

网络出版时间:2018-01-10 16:16

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.04.012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180110.1614.024.html>

# 雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原适生区的分布

黄晓君<sup>1,2a,2b</sup>, 颀耀文<sup>1</sup>, 包玉海<sup>2a,2c</sup>, Altanchimeg<sup>3</sup>

(1 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2 内蒙古师范大学 a 地理科学学院, b 自然灾害防治研究所,

c 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022; 3 蒙古国科学院 生物研究所, 蒙古国 乌兰巴托)

**【摘要】**【目的】为防控蒙古国雅氏落叶松尺蠖(*Eramis jacobsoni* Djak)扩散, 预测该虫在蒙古高原的潜在适生区分布。【方法】选取影响雅氏落叶松尺蠖适生性的 6 个气象指标, 基于害虫分布点和寄主分布数据, 利用 Maxent 模型和气候相似性分析方法, 结合 GIS 空间分析方法预测害虫适生区, 并将这 2 种方法相结合预测害虫适生区细化分布。利用 Kappa 系数对 3 种方法的预测精度进行评定。【结果】Maxent 模型、气候相似性分析法以及 2 种方法综合预测的适生区总面积分别为 9.11, 10.34 和 7.56 万 km<sup>2</sup>; 三者预测的适生区总体分布基本一致, 包括我国内蒙古呼伦贝尔、兴安盟及锡林郭勒和蒙古国库苏古尔、东方、色楞格、布尔干、扎布汗、肯特、后杭爱、中央、鄂尔浑、乌兰巴托及前杭爱等地区, 其中极高和高适生区主要分布在蒙古国布尔干、后杭爱及库苏古尔; 三者预测的 Kappa 系数分别为 0.778, 0.733 和 0.813, 表明 2 种方法综合预测精度优于 Maxent 模型和气候相似性分析法。【结论】雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区分布较广, 应趁早采取防范措施保障蒙古高原森林生态系统安全; 2 种方法综合预测精度较高。

**【关键词】** 雅氏落叶松尺蠖; 适生区预测; GIS 技术; Maxent 生态位模型; 气候相似性

**【中图分类号】** S722.5

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2018)04-0098-09

## Suitable distribution areas of Jas's larch inchworm in Mongolia Plateau

HUANG Xiaojun<sup>1,2a,2b</sup>, XIE Yaowen<sup>1</sup>, BAO Yuhai<sup>2a,2c</sup>, Altanchimeg<sup>3</sup>

(1 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2 a College of Geographical Science, b Institute of Natural Disaster Prevention and Control, c Key Laboratory of Remote Sensing & Geography

Information System, Inner Mongolia Normal University, Huhhot, Inner Mongolia 010022, China;

3 Institute of Biology, Mongolian Academy of Sciences, Ulan Bator, Mongolia)

**Abstract:** 【Objective】The potential suitable distribution area of Jas's larch inchworm in Mongolian Plateau was predicted to prevent the expansion. 【Method】Based on the distribution sites of pest and host distributed data, Maxent ecological niche model and climate similarity analysis were used in combination with GIS to predict suitable areas with 6 meteorological factors. The two methods were also combined to get a more detailed suitable distribution area. The prediction accuracy of the three methods was evaluated using the Kappa coefficient. 【Result】The predicted total suitable areas by Maxent model, climate similarity analysis and combined method were  $9.11 \times 10^4$ ,  $10.34 \times 10^4$  and  $7.56 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, respectively. The predicted distribution of suitable area was basically the same, including Hulun Buir, Hinggan League and Xilin Gol of Inner Mongolia, as well as Khovsgol, Dornod, Selenge, Bulgan, Zavhan, Kentiy, Arhangay, Tov, Orhon, Ulaanbaatar and Ovorkhangay in Mongolia, of which the extremely high and high suitable areas were mainly

**【收稿日期】** 2017-01-21

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(61631011, 41471163); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2016-242); 内蒙古科技计划项目“中蒙俄跨境灾害监测预警与多语言信息共享研究”

**【作者简介】** 黄晓君(1984—), 男, 内蒙古兴安盟人, 讲师, 在读博士, 主要从事自然灾害监测与预警研究。E-mail: hxj3s@qq.com

distributed in Bulgan, Arhangay and Khovsgol. The Kappa coefficients of the three prediction methods were 0.778, 0.733 and 0.813, respectively. The combined method was the best. 【Conclusion】 The Jas's larch inchworm was widely distributed in Mongolian Plateau, and measures should be taken as early as possible to ensure the safety of forest ecosystem. The comprehensive method had high precision.

**Key words:** *Erannis jacobsoni* Djak; suitable area prediction; GIS technology; Maxent ecological niche model; climate similarity

雅氏落叶松尺蠖(*Erannis jacobsoni* Djak)是严重危害森林的害虫,其暴食落叶松针叶与嫩枝,使整株树死亡,该虫一旦爆发将带来生态灾难和巨大的经济损失。在过去50年里蒙古国落叶松林遭受了雅氏落叶松尺蠖的严重侵害,如:1959—1960、1969—1972年害虫在蒙古国杭爱山落叶松林成灾,到1977年蔓延到库布苏尔省、杭爱省和肯特省,导致大面积落叶松林被破坏;1988—1989年害虫扩散到蒙古国中央省。近年来蒙古国落叶松林仍遭受雅氏落叶松尺蠖的严重危害。据蒙古国林业部门统计数据,2013—2015年遭受雅氏落叶松尺蠖的森林面积不断上升,由7 050 hm<sup>2</sup>上升至38 722 hm<sup>2</sup>,成为破坏森林生态系统最为严重的害虫<sup>[1]</sup>。蒙古国雅氏落叶松尺蠖灾害不断往东扩展,将会威胁我国北方森林生态系统的的核心,因此尽早掌握雅氏落叶松尺蠖适生区分布对我国北方森林生态安全具有重要意义。

