中国农业大学学报 2026,31(12):225-234
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

邹娅,周玉婷,葛雪贞,李甜甜,宗世祥. 松针鞘瘿蚊在我国的适生区预测及风险分析[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):225-234.
ZOU Ya, ZHOU Yuting, GE Xuezhen, LI Tiantian, ZONG Shixiang. Prediction of suitable distribution areas and risk analysis of *Thecodiplosis japonensis* in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 225-234.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.17

松针鞘瘿蚊在我国的适生区预测及风险分析

邹 娅[1,2] 周玉婷[1,3] 葛雪贞[2] 李甜甜[4] 宗世祥[1*]

(1. 北京林业大学 林学院/林业有害生物防治北京市重点实验室,北京 100083;
2. 劳里埃大学 生物系,滑铁卢 加拿大 N2L 3C5;
3. 南京信息工程大学 生态与应用气象学院,南京 210044;
4. 北京市门头沟区公园管理中心,北京 102300)

摘 要 为明确危害松树的外来入侵害虫松针鞘瘿蚊(*Thecodiplosis japonensis*)在我国的潜在适生区及其扩散的风险等级,从而为防控决策提供依据,利用BIOMOD2建模平台中的3种物种分布模型:广义加性模型(Generalized Additive Models)、广义线性模型(Generalized Linear Model)、推进式回归树模型(Generalized Boosted Model)对其适生区进行了预测,从物种分布、潜在经济危害性、寄主植物分布和经济重要性、传播扩散的可能性和风险管理难度5个方面进行了风险分析。结果表明:松针鞘瘿蚊在我国的潜在适生区主要分布于南部和东北部,总适生区面积占国土面积的36.70%,风险值为1.91,属中度危险性林业有害生物。松针鞘瘿蚊在我国适生区范围较广,具有一定的扩散风险,亟需制定管理措施,以降低其进一步扩散风险。

关键词 外来入侵害虫;林业有害生物;BIOMOD2;气候适宜性;风险管理

中图分类号 S763.3 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0225-10 **文献标志码** A

Prediction of suitable distribution areas and risk analysis of *Thecodiplosis japonensis* in China

ZOU Ya[1,2], ZHOU Yuting[1,3], GE Xuezhen[2], LI Tiantian[4], ZONG Shixiang[1*]

(1. Forestry College/Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Department of Biology, Wilfrid Laurier University, Waterloo N2L 3C5, Canada;
3. School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
4. Mentougou District Park Management Center, Beijing 102300, China)

Abstract This study aims to identify the potentially suitable distribution areas and assess the risk of spread of *Thecodiplosis japonensis* in China. Using three species distribution models within the BIOMOD2 modeling platform (Generalized Additive Model, Generalized Linear Model and Generalized Boosted Model), the potentially suitable areas for *T. japonensis* are projected. A comprehensive risk analysis is conducted based on five aspects: Species distribution, potential economic impact, host plant distribution and economic importance, likelihood of spread, and difficulty of risk management. The prediction results indicate that the potentially suitable areas for *T. japonensis* are mainly located in southern and northeastern China, covering 36.70% of the country's land area. The calculated risk index is 1.91, classifying it as a moderately hazardous forest pest in China. *T. japonensis* has a wide potential distribution range in China and poses a certain risk of spread. It is urgent to implement quarantine and management measures to prevent further expansion.

Keywords invasive alien pest; forest pest; BIOMOD2; climatic suitability; risk management

收稿日期:2026-03-15;接受日期:2026-08-10
基金项目:国家林草局林业有害生物防治管理与测报项目"松林重大入侵害虫在中国的适生性与风险管理"
第一作者:邹娅(ORCID:0000-0002-8179-015X),博士研究生,E-mail:zouyayaxx@gmail.com
通讯作者:宗世祥(ORCID:0000-0002-4137-4514),教授,主要从事林木钻蛀性害虫生态调控技术研究,E-mail:zongsx@126.com

松针鞘瘿蚊(*Thecodiplosis japonensis* Uchida & Inouye)隶属于双翅目(Diptera)瘿蚊科(Cecidomyiidae),是一种危害松属植物的害虫,原分布于日本[1]。该虫以幼虫危害当年生松针,幼虫在针叶基部内侧取食并刺激植物组织增生形成虫瘿,隐蔽于瘿内完成生长发育[2]。受害针叶早期出现黄绿色斑点,逐渐变黄、缩短和枯萎,严重时整束针叶枯死脱落,树冠稀疏,连续危害2~3年可导致树势显著衰弱,甚至全株死亡[2]。松针鞘瘿蚊一年发生一代,以幼虫在枯枝落叶层或表土层中越夏和越冬,翌年春季化蛹,成虫于5~6月羽化产卵。该虫具有脱瘿习性,老熟幼虫在特定时期主动脱离虫瘿进入地表土壤,这一行为与降雨和湿度密切相关[3-4]。

