

文章编号:1001-1498(2014)01-0024-07

## 基于气象因子的杨树溃疡病发生率空间格局研究\*

毕 猛<sup>1</sup>, 杜 婷<sup>1</sup>, 马思佳<sup>1,2</sup>, 石 雷<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 根据全国范围内 2002—2012 年杨树溃疡病逐年发生数据, 选取发生杨树溃疡病地级行政区的平均发生率作为杨树溃疡病的预测指标, 在 ClimateChina v4.40 气候模拟软件中, 计算出发生地区的气象数据。利用偏最小二乘回归, 得到杨树溃疡病平均发生率与气象因子的回归方程, 即杨树溃疡病平均发生率空间格局模型, 并结合地理空间数据和属性数据, 预测未来我国杨树溃疡病的潜在变化趋势。结果显示: 结合 5 月平均气温、5 月平均最高气温、1 月平均最低气温、3 月平均最低气温、4 月平均最低气温、6 月平均最低气温、8 月平均最低气温、11 月平均降水量、春季平均最低气温、夏季平均最低气温、大于 5 ℃ 的有效积温度日和大于 18 ℃ 的有效积温度日 12 个气象因子建立的杨树溃疡病平均发生率空间格局模型, 具有较强的可靠性, 据此预测杨树溃疡病平均发生率在 2020s、2050s、2080s 的空间格局与 2002—2012 年相比主要呈现出华北、华中和华东地区整体发生面积减少, 但局部地区发生程度加重, 东北地区发生程度普遍加重且总体北移的趋势。

**关键词:** 气象因子; 杨树溃疡病; 发生率; 偏最小二乘; 空间格局

中图分类号: S763.1

文献标识码: A

## Research on Spatial Pattern of Poplar Canker Disease's Incidence Rate Based on Meteorological Factor

BI Meng<sup>1</sup>, DU Ting<sup>1</sup>, MA Si-jia<sup>1,2</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** Based on China's nationwide poplar canker disease data from 2002 to 2012, and taking the prefecture-level average incidence rate of poplar canker as a prediction indicator, the meteorological data in these prefectures was calculated by ClimateChina v4.40, a climate simulation software. By means of partial least squares regression, the regression equation about the average incidence rate and meteorological factor, i. e. the spatial pattern model of poplar canker average incidence rate, was established, and combined with geo-spatial data and attribute data, the potential trend of poplar canker was predicted. The results show that the spatial pattern model built with 12 meteorological factors has high reliability. Based on the model, it is estimated that compared with the data of 2002—2012, the spatial pattern of average incidence of poplar canker in 2020s, 2050s, and 2080s will decrease in area but more severely in some area of North China, Central China and East China. In addition, the disease will cause more serious damage and will move northward in Northeast China.

**Key words:** meteorological factor; poplar canker; incidence rate; partial least squares; spatial pattern

收稿日期: 2013-08-27

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201004062)、(201204501)

作者简介: 毕猛(1988-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 主要从事森林病虫害监测、预警研究。E-mail: bimeng5178@126.com.

\* 感谢国家林业局森林病虫害防治总站的于治军处长、张旭东正高级工程师、谭宏利处长为本研究提供杨树溃疡病数据。

\*\* 通讯作者。

杨树溃疡病主要由葡萄座腔菌属 (*Botryosphaeria* Ces. & De Not.) 真菌侵染造成,在中国分布广泛,多发生于我国的华北、西北、东北、华东和华中中的大部分地区<sup>[1]</sup>,轻则阻碍寄主正常生长,重则直接导致寄主枯死,且发病率高达 80%~100%,死亡率可达 30%~50%<sup>[1-3]</sup>,给林业带来巨大经济损失的同时也使生态环境受到严重破坏。已有研究结果表明,我国杨树溃疡病发生适宜温度为 10~25℃,且在 1 年中有 2 次盛发期,但由于各地区的气候条件不尽相同,盛发期到来的时间也存在差异。通常情况下,4 月和 5 月上旬,随着气温的回暖,大部分地区感病杨树开始出现病斑,5 月中下旬、6 月和 7 月上旬杨树溃疡病迎来第 1 次盛发期,7 月下旬、8 月进入盛夏之后,由于各地气温普遍升高,杨树溃疡病发病率开始下降,直到 9 月杨树溃疡病出现第 2 次盛发期,11 月以后病害基本停止发生<sup>[3-5]</sup>。另外,降水量和相对湿度与杨树溃疡病也有密切关系,在 18~25℃ 范围内,降水量、相对湿度对病害的发生发展起主导作用<sup>[4]</sup>。由此可见,气象因子作为影响杨树溃疡病的重要因子,对杨树溃疡病的扩散、流行及分布具有显著影响。