近年来,世界各地对生态安全的高度重视推动了植物病虫害相关研究的发展,如植物病害和害虫适生区预测成为研究热点之一,预测方法主要包括气候相似性分析、生态位模型和地理信息系统(GIS)技术等。病虫害发生与气候条件有密切的关系,通过气候相似性分析可预测病虫害的适生区分布<sup>[2-5]</sup>。GIS具有强大的空间分析能力,在病虫害适生区分布的研究中得到了应用<sup>[5-6]</sup>。目前采用生态位模型预测害虫适生区分布最为常见,如利用CLIMEX、BIOCLIM、DYMEX、DIVA-GIS、GARP、Maxent等生态位模型预测病虫害适生区分布<sup>[7-16]</sup>,其中Maxent(Maximum Entropy)为较新的生态位模型,是美国普林斯顿大学Phillips等<sup>[17]</sup>基于最大熵理论(一个物种在没有约束的情况下,会尽最大可能扩散蔓延,接近均匀分布),利用JAVA语言编写的预测物种适生区分布的模型。与其他模型相比,Maxent模型具有运行速度快、操作简单、预测较准确等优势<sup>[18]</sup>,已成为害虫适生区预测的首选模型<sup>[19-22]</sup>。目前,植物病虫害适生区分布研究多采用

单一方法预测,而将几个方法结合起来进行预测的研究极为少见。基于此,笔者利用Maxent生态位模型和气候相似性分析方法,结合GIS空间分析,分别模拟雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区,并综合2种预测结果获得害虫适生区细化分布,旨在为防控该虫扩散提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据源

本研究所采用数据包括雅氏落叶松尺蠖分布点数据、气象数据及害虫寄主数据等。害虫分布点数据是2010年以来蒙古国科学院生物研究所和生态研究所在杭爱山、肯特山林区开展野外调查获得的。气象数据是从全球气候数据平台(WorldClim-Global Climate Data, <http://www.worldclim.org/>)获得的,是1950—2000年气象站观测数据经过插值处理而得,包括19个气象指标栅格数据(表1),空间分辨率为30"。害虫寄主数据由2010年蒙古国落叶松分布栅格数据和我国内蒙古植被类型栅格数据组成,前者由蒙古国科学院生物研究所提供,后者从我国科技基础条件平台获取。对以上数据进行预处理,将害虫分布点数据整理为以害虫名称和分布点坐标等字段组成的CSV格式数据;将气象数据格式由GRID转换为ASCII;由内蒙古植被类型栅格数据提取落叶松信息,并与蒙古国落叶松分布栅格数据进行镶嵌获得蒙古高原落叶松分布栅格数据集。

### 1.2 研究方法

影响害虫适生区分布的主要因素有害虫的生物学特性和环境气候条件,其中环境气候条件是制约害虫适生区分布的最基本因素。很多研究显示,害虫适生区分布与气候有密切联系,借助害虫已知分布空间的气象指标预测其适生区仍是最有效的方法。因此,本研究基于气象指标,建立Maxent生态位模型,分析气候相似性,预测雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区分布。

表 1 气象指标说明

Table 1 Descriptions of meteorological indexes

气象指标 Meteorological index	说明 Explanation	气象指标 Meteorological index	说明 Explanation
Bio1	年平均温度 Annual mean temperature	Bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter
Bio2	昼夜温差均值 Mean diurnal range	Bio12	年降水量 Annual precipitation
Bio3	Bio2/Bio7	Bio13	最湿月份降水量 Precipitation of wettest month
Bio4	温度变化方差 Temperature seasonality(standard deviation×100)	Bio14	最干月份降水量 Precipitation of driest month
Bio5	最热月份最高温度 Max temperature of warmest month	Bio15	降水量变化方差 Precipitation seasonality
Bio6	最冷月份最低温度 Min temperature of coldest month	Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter
Bio7	Bio5-Bio6	Bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter
Bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter	Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter
Bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter	Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter
Bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter		

1.2.1 Maxent 生态位模型 (1)预测原理。害虫的可能分布有很多种,当可能分布达到最大熵时,当前分布满足所有的限定条件(已知害虫分布),并获得最接近的可能分布。设  $X$  为研究区,  $x$  为  $X$  分成的每个网格点,  $\pi(x)$  为点  $x$  的可能分布概率,  $\hat{\pi}$  为最接近的可能分布,则  $\hat{\pi}$  的熵  $H(\hat{\pi})$  为:

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_x \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x).$$

满足最大熵条件的概率( $P$ )分布为:

$$P = \arg \max_{x \in X} H(\hat{\pi}).$$

最接近的可能分布概率值记为害虫适生指数(FI),取值 0~1,FI 越大,害虫在该地区的适生性越好。

(2)预测过程。重要气象指标的选取:用 Maxent 模型预测时,气象指标的选择尤其重要,直接影响预测的精度。雅氏落叶松尺蠖的生长与温度、降水量有密切关系,笔者从有关温度和降水量的 WorldClim 数据中选择重要气象指标(表 1),选取方法是将害虫分布点和 19 个气象指标数据导入 Maxent 软件,借助刀切法计算气象指标贡献率。单个气象指标贡献率的计算方法:对单个气象指标建模,获得其得分值,然后利用全部气象指标建模,获得全部气象指标合起来的得分值,单个气象指标的得分与全部气象指标得分的比值即为该气象指标的贡献率。计算所有气象指标的贡献率,根据贡献率选出重要气象指标。