松针鞘瘿蚊的入侵扩散能力较强。自1901年在日本首次记录以来,该虫于1929年入侵韩国木浦和首尔地区,至1996年已扩散至除济州岛外的韩国全境,严重危害赤松(*Pinus densiflora*)、黑松(*P. thunbergii*)[5-6]。1975—1997年,韩国政府累计投入约3 400万美元用于该虫的防治与管理;2014—2015年,为控制该虫砍伐了170万株树木[5-6]。2016年,该虫首次在我国山东省青岛市黄岛区沿海防护林被发现,主要危害黑松、赤松和油松(*P. tabulaeformis*)[2]。作为重要的造林和生态防护树种,油松在我国北方广泛分布,黑松则是山东沿海防护林的主体树种,在防风固沙和水土保持中发挥着重要的作用。

国内外学者对松针鞘瘿蚊开展了多方面的研究。分类学方面,Uchida等[1]首次对该虫进行了分类描述。20世纪80年代,日本学者对其林间发生动态和危害规律进行了系统调查[7]。韩国学者重点研究了该虫的入侵历史、地理扩散模式及经济损失评估,揭示了人类活动驱动的远距离传播是其主要扩散途径[5]。近年来,研究视角逐步拓展至生态与生理层面,包括虫瘿生长与寄主化学防御反应、寄生蜂群落动态、不同地理种群的波动特征、幼虫脱瘿节律及耐寒性测定等[8-10]。国内研究主要集中于该虫的脱瘿节律及气味结合蛋白的关系[3-4,10]。此外,欧洲对该虫进行了有害生物风险评估,确认其具有较高的入侵扩散潜力[6]。

松针鞘瘿蚊是危害松属植物的重要外来有害生物,已在韩国和日本造成严重危害和经济损失。该虫目前在我国仅局部发生,但我国松林资源丰富、寄主植物分布广泛,部分地区可能具备其定殖和扩散的适宜环境。一旦该虫扩散,将对我国松林生态安全和林业生产造成潜在威胁,并增加检疫监管和防控难度。因此,在其尚未大范围扩散前,明确其潜在适生区和入侵风险等级,对于确定重点监测区域、开展早期预警和制定分区防控措施具有重要意义。此外,目前未有关于该虫在我国的适生区研究。基于此,本研究拟结合物种分布模型和林业有害生物风险评估方法,预测松针鞘瘿蚊在我国的潜在适生区,并对其入侵风险进行综合评价,以期为我国松针鞘瘿蚊的检疫管理、风险管控和早期防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

1.1.1 物种分布数据

松针鞘瘿蚊的全球地理分布情况来自文献[5,11]和全球生物多样性网络数据库(https://www.gbif.org/,GBIF)。为保证数据质量,首先使用R包CoordinateCleaner[12]对原始数据进行清洗,去除重复、错误、模糊和在海洋中的分布点;为降低采样偏差,进而利用R包BiodiversityR[13]对分布点进行空间稀疏化处理:依据环境变量分辨率(10 km×10 km),每个网格内仅保留1个分布点。经上述处理,最终获得21个分布点用于后续建模。

1.1.2 气象数据

历史气象数据来自CHELSA数据集(Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas,https://chelsa-climate.org/)。共获取了19个生物气候变量(1981—2010年,表1)。采用方差膨胀因子(Variance inflation factor,VIF)检验变量间的共线性[14],剔除VIF>5的变量[15],即多重共线性不强的气候变量用于该虫的预测模型,最终筛选出4个变量bio3、bio5、bio13和bio19用于松针鞘瘿蚊分布模型构建。

1.2 模型的建立及评估

基于物种分布数据与环境变量,利用R平台的BIOMOD2软件包[16]构建物种分布模型。使用的建模算法包括广义加性模型(Generalized Additive Models,GAM)、广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)、推进式回归树模型(Generalized

表1　本研究中使用的19个生物气候变量

Table 1　19 bio-climatic variables used in the study

气候变量 Climate variables	描述 Description	气候变量 Climate variables	描述 Description
bio1	年均温	bio11	最冷季平均温度
bio2	昼夜温差月均值	bio12	年均降水量
bio3	等温性	bio13	最湿月降水量
bio4	温度的季节性	bio14	最干月降水量
bio5	最暖月最高温度	bio15	季节性降水量
bio6	最冷月最低温度	bio16	最湿季降水量
bio7	年均气温变化范围	bio17	最干季降水量
bio8	最湿季平均温度	bio18	最暖季降水量
bio9	最干季平均温度	bio19	最冷季降水量
bio10	最暖季平均温度		

