

基于生态位因子模型的湖北省松材线虫病风险评估

沈 鹏, 李功权

(长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 【目的】当前湖北省松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 疫情形势严峻。通过研究湖北省松材线虫病的入侵风险, 分析松材线虫病在湖北省的危害程度, 为当前疫情的防治工作提供建议和参考。【方法】结合“3S”技术, 应用生态位因子模型 (ENFA), 选取影响松材线虫定殖和传播的 4 类影响因素 (气候、植被、地形、人类活动), 对松材线虫病在湖北的入侵风险进行了预测和评价。【结果】湖北省松材线虫病高风险区面积 38 884.62 km², 占湖北省总面积的 20.92%, 高风险区主要集中于海拔较低、人类活动频繁的中部和东部地区, 中风险区面积 66 501.84 km², 占总面积的 35.77%, 低风险区面积 80 513.54 km², 占总面积的 43.31%, 中低风险地区主要分布在林地稀少的江汉平原和西部的高海拔山地。松材线虫偏好分布在温度较高, 降水丰富, 海拔较低, 离人类居住点较近且人类活动频繁的针叶林地区。通过交叉验证 (cross-validation) 对模型的预测进行检验, 得到 P/E 曲线, 曲线呈单调递增且 Boyce 指数很高, 说明模型精度很高。【结论】ENFA 模型能很好模拟松材线虫病的风险区域, 模型结果可为湖北省各县市的松材线虫病防治决策提供参考。图 2 表 3 参 25

关键词: 森林保护学; 松材线虫; 生态位因子模型; 风险评估

中图分类号: S763.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2021)03-0560-07

Risk assessment of *Bursaphelenchus xylophilus* in Hubei Province based on ecological niche factor analysis model

SHEN Peng, LI Gongquan

(School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: [Objective] The epidemic situation of *Bursaphelenchus xylophilus* in Hubei Province is severe. The objective of this study is to investigate the invasion risk and the damage degree of *B. xylophilus* disease in Hubei Province, so as to provide suggestions and reference for current epidemic prevention and control. [Method] Combined with 3S technology, the ecological niche factor analysis (ENFA) model was used, and 4 factors affecting the colonization and spread of *B. xylophilus* (climate, vegetation, terrain, human disturbance) were selected to predict and evaluate the invasion risk of the disease. [Result] The high risk area of *B. xylophilus* disease in Hubei Province covered an area of 38 884.62 km², accounting for 20.92% of the total area of Hubei Province, mainly concentrated in the central and eastern regions with low altitude and frequent human activities. The moderate risk area was 66 501.84 km², representing 35.77% of the total area. The low risk area was 80 513.54 km², representing 43.31% of the total area. These areas were mainly distributed in Jiangnan Plain and high-altitude mountains in the west. *B. xylophilus* preferred to be distributed in coniferous forest areas with high temperature, abundant precipitation, low altitude, close to human settlements and frequent human activities. Through cross-validation to test the prediction of the model, the P/E curve was obtained. The curve

收稿日期: 2020-06-03; 修回日期: 2021-03-08

作者简介: 沈鹏 (ORCID: 0000-0003-2250-7155), 从事地理信息系统应用与开发研究。E-mail: 614650173@qq.com。通信作者: 李功权 (ORCID: 0000-0003-2933-0110), 副教授, 博士, 从事时空大数据分析 & 挖掘工作等研究。E-mail: 195648169@qq.com

(<http://www.gscloud.cn>)。③人类活动干扰数据。包括道路数据(2015年)、土地利用/覆盖变化数据(2015年)、人口分布密度数据(2015年),均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。④植被因素。主要包括植被覆盖类型(2015年)和归一化植被指数(NDVI)数据(2017年),来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

1.2 生态位因子分析模型(ENFA)

ENFA模型是研究物种分布的多变量分析方法^[16]。该模型采用主成分分析方法,利用物种分布点的数据和生态地理变量(EGV)数据,将物种的生态位和生态幅度与整个研究区的环境因子平均状态和标准差相比较,从EGV中提取主要信息组合为互不相关的特征矩阵,特征矩阵和特征向量用来生成生境适宜性图^[17]。物种的分布与EVG之间的相互关系通过计算边际性、特殊性和耐受性3个指标得到^[18]。