目前,国内外对于杨树溃疡病的研究主要集中在其病原菌的系统分类和分子生物学等微观领域<sup>[6-10]</sup>,关于杨树病害的气象预测模型的研究也只是针对某一区域的小尺度范围<sup>[11-17]</sup>,尚无在全国范围内杨树病害气象预测模型的研究。因此,本文利用 2002—2012 年我国杨树溃疡病发生数据和 ClimateChina 气象数据模拟软件,通过分析杨树溃疡病平均发生率与气象因子的相关性,筛选出主导杨树溃疡病扩散、流行的气象因子,建立杨树溃疡病平均发生率的预估模型,结合地理空间数据和属性数据,在全球气候变化的背景下,预测未来我国杨树溃疡病的潜在变化趋势。为杨树溃疡病长期预测和治理措施的制定提供依据。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究数据

1.1.1 杨树溃疡病数据的收集和提取 2002—2012 年杨树溃疡病相关数据由国家林业局森林病虫害防治总站提供,涵盖有杨树溃疡病发生的 22 个省级行政区的共 153 条记录、127 个地级行政区共 685 条记录、668 个县级行政区共 2 744 条记录,数据字段主要包括省级行政区、地级行政区、县级行政

区 3 个级别的各行政单位的地区名称、监测年份、行政级别、行政区划代码和发生面积、监测面积、防治面积、防治率等监测指标。相关数据经数字化处理,存储为 Access 数据库格式。剔除监测信息缺失的统计数据后,本试验利用监测信息完整的 72 个地级行政区的杨树溃疡病逐年发生数据用作模型分析,计算出 72 个地级行政区的平均发生率 (Average Incidence Rate, AIR) (表 1),并作为杨树溃疡病的预测指标,其计算公式为:

$$AIR = \frac{\sum_{i=1}^n OA_i}{\sum_{i=1}^n MA_i} \times 100\%, (1 \leq n \leq 11 \text{ 且 } n \in N)$$

式中: AIR 为杨树溃疡病平均发生率,  $OA_i$  为第  $i$  年杨树溃疡病发生面积,  $MA_i$  为第  $i$  年杨树溃疡病监测面积,  $n$  为杨树溃疡病发生总年数,  $N$  为整数集。

表 1 发生杨树溃疡病的地级行政区统计数据

地区名称	总发生面积/ 万 $hm^2$	总监测面积/ 万 $hm^2$	平均发生率 (AIR)/%
安庆市	0.026 0	9.712 7	0.267 7
安阳市	0.249 7	15.922 4	1.568 0
鞍山市	0.681 4	3.997 3	17.046 5
蚌埠市	0.089 4	111.000 0	0.080 6
宝鸡市	0.546 6	2.757 1	19.825 2
保定市	0.953 1	50.502 7	1.887 2
北京市	0.508 6	26.591 9	1.912 6
滨州市	4.654 0	54.512 0	8.537 6
亳州市	2.423 3	55.800 0	4.342 8
巢湖市	0.020 7	4.866 7	0.425 3
……	……	……	……
淄博市	1.928 7	74.726 7	2.581 0

依据国家统计局《全国县及县级以上行政区划代码表》和国家基础地理信息中心《国家基础地理信息系统数据库》匹配 72 个地级行政区的地理中心经度、纬度和高程坐标,得到杨树溃疡病的分布区域 (图 1)。

1.1.2 我国空间地理坐标点数据的获取 于国际农业研究磋商组织空间信息协会 (CGIARCSI) 官方网站 (<http://www.cgiar-csi.org/>) 下载由美国国家航空航天局 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合测量的覆盖我国全境的 SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) 数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据。下载数据为 v4.1 版,该版本数据由国际热带农业中心 (CIAT) 利用新的插值算法得到,更好的填补了 SRTM 数据的空洞,数据空间分