Boosted Model，GBM），采用BIOMOD2默认参数设置。在建模过程中，需同时输入物种的存在点与缺失点数据。由于难以获取真实的缺失点信息，采用随机生成的方法，构建了10组伪缺失点（Pseudo-absence points，每组1 000个），用于后续模型训练与评估。随后，为评估模型的稳定性和预测能力，本研究采用随机5次交叉验证方法，即每次随机划分75%数据为训练集、25%为测试集[17]。模型评估阶段，本研究采用遗漏率（Omission rate，OR）作为模型评估指标，该指标反映验证集中已知分布点落在预测适生区范围外的比例[18]。一般认为，遗漏率≤0.05表示模型模拟效果良好。在完成模型训练与评估后，依据遗漏率≤0.05的标准筛选出表现优异的模型组合，进而采用多模型平均策略整合各模型的预测结果，生成最终针鞘瘿蚊适生性图。根据适生指数值和该虫的已知分布情况，将预测结果划分为4个等级：0≤适生指数<0.2为非适生区，0.2≤适生指数<0.4为低度适生区，0.4≤适生指数<0.6为中度适生区，0.6≤适生指数≤1为高度适生区[19]。以上分析均在R平台完成。

1.3　风险指标的确定

根据国家林业和草原局2016年发布的《林业有害生物风险分析准则》[20]，结合物种适生性分析结果，从分布状况、潜在经济危害性、寄主植物的经济重要性、传播扩散的可能性和危险性管理难度5个方面对松针鞘瘿蚊在我国的风险进行量化和评估。风险评价指标体系见表2。本研究中，P_1～P_5分别表示上述5个准则层的风险分值；P_{ij}表示第i个准则层下第j个指标层的赋分值。综合风险值以R表示。各准则层分值及综合风险值按下列公式计算：分布状况：$P_1=P_{11}$，潜在经济危害性：$P_2=0.70P_{21}+0.20P_{22}+0.05P_{23}+0.05P_{24}$，寄主植物经济重要性：$P_3=\mathrm{Max}(P_{31},P_{32},P_{33})$，传播扩散可能性：$P_4=(P_{41}\times P_{42}\times P_{43}\times P_{44}\times P_{45})^{1/5}$，危险性管理难度：$P_5=(P_{51}+P_{52}+P_{53})/3$，$R=(P_1\times P_2\times P_3\times P_4\times P_5)^{1/5}$。

1.4　数据处理及分析

依据《林业有害生物风险分析准则》[20]，邀请相关领域内专家对各项风险指标进行独立赋分。计算各项指标层的平均值，进而计算P_1、P_2、P_3、P_4和P_5这5项指标层分值，最后带入公式计算综合风险性值R，分析松针鞘瘿蚊在我国的总体风险等级。我国林业有害生物的危险程度一般分为4级：2.5≤R<3.0为特别危险，2.0≤R<2.5为高度危险，1.5≤R<2.0为中度危险，0≤R<1.5为低度危险。

2　结果与分析

2.1　模型评估

经遗漏率阈值筛选后，最终纳入分析的模型为GLM，遗漏率值为0。表明模型预测性能优良，据此预测该虫在我国的潜在分布具有较高的可靠性。

2.2　影响松针鞘瘿蚊的主要气候因子

4个生物气候因子的重要性值如表1所示。其中，为最湿月降水量（bio13）的重要性值最高（0.80），其次是等温性（bio3，0.65），最暖月最高温度（bio5，0.48）和最冷季降水量（bio19，0.16）的重要性相对较低。

表 2 松针鞘瘿蚊风险性评价指标赋分表

Table 2 Scoring of risk evaluation index of *Thecodiplosis japonensis*

准则层 Criteria layer	指标层(P_{ij}) Indicator layer	评判指标 Evaluation indexes	赋分区间 Assignment interval	赋分依据 Assignment criteria	赋分值 Assigned value
分布状况(P_1) Domestic distribution	分布情况 P_{11}	占其适生面积的百分率＜5%	2.01～3.00	物种分布模型预测结果显示，松针鞘瘿蚊在我国潜在适生区范围较广，总适生区面积占全国陆地面积的 36.70%；但目前在我国仅见于山东青岛局部发生，实际分布范围相对于潜在适生区较小[2]	3
		5%≤占其适生面积的百分率＜20%	1.01～2.00		
		20%≤占其适生面积的百分率＜50%	0.01～1.00		
		占其适生面积的百分率≥50%	0		
潜在经济危害性(P_2) Potential economic hazard	潜在经济或生态危害性 P_{21}（权重值 0.70）	如传入可造成≥20% 的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失	2.01～3.00	松针鞘瘿蚊以幼虫危害当年生松针，连续危害 2～3 年可导致树势衰弱，严重时可造成寄主死亡；该虫已在韩国造成明显生态和经济损失，在我国山东青岛也已发现其危害黑松和赤松[2,5]	2
		20%＞如传入可造成≥5% 的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失	1.01～2.00		
		5%＞如传入可造成≥1% 的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失	0.01～1.00		
		如传入可造成＜1% 的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失	0		
	是否为其他有害生物传播媒 P_{22}（权重值 0.20）	可传带 1 种或 1 种以上有害生物	2.01～3.00	现有资料未显示松针鞘瘿蚊为其他有害生物的主要传播媒介	2
		否	2.00		
	国外重视程度 P_{23}（权重值 0.05）	≥20 个国家将其列入禁止进境有害生物名单	2.01～3.00	欧洲已对松针鞘瘿蚊开展有害生物风险评估，并认为其具有较高入侵扩散潜力，但目前尚未见其被多数国家列入禁止进境有害生物名单[6]	0.6
		10～19 个国家将其列入禁止进境有害生物名单	1.01～2.00		
		0～9 个国家将其列入禁止进境有害生物名单	0.01～1.00		
	外检重视程度 P_{24}（权重值 0.05）	列为境植物检疫性有害生物名录	3.00	现有资料未显示其已列入我国进境植物检疫性有害生物名录	1
		未列入	1.00		