边际性系数(M)为物种分布区EGV平均值和整个研究区内EGV平均值的差异。 $M > 0$ 时,表明该物种偏好EGV平均水平以上的环境; $M < 0$ 时,表明物种偏好EGV平均水平以下的环境。 M 的绝对值越大,物种对EGV的偏好程度越高,物种的分布也越不随机。

$$M = \frac{|m_B - m_G|}{1.96\sigma_G} \quad (1)$$

式(1)中: m_B 表示物种分布区内某个EGV的平均值; m_G 表示整个研究区内某个EGV的平均值, σ_G 表示其标准差^[18]。

特殊性系数(S)为物种适宜分布区EGV标准差与整个研究区内EGV标准差的比率,是物种选择EGV可用范围的度量指标。

$$S = \frac{\sigma_G}{\sigma_B} \quad (2)$$

式(2)中: σ_B 表示物种分布区内某个EGV的标准差。

耐受性系数(T)为 S 的倒数, T 取值为0~1, T 越小,表明物种在研究区内的特殊化程度越高,对环境因子有一定的选择性,其适生性受到一定环境条件的限制。 T 越大,则表明物种对环境的选择性不高,在研究区内分布广泛^[18]。在本研究中, T 越大,说明松材线虫病的生存和传播对各种环境因子的选择不高,其分布也越随机。

$$T = \frac{\sigma_B}{\sigma_G} = \frac{1}{S} \quad (3)$$

ENFA模型在Biomapper 4.0软件中运行,通过计算特征矩阵提取累积贡献率生成生境适宜图,通过生境适宜性指数(I_{HS})划分生境适宜图的等级, I_{HS} 为0~100,取值越大代表生境适宜性越高。模型通过Jake-Knife交叉验证(cross-validation)评价模型的精度,生成P/E(predicted/expected ratio)曲线和Boyce指数判断模型,Boyce指数为平均值和标准差,可检验模型的精度,平均值越大,标准差越小,模型的预测精度就越高^[18]。

1.3 ENFA模型指标体系

松材线虫的定殖和传播是一个复杂的病害系统。温度、降水量、日照等气候条件影响松材线虫及其寄主松墨天牛的生存和定殖^[19];林分状况、树龄、树种的丰富度、森林郁闭度等因子影响着媒介昆虫松墨天牛的种群密度^[20];海拔、坡度和坡向等地形因子通过影响气候和土壤从而间接影响植物的生长和分布;松墨天牛的自然扩散能力不强^[2],因此松材线虫主要借助人传播,人类活动直接影响松材线虫病扩散的速度和规模。本研究从气候、植被、地形、人类活动干扰等4个影响因素中选取15个EGV指标,用于松材线虫病潜在风险区的评估(表1)。

1.4 数据处理

所有生态地理变量数据均预先在ArcGIS 10.2中进行处理。气候数据进行克里金(Kriging)插值处理,地形数据从DEM提取,植被和人类活动干扰数据需转换为距离数据或者频率数据^[19],植被覆盖度利用像元二分模型计算NDVI得到^[21]。所有数据转换为250 m×250 m空间分辨率和相同的投影,并将ArcGIS栅格数据转换为ENFA所能使用的栅格数据格式,然后利用ENFA对数据进行Box-Cox标准化后进行分析。

表 1 ENFA 模型分析的生态地理变量

Table 1 Ecogeographical variables analyzed by ENFA model			
因素类型	生态地理变量(EGV)	因素类型	生态地理变量(EGV)
气候因素	年平均气温(℃)	人类干扰因素	到居民点距离(m)
	年平均降水量(mm)		到公路距离(m)
	5-10月平均气温(℃)		到铁路距离(m)
	5-10月平均降水量(mm)		到农田距离(m)
地形因素	海拔(m)		人口分布密度(人·km ⁻²)
	坡度(°)	植被因素	到针叶林距离(m)
	坡向		植被覆盖度
	到河流距离(m)		

2 结果与分析

2.1 ENFA 模型结果

通过 ENFA 模型得到边际性系数 $M=1.639$, $M>1$, 说明松材线虫对各种环境条件的选择不是随机的。特殊性系数 $S=8.822$, 耐受性系数 $T=0.113$, S 较大, T 小, 说明松材线虫的定殖和传播是受特定环境条件影响, 在环境条件适宜的情况下入侵风险较高。