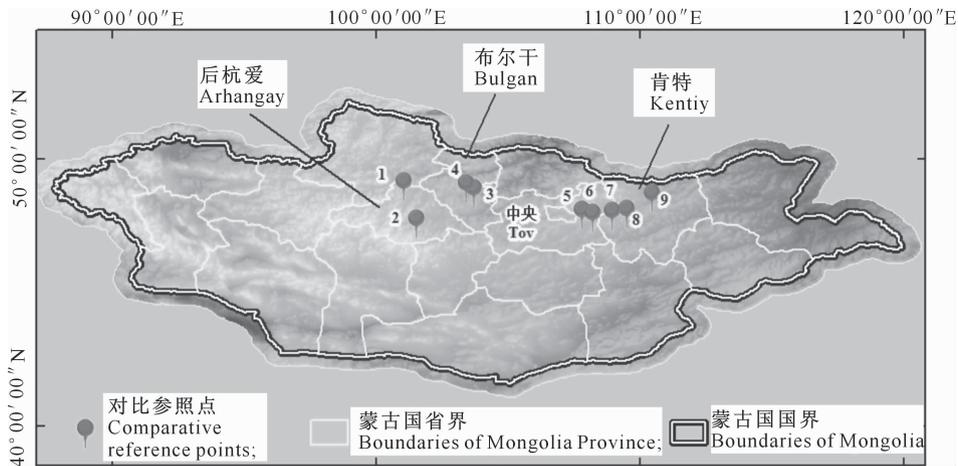
适生区预测:以害虫分布点数据和重要气象指标为输入变量导入 Maxent 软件,运行模型(最大迭

代次数和收敛阈值分别设置为 500 次和 0.000 01),输出 ESRI ASCII 格式的害虫适生指数 FI。考虑害虫寄主分布条件,将适生指数与蒙古高原落叶松分布栅格数据进行叠加分析,得到蒙古高原雅氏落叶松尺蠖适生区分布图。适生区等级划分:利用 ArcGIS 自然断点分级法(Natural Breaks)将 Maxent 模型模拟的适生指数 FI 分为 4 个等级,相应产生高( $FI \geq 0.40$ )、中( $0.20 \leq FI < 0.40$ )、低( $0.05 < FI < 0.20$ ) 3 个适生区和非适生区( $FI \leq 0.05$ )。

1.2.2 气候相似性分析方法 (1)预测原理。基于生物气候相似理论,针对物种本身对气候环境的要求,根据物种适宜性决定的各种气象指标阈值与现实气候环境的吻合程度来衡量物种在该地区的适宜性。利用气候相似性分析实现物种适生区预测的具体方法是通过物种适宜性决定的气象指标,计算物种源地与预测地之间的欧氏距离,用其表征两地气候相似距,分析物种从源地到另一个地区时对该地区的适生性。气候相似距越大则两地气候相似性越低,物种适生性越差;反之则物种适生性越好。设  $M$  为研究区,  $i$  为  $M$  分成的每个网格点,  $(i_n)$  为网格点  $i$  上的第  $n$  个气象指标,计算任意两个网格点的相似程度,就相当于计算  $n$  维空间中此两点之间的距离,距离越小相似程度越大。

(2)预测过程。气候参照点的选择:借助 ArcGIS 空间分析功能,从雅氏落叶松尺蠖已有分布点中提取离所有分布点最近的点作为最佳参照点。另外,根据害虫发生情况,从害虫分布点中又选取了 9 个点作为对比参照点,分别是蒙古国的宾德尔、鄂尔

浑、额尔德尼、车车力格、巴图青格勒、南德力格尔、巴彦德力格尔、臣赫尔曼德勒和宝格塔(图 1)。



1. 车车力格 Tsetserleg; 2. 巴图青格勒 Battsengel; 3. 鄂尔浑 Orkhon; 4. 宝格塔 Bugat; 5. 额尔德尼 Erdene; 6. 巴彦德力格尔 Bayandelger; 7. 臣赫尔曼德勒 Tsenkhermandal; 8. 南德力格尔 Nandelger; 9. 宾德尔 Binder

图 1 气候相似性分析所选对比参照点的分布

Fig. 1 Distribution of comparative reference points selected for climate similarity analysis

气象指标归一化:各气象指标度量单位不同,计算气候相似距时,不能在同一水平上进行计算,应对各气象指标进行无量纲化处理,处理方法如下:

$$X'_{mi} = \frac{X_{mi} - X_{n\min}}{X_{n\max} - X_{n\min}}$$

式中: $X'_{mi}$ 为网格点*i*第*n*个气象指标无量纲的归一化值, $X_{mi}$ 为格网点*i*第*n*个气象指标的数值, $X_{n\min}$ 、 $X_{n\max}$ 分别为第*n*个气象指标的最小值和最大值。

基于欧氏距离计算气候相似距系数:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m [W_n (X'_{mi} - X'_{mj})]^2}{m}}$$

式中: $d_{ij}$ 为害虫适生地*i*与已知分布地*j*之间的气候相似距系数, $m$ 为气象指标个数, $n$ 为任意一个气象指标, $W_n$ 为第*n*个气象指标权重值, $X'_{mi}$ 、 $X'_{mj}$ 分别为*i*、*j*地第*n*个气象指标的归一化值。

