国白蛾入侵风险进行等级划分,即 $2.50 \leq R < 3.00$ 为特别危险级, $2.00 \leq R < 2.50$ 为高度危险级, $1.50 \leq R < 2.00$ 为中度危险级, $1.00 \leq R < 1.50$ 为低度危险级。

### 1.2.2 美国白蛾在江西省的适生性分析及 $P_{25}$ 确定

发生世代数的确定:美国白蛾发育起点温度 $C$ 为 $10^\circ\text{C}$ ,其完成1个世代所需有效积温 $K$ 为 $885\text{日}\cdot\text{度}$ (程桂林,2010)。从江西省县区气象站收集1980—2010年各月平均气温后,参考王钦召和曾菊平(2017)方法,计算江西省各市美国白蛾能发育的年有效积温 $K'$ 和每年的潜在发生世代数 $G$ ,预判世代发生情况。 $K' = \sum(T_i - C) \times 30$ ,  $G = K'/K$ ,式中 $T_i$ 为各月的平均气温, $i=1,2,3\cdots 11,12$ 。

基于最大熵(maximum entropy model, MaxEnt)模型的适生性分析:(1)从WorldClim数据库(<http://www.worldclim.org>)采集中国范围的19个气候变量栅格数据(1950—2000年平均),包括年平均气温、平均气温日较差、等温性、气温季节性变动系数、最热月份最高温度、最冷月份最低温度、气温年较差、最湿季度平均温度、最干季度平均温度、最暖季度平均温度、最冷季度平均温度、年降水量、最湿月份降水量、最干月份降水量、降水量季节性变化、最干季度降水量、最湿季度降水量、最暖季度降水量、最冷季度降水量,栅格空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。(2)从WorldClim数据库采集中国范围的 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的数字高程模型,用Arcgis 10.2软件(<http://www.arcgis.com>)生成坡向和坡度栅格数据,获得海拔、坡向和坡度3个地形变量。用Arcgis 10.2软件将以上22个环境栅格全部另存为ASC文件。(3)用R语言Hmisc数据包计算22个环境变量的Spear-

man 相关性系数,同时生成变量聚类图,根据分组情况,从两两相关系数大于0.7的同组变量中选择其中一个作为预测变量,以降低变量共线性。(4)将美国白蛾发生点 CSV 文件与所选环境变量的 ASC 文件分别导入到 MaxEnt 3.4.4 软件的 Sample 和 Environmental layer 模块,随机选择 75% 测试点为样本集,剩余 25% 测试点为验证集;重复运行 100 次,选择受试者操作特征曲线下面积 (area under curve, AUC) (Fielding & Bell, 1997) 最大值作为最优模型,并用刀切法评估模型中各变量对预测适生分布增益的相对贡献。(5)利用最优模型预测美国白蛾在中国的适生区分布,将预测结果以 ASC 文件格式输出,将其

导入到 Arcgis 10.2 软件中,参考邹武等(2022)方法,根据模型预测的适生概率值划分适生区等级,即  $0 \leq \text{适生概率值} \leq 0.25$  为非适生区,  $0.25 < \text{适生概率值} \leq 0.40$  为低适生区,  $0.40 < \text{适生概率值} \leq 0.60$  为中适生区,  $0.60 < \text{适生概率值} \leq 1.00$  为高适生区。(6)用江西省行政区划矢量数据从全国的适生分布中掩膜提取获得江西省适生区分布图,并分别按属性提取各适生区等级分布,统计江西省全省及各市的各等级适生区面积,计算各等级适生区面积占省内总面积及各市总面积的比例,并据此对区域适生范围  $P_{25}$  进行赋分(表 1),赋分范围为 0~3。

表 1 美国白蛾入侵江西省及其各市综合风险分析准则层、指标层赋分与加权值

Table 1 Plant species damaged by the invasive *Hyphantria cunea* in epidemic provinces and their distributions in Jiangxi Province

准则层、指标层 或加权值 Criterion, index or weighted value	九江 Jiujiang	南昌 Nan- chang	鹰潭 Yingtán	新余 Xinyu	上饶 Shangrao	宜春 Yichun	抚州 Fuzhou	景德镇 Jingdezhen	吉安 Ji'an	萍乡 Ping- xiang	赣州 Ganzhou	全省 Jiangxi Province
$P_{11}$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$P_1$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$P_{21}$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$\omega_1$	1.000	0.273	0.182	0.182	0.818	0.182	0.091	0.364	0.273	0.091	0.091	-
$\omega_1 P_{21}$	3.000	0.818	0.545	0.545	2.455	0.545	0.273	1.091	0.818	0.273	0.273	3.000
$P_{22}$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$P_{23}$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$P_{24}$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$\omega_D$	0.573	0.990	0.241	0.183	1.000	0.638	0.427	0.312	0.657	0.141	0.900	-
$\omega_D P_{24}$	1.718	3.000	0.724	0.548	3.000	1.914	1.282	0.937	1.971	0.423	2.700	3.000
$P_{25}$	2.000	3.000	3.000	2.845	2.072	1.950	1.902	1.742	1.649	0.168	0.166	1.600
$P_2$	2.766	3.000	3.000	2.968	2.786	2.752	2.739	2.691	2.662	1.685	1.681	2.646
$P_{31}$	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
$P_{32}$	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
$P_{33}$	2.500	2.000	1.000	1.000	2.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	2.000
$P_2$	2.300	2.200	2.000	2.000	2.200	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.200
$P_{41}$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$P_{42}$	1.493	1.069	0.504	0.490	2.278	1.810	1.161	0.325	1.789	0.628	2.500	1.800
$P_{43}$	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
$\omega_H$	0.597	0.428	0.202	0.196	0.911	0.724	0.464	0.130	0.716	0.251	1.000	0.600
$\omega_H P_4$	1.791	1.283	0.605	0.588	2.734	2.172	1.393	0.389	2.147	0.754	3.000	1.800
$P_4$	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
$P_{51}$	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
$P_{52}$	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
$P_{53}$	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
$P_5$	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

$P_1 \sim P_5$  为准则层;  $P_{11}$ 、 $P_{21} \sim P_{25}$ 、 $P_{31} \sim P_{33}$ 、 $P_{41} \sim P_{43}$ 、 $P_{51} \sim P_{53}$  为指标层;  $\omega_1$ 、 $\omega_D$ 、 $\omega_H$  为加权系数。 $P_1 \sim P_5$  are criterions;  $P_{11}$ 、 $P_{21} \sim P_{25}$ 、 $P_{31} \sim P_{33}$ 、 $P_{41} \sim P_{43}$ 、 $P_{51} \sim P_{53}$  are indexes;  $\omega_1$ 、 $\omega_D$ 、 $\omega_H$  are weighted values.