图1 杨树溃疡病地级行政区分布示意图

分辨率为 90 m, 标称绝对平面精度为 20 m, 标称绝对高程精度为 16 m, 数据格式为 GeoTiff, 大地水准面为 EGM96 (Earth Gravitational Model 1996), 空间地理坐标系为 WGS84 (World Geodetic System 1984)。

利用 ArcGIS9.3, 对获取的 63 幅 SRTM 数据进行镶嵌、裁切, 提取出我国范围的 DEM 数据, 基于此数据, 均匀地选取分布于我国全境的 13 846 595 个地理坐标点数据, 并匹配选取坐标点的经度、纬度、高程等空间信息。

1.1.3 气象数据的计算 用于模型分析的地级行政区 2002—2012 年的平均气象数据、1.1.2 选取的地理坐标点 2002—2012 年、2020s、2050s 和 2080s 的平均气象数据均由气象数据模拟软件 ClimateChina v4.40 计算得出。

ClimateChina 基于 PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) 插值模型开发, 并采用双线性插值和高程校准对 PRISM 模型加以改进, 使 ClimateChina 的精度得以提升<sup>[18-21]</sup>。提供我国任一地区的经度、纬度、高程, ClimateChina 即可导出该地区历史逐年和未来 2020s (2010—2039)、2050s (2040—2069)、2080s (2070—2099) 的年平均气温、年平均降水量、月平均气温、月平均降水量、年温湿系数、无霜期等 83 个气象因子的数据<sup>[22]</sup>, 输出的气象台站历史数据已通过中国气象科学数据共享服务网《中国地面国际交换站气候资料年值数据集》和《中国地面国际交换站气候资料月值数据集》验证。

## 1.2 研究方法

1.2.1 偏最小二乘 (PLS) 回归 偏最小二乘 (Partial Least Squares, PLS) 回归在建模过程中将主成分分析、典型相关分析和线性回归分析方法的特点集于一身, 可解决一些传统多元线性回归无法解决的

问题。利用偏最小二乘回归建模的关键就是确定所选取的主成分个数, 舍一交叉验证法 (Leave One Out Cross Validation, LOOCV) 可通过预测残差平方和 (Predictive Residual Error Sum of Square, PRESS) 来确定主成分数, PRESS 的值越小, 表明模型的稳定性越强<sup>[23]</sup>。由此, 可依据 PRESS 的最小值确定用于建模的主成分数。

1.2.2 变量投影重要性 (VIP) 计算 变量投影重要性 (Variable Importance in Projection, VIP) 指标可有效地判断自变量在解释因变量  $Y$  时的重要性。VIP 值大于 1 时, 说明自变量在解释因变量时有重要作用; VIP 值在 0.5 ~ 1.0 时, 说明自变量的解释作用还不明确, 需要增加样本或根据其它条件进行判断; VIP 值小于 0.5 时, 说明自变量对因变量的解释基本没有意义<sup>[24-25]</sup>。

1.2.3 模型精度评价 用杨树溃疡病 AIR 预测值的决定系数 ( $R^2$ )、平均误差 (AE)、均方根误差 (RMSE)、总预测相对误差 (PRE) 作为模型精度的评价指标, 其计算公式分别如下:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \tilde{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i) \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \tilde{y}_i)} \right]^2$$

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

$$PRE = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \right|}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\%$$

式中:  $y_i$  为杨树溃疡病 AIR 实测值;  $\hat{y}_i$  为杨树溃疡病 AIR 预测值;  $\bar{y}_i$  为实测值的平均值;  $\tilde{y}_i$  为预测值的平均值;  $n$  为样本个数。

1.2.4 数据处理 试验所需数据主要基于以下软件进行处理、分析: 气象数据通过 ClimateChina v4.40 软件计算, 描述性统计分析、相关性分析、偏最小二乘回归模型的建立利用 SAS9.2 软件, 我国范围的 DEM 数据提取、空间格局分布图用 ArcGIS9.3 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 空间格局模型