1.2.3 Maxent 模型与气候相似性分析方法结合预测 为得到更可靠的雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原适生区细化分布结果,利用 ArcGIS 空间分析功能对 Maxent 模型与气候相似性分析 2 种方法各自预测的高、中、低适生区以及非适生区进行叠加,获得害虫极高、高、中、低适生区和非适生区。叠加判定规则为:Maxent 模型与气候相似性分析 2 种方法均预测为高适生区时记为极高适生区,预测为一中一高适生区时记为高适生区,均预测为中适生区或一高一低适生区时均记为中适生区,均预测为低适生区或一高一非、一中一非、一中一低适生区时均记为低适生区,均预测为非适生区或一低一非适生区时均记为非适生区。叠加之后获得 2 种方法综合预测的

结果。

1.2.4 预测方法精度的评定 利用混淆矩阵分别计算 Maxent 模型、气候相似性分析方法以及两者综合预测结果的 Kappa 系数(记为  $K$ )并进行预测方法精度评定。Kappa 系数能检验预测结果与真实结果的一致性,可评价模型预测精度,取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $K > 0$  时一致性才有意义; $0 < K \leq 0.40$  时一致性差, $0.40 < K \leq 0.60$  时一致性一般, $0.60 < K \leq 0.80$  时一致性较好, $K > 0.80$  时一致性极好。本研究首先根据虫口密度 ID ( $ID = \text{调查总虫数量} / \text{调查总株数}$ ),从害虫分布点中随机选取 60 个点作为真实验证点(包括  $ID > 500$  的高适生区、 $200 < ID \leq 500$  的中适生区、 $0 < ID \leq 200$  的低适生区和  $ID = 0$  的非适生区等 4 个等级点,各等级点数均匀),然后在不同预测结果图上与真实验证点对应分别选择 60 个待验证点,最后建立真实点与待验证点的混淆矩阵,计算 Kappa 系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 重要气象指标及其权重的确定

各气候指标对雅氏落叶松尺蠖适生性有不同程度的影响。笔者借助 Maxent 模型的刀切法计算 19 个气象指标对害虫适生性的贡献率,分析了气象指标的重要性,选取贡献率大于 7% 的气象指标作为重要指标,结果显示,重要气象指标包括最暖季度平均温度、年降水量、年平均温度、昼夜温差与年温差比值、最冷月份最低温度、最热月份最高温度等,其贡献率分别为 32.40%, 17.50%, 11.80%, 8.20%,

7.80%和 7.70%。将以上 6 个重要气象指标导入 Maxent 模型,采用刀切法再次计算其对害虫适生性的贡献率,结果显示上述 6 个重要气象指标的贡献率依次为 34.3%,23.4%,15.8%,11.1%,8.1%和 7.2%。以上贡献率表征了重要气象指标对害虫适生性影响的程度,在气候相似距系数计算中可作为气象指标权重值。

## 2.2 Maxent 生态位模型预测害虫的适生区分布

由图 2 可知,雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区总面积达 9.11 万 km<sup>2</sup>,主要分布在我国内蒙古呼伦贝尔、兴安盟及锡林郭勒和蒙古国库苏古尔、东方、色楞格、布尔干、扎布汗、肯特、后杭爱、中央、鄂尔浑、乌兰巴托及前杭爱等地区。高适生区面积为 2.02 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 22.18%,主要分布在蒙古国布尔干中部、后杭爱南部、库苏古尔东南部、中央北部、色楞格东南部、乌兰巴托北部、肯特西部、前杭爱北部、鄂尔浑南部等地区,其中布尔干分布面积最大,其次为后杭爱,再次为库苏古尔,三者面积之

和占高适生区面积的 68.36%。中适生区面积为 2.83 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 31.02%,主要分布在蒙古国库苏古尔东南部、布尔干中北部、后杭爱南部、中央北部、肯特西北部、色楞格东部、前杭爱北部、乌兰巴托南部、东方东南部、鄂尔浑南部、扎布汗中部和我国内蒙古呼伦贝尔中南部、兴安盟西北部、锡林郭勒东北部等地区,其中库苏古尔分布面积最大,其次为布尔干,再次为后杭爱,三者面积之和占中适生区面积的 51.34%。低适生区面积为 4.26 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 46.80%,主要分布在蒙古国肯特北部、色楞格东西部、库苏古尔东南部、布尔干北部、后杭爱西南部、中央北部、前杭爱北部、扎布汗中部、东方东南部、乌兰巴托南部、鄂尔浑南部和我国内蒙古呼伦贝尔中南部、兴安盟西北部、锡林郭勒东南部等地区,其中呼伦贝尔分布面积最大,其次为肯特,再次为色楞格,三者面积之和占低适生区分布面积的 61.63%。