### 1.2.3 受害寄主植物的范围与分布及 $P_{42}$ 确定

以省为单位,从相关文献、网站和搜索引擎等采集美国白蛾在疫情省的为害植物种类,其中辽宁省(刘士军,2015)、山东省(刘川等,2009;程桂林,2010;杨宝山等,2010)、河北省(乔秀荣,2001;张雪松,2004)、安徽省(郑华英等,2018)和湖北省(闵水发等,2018)的数据相对完整,受害植物种类有臭椿 *Ailanthus altissima*、桑 *Morus alba*、法桐 *Platanus orientalis*、榆树 *Ulmus pumila*、杨 *Populus spp.*、红瑞木 *Swida alba*、国槐 *Sophora japonica*、枫杨 *Pterocarya stenoptera*、糖槭 *Acer saccharum* 和泡桐 *Paulownia fortunei* 等(表2)。在植物智(<https://www.iplant.cn>)等专业平台与搜索引擎查询以上受害植物种类在江西省的分布情况,包括自然分布与人工种植,根据此判定美国白蛾的潜在受害寄主种类 $P_{41}$ 与受害寄主的特殊经济价值 $P_{43}$ 并进行赋分,赋分范围为0~3。

按主要林种用途江西省林业资源可分为用材林、经济林、防护林和薪炭林,其中,用材林主要为杉木 *Cunninghamia lanceolata*、马尾松 *Pinus massoniana*、毛竹 *Phyllostachys edulis* 与引进的国外松(如湿地松 *Pinus elliotii*、桉树 *Eucalyptus robusta*)等树

种;经济林主要为油茶 *Camellia oleifera*、松类和药材林等;防护林则因防护内容不同树种各异,覆盖范围较广,包括臭椿、法桐、杨、泡桐、枫香 *Liquidambar formosana*、刺槐 *Robinia pseudoacacia* 等落叶树种(向玉清和陈齐柳,1994;王倩等,2003);薪炭林主要包括马尾松、刺槐、木荷 *Schima superba*、桉树、胡枝子 *Lespedeza bicolor*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa*、黑荆树 *Acacia mearnsii* 和白栎 *Quercus fabri* 等树种(向玉清和陈齐柳,1994;王倩等,2003)。根据美国白蛾的为害植物种类(表2),选择防护林和薪炭林作为风险分析区的潜在寄主植物资源。考虑到近些年当地通道绿化与四旁(路旁、沟旁、渠旁和宅旁)零星种植的防护树种多以杨、柳 *Salix sp.*、法桐、樟树 *Cinnamomum camphora*、桂花 *Osmanthus fragrans* 和黄檀 *Dalbergia hupeana* 等为主,包括了多种美国白蛾为害种类,故将这些四旁零星种植的防护林也单独作为潜在寄主植物资源来源。因此,从江西统计局(<http://www.jxstj.gov.cn>)采集2011—2015年江西省及各市防护林、薪炭林与四旁种植的防护林数据,确定江西省各市寄主植物资源状况,并对受害寄主的分布面积或产量 $P_{42}$ 进行赋分(表1)。

表2 美国白蛾在疫区各省的主要为害植物种类及其在江西省的分布

Table 2 Plant species damaged by the invasive *Hyphantria cunea* in epidemic provinces and their distributions in Jiangxi Province

植物种类 Plant species	各省重度受害种类 Severely damaged species in several provinces					在江西省的分布情况 Distribution in Jiangxi Province
	山东 Shandong	辽宁 Liaoning	河北 Hebei	湖北 Hubei	安徽 Anhui	
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	1	1	1	NA	1	1
桑 <i>Morus alba</i>	1	NA	1	1	NA	1
法桐 <i>Platanus orientalis</i>	1	NA	1	1	NA	1
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	NA	1	1	1	NA	1
杨 <i>Populus spp.</i>	1	1	NA	NA	NA	1
红瑞木 <i>Swida alba</i>	1	1	NA	NA	NA	1
国槐 <i>Sophora japonica</i>	1	NA	1	NA	NA	1
枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	NA	NA	NA	1	1	1
糖槭 <i>Acer saccharum</i>	1	1	NA	NA	NA	1
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	NA	NA	NA	1	1	1
山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i>	NA	1	NA	NA	NA	1
李树 <i>Prunus salicina</i>	NA	1	NA	NA	NA	1
桃 <i>Prunus persica</i>	NA	NA	NA	NA	1	1
卫矛 <i>Euonymus alatus</i>	NA	NA	1	NA	NA	1
柿树 <i>Diospyros spp.</i>	NA	NA	NA	1	NA	1
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	1	NA	NA	NA	NA	1
美桐 <i>Platanus occidentalis</i>	1	NA	NA	NA	NA	1
赤杨 <i>Alnus japonica</i>	1	NA	NA	NA	NA	NA
大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	1	NA	NA	NA	NA	1
柳 <i>Salix babylonica</i>	1	NA	NA	NA	NA	1
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	1	NA	NA	NA	NA	NA
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	1	NA	NA	NA	NA	NA
核桃 <i>Juglans regia</i>	NA	NA	1	NA	NA	1
白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>	1	NA	NA	NA	NA	1

1: 有记录; NA: 未知。1: Recorded; NA: unknown.

### 1.2.4 基于加权校正法的综合风险值

原指标体系的准则层  $P_2$  未充分考虑传入途径、扩散路径对入侵风险的影响;而且原指标体系的准则层  $P_4$  以各指标最大值获取分值,这对于多食性的美国白蛾而言,无法真实反映江西省及各市可利用寄主植物资源及其面临的风险。因此,本研究收集江西省及各市的传入途径、扩散路径与寄主植物资

源数据,将收集的有关美国白蛾传播事件和案例按照虫源地、传入地、传播虫态和传入途径等信息进行整理和汇总(表3),从中筛选出美国白蛾从湖北省、安徽省和上海市等近邻疫区传入江西省的潜在传播载体和传播途径。从2019年全国交通网提取连通现有发生点、疫区至江西省各市的潜在传入途径数据,统计江西省各市传入途径的数量(未考虑空运途径)。

表3 美国白蛾部分传播事件及其传入虫态、载体和途径

Table 3 Some invasive events of *Hyphantria cunea* and their transmission stages, carriers, and pathways