2.1.1 气象因子的筛选 从 ClimateChina 输出的 83 个气象因子中初步选取了 1—12 月逐月平均气

温(*TAV01 - TAV12*)、1—12 月逐月平均最高气温(*TMX01 - TMX12*)、1—12 月逐月平均最低气温(*TMN01 - TMN12*)、1—12 月逐月平均降水量(*PPT01 - PPT12*)、每季度平均气温(*TAV\_sp、TAV\_sm、TAV\_at、TAV\_wt*)、每季度平均最低气温(*TMAX\_sp、TMAX\_sm、TMAX\_at、TMAX\_wt*)、每季度平均最高气温(*TMIN\_sp、TMIN\_sm、TMIN\_at、TMIN\_wt*)、小于 5℃ 的有效积温度日(*DD < 5*)、小于 18℃ 的有效积温度日(*DD < 18*)、大于 5℃ 的有效积温度日(*DD > 5*)、大于 18℃ 的有效积温度日(*DD > 18*)、年温湿系数(*AH: M*)、无霜期日数(*NFFD*)共 66 个气象因子作为 Pearson 积矩相关性分析的备选变量。

作为因变量的 2002—2012 年杨树溃疡病 AIR 数据为非正态分布,经对数变换,生成符合正态分布的杨树溃疡病平均发生率对数变换(*lnAIR*)数据(表 2)。利用 SAS9.2 对 *lnAIR* 数据和选取由 ClimateChina 输出的相应地区 66 个气象因子的历史数据进行 Pearson 积矩相关性分析,计算 *lnAIR* 数据与每个气象因子的相关关系,对分析结果做双侧显著性检验。提取与 *lnAIR* 数据呈显著相关的气象因子,得到 5 月平均气温、5 月平均最高气温、1 月平均最低气温、3 月平均最低气温、4 月平均最低气温、6 月平均最低气温、8 月平均最低气温、11 月平均降水量、春季平均最低气温、夏季平均最低气温、大于 5℃ 的有效积温度日、大于 18℃ 的有效积温度日 12 个气象因子作为建立回归模型的入选因子(表 3)。

表 2 AIR 和 *lnAIR* 的描述性统计量

预测指标	选取地区/个	最小值 /%	最大值 /%	均值 /%	标准差 /%
平均发生率(AIR)	72	0.081	100	6.621	13.781
平均发生率对数变换( <i>lnAIR</i> )	72	-2.519	4.605	0.990	1.305

表 3 *lnAIR* 数据与气象因子的相关性系数

气象因子	平均发生率对数变换数据( <i>lnAIR</i> )	<i>P</i> 值
5 月平均气温( <i>TAV05</i> )	-0.451 8	<0.000 1
5 月平均最高气温( <i>TMX05</i> )	-0.407 1	0.000 4
1 月平均最低气温( <i>TMN01</i> )	-0.320 6	0.006 0
3 月平均最低气温( <i>TMN03</i> )	-0.312 4	0.007 5
4 月平均最低气温( <i>TMN04</i> )	-0.387 0	0.000 8
6 月平均最低气温( <i>TMN06</i> )	-0.519 4	<0.000 1
8 月平均最低气温( <i>TMN08</i> )	-0.546 5	<0.000 1
11 月平均降水量( <i>PPT11</i> )	-0.309 8	0.008 1
春季平均最低气温( <i>TMIN_sp</i> )	-0.375 5	0.001 2
夏季平均最低气温( <i>TMIN_sm</i> )	-0.545 6	<0.000 1
大于 5℃ 的有效积温度日( <i>DD &gt; 5</i> )	-0.459 6	<0.000 1
大于 18℃ 的有效积温度日( <i>DD &gt; 18</i> )	-0.511 7	<0.000 1