表2（续）

准则层 Criteria layer	指标层（P_{ij}） Indicator layer	评判指标 Evaluation indexes	赋分区间 Assignment interval	赋分依据 Assignment criteria	赋分值 Assigned value
危害对象的重要性（P_3） The importance of hazardous objects	危害对象的种类 P_{31}	≥10种	2.01～3.00	松针鞘瘿蚊主要危害松属植物，在日本和韩国主要危害赤松和黑松，在我国已记录危害黑松、赤松和油松，寄主种类相对有限[2,21]	0.15
		5～9种	1.01～2.00		
		1～4种	0.01～1.00		
		无	0		
	危害对象的分布范围或生态效益 P_{32}	分布范围广或产量大或生态效益大	2.01～3.00	油松是我国北方重要造林树种，分布广泛；黑松是山东沿海防护林的重要组成树种，在防风固沙、水土保持和水源涵养等方面具有重要生态功能[22-23]	2.3
		分布范围中等或产量中等或“生态效益”一般	1.01～2.00		
		分布范围小或产量有限或生态效益差	0.01～1.00		
	危害对象的特殊经济价值 P_{33}	经济价值高，社会影响大	2.01～3.00	松属植物在我国生态防护、造林绿化和林业生产中具有重要价值，一旦受害可能影响区域森林健康和生态防护功能[22-23]	2.5
		经济价值一般，社会影响一般	1.01～2.00		
		经济价值低，社会影响小	0.01～1.00		
传入、定殖扩散可能性（P_4） Likelihood of entry, establishment and spread	有害生物被截获的频次 P_{41}	经常被截获	2.01～3.00	该虫目前在我国仅局部发生，尚缺乏大范围截获记录；但其可随受害苗木、枝条、松针或相关林木材料传播，存在检疫截获风险[2]	1.8
		偶尔被截获	1.01～2.00		
		从未被截获	0.01～1.00		
	运输过程中有害生物存活率 P_{42}	存活率≥40%	2.01～3.00	幼虫隐蔽于松针基部虫瘿内，并可在枯枝落叶层或表土层中越夏和越冬，随寄主材料或带土植株运输时具有一定存活可能性[2]	2.6
		10%≤存活率＜40%	1.01～2.00		
		1%≤存活率＜10%	0.01～1.00		
		存活率＜1%	0		
	传播方式（介体）P_{43}	主要为人为传播	2.01～3.00	该虫具有自然扩散和人为扩散两种方式，成虫自然飞行距离有限，远距离扩散主要依赖受害植株或相关林木材料调运，人为传播是其远距离扩散的重要途径[2,5]	2.3
		通过气流或水流传播	1.01～2.00		
		土传或活动能力很弱或有限的介体传播	0.01～1.00		
	我国适生范围 P_{44}	≥50%的地区能够适生	2.01～3.00	模型预测结果显示，我国潜在适生区面积占全国陆地面积的36.70%	1.8
		25%≤地区能够适生＜50%	1.01～2.00		
		1%≤地区能够适生＜25%	0.01～1.00		

表2（续）

准则层 Criteria layer	指标层（P_{ij}） Indicator layer	评判指标 Evaluation indexes	赋分区间 Assignment interval	赋分依据 Assignment criteria	赋分值 Assigned value
传入、定殖扩散可能性（P_4） Likelihood of entry, establishment and spread	国外分布状况 P_{45}	≥50%的国家有分布	2.01～3.00	松针鞘瘿蚊原分布于日本，后传入韩国，目前国外分布国家数量相对有限[6]	0.01
		25%≤国家有分布＜50%	1.01～2.00		
		0≤国家有分布＜25%	0.01～1.00		
危险性管理难度（P_5） Hazard level management difficulty	检验检疫难度 P_{51}	当场鉴定可靠性低、费时，需经专家鉴定	2.01～3.00	该虫体型微小，幼虫隐蔽于松针基部虫瘿内，早期危害症状不易发现[2]	2.9
		当场鉴定可靠性一般，需经专门培训的技术人员鉴定	1.01～2.00		
		当场鉴定非常可靠，简便快捷，一般技术人员可鉴定	0.01～1.00		
	除害处理难度 P_{52}	常规方法不能杀死有害生物	2.01～3.00	该虫部分发育阶段隐蔽于虫瘿、枯枝落叶层或表土层中，常规防治措施难以完全覆盖；树干注射、清理地被物等措施虽可降低虫口数量，但成本和实施难度较高[2]	1.8
		常规方法的除害效率＜50%	1.01～2.00		
		50%≤常规方法的除害效率＜100%	0.01～1.00		
		常规方法的除害效率为100%	0		
	根除难度 P_{53}	效果差，成本高，难度大	2.01～3.00	该虫寄主植物分布较广，且具有隐蔽危害和人为远距离传播风险，一旦在更多地区建立种群，根除成本较高、难度较大[2]	2.8
		效果好，成本低，简便易行	0		
		介于二者之间	0.01～2.00		