途径 Pathway	虫源地 Insect source	传入地 Invasion place	传入时间 Invasion time	虫态 Insect stage	载体 Carrier
铁路 Railway	朝鲜新义洲 Sinuiju, DPRK	辽宁省丹东市 Dandong City, Liaoning Province	1979	幼虫、成虫 Larva, adult	火车车厢 Railway carriages
	数据缺失 Missing data	辽宁省丹东市 Dandong City, Liaoning Province	2015	成虫 Adult	货物 Freights
	河北省 Hebei Province	内蒙古自治区包头市 Baotou City, Inner Mongolia Autonomous Region	2017	蛹 Pupa	苗木 Nursery stock
水路 Waterway	伊朗阿萨鲁耶 Assaluyeh, Iran	山东省莱州市 Laizhou City, Shandong Province	2015	成虫 Adult	船体 Boats
	韩国 South Korea	山东省威海市 Weihai City, Shandong Province	1995	蛹、成虫 Pupa and adult	集装箱 Containers
	美国 USA	匈牙利布达佩斯 Budapest, Hungary	1940	数据缺失 Missing data	货物 Freights
	日本 Japan	广东省顺德区 Shunde District, Guangdong Province	2015	成虫 Adults	苗木 Nursery stock
	辽宁省丹东市和大连市 Dandong and Dalian cities, Liaoning Province	山东省荣成市 Rongcheng City, Shandong Province	1981	数据缺失 Missing data	渔船上木制品 Woodworks in fishing boats
	山东省威海市 Weihai City, Shandong Province	辽宁省庄河市 Zhuanghe City, Liaoning Province	1984	蛹 Pupa	原木 Logs
	美国 USA	辽宁省锦州市 Jinzhou City, Liaoning Province	1987	蛹 Pupa	原木 Logs
空运 Airline	朝鲜 DPRK	陕西省武功县 Wugong County, Shaanxi Province	1984	数据缺失 Missing data	包装箱 Packing boxes
道路 Highway	陕西省武功县 Wugong County, Shaanxi Province	甘肃省天水市 Tianshui City, Gansu Province	1985	蛹 Pupa	包装箱 Packing boxes
	辽宁省普兰店区 Pulandian District, Liaoning Province	数据缺失 Missing data	1986	幼虫 Larva	包装箱 Packing boxes
	数据缺失 Missing data	辽宁省宽甸镇 Kuandian Township, Liaoning Province	1982	幼虫 Larva	货物和绑绳 Freights and ropes
	数据缺失 Missing data	宁夏回族自治区灵武市、平罗县和彭阳县 Lingwu City, Pingluo and Pengyang counties, Ningxia Autonomous Region	2017	数据缺失 Missing data	苗木 Nursery stock
数据缺失 Missing data	辽宁省锦州市 Jinzhou City, Liaoning Province	数据缺失 Missing data	1989	幼虫、蛹 Larva and pupa	包装袋 Packing bags
	辽宁省大连市 Dalian City, Liaoning Province	数据缺失 Missing data	1982	蛹 Pupa	标本夹、草绳 Specimen holders, straw ropes
	辽宁省大连市 Dalian City, Liaoning Province	辽宁省长海县 Changhai County, Liaoning Province	1983	幼虫 Larva	草帘 Straw curtains

根据江西省及其各市的实际情况确定江西省及各市的传入途径加权系数 $\omega_1$ 、扩散路径加权系数 $\omega_D$ 和寄主植物资源加权系数 $\omega_H$ ,利用加权系数对原指标体系的 $P_{21}$ 、 $P_{24}$ 等进行校正,即 $\omega_1 P_{21}$ 和 $\omega_D P_{24}$ 。根据公式 $P_{21} = \sqrt[5]{\omega_1 P_{21} \times P_{22} \times P_{23} \times P_{24} \times P_{25}}$ 、 $P_{2D} = \sqrt[5]{P_{21} \times P_{22} \times P_{23} \times \omega_D P_{24} \times P_{25}}$ 和 $P_{2ID} = \sqrt[5]{\omega_1 P_{21} \times P_{22} \times P_{23} \times \omega_D P_{24} \times P_{25}}$ 计算江西省及各市准则层 $P_2$ 的3个校正值 $P_{21}$ 、 $P_{2D}$ 和 $P_{2ID}$ 。同样利用寄主植物资源加权系数 $\omega_H$ 对江西省及各市准则层 $P_4$ 进行校正,即 $\omega_H P_4$ ,得到校正值 $P_{4H}$ (表1)。根据公式传入途径的加权 $R_1 = \sqrt[5]{P_1 \times P_{21} \times P_3 \times P_4 \times P_5}$ 、扩散路径的加权 $R_D = \sqrt[5]{P_1 \times P_{2D} \times P_3 \times P_4 \times P_5}$ 、传入途径与扩散路径的加权 $R_{1D} = \sqrt[5]{P_1 \times P_{2ID} \times P_3 \times P_4 \times P_5}$ 、寄主植物资源的加权

$R_H = \sqrt[5]{P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_{4H} \times P_5}$ 、扩散路径与寄主植物资源的加权 $R_{DH} = \sqrt[5]{P_1 \times P_{21} \times P_3 \times P_{4H} \times P_5}$ 、传入途径与寄主植物资源的加权 $R_{DHD} = \sqrt[5]{P_1 \times P_{2D} \times P_3 \times P_{4H} \times P_5}$ 、三要素的加权 $R_{1DH} = \sqrt[5]{P_1 \times P_{2ID} \times P_3 \times P_{4H} \times P_5}$ 计算各校正 $R$ 值。

## 2 结果与分析

### 2.1 美国白蛾在江西省的适生性

#### 2.1.1 美国白蛾在江西省发生的世代数

江西省及各市的年有效积温均能满足美国白蛾世代发生的要求。美国白蛾在江西省发生的平均世代数为3.51代,美国白蛾在各市发生的世代数差异较大,其中在九江市的发生世代数最少,为1.80代,在赣州市发生的世代数最多,可达4.03代(表4)。

表4 江西省各市年有效积温及美国白蛾的发生世代数

Table 4 Annual effective accumulated temperature and generation of *Hyphantria cunea* in cities of Jiangxi Province

市 City	年有效积温			世代数		
	Annual effective accumulated temperature/°C			No. of generations		
	均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum
赣州 Ganzhou	3 327.26	3 166.50	3 570.00	3.76	3.58	4.03
鹰潭 Yingtan	3 230.00	3 075.00	3 309.00	3.65	3.47	3.74
新余 Xinyu	3 153.00	3 084.00	3 222.00	3.56	3.48	3.64
上饶 Shangrao	3 128.75	2 871.00	3 255.00	3.54	3.24	3.68
景德镇 Jingdezhen	3 118.50	3 078.00	3 159.00	3.52	3.48	3.57
南昌 Nanchang	3 103.50	2 910.00	3 204.00	3.51	3.29	3.62
吉安 Ji'an	3 095.45	2 109.00	3 342.00	3.50	2.38	3.78
抚州 Fuzhou	3 093.90	2 826.00	3 228.00	3.50	3.19	3.65
萍乡 Pingxiang	3 031.50	3 024.00	3 039.00	3.43	3.42	3.43
宜春 Yichun	3 017.33	2 673.00	3 201.00	3.41	3.02	3.62
九江 Jiujiang	2 812.50	1 593.00	3 057.00	3.18	1.80	3.45
全省 Jiangxi Province	3 110.66	1 593.00	3 570.00	3.51	1.80	4.03