2.1.2 气象因子的 *VIP* 值 在进行 PLS 回归时,计算出参与建立模型的 12 个气象因子的 *VIP* 值(图 2),其中,*VIP* 值大于 1 的气象因子排序依次为:大于 18℃ 的有效积温度日 > 夏季平均最低气温 > 8 月平均最低气温 > 大于 5℃ 的有效积温度日 > 4 月平均最低气温 > 6 月平均最低气温 > 1 月平均最低气温 > 春季平均最低气温 > 3 月平均最低气温,说明其对于 *lnAIR* 具有很强的解释作用,*VIP* 值在 0.5~1 之间的气象因子排序依次为:5 月平均气温 > 5 月平均最高气温 > 11 月平均降水量,说明它们对 *lnAIR* 的解释作用还不明确,需要进行判断,但由于春季气温和秋季降水量对杨树溃疡病的发生发展具有影响,并且 5 月和 11 月又临近杨树溃疡病每年的第 1 次和第 2 次盛发期,所以将 *VIP* 值在 0.5~1 之间的 3 个气象因子和之前 9 个气象因子,共 12 个气象因子全部作为建立空间格局模型的入选变量。

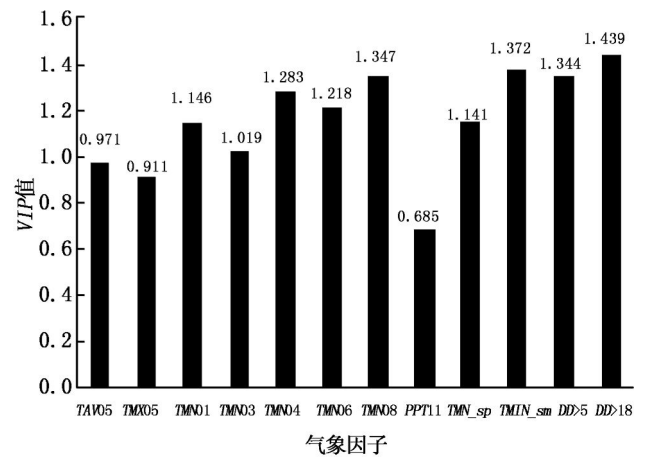


图 2 筛选后的气象因子 *VIP* 值

2.1.3 空间格局模型的建立 用杨树溃疡病 *lnAIR* 作为因变量,筛选出的 12 个气象因子作为自变量,利用 72 个地级行政区的数据进行 PLS 回归运算,随主成分数的增加,*PRESS* 值不断减小,当主成分数为 11 时,*PRESS* 达到最小值为 0.700 7,因此,选取 11 个主成分参与建模,并得到杨树溃疡病 AIR 空间格局模型,计算公式如下:

$$AIR = \exp(-7.3373 - 4.9381 \times TAV05 + 2.3235 \times TMX05 - 0.5065 \times TMN01 - 1.4677 \times TMN03 - 5.5153 \times TMN04 + 3.9355 \times TMN06 + 2.8891 \times TMN08 - 0.0241 \times PPT11 + 8.9482 \times TMIN\_sp - 6.9264 \times TMIN\_sm + 0.0108 \times DD > 5 - 0.0103 \times DD > 18)$$

利用2011—2012年杨树溃疡病平均发生率数据对模型进行精度检验,结果显示:2011—2012年杨树溃疡病平均发生率实测值和预测值具有线性关系(图3);决定系数( $R^2$ )为0.749 2,平均误差(AE)为-0.468,均方根误差(RMSE)为2.369 3,总预测相对误差(PRE)为10.77%,整体预测精度超过85%,达到89.23%,说明模型能够用于杨树溃疡病AIR的空间格局分析,具有实际预测意义。

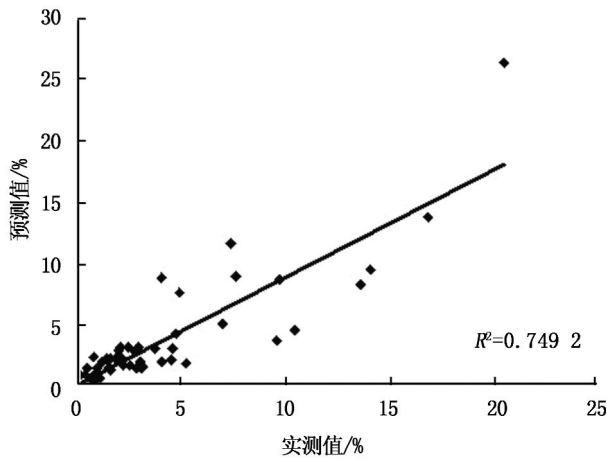


图3 杨树溃疡病平均发生率精度检验

### 2.2 空间格局分析

将我国全境DEM数据中提取的地理坐标点数据导入ClimateChina,分别得出在2002—2012年、2020s、2050s和2080s 4个时期参与空间格局模型建立的12个气象因子的数据。在ArcGIS9.3中,依据空间格局模型,计算出这些地理坐标点的杨树溃疡病AIR值,结合2002—2012年我国杨树溃疡病的空间分布,分别得到我国杨树溃疡病AIR从2002—2012年到2080s的变化趋势,并生成我国杨树溃疡病AIR空间格局专题图(图4~7)。