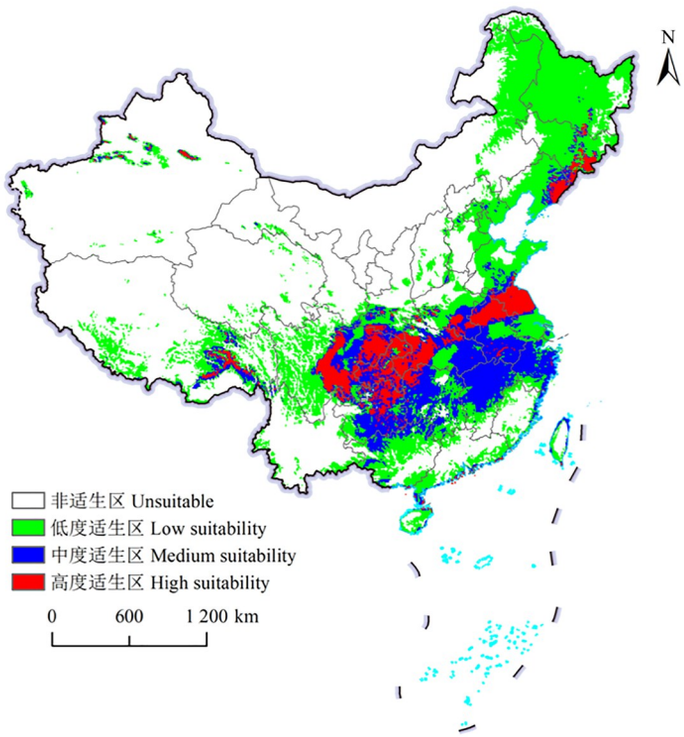
2.3 松针鞘瘿蚊在我国潜在适生区分布

物种分布模型预测结果显示松针鞘瘿蚊在我国的潜在适生区主要分布于南部和东北部，总适生区面积占全国陆地面积的36.70%。其中，低度适生区面积最大，为120.67万km^2，占我国陆地面积的14.22%；高度适生区面积为97.70万km^2，占我国陆地面积的11.51%；中度适生区面积为93.10万km^2，占我国陆地面积的10.97%（图1）。

低度适生区分布范围较广，主要位于非适生区与中、高度适生区之间的过渡地带。其主要分布省份包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古自治区、河北、山东、河南、陕西、山西、四川、云南、贵州、广西、广东、福建、海南和台湾等地。其中，东北地区、华北-黄淮海地区、西南山地以及华南和东南沿海地区均有较大范围或零散斑块分布。

中度适生区主要集中在我国华中、华东、华南及西南部分地区，分布相对连续。主要涉及四川、重庆、湖北、湖南、河南、安徽、江苏、浙江、江西、福建、广东、广西以及山东、辽宁等省份。总体上，中度适生区多分布在低度适生区内部或其邻近区域，并与高度适生区相互交错。

高度适生区分布范围相对较小，但空间集聚性较强，主要集中在中国中部至东部地区。主要分布在四川东部、重庆、湖北、湖南、河南南部、安徽、江苏、浙江、江西和山东等地。此外，在辽宁南部及部分东部沿海地区也存在零星高度适生斑块。总体来看，高度适生区主要沿长江流域及其邻近地区分布，并在黄淮海地区和东北部形成局部斑块，表明这些区域是该物种潜在分布风险较高的区域。



基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的中国标准地图绘制，底图无修改。

This map was prepared using the standard map of China (map approval number: GS(2020)4619) downloaded from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources of China. The base map was used without modification.

图1　松针鞘瘿蚊在我国潜在适生区预测

Fig. 1　The projected potential distribution of *Thecodiplosis japonensis* in China

2.4　松针鞘瘿蚊的风险定量分析

各项评判指标的赋分结果见表2。各项评判指标(P)和风险R值计算结果如下：分布状况P_1=3，潜在经济危害性P_2=1.88，寄主植物的经济重要性P_3=2.50，传播扩散的可能性P_4=0.72，风险管理难度P_5=2.50，风险值R=1.91。计算结果表明，松针鞘瘿蚊的风险值为1.91，在我国属于中度危险的林业有害生物。