#### 2.1.2 美国白蛾在江西省的适生性分布

美国白蛾在江西省分布以低、中适生区为主,面积分别为 $141.38 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $77.06 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,所占比例分别为64.29%和35.04%,高适生区面积较少,为 $1.47 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。高适生区均分布在九江市;中适生区主要分布在上饶、宜春、吉安和抚州市,而萍乡市的中适生区面积最少;南昌市中适生区面积比例最大,为89.95%,其次为新余市和鹰潭市,分别为73.93%和69.81%,而赣州市中适生区面积比例最小,为3.77%(表5)。

### 2.2 美国白蛾传入江西省的途径、加权系数 $\omega_1$ 及 $R_1$

美国白蛾易被携带传播,传播载体涉及苗木、木制或草制材料、货物及运输工具,传播虫态可能为幼虫、成虫或蛹,传播途径主要为水路、铁路和道路(表3)。而自湖北、安徽和上海疫区,美国白蛾可能入侵江西省的水路、道路和铁路共39条,其中可能入侵九江市的途径最多,有11条,其次为上饶市,有9条,而可能入侵赣州、抚州和萍乡市的途径最少,均仅为1条(表6)。所以,据各市传入途径数计算相对比例,得到加权系数(表1),进而得到校正的 $P_{21}(\omega_1 P_{21})$

和校正的 $P_2$ (表1)。美国白蛾入侵江西省九江市和上饶市的综合风险值 $R_1$ 最高,其次为南昌、鹰潭、新余和吉安市等,入侵赣州市和萍乡市的综合风险值 $R_1$ 相对较低(表6)。

表5 美国白蛾在江西省各市的适生区面积及所占比例  
Table 5 Suitable areas and proportion of *Hyphantria cunea* in cities of Jiangxi Province

市 City	高适生区 Highly suitable area		中适生区 Moderately suitable area		低适生区 Slightly suitable area	
	面积 Area/( $\times 10^5$ hm <sup>2</sup> )	比例 Proportion/%	面积 Area/( $\times 10^5$ hm <sup>2</sup> )	比例 Proportion/%	面积 Area/( $\times 10^5$ hm <sup>2</sup> )	比例 Proportion/%
	九江 Jiujiang	1.47	5.85	7.38	29.37	16.29
上饶 Shangrao	0.00	0.00	13.96	46.03	16.37	53.97
宜春 Yichun	0.00	0.00	12.48	50.41	12.28	49.59
吉安 Ji'an	0.00	0.00	11.74	35.44	21.38	64.56
抚州 Fuzhou	0.00	0.00	11.63	46.97	13.13	53.03
南昌 Nanchang	0.00	0.00	8.84	89.95	0.99	10.05
鹰潭 Yingtan	0.00	0.00	3.27	69.81	1.41	30.19
新余 Xinyu	0.00	0.00	3.11	73.93	1.10	26.07
景德镇 Jingdezhen	0.00	0.00	2.41	34.31	4.61	65.69
赣州 Ganzhou	0.00	0.00	1.93	3.77	49.13	96.23
萍乡 Pingxiang	0.00	0.00	0.31	6.09	4.69	93.91
全省 Jiangxi Province	1.47	0.67	77.06	35.04	141.38	64.29

表6 自湖北、安徽、上海疫区美国白蛾可能入侵江西省的途径数及其加权综合风险值 $R_1$   
Table 6 Possible transmission routes of *Hyphantria cunea* invading Jiangxi Province from Hubei, Anhui and Shanghai epidemic areas and weighted comprehensive risk values  $R_1$

市 City	湖北疫区 Hubei epidemic area			安徽疫区 Anhui epidemic area			上海疫区 Shanghai epidemic area			传入途径 Route of transmission	$R_1$
	水路 Waterway	道路 Highway	铁路 Railway	水路 Waterway	道路 Highway	铁路 Railway	水路 Waterway	道路 Highway	铁路 Railway		
	九江 Jiujiang	1	2	3	1	2	2	0	0		
上饶 Shangrao	0	0	1	0	0	2	0	3	3	9	2.541
南昌 Nanchang	0	0	1	0	0	1	0	0	1	3	2.468
景德镇 Jingdezhen	0	0	0	0	2	1	0	0	1	4	2.397
鹰潭 Yingtan	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	2.383
新余 Xinyu	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	2.378
吉安 Ji'an	0	0	1	0	0	1	0	0	1	3	2.364
宜春 Yichun	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2.342
抚州 Fuzhou	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2.276
萍乡 Pingxiang	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2.065
赣州 Ganzhou	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2.064
全省 Jiangxi Province	1	4	8	1	4	11	0	3	7	39	2.351

2.3 美国白蛾在江西省的扩散路径、加权系数 $\omega_b$ 及 $R_b$

南昌市铁路最长,其次为吉安市和赣州市;上饶市道路最长,其次为赣州市和南昌市;而上饶市的铁路和道路总长占比最大,为33.04%,其次为南昌、赣州、吉安和宜春市,萍乡市最小(表7)。基于各市的

道路和铁路合计占比,计算相对比例,得到各市加权系数(表1),进而得到校正的 $P_{24}(\omega_b P_{21})$ 和 $P_2$ 指标(表1)。美国白蛾入侵南昌、上饶和九江市的扩散综合风险值 $R_b$ 较高,其次为宜春市和吉安市,而萍乡市和赣州市的相对较低(表7)。

表7 江西省各市美国白蛾的扩散路径(铁路、道路)长度、占比及其加权综合风险值  $R_D$ Table 7 Length and proportions of diffusion paths (railway and road), and weighted comprehensive risk values  $R_D$  in cities of Jiangxi Province

市 City	铁路 Railway		道路 Highway		合计 Total		$R_D$
	长度 Length/km	占比 Proportion/%	长度 Length/km	占比 Proportion/%	占比 Proportion/%	排序 Rank	
南昌 Nanchang	13.78	19.13	118.82	13.45	32.58	2	2.600
上饶 Shangrao	8.40	11.66	188.87	21.38	33.04	1	2.562
九江 Jiujiang	7.01	9.73	80.91	9.16	18.89	6	2.524
宜春 Yichun	8.01	11.11	87.78	9.94	21.05	5	2.463
吉安 Ji'an	9.13	12.68	79.56	9.00	21.68	4	2.449
抚州 Fuzhou	5.30	7.36	59.60	6.75	14.11	7	2.421
鹰潭 Yingtan	3.70	5.14	24.94	2.82	7.96	9	2.410
景德镇 Jingdezhen	2.78	3.86	56.93	6.44	10.31	8	2.382
新余 Xinyu	3.00	4.16	16.49	1.87	6.03	10	2.378
赣州 Ganzhou	9.11	12.64	150.66	17.10	29.70	3	2.262
萍乡 Pingxiang	1.81	2.51	18.87	2.14	4.65	11	2.102
全省 Jiangxi Province	72.05		883.42				2.410

数据截至2019年12月31日。Data collected by the end of December 31st, 2019.