从表 2 可知: 第 1 列为边际因子, 特殊性解释比例为 98.00%, 其他为特殊因子, 包括特异因子 1 和特异因子 2, 解释比例分别为 1.11%、0.49%, 3 个因子的累积贡献率达 99.60%, 即解释了 100% 的边际性和 99.60% 的特殊性, 由这 3 个因子生成最终的风险等级图。用交叉验证对模型的预测进行检验, 得到呈单调递增趋势的 P/E 曲线, Boyce 平均值为 0.90, 标准差为 0.20, 说明模型预测能力很好。根据 P/E 曲线将湖北省松材线虫病风险区分为 3 个等级: 低风险区 ($0<I_{HS}\leq 33$)、中风险区 ($33<I_{HS}\leq 66$)、高风险区 ($66<I_{HS}\leq 100$)(图 2)。

2.2 松材线虫分布与环境因子的关系

从边际因子得分可以看出: 松材线虫喜好分布在年均气温较高 ($>16\text{ }^{\circ}\text{C}$), 年降水量丰富 ($>1\,165\text{ mm}$), 5-10 月气温较高 (平均气温 $>23.77\text{ }^{\circ}\text{C}$), 5-10 月降水量较多 (平均降水量 $>151.94\text{ mm}$) 的地区。在地形上趋向于低海拔 (平均海拔 425 m)、坡度平缓 (平均坡度 7°) 并位于西坡和南坡的地区。在各种人类活动影响下, 松材线虫选择分布在距离人类居民点 (平均距离 $9\,077\text{ m}$) 和铁路 (平均距离 $18\,356.20\text{ m}$) 较近, 人口密度较大 (平均 $253.68\text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$), 农田 (平均距离 789.52 m) 比较密集的地区, 远离公路 (平均距离 $2\,304.65\text{ m}$) 和河流 (平均距离 $8\,762.43\text{ m}$)。在植被因素的选择上, 松材线虫病主要发生在植被覆盖度较低 (平均覆盖度 0.42) 的针叶林 (平均距离 $9\,133\text{ m}$) 内。

表 2 ENFA 模型的因子得分

Table 2 Factor scores of the ENFA model			
生态地理变量	边际因子	特异因子1	特异因子2
年平均气温	0.397	-0.112	-0.702
年均降水量	0.398	-0.405	-0.099
5-10月平均气温	0.399	0.224	0.562
5-10月平均降水量	0.390	0.293	0.290
海拔	-0.013	-0.481	0.111
坡度	0.039	0.032	0.027
坡向	0.364	0.110	-0.008
到河流距离	0.196	-0.069	0.004
到居民点距离	0.035	-0.142	0.048
到公路距离	0.255	0.314	0.144
到铁路距离	-0.010	-0.423	-0.076
到农田距离	0.084	0.030	-0.040
人口分布密度	0.242	-0.079	0.005
植被覆盖度	0.007	-0.034	-0.065
到针叶林距离	0.048	-0.071	-0.119

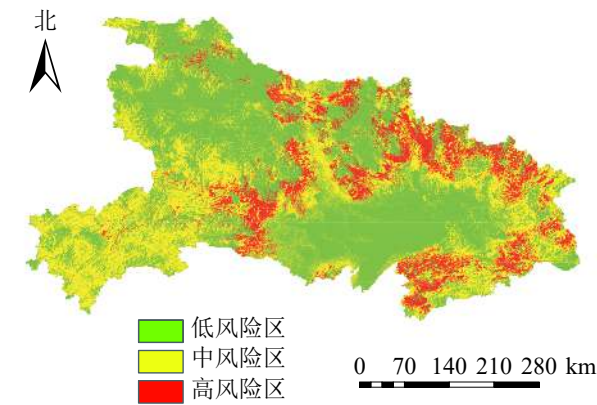


图 2 湖北省松材线虫入侵风险等级分布示意图

Figure 2 Risk level map of *B. xylophilus* in Hubei Province

2.3 松材线虫的潜在风险区分析

利用 ArcGIS 10.2 对湖北省松材线虫的入侵风险等级区域进行计算,发现湖北省松材线虫病高风险区面积 38 884.62 km², 占湖北省总面积的 20.92%, 中风险区面积 66 501.84 km², 占总面积的 35.77%, 低风险区面积 80 513.54 km², 占总面积的 43.31%(表 3)。