3　讨　论

3.1　主要气候因子的生态学含义

本研究中，最湿月降水量(bio13)和等温性(bio3)对模型贡献较高，表明水分条件和温度波动稳定性可能是限制松针鞘瘿蚊分布的重要气候因子。前人研究发现，该物种种群波动的空间同步性与降水条件显著相关[8]。本研究中bio13表现出较高重要性，与前人关于降水影响该物种种群动态的研究结果总体一致，均表明降水条件对该物种具有重要作用。温度方面，该虫以幼虫在表土越冬，在温度＜15 ℃或＞30 ℃时发育适宜性明显降低[24]，表明等温性(bio3)反映的温度季节模式的重要性。总体来看，本研究筛选出的关键气候因子与松针鞘瘿蚊的生活史特征和生态需求具有较好的一致性，为模型预测结果的合理性提供了生态学解释。

3.2　松针鞘瘿蚊在我国的潜在分布范围

预测结果表明，该虫在我国具有较广泛的潜在适生区，主要分布于我国中部、南部和东北部地区，总适生区面积约占本研究有效陆地区域面积的36.70%，说明该虫在我国部分地区具有定殖和扩散的气候适宜性。

从空间分布格局来看，松针鞘瘿蚊的中、高度适生区主要集中于我国南部、中东部、长江流域及其邻近地区。这些地区气候相对温和湿润，可能为该虫生存、繁殖和种群维持提供较适宜的环境条件。相比之下，西北干旱区和青藏高原等高寒或干旱地区适生性较低，可能与低温、干旱或高海拔环境限制有关。

本研究预测山东青岛为松针鞘瘿蚊的低度适

生区，而该虫目前在青岛确有分布。对此，需从两方面理解模型预测的准确性与局限性。首先，低度适生区并不等同于无分布区。据调查资料，松针鞘瘿蚊在青岛虽有分布，但仅局部发生，尚未造成大面积暴发或显著的经济损失，这与低度适生区的预测内涵基本吻合。同时，物种实际发生还会受到寄主植物分布、局地小气候和人为传播等因素影响，而这些因素未完全纳入模型，可能导致模型预测结果与实际发生情况存在一定差异。因此，模型结果总体上能够反映松针鞘瘿蚊在我国的潜在适生格局，但仍需结合实际监测资料进行综合判断。

3.3 松针鞘瘿蚊在我国的入侵风险分析

该虫风险值为1.91，属于中度危险林业有害生物。该结果表明，虽然松针鞘瘿蚊目前在我国仅局部发生，但其潜在适生区范围较广，且在部分区域具有进一步定殖和扩散的可能性，因此其入侵风险不容忽视。

从适生区预测结果看，我国中部、南部和东北部存在较大面积潜在适生区，部分地区可能具备该虫长期定殖的气候条件。从传播扩散途径看，松针鞘瘿蚊可随寄主苗木、带虫枝条、松针或相关林木材料进行人为传播，其自然扩散能力虽然有限，但人为调运可能增加其远距离扩散风险。此外，该虫危害具有一定隐蔽性，早期虫瘿或低密度种群不易被及时发现，可能增加监测和检疫难度。

从管理难度看，松针鞘瘿蚊生活史中存在进入地面枯枝落叶层或表土层越冬的阶段，且虫体微小，具有识别和防治的难度。同时，我国松属植物分布广泛，部分适生区与寄主资源分布区域可能重叠，一旦该虫在更多地区建立种群，防控成本和管理难度将进一步增加。因此，应将该虫作为具有潜在扩散风险的外来林业有害生物进行持续监测和分区管理。

3.4 风险管理建议

松针鞘瘿蚊作为一种外来入侵林业有害生物，目前在我国的实际分布范围较为有限，但风险评估表明其具有中度危险性。值得注意的是，该虫在我国的潜在适生区范围广泛，存在一定的扩散风险，因此需要制定相应的检疫和管理措施，降低未来扩散风险。

强化检疫与早期监测。松针鞘瘿蚊形态较小且不同发育阶段的形态差异较大，因此开发利用松针鞘瘿蚊分子快速鉴定技术，可为害虫的早期监测提供理论基础和参考[2]。

推进发生区综合治理。在韩国，树干注射杀虫剂取得了良好的效果，但是该方法所需成本较高[5]。寄生蜂 *Platygaster matsutama* 和 *Inostemma seoulis* 为具有广泛地理分布的优势种，已被用于松针鞘瘿蚊的生物防治[25]。

实施针对性营林管理。松针鞘瘿蚊具有脱瘿进入地面枯枝落叶层或表土层越冬的习性，因此在松针鞘瘿蚊越冬期，及时清理地被物，可以有效降低其成虫数量[3,24]。

深化基础研究与技术研发。加强对该物种在生物学、生态学等方面的研究，为该物种的管理防治提供理论依据。松针鞘瘿蚊危害隐蔽，掌握其脱瘿的时期对于制定精准防治措施和保证防治效果至关重要[3]。

3.5 研究需要说明的问题及前沿展望

尽管本研究评估了松针鞘瘿蚊在我国的潜在适生区和风险等级，但仍存在一定局限。首先，本研究主要使用分布点和气候变量建模，尚未纳入寄主树种如黑松的分布、土地利用方式和天敌调控作用等因素，而这些因素均可能影响该虫的定殖成功率和扩散速度。其次，风险分析中的部分指标依赖专家赋值，具有一定主观性。未来可在本研究基础上进一步结合黑松等寄主植物分布数据，引入交通运输网络和人为传播路径变量，并结合未来气候变化情景开展动态预测，构建多因子综合风险评估框架，从而为松针鞘瘿蚊的精准监测、分区预警和综合治理提供更有力的科学支撑。