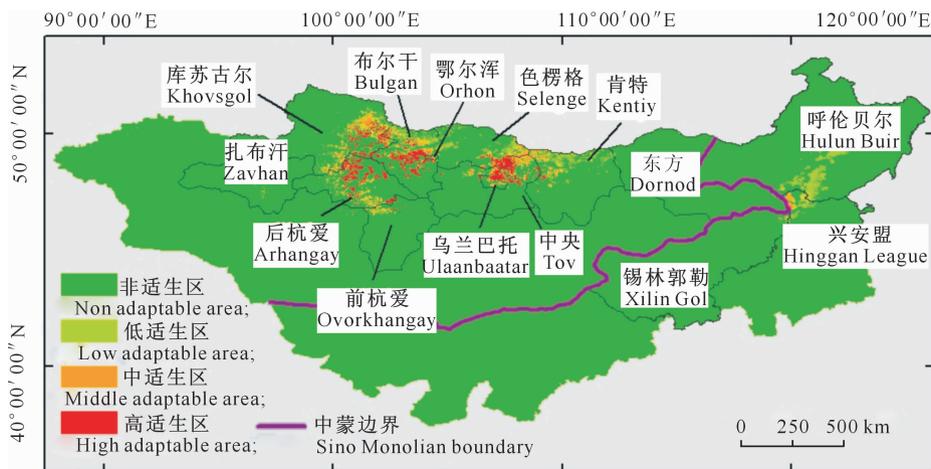


图 2 Maxent 模型预测的雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区分布

Fig. 2 Suitable distribution areas of Jas's larch inchworm in Mongolia Plateau by Maxent model

## 2.3 气候相似性预测害虫的适生区分布

表 2 为 9 个对比参照点气候相似距系数,其最大值为 0.016 7,最小值为 0.010 7,平均值为 0.013 4,相似距系数小于等于 0.013 4 的地区应为害虫最佳适生区域。据以上结果,采用 ArcGIS 等

差分类法,对气候相似距系数进行分级,得到了 3 个等级适生区和非适生区,即  $d_{ij} \leq 0.013$  为高适生区;  $0.013 < d_{ij} \leq 0.018$  为中适生区;  $0.018 < d_{ij} \leq 0.023$  为低适生区;  $d_{ij} > 0.023$  为非适生区,结果见图 3。

表 2 对比参照点的相似距系数( $d_{ij}$ )

Table 2 Similarity distance coefficient of comparative reference points

对比参照点 Comparative reference points	相似距系数( $d_{ij}$ ) Similarity distance coefficient	对比参照点 Comparative reference points	相似距系数( $d_{ij}$ ) Similarity distance coefficient
宾德尔 Binder	0.013 6	南德力格尔 Nandelger	0.013 6
鄂尔浑 Orkhon	0.010 7	巴彦德力格尔 Bayandelger	0.016 2
额尔德尼 Erdene	0.015 2	臣赫尔曼德勒 Tsenkhermandal	0.016 7
车车力格 Tsetserleg	0.010 9	宝格塔 Bugat	0.010 9
巴图青格勒 Battsengel	0.013 2	平均 Average	0.013 4

从图 3 可知,雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区总面积达 10.34 万 km<sup>2</sup>,主要分布在我国内蒙古呼伦贝尔、兴安盟及锡林郭勒和蒙古国库苏古尔、东方、色楞格、布尔干、扎布汗、肯特、后杭爱、中央、鄂尔浑、乌兰巴托及前杭爱等地区。高适生区面积为 2.26 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 21.82%,主要分布在蒙古国布尔干中部、库苏古尔东南部、后杭爱南北部、中央北部、乌兰巴托南北部、肯特中东部、前杭爱北部、东方西北部、扎布汗中部、色楞格南部、鄂尔浑南部等地区,其中布尔干分布面积最大,其次为库苏古尔,再次为后杭爱,三者面积之和占高适生区分布面积的 79.12%。中适生区面积为 2.03 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 19.57%,主要分布在蒙古国库苏古尔东

南部、后杭爱南北部、色楞格南部、肯特中东部、中央北部、布尔干中部、扎布汗中东部、东方西北部、乌兰巴托南北部、鄂尔浑南部等地区,其中库苏古尔分布面积最大,其次为后杭爱,再次为色楞格,三者面积之和占中适生区分布面积的 51.94%。低适生区面积为 6.05 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 58.31%,分布在我国内蒙古呼伦贝尔市南北部、锡林郭勒盟东北部、兴安盟西南部和蒙古国色楞格东西部、库苏古尔中东部、肯特西北部、中央东北部、扎布汗中东部、后杭爱中南部、布尔干中北部、东方东南部、前杭爱北部、乌兰巴托北部、鄂尔浑南部等地区,其中色楞格分布面积最大,其次为库苏古尔,再次为呼伦贝尔,三者面积之和占低适生区分布面积的 52.83%。

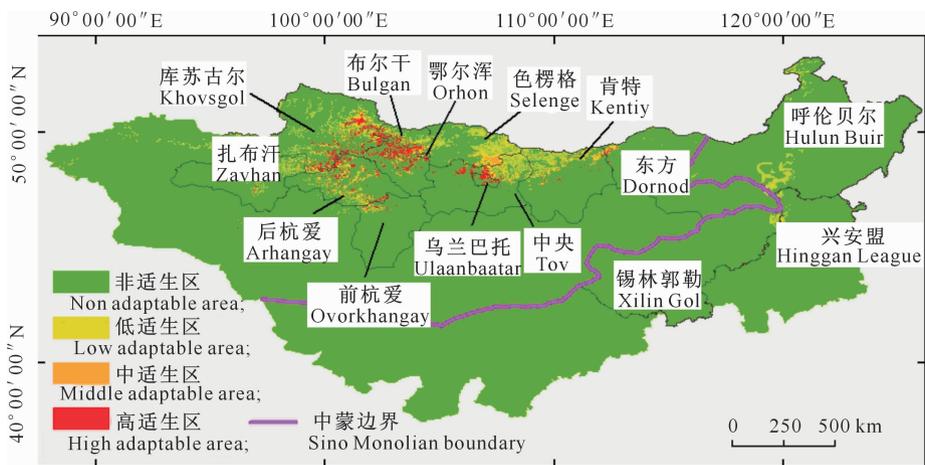


图 3 气候相似性分析方法预测的雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区分布

Fig. 3 Suitable distribution areas of Jas's larch inchworm in Mongolia Plateau by climatic similarity analysis