#### 2.4 美国白蛾在江西省的可利用寄主植物资源及其 $R_{II}$

2011—2015年江西省赣州市的防护林面积最大,为  $37.94 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , 占比为 22.39%, 其次为上饶、吉安、宜春和九江市等, 而景德镇市的防护林面积最小, 为  $2.60 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ; 但在四旁种植方面, 上饶市种植株数最多, 其次为宜春、赣州和吉安市等, 鹰潭市和

景德镇市最少(表8)。基于各市寄主植物资源状况, 计算其相对比例, 得到各市的加权系数(表1), 进而得到校正的  $P_{4H}(\omega_H P_4)$ (表1), 进一步计算得到寄主植物资源加权综合风险值  $R_{II}$ (表8)。上饶市的入侵综合风险值最高, 其次为宜春、吉安和九江市, 而鹰潭、新余、萍乡和景德镇市则相对较低(表8)。

表8 2011—2015年江西省各市美国白蛾潜在利用的林木资源及其加权综合风险值  $R_{II}$ Table 8 Potential utilization of forest resources by *Hyphantria cunea* in various cities of Jiangxi Province from 2011 to 2015 and weighted comprehensive risk values  $R_{II}$ 

市 City	防护林 Protection forest		薪炭林 Fuelwood forest		四旁种植 Tree planted along roads and villages		$R_{II}$
	面积 Area/(\( $\times 10^3 \text{ hm}^2$ )	占比 Proportion/%	面积 Area/(\( $\times 10^3 \text{ hm}^2$ )	占比 Proportion/%	数量 No./(\( $\times 10^7 \text{ plants}$ )	占比 Proportion/%	
上饶 Shangrao	28.01	16.53	0.62	16.53	14.79	15.90	2.515
宜春 Yichun	19.75	11.65	0.10	2.67	13.13	14.12	2.350
吉安 Ji'an	22.07	13.02	1.09	29.07	11.58	12.45	2.329
九江 Jiujiang	16.61	9.81	1.40	37.33	10.65	11.46	2.328
赣州 Ganzhou	37.94	22.39	0.46	12.27	12.28	13.20	2.272
南昌 Nanchang	10.59	6.25	0.00	0.00	8.34	8.97	2.194
抚州 Fuzhou	14.30	8.44	0.08	2.13	7.53	8.09	2.149
鹰潭 Yingtan	6.94	4.10	0.00	0.00	2.86	3.08	1.852
新余 Xinyu	4.44	2.62	0.00	0.00	4.09	4.36	1.838
萍乡 Pingxiang	6.21	3.66	0.00	0.00	4.91	5.28	1.724
景德镇 Jingdezhen	2.60	1.53	0.00	0.00	2.87	3.09	1.659
全省 Jiangxi Province	169.46	100.00	3.75	100.00	93.01	100.00	2.110

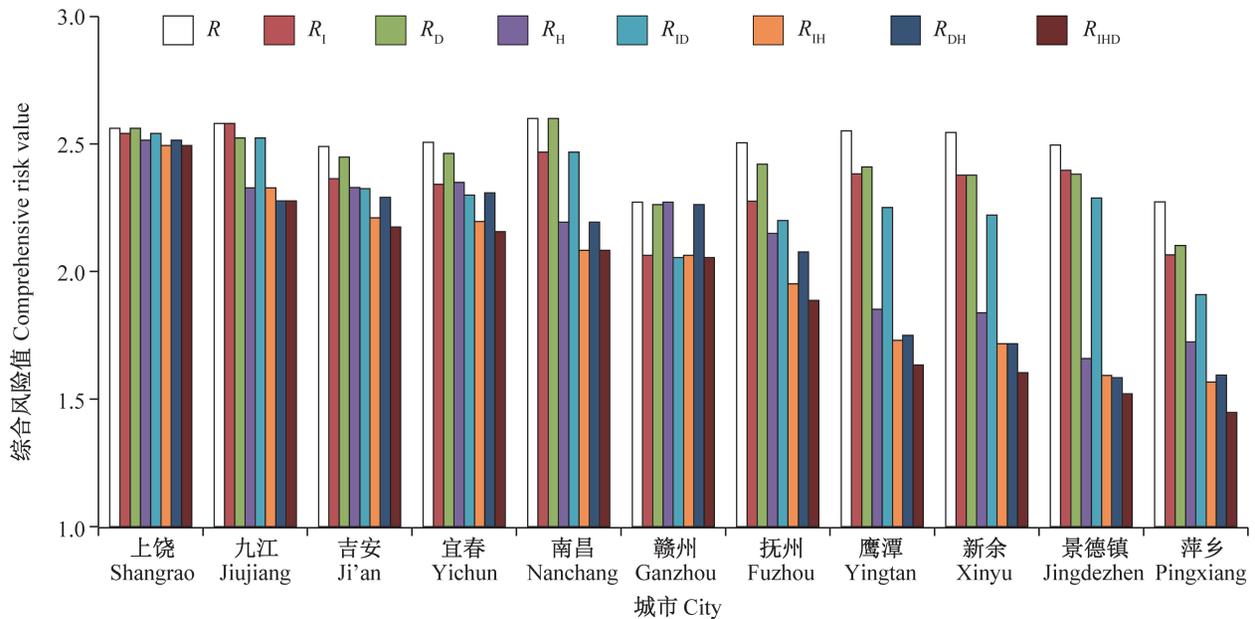
#### 2.5 美国白蛾入侵江西省的综合风险值

基于原指标体系, 美国白蛾入侵江西省的综合

风险值为 2.535, 但经寄主植物资源加权校正后, 综合风险值为 2.436, 风险等级由原来的特别危险级降

为高度危险级。基于原指标体系,江西省上饶、九江、宜春、南昌、抚州、鹰潭和新余市的综合风险值分别为2.562、2.581、2.507、2.600、2.505、2.551和2.545,均为特别危险级,其他各市均为高度危险级(图1)。而经传入途径或扩散路径或寄主植物资源单独加权校正后,综合风险值均不同程度下降,仅上饶市和九江市的传播途径加权综合风险值 $R_i$ (上饶市为2.541,九江市为2.581)与扩散路径加权综合风险值 $R_D$ (上饶市为2.562,九江市为2.524)保留在特别危险等级,其他各市的校正综合风险值均小于2.500,