4 结 论

本研究基于气候因子与物种分布数据，利用物种分布模型预测了松针鞘瘿蚊在我国历史气候条件下的适生区分布。结果表明，其潜在适生区主要分布于我国南部和东北部，总适生区面积占国土面积的36.70%。其中高度、中度和低度适生区面积分别为97.70万、93.10万和120.67万 km^2。风险评估显示该虫属于中度危险林业有害生物。尽管当前分布局限，但大面积的适生区与寄主松林为其扩散提供了条件，建议在潜在高风险区域加强早期监测与预防。

参考文献　References

[1] Uchida T, Inoue M. Eine neue *Thecodiplosis*-Art (Dip., Itonididae)[J]. *Insecta Matsumurana*, 1955, 19(1/2): 44-50

[2] 焦继鹏, 武海卫, 任利利, 陈汝敏, 骆有庆. 入侵种松针鞘瘿蚊在山东省黄岛区的发现与初步研究[J]. 应用昆虫学报, 2017, 54(6): 915-923
Jiao J P, Wu H W, Ren L L, Chen R M, Luo Y Q. Reports on the discovery and preliminary studies of the invasive species *Thecodiplosis japonensis* (Uchida & Inouye) in Huangdao area of Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2017, 54(6): 915-923 (in Chinese)

[3] 刘慇, 段春华, 亓玉昆, 刘焕秀, 康智, 陈汝敏, 武海卫. 松针鞘瘿蚊在黑松冠层的空间分布特征与脱瘿节律研究[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(3): 752-757
Liu Y, Duan C H, Qi Y K, Liu H X, Kang Z, Chen R M, Wu H W. Spatial distribution characteristics of *Thecodiplosis japonensis* in the canopy of *Pinus thunbergii* and the time rhythm of larvae disengaging from galls[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43(3): 752-757 (in Chinese)

[4] 朱蕊, 焦继鹏, 孙慧敏, 武海卫, 陶静. 松针鞘瘿蚊气味结合蛋白 TjapOBP1 的同源模建及活性气味分子的筛选[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(9): 77-86
Zhu R, Jiao J P, Sun H M, Wu H W, Tao J. Homology modeling of the odorant binding protein TjapOBP1 of *Thecodiplosis japonensis* and screening of active odorant molecules[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(9): 77-86 (in Chinese)

[5] Choi W I, Park Y S. Dispersal patterns of exotic forest pests in South Korea [J]. *Insect Science*, 2012, 19(5): 535-548

[6] Bragard C, Baptista P, Chatzivassiliou E, Di Serio F, Gonthier P, Jaques Miret J A, Justesen A F, Magnusson C S, Milonas P, Navas-Cortes J A, Parnell S, Potting R, Reignault P L, Stefani E, Thulke H H, Van der Werf W, Civera A V, Yuen J, Zappalà L, Grégoire J C, Malumphy C, Kertesz V, Maiorano A, MacLeod A. Pest categorisation of *Thecodiplosis japonensis* [J]. *EFSA Journal*, 2022, 20(2): e07088

[7] Soné K, Furuno T. Annual changes in the infestation by the pine needle gall midge, *Thecodiplosis japonensis* Uchida et Inouye (Diptera: Cecidomyiidae), in a pine stand[J]. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1982, 64(8): 301-306

[8] Choi W I, Ryoo M I, Chung Y J, Park Y S. Geographical variation in the population dynamics of *Thecodiplosis japonensis*: Causes and effects on spatial synchrony[J]. *Population Ecology*, 2011, 53(3): 429-439

[9] Choi W I, Jeon M J, Park Y S. Structural dynamics in the host-parasitoid system of the pine needle gall midge (*Thecodiplosis japonensis*) during invasion[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3610

[10] Qi Y K, Duan C H, Ren L L, Wu H W. Growth dynamics of galls and chemical defence response of *Pinus thunbergii* Parl. to the pine needle gall midge, *Thecodiplosis japonensis* Uchida & Inouye (Diptera: Cecidomyiidae) [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 12289

[11] Jiao J P, Ren L L, Chen R M, Tao J, Luo Y Q. A LAMP assay for the detection of *Thecodiplosis japonensis*, an alien gall midge species pest of pine trees[J]. *Insects*, 2022, 13(6): 540

[12] Zizka A, Silvestro D, Andermann T, Azevedo J, Duarte Ritter C, Edler D, Farooq H, Herdean A, Ariza M, Scharn R, Svantesson S, Wengström N, Zizka V, Antonelli A. CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10(5): 744-751

[13] Kindt R, Kindt M R. Package 'BiodiversityR'[J]. *Package for Community Ecology and Suitability Analysis*, 2019, 2: 11-12