2.4 2 种方法综合预测害虫的适生区分布

雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区分布结果见图

Maxent 模型与气候相似性 2 种方法综合预测

4。

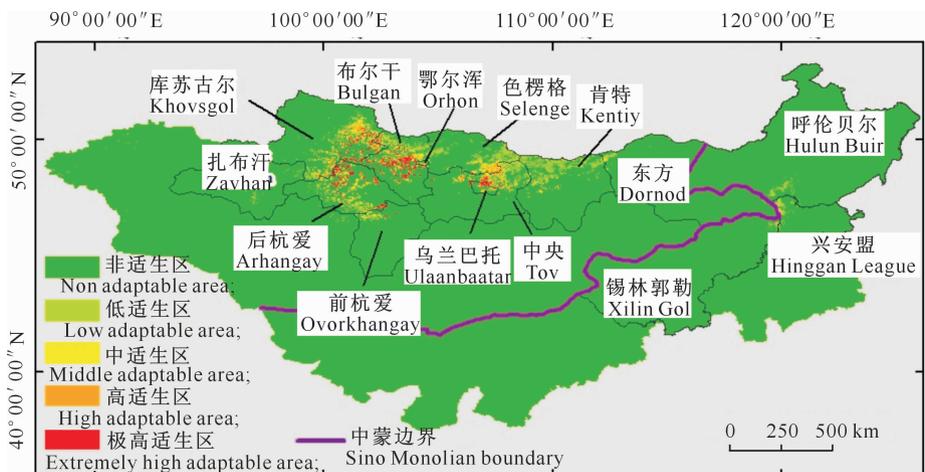


图 4 2 种方法综合预测雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区分布

Fig. 4 Suitable distribution areas of Jas's larch inchworm in Mongolia Plateau by the combined method

从图 4 可知,雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原的适生区总面积达 7.56 万 km<sup>2</sup>,主要分布在我国内蒙古

呼伦贝尔、兴安盟及锡林郭勒和蒙古国库苏古尔、东方、色楞格、布尔干、扎布汗、肯特、后杭爱、中央、鄂

尔浑、乌兰巴托及前杭爱等地区。极高适生区面积为 0.97 万 km<sup>2</sup>, 占总面积的 12.84%, 主要分布在蒙古国布尔干中部、后杭爱南北部、库苏古尔东南部、中央北部、乌兰巴托南北部、前杭爱北部、色楞格南部、鄂尔浑南部等地区, 其中布尔干分布面积最大, 其次为后杭爱, 再次为库苏古尔, 三者面积之和占极高适生区分布面积的 87.25%。高适生区面积为 1.65 万 km<sup>2</sup>, 占总面积的 21.77%, 主要分布在蒙古国库苏古尔东南部、布尔干中部、后杭爱南北部、中央北部、色楞格南部、乌兰巴托南北部、肯特西部、前杭爱北部、鄂尔浑南部、扎布汗中部等地区, 其中库苏古尔分布面积最大, 其次为布尔干, 再次为后杭爱, 三者面积之和占高适生区分布面积的 64.64%。中适生区面积为 1.27 万 km<sup>2</sup>, 占总面积的 16.83%, 主要分布在蒙古国库苏古尔东南部、后杭爱中南部、布尔干中部、中央北部、色楞格东南部、肯特东西部、前杭爱北部、东方西北部、扎布汗中部、乌兰巴托南北部、鄂尔浑南部等地区, 其中库苏古尔分布面积最大, 其次为后杭爱, 再次为布尔干, 三者面积之和占中适生区分布面积的 60.10%。低适生区面积为 3.67 万 km<sup>2</sup>, 占总面积的 48.56%, 主要分布在蒙古国肯特北部、色楞格东部、库苏古尔东南部、中央北部、布尔干中部、后杭爱中南部、东方省西北及东南部、扎布汗东部、前杭爱北部、乌兰巴托南北部、鄂尔浑南部和我国内蒙古兴安盟西北部、呼伦贝尔市中南部、锡林郭勒盟东北部等地区, 其中肯特分布面积最大, 其次为色楞格, 再次为库苏古尔, 三者面积之和占低适生区分布面积的 55.22%。总体上, 雅氏落叶松尺蠖适生区分布较广, 将威胁蒙古高原森林生态系统的安全。

### 2.5 预测方法精度评定

结果显示, Maxent 模型预测的 Kappa 系数为 0.778, 一致性较好; 气候相似性分析方法预测的 Kappa 系数为 0.733, 一致性较好; 2 种方法综合预测的 Kappa 系数为 0.813, 一致性极好。可见, 2 种方法综合预测的精度较高。

## 3 讨论

### 3.1 重要气象指标的合理性

雅氏落叶松尺蠖是一年一代的森林害虫, 5 月上旬至下旬为孵化期, 5 月下旬至 6 月下旬为幼虫期(危害期), 7 月上旬至 9 月上旬为蛹期, 9 月上旬至 10 月中旬为羽化期, 羽化结束即可交尾产卵, 10 月下旬至翌年 4 月为越冬期, 每年如此循环。雅氏