表 3 湖北省各地区的潜在风险区面积

Table 3 Areas of potential risk areas in various regions of Hubei Province

地级市	低风险区		中风险区		高风险区		总面积/km ²	比例/%
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%		
十堰	17 070.33	71.48	5 892.89	24.67	919.31	3.85	23 882.53	100.00
襄樊	11 992.35	60.30	4 283.28	21.54	3 612.35	18.16	19 887.99	100.00
随州	4 747.96	49.24	2 037.07	21.13	2 857.88	29.64	9 642.92	100.00
孝感	2 288.41	25.79	2 315.58	26.10	4 268.78	48.11	8 872.76	100.00
黄冈	4 652.81	26.90	7 983.51	46.15	4 661.60	26.95	17 297.91	100.00
武汉	5 939.94	69.66	2 150.60	25.22	436.07	5.11	8 526.60	100.00
鄂州	1 307.54	83.41	259.74	16.57	0.26	0.02	1 567.54	100.00
黄石	1 385.89	30.76	1 810.41	40.18	1 309.84	29.07	4 506.14	100.00
咸宁	2 125.73	22.29	4 117.85	43.17	3 294.34	34.54	9 537.92	100.00
荆州	973.19	7.01	3 197.68	23.03	9 714.51	69.96	13 885.38	100.00
宜昌	7 350.90	34.81	9 922.73	46.99	3 843.48	18.20	21 117.11	100.00
荆门	4 311.63	35.02	4 600.77	37.36	3 400.92	27.62	12 313.32	100.00
恩施	7 129.55	30.09	16 175.96	68.26	391.64	1.65	23 697.15	100.00
神农架	2 244.18	69.26	996.16	30.74	0	0	3 240.34	100.00
仙桃	2 444.00	97.86	53.48	2.14	0	0	2 497.48	100.00
潜江	1 883.91	94.79	103.55	5.21	0	0	1 987.46	100.00
天门	1 826.68	70.23	600.58	23.09	173.64	6.68	2 600.90	100.00
总面积	80 513.54	43.31	66 501.84	35.77	38 884.62	20.92	185 900.00	100.00

湖北省松材线虫病入侵风险较高的地区主要有:荆门市东部和中西部大部分地区;荆州市的西南部和南部地区;宜昌市的东部和中部地区;天门市的北部地区;襄樊市的东北部和中部大部分地区;孝感市的北部大部分地区;黄冈市的东南部和北部的大部分地区;黄石市的东部和中部大部分地区;咸宁市的大部分地区;十堰市的中部地区;恩施市的中部和东北部的少部分地区;随州市的东部和中部地区;武汉市的西北部。这些地区基本都是海拔较低的山地和平原地区,森林覆盖率高,人类活动频繁,松材线虫入侵的风险也相对较高。

中风险区和低风险区主要分布在江汉平原的大部分地区和西部的高海拔山地,主要包括鄂州市、仙桃市、潜江市、天门市、武汉市的大部分地区、荆州市的东部和中部大部分地区、黄冈市东南部的小部分地区、宜昌市的南部和西部大部分地区、恩施州的大部分地区、襄樊市的西部大部分地区 and 十堰市的西南部大部分地区以及与之接壤的神农架林区。江汉平原地势平坦,人口密集,但森林很少,大部分低风险区分布于此;湖北省西部大部分地区都是海拔较高的山地,特别是神农架林区的平均海拔就有 1 700 m,一部分低风险区就位于这些海拔很高的地区;西部地区人类活动较少,但一些低海拔地区仍然有森林覆盖,因此有大部分中度风险区分布于此。

3 结论与讨论

较前人研究^[5-6,22],本研究在模型指标因子的选择上更加全面,不局限于气候因素,因此模型结果可以更好地了解松材线虫病在湖北省的传播规律。模型通过交叉验证,Boyce 平均值为 0.90,标准差为 0.20,很好地模拟了湖北省松材线虫病的潜在风险区域。

本研究表明:年均气温、年降水量、夏季气温及降水均是影响松材线虫定殖的主要气候因素。湖北

省适宜的气候给松材线虫及其寄主松墨天牛提供了良好的生存环境。地形因子的边际性系数表明: 松材线虫喜欢分布于海拔较低, 坡度平缓, 并位于西坡和南坡的地区, 因此松材线虫病普遍发生于海拔低于 700 m 的地区。植被因子的边际性系数表明: 松材线虫偏好于植被覆盖度较低的针叶林。人口密度、居民点、铁路和农田是影响松材线虫病在湖北省内传播的几个主要人为因素。