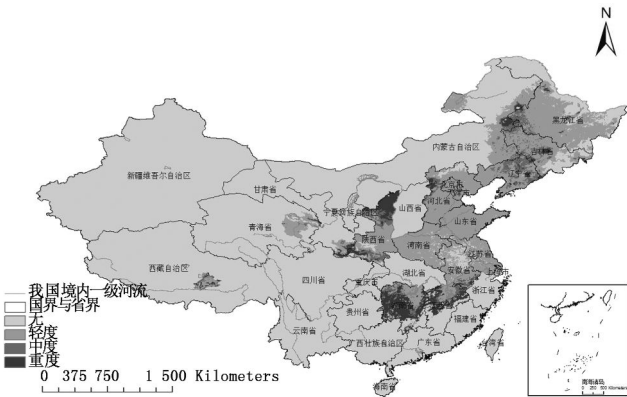


图4 杨树溃疡病平均发生率2002—2012年空间格局示意图

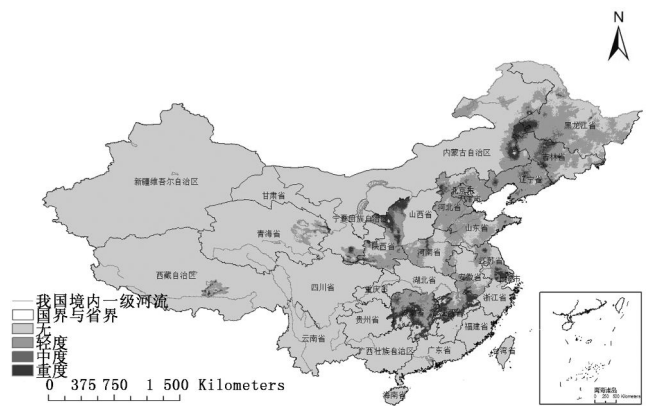


图5 杨树溃疡病平均发生率2020s空间格局示意图

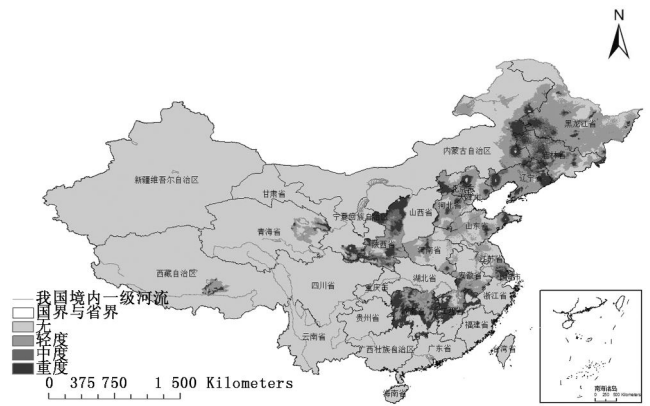


图6 杨树溃疡病平均发生率2050s空间格局示意图

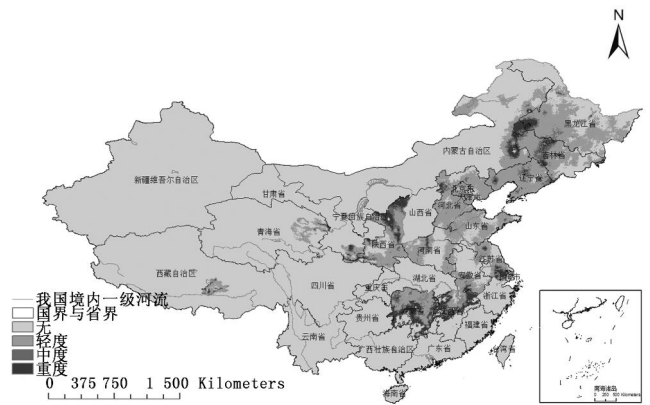


图7 杨树溃疡病平均发生率2080s空间格局示意图

将各地区的杨树溃疡病的发生、发展程度按照《林业有害生物发生及成灾标准》分为无、轻度(AIR < 10%)、中度(AIR为10%~20%)和重度(AIR > 20%)4个等级,并分别统计出2002—2012年、2020s、2050s和2080s我国杨树溃疡病各等级的发生面积(表4)。