落叶松尺蠖的正常发育与温度、降水量有密切关系。特别寒冷天气对越冬卵不利, 将影响翌年正常孵化。越冬卵在少雨且温度为 15~28℃ 的天气下才能顺利孵化。幼虫吐丝下树钻入土层, 蜕皮化蛹时最合适的温度为 15℃。多雨湿冷的天气不利于孵化期、幼虫期、产卵期雅氏落叶松尺蠖的发育。产卵期温度不宜过高或过低, 适宜产卵的温度为 15~20℃。基于此, 本研究利用刀切法选取的最暖季度平均温度、年降水量、年平均温度、昼夜温差与年温差比值、最冷月份最低温度、最热月份最高温度等 6 个指标, 在很大程度上能够指示适生区气候条件, 可作为重要气候指标。

### 3.2 分析预测方法的可靠性

考虑 6 个重要气象指标对害虫适生性的影响程度不同, 对其确定各自的权重值, 并在计算气候相似距系数时引入了相应值, 使预测结果变得更为客观。

适生区等级划分采用了自然断点分级法和等差分级法, 一定程度上降低了适生区划分的主观性。2 种方法预测结果综合之后得到害虫适生区更细的划分结果, 即极高、高、中、低适生区和非适生区, 其中极高适生区是森林害虫防疫部门最需要关注的区域。

## 4 结论

(1) 在空间分布上, Maxent 模型、气候相似性以及 2 种方法综合预测的雅氏落叶松尺蠖适生区总体分布基本一致, 即主要分布在我国内蒙古呼伦贝尔、兴安盟及锡林郭勒和蒙古国库苏古尔、东方、色楞格、布尔干、扎布汗、肯特、后杭爱、中央、鄂尔浑、乌兰巴托及前杭爱等地区。Maxent 模型、气候相似性分析方法分别预测的高适生区以及 2 种方法综合预测的极高、高适生区主要分布在布尔干、后杭爱、库苏古尔, 有关部门应重点关注这些区域。

(2) 在分布面积上, 总面积气候相似性分析方法预测的最大(10.34 万 km<sup>2</sup>), 其次是 Maxent 模型(9.11 万 km<sup>2</sup>), 再次是 2 种方法综合预测(7.56 万 km<sup>2</sup>); 极高适生区面积为 0.97 万 km<sup>2</sup>, 高适生区面积气候相似性分析方法的(2.26 万 km<sup>2</sup>), 其次为 Maxent 模型(2.02 万 km<sup>2</sup>), 再次为 2 种方法综合预测(1.65 万 km<sup>2</sup>)。

(3) 在精度上, 2 种方法综合预测精度最高(Kappa 系数为 0.813), 其次为 Maxent 模型(Kappa 系数为 0.778), 再次为气候相似性分析方法(Kappa 系数为 0.733)。可见, 2 种方法综合预测具