[14] Naimi B, Araújo M B. Sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling[J]. *Ecography*, 2016, 39(4): 368-375

[15] Rausell-Moreno A, Galiana N, Naimi B, Araújo M B. Improving species distribution models by optimising background points: Impacts on current and future climate projections[J]. *Ecological Modelling*, 2025, 507: 111177

[16] Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo M B. BIOMOD-a platform for ensemble forecasting of species distributions [J]. *Ecography*, 2009, 32(3): 369-373

[17] 邹娅, 葛雪贞, 周玉婷, 李春红, 宗世祥. 长林小蠹在中国的适生区预测及风险分析[J]. 东北林业大学学报, 2026, 54(3): 109-114, 124
Zou Y, Ge X Z, Zhou Y T, Li C H, Zong S X. Suitable area prediction and risk assessment of *Hylurgus ligniperda* in China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2026, 54(3): 109-114, 124 (in Chinese)

[18] Maitner B S, Richards R L, Carlson B S, Drake J M, Merow C. Flexible methods for species distribution modeling with small samples[J]. *Ecography*, 2026, 2026(2): e08112

[19] Li D X, Li Z X, Wang X X, Wang L, Li Y H, Liu D G. Increasing risk of aphids spreading plant viruses in maize fields on both sides of China's Heihe-Tengchong line under climate change[J]. *Pest Management Science*, 2022, 78(7): 3061-3070

[20] LY/T 2588—2016. 林业有害生物风险分析准则[S]. 北京: 国家林业局, 2016
LY/T 2588—2016. Guidelines for the pest risk analysis(PRA)in forestry[S]. Beijing: State Forestry Administration, 2016 (in Chinese)

[21] Choi W I, Nam Y, Lee C Y, Choi B K, Shin Y J, Lim J H, Koh S H, Park Y S. Changes in major insect pests of pine forests in Korea over the last 50 years[J]. *Forests*, 2019, 10(8): 692

[22] 肖军, 雷蕾, 曾立雄, 李肇晨, 马成功, 肖文发. 不同经营模式对华北油松人工林碳储量的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2134-2142
Xiao J, Lei L, Zeng L X, Li Z C, Ma C G, Xiao W F. Effects of different management regimes on carbon stock of *Pinus tabulaeformis* plantations in Northern China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(11): 2134-2142 (in Chinese)

[23] 郑凤英, 王法明. 威海市区黑松林群落分析的研究[J]. 生态环境学报, 2006, 15(4): 787-790
Zheng F Y, Wang F M. Community analysis of the *Pinus thunbergii* forest at Weihai[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2006, 15(4): 787-790 (in Chinese)

[24] 陈汝敏, 薛月光, 张艳, 刘慇, 马安宝, 王静, 武海卫. 松针鞘瘿蚊自然耐寒性与过冷却点测定[J]. 山东林业科技, 2021, 51(5): 53-56
Chen R M, Xue Y G, Zhang Y, Liu Y, Ma A B, Wang J, Wu H W. Cold

hardiness and supercooling points of *Thecodiplosis japonensis*[J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2021, 51(5): 53-56 (in Chinese)

[25] Son Y, Chung Y J, Lee J H. Differential thermal biology may explain the coexistence of *Platygaster matsutama* and *Inostemma seoulis* (Hymenoptera: Platygastridae) attacking *Thecodiplosis japonensis* (Diptera: Cecidomyiidae)[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2012, 15(3): 465-471

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 邹娅,博士,Wilfrid Laurier University 博士后。主要研究方向为气候变化背景下有害生物适生区预测分析。主要从事林业有害生物监测与预警研究,研究领域聚焦于物种分布模型、气候变化对有害生物潜在分布的影响及入侵风险评估。



通讯作者简介: 宗世祥,男,博士,北京林业大学林学院森林保护学科教授、博士生导师、学科负责人,沈阳农业大学林学学科森林保护方向硕士生导师。兼任中国林学会森林昆虫分会副主任委员、中国昆虫学会林业昆虫专业委员会副主任、林木有害生物防控北京市重点实验室主任、国家林草局“林业有害生物防控创新团队”负责人、国家林草局“林业害虫防治创新联盟”常务副理事长、国家林草局“林业生物灾害监测预警科技创新联盟”副理事长、北京市林业有害生物防控协会监事、东北林草危险性有害生物防控国家林业和草原局重点实验室学术委员会委员,《应用昆虫学报》《植物保护》《西部林业科学》《中国森林昆虫》等期刊编委。主要研究方向为林木钻蛀性害虫生态调控技术。主持“十三五”“十四五”国家重点研发课题、国家自然科学基金、农业科技成果转化、国家林业和草原局行业标准制定等多个项目。获国家科学技术进步二等奖、梁希林业科学技术一等奖等多个奖项,以第1完成人发布林业行业标准3项,以第一发明人获授权国家发明专利5项,实用新型专利2项。以第一作者或责任作者在国内外发表学术论文130余篇,其中SCI源论文74篇。