表 4 我国杨树溃疡病各等级发生面积

时间	轻度发生面积 /万 km <sup>2</sup>	占总发生面积 比值/%	中度发生面积 /万 km <sup>2</sup>	占总发生面积 比值/%	重度发生面积 /万 km <sup>2</sup>	占总发生面积 比值/%	总发生面积 /万 km <sup>2</sup>
2002—2012 年	147.798	77.68	22.513	11.83	19.946	10.49	190.257
2020s	122.737	76.92	18.153	11.38	18.670	11.70	159.560
2050s	109.247	64.05	26.938	15.79	34.389	20.16	170.574
2080s	85.461	57.82	20.715	14.02	41.626	28.16	147.802

### 3 结论与讨论

研究表明,2002—2012 年到 2080s,杨树溃疡病轻度发生面积总体逐渐减少,中度发生面积总体基本保持稳定,重度发生面积则总体呈增加趋势,但总发生面积整体为递减状态。同 2002—2012 年相比,2020s 杨树溃疡病轻度、中度、重度 3 个等级发生面积全部减少,轻度发生面积为 122.737 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 76.92%;中度发生面积降至 18.153 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 11.38%;重度发生面积为 18.67 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 11.7%。2050s,杨树溃疡病轻度发生面积继续减少,为 109.247 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 64.05%;中度发生面积迅速升高,达到 26.938 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 15.79%;重度发生面积开始回升,为 34.389 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 20.16%。2080s,杨树溃疡病轻度发生面积减少到 85.461 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 57.82%;中度发生面积也减少为 20.715 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 14.02%;重度发生面积上升到 41.626 万 km<sup>2</sup>,占总发生面积的 28.16%。

预测结果显示,东北地区杨树溃疡病发生区总体呈北移趋势,其中,内蒙古东部、黑龙江中部、吉林西北部和中部、辽宁东部地区病害重度发生面积明显增加;华北、华东和华中地区杨树溃疡病发生区总体为缩减趋势,河北北部和中部、山东中部、河南东南部等局部地区病害重度发生面积有所扩增;西北地区杨树溃疡病轻度发生面积总体略有减少,重度发生面积总体比较稳定,但陕西南部 and 甘肃东南部地区病害重度发生面积明显增加。这一结果与 21 世纪中叶,东北、西北和华北地区的地面平均气温升高 1.6~1.8℃,降水量将会有小幅增加,21 世纪末期,东北和西北地区地面平均气温可升高 4.5℃左右,其他地区在 3.0~4.0℃间,降水量可普遍增加 12%~18%,而华北地区夏季和华中地区秋季降水量将呈减少趋势<sup>[26-27]</sup>相吻合,也与温度和降雨量(湿度)是影响杨树溃疡病发生的关键因子的研究结论一致。

本研究使用气象因子个数较多,且气象因子之间存在较强的多重共线性,用 PLS 回归建立的模型可有效减少由于变量间的高度相关对模型稳定性所造成的影响。虽然得到了精度较高的预测模型,但杨树溃疡病除与气象因子关系密切之外,同时还受林木抗性、寄主、地形、土壤以及人为干扰等因素的影响,所以模型仍有待于进一步完善。此外,考虑到全球气候变化的多样性和复杂性,也使得杨树病害的预测预报变的更为复杂。在此领域,若能更好的利用人工神经网络、支持向量机等数学方法,并结合 GIS 等技术手段对其空间格局加以分析,将可能会更准确地预测杨树溃疡病的流行、扩散规律。