根据模型预测结果, 湖北省松材线虫病入侵风险较高的区域广泛分布于湖北省的 12 个地级市, 部分地区已经暴发了比较严重的松材线虫病, 这些区域都是海拔较低的山地或者平原, 气候适宜, 人类活动频繁, 松材线虫入侵的风险特别高。因此在风险较高的地区必须加强松材线虫病的防范和治理力度。首先, 必须加大高风险区内针叶林的疫情监测力度, 在夏季运用遥感和无人机监测等相关技术, 实现松材线虫病疫情的大面积监测; 其次, 针对已经感染松材线虫病的林区, 可采取目前较为成熟的生物防治、引诱剂和化学防治来降低媒介昆虫的虫口数量, 从而减小松材线虫病疫区的范围; 松材线虫病防治最重要的环节就是染病松木的处理, 松材线虫病疫区必须彻底清理染病濒死和枯死的松木, 在受灾程度严重的地区则应建立疫木集中处理场地, 对砍伐的疫木进行集中处理^[23]; 同时, 政府和相关部门也要做好与松材线虫病害相关的宣传和管理工作的, 严格控制松木及其加工制品的流通, 防止松材线虫借助松木制品再次扩散到其他地区^[24]。

中风险区和高风险区相邻, 大部分针叶林也都分布在中风险地区, 因此在这些地区主要做好松材线虫病的监测和检疫工作, 对于新发病的地区要及时处理疫木, 砍伐的疫木尽快就地焚烧或粉碎处理。

低风险区主要分布在江汉平原中部和西北部的山区和神农架林区。江汉平原中部地势平缓, 气候适宜, 但是松材线虫的寄主植物松树却很少, 西北部山区和神农架林区海拔较高, 大部分松林都分布于人迹罕至的地区, 因此感染松材线虫的风险相对较低。但随着城镇的扩张, 人类活动的加剧, 气候变暖和松材线虫的遗传多样性提高^[25], 其感染风险也会相对提高, 因此也要做好松材线虫病的检疫工作, 并对松林进行定期巡查, 阻止松材线虫的进一步蔓延。

4 参考文献

- [1] 冯益明, 张海军, 张星耀, 等. 松材线虫病在我国适生性分布的定量估计[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 65–71.
FENG Yiming, ZHANG Haijun, ZHANG Xingyao, et al. Quantification of suitability distribution region of *Bursaphelenchus xylophilus* in China [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, 45(2): 65–71.
- [2] 宁眺, 方宇凌, 汤坚, 等. 松材线虫及其关键传媒墨天牛的研究进展[J]. 昆虫知识, 2004, 41(2): 97–104.
NING Tiao, FANG Yuling, TANG Jian, et al. Advances in research on *Bursaphelenchus xylophilus* and its key vector *Monochamus* spp. [J]. *Chin Bull Entomol*, 2004, 41(2): 97–104.
- [3] 李兰英. 浙江省松材线虫病环境影响经济评价与治理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
LI Lanying. *Study on the Environmental Impact Eco-assessment and Management of Pine Wood Nematode in Zhejiang Province*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [4] 湖北省林业局. 湖北省林业局公告 (2020 年第 1 号) [EB/OL]. 2020-04-30[2021-03-07]. [http: //lyj.hubei.gov.cn/bmdt/tzgg_2020/index_3.shtml](http://lyj.hubei.gov.cn/bmdt/tzgg_2020/index_3.shtml).
- [5] 潘红伟. 松材线虫 (*Bursaphelenchus xylophilus*) 在我国的潜在分布区研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
PAN Hongwei. *Study on the Potential Geographic Distribution of Bursaphelenchus xylophilus in China*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [6] 韩阳阳, 王焱, 项杨, 等. 基于 Maxent 生态位模型的松材线虫在中国的适生区预测分析[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2015, 39(1): 6–10.
HAN Yangyang, WANG Yan, XIANG Yang, et al. Prediction of potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in China based on Maxent ecological niche model [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, 39(1): 6–10.
- [7] HUTCHINSON G E. Concluding remarks, Coldspring Harbor Symposium [J]. *Quant Biol*, 1957, 22: 415–427.
- [8] 王学志, 徐卫华, 欧阳志云, 等. 生态位因子分析在大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 生境评价中的应用[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 821–828.
WANG Xuezhi, XU Weihua, OUYANG Zhiyun, et al. The application of ecological-niche factor analysis in giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) habitat assessment [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(2): 821–828.
- [9] 刘鹏, 代娟, 曹大潘, 等. 普洱市亚洲象栖息地适宜度评价[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 4164–4170.