有较高的可信度,可为物种适生区地理分布预测提供参考。

## [参考文献]

- [1] 黄晓君,包玉海,Altanchimeg,等.蒙古国雅氏落叶松尺蠖入侵内蒙古地区的风险分析 [C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会第七届年会论文集,巴黎: Atlantis 出版社,2016:98-104.  
Huang X J, Bao Y H, Altanchimeg, et al. Risk analysis of Mongolian *Erannis jacobsoni* Djak's invasion into the Inner Mongolia area [C]//7th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC-16), Paris: Atlantis Press, 2016:98-104.
- [2] 陈祉作,李金山,余林生,等.基于气候相似性研究梅氏热厉螨在时间与空间上的适生性 [J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(3): 526-533.  
Chen Z Z, Li J S, Yu L S, et al. Temporal and spatial suitable establishment of *Tropilaelaps mercedesae* in China based on climatic comparability [J]. Journal of Environmental Entomology, 2015, 37(3): 526-533.
- [3] 马骏, 万方浩, 郭建英, 等. 豚草卷蛾在我国的生物气候相似性分析 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(10): 1156-1162.  
Ma J, Wan F H, Guo J Y, et al. Bio-climatic matching analysis for *Epiblema strenuana* (Lepidoptera: Tortricidae) in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(10): 1156-1162.
- [4] 鞠瑞亭, 李跃忠, 王凤, 等. 基于生物气候相似性的锈色棕榈象在中国的适生区预测 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2318-2324.  
Ju R T, Li Y Z, Wang F, et al. Prediction of suitable distributions of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Fabricius (Coleoptera: Curculionidae) in China with analysis of bio-climatic matching [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(8): 2318-2324.
- [5] 齐国君, 高燕, 钟锋, 等. 基于 GIS 与生物气候相似性的西花蓟马在广东的适生性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2011, 33(1): 1-7.  
Qi G J, Gao Y, Zhong F, et al. Study on the suitable establishment of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) in Guangdong Province by bio-climatic matching and GIS [J]. Journal of Environmental Entomology, 2011, 33(1): 1-7.
- [6] 刘诚, 曹春香. 基于 GIS 的“树流感”在中国适生区预测 [J]. 科学通报, 2014, 59(18): 1732-1747.  
Liu C, Cao C X. Prediction of potentially suitable distributions of sudden oak death in China based on GIS technology [J]. Chin Sci Bull, 2014, 59(18): 1732-1747.
- [7] 王齐, 王志明, 郭建波, 等. 落叶松大小蠹在中国适生性分析 [J]. 环境昆虫学报, 2010, 32(2): 287-290.  
Wang Q, Wang Z M, Guo J B, et al. Analysis of suitability for *Dendroctonus simplex* Leconte in China [J]. Journal of Environmental Entomology, 2010, 32(2): 287-290.
- [8] Stephens A E A, Kriticos D J, Leriche A. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) [J]. Bulletin of Entomological Research, 2007, 97: 369-378.
- [9] 徐家文, 史家, 浩任强, 等. 基于 BIOCLIM 模型的扶桑绵粉蚧在中国的适生性分析 [J]. 湖北农业科学, 2015, 54(11): 2631-2633.  
Xu J W, Shi J, Hao R Q, et al. Potential distribution of *Phe-nacoccus solenopsis* in China by the BIOCLIM model [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(11): 2631-2633.
- [10] 饶玉燕, 黄冠胜, 李志红, 等. 基于 DYMEX 和 DIVA-GIS 的昆士兰果实蝇地理分布预测 [J]. 植物保护学报, 2009, 36(1): 1-6.  
Rao Y Y, Huang G S, Li Z H, et al. A predication of potential geographic distribution analysis of queensland fruitfly based on DYMEX and DIVA-GIS [J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2009, 36(1): 1-6.
- [11] 周果梁, 陈晨, 叶军, 等. 利用 GARP 生态位模型预测桔小实蝇 (*Bactrocera dorsalis*) 在中国的适生区域 [J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3362-3369.  
Zhou G L, Chen C, Ye J, et al. Predicting potential ecological distribution of *Bactrocera dorsalis* in China using GARP ecological niche modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3362-3369.
- [12] 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 Y Y, Wang Y, Xiang Y, et al. Prediction of potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in China based on Maxent ecological niche model model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(1): 6-10.
- [13] 赵晶晶, 高丹, 冯纪年, 等. 基于 MaxEnt 模型对葡萄根瘤蚜在中国的适生性分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 100-104.  
Zhao J J, Gao D, Feng J N, et al. Potential geographic distribution of *Daktulosphaira viti foliae* Fitch in China based on MaxEnt model [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(11): 100-104.
- [14] 张颖, 章超斌, 郝建华, 等. 入侵害虫葡萄根瘤蚜在中国的适生区预测 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1986-1993.  
Zhang Y, Zhang C B, Hao J H, et al. Prediction of potential suitable distribution area of invasive alien pest, *Viteus viti foliae* Fitch in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1986-1993.
- [15] 王茹琳, 高晓清, 王闫利, 等. 基于 MaxEnt 的非洲橘硬蓟马在全球及中国的分布区预测 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 315-320.  
Wang R L, Gao X Q, Wang Y L, et al. Potential distribution of *Scirtothrips aurantii* in China and the world predicted by MaxEnt [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(28): 315-320.
- [16] 卢辉, 钟义海, 徐雪莲, 等. 基于 MaxEnt 模型的对粒材小蠹的适生性分析 [J]. 热带作物学报, 2013, 34(11): 2239-2245.

- Lu H, Zhong Y H, Xu X L, et al. The potential geographic distribution of *Xyleborus perforans* based on the MaxEnt [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(11): 2239-2245.
- [17] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling [C]//Proceedings of the twenty-first international conference on machine learning, New York: ACM Press, 2004: 83.
- [18] Ortega-Huerta M A, Peterson A T. Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods [J]. Revista Mexicana De Biodiversidad, 2008, 79: 205-216.
- [19] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.  
Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models [J]. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365-372.
- [20] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of maxent for ecologists [J]. Diversity & Distributions, 2011, 17: 43-57.
- [21] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4827-4835.  
Li G Q, Liu C C, Liu Y G, et al. Advances in theoretical issues of species distribution models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [22] Padalia I, Srivastava V, Kushwaha S P S. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: comparison of maxent and GARP [J]. Ecological Informatics, 2014, 22: 36-43.

(上接第 97 页)

- [22] 方中达. 植物病理研究方法 [J]. 北京: 中国农业出版社, 2007.  
Fang Z D. Plant pathology research methods [J]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [23] 邢光耀, 杜学林. 不同玉米品种对小斑病和弯孢霉叶斑病的抗病性分析 [J]. 西北农业学报, 2006, 15(1): 75-78.  
Xing G Y, Du X L. Analysis on disease resistance of different corn varieties to the southern leaf blight and curvalaria leaf spot of corn [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2006, 15(1): 75-78.
- [24] 赵聚莹, 屈振刚, 贾海民, 等. 不同玉米品种对小斑病强致病力菌的抗病性检测 [J]. 河北农业科学, 2010, 14(9): 66-67.  
Zhao J Y, Qu Z G, Jia H M, et al. Detection of resistance of maize varieties to virulent strain of southern leaf blight [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(9): 66-67.
- [25] Zwonitzer J, Bubeck D M, Bhatramakki D, et al. Use of selection with recurrent backcrossing and QTL mapping to identify loci contributing to southern leaf blight resistance in a highly resistant maize line [J]. Theor Appl Genet, 2009, 118: 911-925.
- [26] Belcher A R, Zwonitzer J C, Cruz J S, et al. Analysis of quantitative disease resistance to southern leaf blight and of multiple disease resistance in maize, using near-isogenic lines [J]. Theor Appl Genet, 2012, 124: 433-445.
- [27] Dai Y, Yang X, Gan L, et al. First report of southern leaf blight caused by *Cochliobolus heterostrophus* on corn (*Zea mays* L.) in Fujian province, China [J]. Plant Disease, 2016, 100(8): 1781.