#### 参考文献:

- [1] 黄烈健,苏晓华.我国杨树溃疡病研究进展[J].世界林业研究,2003,16(4):49-53
- [2] 吴小芹,何月秋,刘忠华.葡萄座腔菌属所致树木溃疡病发生与研究进展[J].南京林业大学学报,2001,25(1):61-66
- [3] 王义勋,陈京元,蔡三山,等.杨树溃疡病研究进展[J].湖北林业科技,2008(3):39-41
- [4] 景 耀,杨俊秀.杨树溃疡病的发生发展规律[J].林业科学,1981,17(2):183-188
- [5] 赵仕光.杨树溃疡病研究现状[J].西北林学院学报,1992,7(4):122-128
- [6] de Wet J, Burgess T, Slippers B, et al. Multiple gene genealogies and microsatellite markers reflect relationships between morphotypes of *Sphaeropsis sapinea* and distinguish a new species of *Diplodia*[J]. Mycological Research, 2003, 107(5): 557-566
- [7] Crous P W, Slippers B, Wingfield M J, et al. Phylogenetic lineages in the Botryosphaeriaceae[J]. Studies in Mycology, 2006, 55(1): 235-253
- [8] Slippers B, Smit W A, Crous P W, et al. Taxonomy, phylogeny and identification of Botryosphaeriaceae associated with pome and stone fruit trees in South Africa and other regions of the world[J]. Plant Pathology, 2007, 56(1): 128-139
- [9] Mohali S, Burgess T I, Wingfield M J. Diversity and host association of the tropical tree endophyte *Lasiodiplodia theobromae* revealed using simple sequence repeat markers[J]. Forest Pathology, 2005, 35(6): 385-396
- [10] Taylor K, Barber P A, Hardy G E S J, et al. Botryosphaeriaceae from tuart (*Eucalyptus gomphocephala*) woodland, including de-

- criptions of four new species[J]. *Mycological Research*, 2009, 113(3): 337-353
- [11] 曹支敏,周芳,杨俊秀,等. 杨树溃疡病流行规律与测报研究[J]. *森林病虫通讯*, 1991(8): 5-9
- [12] 田呈明,张星耀,景耀,等. 陕西省杨树溃疡病生态地理分布[J]. *森林病虫通讯*, 1992(2): 5-7
- [13] 刘丹,杜春英,于成龙,等. 东北杨树烂皮病发生流行的时空分析[J]. *植物保护*, 2011, 37(4): 138-141
- [14] 王纯枝,郭安红,王玉玲,等. 华北地区杨树烂皮病发生发展气象适宜度预报模型[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(1): 139-143
- [15] 王纯枝,郭安红,张玉书,等. 东北地区杨树烂皮病气象预报模型研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(10): 47-52
- [16] 曲辉辉,杨晓强,李帅,等. 2002-2008年黑龙江省杨树烂皮病与气象条件研究[J]. *气象与环境学报*, 2012, 28(4): 63-68
- [17] 刘丹,于成龙,郭安红,等. 黑龙江省杨树烂皮病气象预报模型的适应性分析[J]. *灾害学*, 2012, 27(3): 45-47
- [18] Wang T, Hamann A, Spittlehouse D L, *et al.* Development of scale-free climate data for western Canada for use in resource management[J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 26(3): 383-397
- [19] Hamann A, Wang T L. Models of climate normals for genecology and climate change studies in British Columbia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3-4): 211-221
- [20] Daly C, Gibson W P, Taylor G H, *et al.* A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate[J]. *Climate Research*, 2002, 22(2): 99-113
- [21] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(6): 693-712
- [22] 张雷,刘世荣,孙鹏森,等. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(11): 1091-1105
- [23] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3)(偏最小二乘回归与PLS过程)[J]. *数理统计与管理*, 2002, 21(2): 58-64
- [24] 王惠文,吴载斌,孟浩. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2006
- [25] Chong I G, Jun C H. Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2005, 78(1-2): 103-112
- [26] 汤剑平,陈星,赵鸣,等. IPCC A2情景下中国区域气候变化的数值模拟[J]. *气象学报*, 2008, 66(1): 13-25
- [27] 江志红,张霞,王冀. IPCC-AR4模式对中国21世纪气候变化的情景预估[J]. *地理研究*, 2008, 27(4): 787-799