降为高度危险级或以下(图1)。而与单要素加权校正法相比,经双要素组合加权校正后,综合风险值下降幅度更大,抚州( $R_{IH}$ )、鹰潭( $R_{IH}$ 、 $R_{DH}$ )、新余( $R_{IH}$ 、 $R_{DH}$ )、景德镇( $R_{IH}$ 、 $R_{DH}$ )、萍乡( $R_{ID}$ 、 $R_{IH}$ 、 $R_{DH}$ )综合风险值均小于2.000,即风险等级降至中度危险级(图1)。经三要素加权校正后,不仅各市综合风险值下降,而且美国白蛾入侵各市的危险等级出现了明显分化,其中上饶、九江、吉安、宜春、南昌与赣州市为高度危险级,抚州、鹰潭、新余和景德镇市为中度危险级,萍乡市为低度危险级(图1)。



$R$ : 加权前综合风险值;  $R_i$ : 传播途径的加权综合风险值;  $R_D$ : 扩散路径的加权综合风险值;  $R_{IH}$ : 寄主植物资源的加权综合风险值;  $R_{ID}$ : 传播途径与扩散路径的加权综合风险值;  $R_{IH}$ : 传播途径与寄主植物资源的加权综合风险值;  $R_{DH}$ : 扩散路径与寄主植物资源的加权综合风险值;  $R_{IDH}$ : 传播途径、扩散路径与寄主植物资源的加权综合风险值。 $R$ : Risk value;  $R_i$ : risk value weighted by invasion pathways;  $R_D$ : risk value weighted by diffusion paths;  $R_{IH}$ : risk value weighted by host plants;  $R_{ID}$ : risk value weighted by invasion pathways and diffusion paths;  $R_{IH}$ : risk value weighted by invasion pathways and host plants;  $R_{DH}$ : risk value weighted by diffusion paths and host plants;  $R_{IDH}$ : risk value weighted together by invasion pathways, diffusion paths and host plants.

图1 美国白蛾入侵江西省各市的综合风险值及其加权校正后综合风险值与风险等级

Fig. 1 Comprehensive risk values of *Hyphantria cunea* invasion in various cities of Jiangxi Province and comprehensive risk values after weighted adjustment, along with risk grades

### 3 讨论

定量评估有害生物风险可为有害生物分类管理、差异防控提供基础依据(孙双艳等,2022)。根据有害生物的风险产生和形成特征,多指标综合评估法设置了分布 $P_1$ 、传入与定殖扩散 $P_2$ 、潜在危害 $P_3$ 、经济影响 $P_4$ 和危害管控 $P_5$ 五个准则层(蒋青等,1994;1995),每个准则层再设置二级指标,对二级指标赋分和赋权重,利用加权平均法计算准则层的值,

准则层通过简单算术平均法或者加权平均法计算有害生物综合风险值(宋玉双等,2000;国家林业局森林病虫害防治总站,2014)。在实际应用中,赋分高低受主观因素及参考依据的影响,所依据的信息、数据越准确越详尽,评估结果越可信。针对美国白蛾的风险分析案例,本研究选择了与美国白蛾传播、扩散等行为特征有关的3个信息要素对综合风险值进行校正,校正前江西省大部分市的综合风险均达到特别危险级,其中南昌市的综合风险值最高;但同时

考虑传播途径、扩散路径与寄主植物资源因素后,综合风险值变化明显,上饶、九江、吉安、宜春、南昌和赣州市均降为高度风险级,而抚州、鹰潭、新余和景德镇市则降为中度危险级,萍乡市更是降至低度危险级,表明校正后的综合风险评估结果更符合当前江西全省及各市的实际情况,可为实行差异化的风险等级分类管理提供依据。基于原指标体系(蒋青等,1995;国家林业局森林病虫害防治总站,2014),宋玉双等(2000)评估美国白蛾入侵江西省的综合风险为特别危险级,同样考虑寄主植物资源后(季荣等,2003;Schowalter & Ring,2017),综合风险值变化较大,风险等级降为高度危险级。

美国白蛾入侵能力强,主要归功于其传播途径多、易被携带传播(Szalay-Marzso,1971;Umeya & Itô,1977),因此不能忽视其入侵传播途径及其传入后的可能扩散路径(张生芳,1980)。Lin et al.(2007)研究显示传播途径与各地经济有关。九江市和上饶市位于赣北、赣东北,与湖北疫区、安徽疫区和上海疫区连接,且还受长江经济带快速发展的影响,因此传播途径的加权综合风险值 $R_1$ 较高;相反,萍乡市位于赣西,与长江以北的疫区连接较少,其 $R_1$ 值最低,表明校正后的 $R_1$ 值更能准确地反映江西省各市的地理区位。此外,传播途径的有效性也需要考虑入侵害虫的传播难易程度(Perkins et al.,2013)。美国白蛾易被携带和传播,其可能通过各种途径进行有效传播,所以对其进行科学检疫尤为重要。

美国白蛾入侵后,可能会以新区为次中心借助种群扩增以流式形式向周围空间扩散(Perkins et al.,2013)或者借助动物和人的各种活动进行跳跃式扩散(Kitayama & Mueller-Dombois,1995;Cohen & Carlton,1998)和再传播,因此应关注其定殖情况(Takahashi & Park,2020),并监测其在新区的扩散方式和路径等(赵紫华等,2019)。美国白蛾繁殖力强(刘川等,2009),易在新入侵地定殖、建群和扩散,但新入侵地的环境不同,其所形成的环境阻力或环境的入侵抵抗力也不同(Lovell et al.,2021),因此美国白蛾的扩散速度可能会受到不同程度的限制。当前,美国白蛾到达长江中下游后,推测其一方面可能继续沿通道、路径快速扩散;另一方面,也可能因南方山地森林的屏障作用而放缓扩散速度。因此,在充分考虑各地扩散路径差异情况下开展综合风险评估,有助于得到更加分化的综合风险值,从而为各地美国白蛾的差异化风险等级管理与分类施策提供科