- LIU Peng, DAI Juan, CAO Dapan, *et al.* Habitat suitability assessment for Asian elephant in Pu'er prefecture in the Yunnan Province of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(13): 4164 – 4170.
- [10] 李雯. 西双版纳人象冲突风险评估研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2017.
LI Wen. *Research on Risk Assessment of Human Elephant Conflict in Xishuangbanna* [D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2017.
- [11] 杨瑞, 张雅林, 冯纪年. 利用 ENFA 生态位模型分析玉带凤蝶和箭环蝶异地放飞的适生性[J]. 昆虫学报, 2008, **51**(3): 290 – 297.
YANG Rui, ZHANG Yalin, FENG Jinian. Habitat suitability analysis in live releasing of two butterflies *Papilio polytes* Linnaeus and *Stichophthalma howqua*(Westwood) in China using ENFA [J]. *Acta Entomol Sin*, 2008, **51**(3): 290 – 297.
- [12] ZANIEWSKI A E, LEHMANN A, OVERTON J M. Predicting species spatial distributions using presence-only data: a case study of native New Zealand ferns [J]. *Ecol Model*, 2002, **157**(2/3): 261 – 280.
- [13] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 等. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测[J]. 生态学报, 2011, **31**(5): 1221 – 1229.
LUO Chong, XU Weihua, ZHOU Zhixiang, *et al.* Habitat prediction of *Moschus berezovskii* in Qinling mountains based on niche model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(5): 1221 – 1229.
- [14] BRAUNISCH V, SUCHANT R. A model for evaluating the habitat potential of a landscape for capercaillie *Tetrao urogallus*: a tool for conservation planning [J]. *Wildl Biol*, 2007, **13**(suppl): 21 – 33.
- [15] 国家林业与草原局. 国家林业与草原局公告 (2020 年第 4 号)[EB/OL]. 2020-03-16[2021-03-07]. <http://www.forestry.gov.cn/Common/index/3457.html>.
- [16] GÁLLEGO D, CÁNOVAS F, ESTEVE M A, *et al.* Descriptive biogeography of *Tomicus*(Coleoptera: Scolytidae) species in Spain [J]. *J Biogeogr*, 2004, **31**(12): 2011 – 2024.
- [17] HIRZEL A H, LE LAY G, HELFER V, *et al.* Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences [J]. *Ecol Model*, 2006, **199**: 142 – 152.
- [18] HIRZEL A H, HAUSSE J, CHESSE L. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data [J]. *Ecology*, 2002, **83**(7): 2027 – 2036.
- [19] 赵宇翔, 董燕, 徐正会. 云南省松墨天牛生物学特性和地理分布研究[J]. 中国森林病虫, 2004, **23**(5): 13 – 16.
ZHAO Yuxiang, DONG Yan, XU Zhenghui. Biological characteristics and geographical distribution of *Monochamus alternatus* in Yunnan Province [J]. *Chin For Pests*, 2004, **23**(5): 13 – 16.
- [20] 展茂魁. 马尾松蛀干害虫种群动态与松材线虫病的关系及松褐天牛天敌研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
ZHAN Maokui. *Studies on Population Dynamics of Woodborers and the Relationship with Pine Disease on Pinus massoniana, and Natural Enemies of Monochamus alternatus* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [21] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, **26**(4): 154 – 158.
LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing [J]. *Resour Sci*, 2004, **26**(4): 154 – 158.
- [22] 魏淑婷, 李涛, 林玉成. 基于 MaxEnt 模型预测四川省松材线虫的潜在适生区[J]. 四川动物, 2019, **38**(1): 37 – 46.
WEI Shuting, LI Tao, LIN Yucheng. Prediction of the potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in Sichuan Province using MaxEnt model [J]. *Sichuan J Zool*, 2019, **38**(1): 37 – 46.
- [23] 张华锋, 陈思宇, 刘刚, 等. 松材线虫病疫木卫生伐对马尾松纯林林分结构的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(4): 745 – 751.
ZHANG Huafeng, CHEN Siyu, LIU Gang, *et al.* Effects of sanitation cutting pine wilt diseased trees on the stand structure of pure *Pinus massoniana* plantation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(4): 745 – 751.
- [24] 叶建仁. 松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析[J]. 林业科学, 2019, **55**(9): 1 – 10.
YE Jianren. Epidemic status of pine wilt disease in china and its prevention and control techniques and counter measures [J]. *Sci Silv Sin*, 2019, **55**(9): 1 – 10.
- [25] 黄麟, 叶建仁, 刘雪莲. 松材线虫病病原种群分化研究现状[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2009, **33**(4): 135 – 139.
HUANG Lin, YE Jianren, LIU Xuelian. Advance in population differentiation of *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2009, **33**(4): 135 – 139.