学依据。

## 参 考 文 献 (References)

- Perkins TA, Phillips BL, Baskett ML, Hastings A. 2013. Evolution of dispersal and life history interact to drive accelerating spread of an invasive species. *Ecology Letters*, 16(8): 1079–1087
- Chen C, Wei XT, Xiao HJ, He HM, Xia QW, Xue FS. 2014. Diapause induction and termination in *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiinae). *PLoS ONE*, 9(5): e98145
- Cheng GL. 2010. According to effective accumulated temperature to statistics yearly generations of *Hyphantria cunea* Drury in Qingdao. *Northern Horticulture*, (4): 175–176 (in Chinese) [程桂林. 2010. 有效积温法统计美国白蛾在青岛市区的发生代数. *北方园艺*, (4): 175–176]
- Cohen AN, Carlton JT. 1998. Accelerating invasion rate in a highly invaded estuary. *Science*, 279(5350): 555–558
- Ding ZW, Song YD, Yang YF, Gao F, Zhao ZH. 2021. Comparative analysis of invasive alien animals between temperate and tropical countries. *Journal of Plant Protection*, 48(4): 921–922 (in Chinese) [丁子玮, 宋昱东, 杨益芬, 高峰, 赵紫华. 2021. 温带国家与热带国家外来入侵动物比较分析. *植物保护学报*, 48(4): 921–922]
- FAO. 1996. International standards for phytosanitary measures: part 1, import regulations: guidelines for pest risk analysis. Rome: Italy, pp. 1–23
- Fielding AH, Bell JF. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1): 38–49
- General Station of Forest Pest Management. 2014. Forest pest risk assessment in China. Harbin: Northeast Forestry University, pp. 5–8 (in Chinese) [国家林业局森林病虫害防治总站. 2014. 中国林业有害生物风险评估. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, pp. 5–8]
- Gomi T, Adachi K, Shimizu A, Tanimoto K, Kawabata E, Takeda M. 2009. Northerly shift in voltinism watershed in *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae) along the Japan sea coast: evidence of global warming? *Applied Entomology and Zoology*, 44(3): 357–362
- Guo XH, Qi SY, Zhou XW, Sun XY. 2007. Research progress on alien pest risk assessment methods. *Chinese Journal of Ecology*, 26(9): 1486–1490 (in Chinese) [郭晓华, 齐淑艳, 周兴文, 孙晓扬. 2007. 外来有害生物风险评估方法研究进展. *生态学杂志*, 26(9): 1486–1490]
- Guo ZY, Wu XX. 2007. Analysis on semi-quantitative risk assessment method of pests entering Australia. *Plant Quarantine*, 21(4): 255–258 (in Chinese) [郭志永, 吴杏霞. 2007. 澳大利亚的半定量有害生物进境风险评估方法浅析. *植物检疫*, 21(4): 255–258]
- Hui C, Richardson DM. 2017. Invasion dynamics. Oxford: Oxford University Press, pp. 1–3364
- Ji R, Xie BY, Li XH, Gao ZX, Li DM. 2003. Research progress on the invasive species, *Hyphantria cunea*. *Entomological Knowledge*,

- 40(1): 13–18 (in Chinese) [季荣, 谢宝瑜, 李欣海, 高增祥, 李典谟. 2003. 外来入侵种: 美国白蛾的研究进展. 昆虫知识, 40(1): 13–18]
- Jiang Q, Liang YB, Wang NY, Yao WG. 1994. Preliminary establishment of index system for pest risk assessment. *Plant Quarantine*, 8(6): 331–334 (in Chinese) [蒋青, 梁忆冰, 王乃扬, 姚文国. 1994. 有害生物危险性评价指标体系的初步确立. 植物检疫, 8(6): 331–334]
- Jiang Q, Liang YB, Wang NY, Yao WG. 1995. Study on quantitative analysis method of pest risk assessment. *Plant Quarantine*, 9(4): 208–211 (in Chinese) [蒋青, 梁忆冰, 王乃扬, 姚文国. 1995. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究. 植物检疫, 9(4): 208–211]
- Ju Z. 2007. Study on biological characteristics and cold resistance of *Hyphantria cunea* on different tree species. Master thesis. Taian: Shandong Agricultural University (in Chinese) [鞠珍. 2007. 美国白蛾在不同树种上的生物学特性及抗寒性的研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Kitayama K, Mueller-Dombois D. 1995. Biological invasion on an oceanic island mountain: do alien plant species have wider ecological ranges than native species? *Journal of Vegetation Science*, 6(5): 667–674
- Li J, Zhao YX, Chen XP, Yan H, Song YS. 2013. Discussion on the forest pest risk analysis index system and standard of natural endowments. *Forest Pest and Disease*, 32(3): 10–15 (in Chinese) [李娟, 赵宇翔, 陈小平, 阎合, 宋玉双. 2013. 林业有害生物风险分析指标体系及赋分标准的探讨. 中国森林病虫, 32(3): 10–15]
- Lin W, Zhou GF, Cheng XY, Xu RM. 2007. Fast economic development accelerates biological invasions in China. *PLoS ONE*, 2(11): e1208
- Liu C, Huang Y, Sun HM. 2009. Status analysis of *Hyphantria cunea* (Drury) occurrence in Shandong Province. *Shaanxi Forest Science and Technology*, (4): 54–57 (in Chinese) [刘川, 黄娅, 孙华梅. 2009. 山东省美国白蛾发生现状分析. 陕西林业科技, (4): 54–57]
- Liu SJ. 2015. Tree species damaged by *Hyphantria cunea* and its distribution in Shenyang region. *Protection Forest Science and Technology*, (2): 37–38, 40 (in Chinese) [刘士军. 2015. 沈阳地区美国白蛾危害树种及分布研究. 防护林科技, (2): 37–38, 40]
- Lovell RSL, Blackburn TM, Dyer EE, Pigot AL. 2021. Environmental resistance predicts the spread of alien species. *Nature Ecology & Evolution*, 5(3): 322–329
- Min SF, Zeng WH, Chen YX, Luo ZJ, Chen L, Chen S. 2018. Biological characteristics and control measures of *Hyphantria cunea* in Xiaogan city, Hubei Province. *Hubei Forestry Science and Technology*, 47(5): 30–33 (in Chinese) [闵水发, 曾文豪, 陈益娟, 罗治建, 陈亮, 陈肆. 2018. 美国白蛾在湖北孝感市的生物学特性与防治措施. 湖北林业科技, 47(5): 30–33]
- Qiao XR. 2001. Study on bionomics of *Hyphantria cunea* in Qinghuangdao. *Journal of Langfang Teachers College*, 15(2): 48–51 (in Chinese) [乔秀荣. 2001. 美国白蛾在秦皇岛市的生物学特性研究. 河北职业技术师范学院学报, 15(2): 48–51]
- Schowalter TD, Ring DR. 2017. Biology and management of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Erebidae). *Journal of Integrated Pest Management*, 8(1): 7
- Song YS, Yang AL, He NJ. 2000. Pest risk analysis of red turpentine beetle (*Dendroctonus valens*). *Forest Pest and Disease*, 19(6): 34–37 (in Chinese) [宋玉双, 杨安龙, 何嫩江. 2000. 森林有害生物红脂大小蠹的危险性分析. 森林病虫通讯, 19(6): 34–37]
- Sun SH, Sun LL, Deng Y, Lin F, Nan JK. 2017. Observation of black-headed and red-headed races of *Hyphantria cunea* in the eastern US, with implications to populations in China. *Forest Pest and Disease*, 36(5): 13–18 (in Chinese) [孙守慧, 孙丽丽, 邓煜, 林枫, 南俊科. 2017. 美国白蛾两种色型的研究及其对我国美国白蛾防控的启示. 中国森林病虫, 36(5): 13–18]
- Sun SY, Zhou MH, Bai J, Wang ZH, Wang JD, Ma F. 2022. An introduction and review of EPPO's pest risk analysis. *Plant Quarantine*, 36(3): 54–59 (in Chinese) [孙双艳, 周明华, 白娟, 王振华, 王建东, 马菲. 2022. 欧洲和地中海植物保护组织有害生物风险分析工作介绍. 植物检疫, 36(3): 54–59]
- Szalay-Marzós L. 1971. Biology and control of the fall webworm (*Hyphantria cunea* Drury) in the middle- and east European countries. *EPPO Bulletin*, 1(3): 23–31
- Takahashi D, Park YS. 2020. Spatial heterogeneities of human-mediated dispersal vectors accelerate the range expansion of invaders with source-destination-mediated dispersal. *Scientific Reports*, 10: 21410
- Umeya K, Itô Y. 1977. Invasion and establishment of a new insect pest in Japan.//Hidaka T. Adaptation and speciation in the fall webworm. Tokyo: Kodansha, pp. 1–12
- Wang H, Wang QZ, Meng LC, Liang YY, Liu XP, Zeng JP. 2020. Risk assessment of the invasive pest red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* transferring to the native palm *Trachycarpus fortunei*. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 920–928 (in Chinese) [王辉, 王钦召, 孟令春, 梁玉勇, 刘兴平, 曾菊平. 2020. 入侵害虫红棕象甲转移为害本土棕榈树的风险评估. 植物保护学报, 47(4): 920–928]
- Wang Q, Wen FZ, Sun L, Liu H. 2003. International cooperation of the project of the whole people's afforestation in Jiangxi Province: exploration for the first phrase of the Sino-German cooperative project of Changjiang protection forest in the section of Jiangxi Province. *Jiangxi Forestry Science and Technology*, 31(3): 42–47 (in Chinese) [王倩, 文凤竹, 孙乐, 刘虹. 2003. 江西省全民绿化工程的国际协作: 长江防护林(江西段)中德合作项目一期工程初探. 江西林业科技, 31(3): 42–47]
- Wang QZ, Zeng JP. 2017. Risk analysis and prevention measurements of red palm weevil in Jiangxi Province. *Plant Quarantine*, 31(2): 53–58 (in Chinese) [王钦召, 曾菊平. 2017. 红棕象甲在江西省的风险性分析及防控管理对策. 植物检疫, 31(2): 53–58]
- Xiang YQ, Chen QL. 1994. Brief report on tree species selection of dune shelterbelt in Duchang. *Jiangxi Forestry Science and Technology*, 22(5): 10–11 (in Chinese) [向玉清, 陈齐柳. 1994. 都昌沙丘防护林树种选择试验简报. 江西林业科技, 22(5): 10–11]

- Yang BS, Wang H, Shao FL, Zhao Q, Ma ZM. 2012. The evaluation of environmental function loss resulted from *Hyphantria cunea* in Jinan in 2008. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 26(2): 179–182 (in Chinese) [杨宝山, 王惠, 邵凤姿, 赵强, 马振民. 2012. 2008年美国白蛾造成的济南市环境功能损失评估. *济南大学学报(自然科学版)*, 26(2): 179–182]
- Yang BS, Wang H, Zhao Q, Liang W. 2010. Investigation of *Hyphantria cunea* host among urban afforestation tree species in Jinan city. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 24(3): 282–284 (in Chinese) [杨宝山, 王惠, 赵强, 梁伟. 2010. 济南市城市绿化树种中美国白蛾寄主调查. *济南大学学报(自然科学版)*, 24(3): 282–284]
- Zhang SF. 1980. *Hyphantria cunea*, a new quarantine pest introduced into China. *Hebei Agricultural Science and Technology*, (1): 34–35 (in Chinese) [张生芳. 1980. 美国白蛾——一种新传入我国的检疫性害虫. *河北农业科技*, (1): 34–35]
- Zhang XS. 2004. Damage and control of *Hyphantria cunea* in Tangshan. // Abstract of the 12th and 13th National Symposium on Garden Plant Protection. Taiyuan: Plant Protection Committee, Chinese Society of Landscape Architecture, pp. 44 (in Chinese) [张雪松. 2004. 美国白蛾在唐山的危害及防治. *全国园林植物保护第十二次、十三次学术讨论会论文摘要集*. 太原: 中国风景园林学会植物保护专业委员会, pp. 44]
- Zhao ZH, Su M, Li ZH, Hui C. 2019. Invasion ecology of alien species. *Journal of Plant Protection*, 46(1): 1–5 (in Chinese) [赵紫华, 苏敏, 李志红, 惠苍. 2019. 外来物种入侵生态学. *植物保护学报*, 46(1): 1–5]
- Zheng HY, Xu LL, Liu YP, Xie CX, Gao Y. 2018. Analysis on the occurrence status of *Hyphantria cunea* in the south of the Yangtze River: a case study of Wuhu. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 45(2): 17–20 (in Chinese) [郑华英, 徐丽丽, 刘云鹏, 解春霞, 高悦. 2018. 长江以南美国白蛾发生现状分析: 以芜湖为例. *江苏林业科技*, 45(2): 17–20]
- Zou W, Wang L, Lai T, Zhu XF, Chen FS, Zeng JP. 2022. Distribution, influencing factors and gaps analysis of *Manglietia fordiana*: implications of conservation to mountain broad-leaved forests. *Acta Ecologica Sinica*, 42(5): 1889–1900 (in Chinese) [邹武, 王淦, 赖童, 朱祥福, 陈伏生, 曾菊平. 2022. 木莲 (*Manglietia fordiana*) 的适生分布, 影响因子与保护空缺研究. *生态学报*, 42(5): 1889–1900]

(责任编辑:张俊芳)