基于 GIS 的“树流感”在中国潜在适生区预测

刘诚^{①②③}, 曹春香^{①③*}

① 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

② 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

③ 公共卫生领域空间信息技术应用研究中心, 北京 100101

* 联系人, E-mail: cao413@irsa.ac.cn

2013-07-22 收稿, 2013-10-09 接受, 2014-05-28 网络版发表

国家自然科学基金(41171330)和国家高技术研究发展计划(2013AA12A302)资助

摘要 “树流感”的学名是栎树猝死病, 该病自 1996 年在美国加利福尼亚州首次暴发以来, 已造成了欧洲及北美大量林木的死亡. 引起“树流感”的病菌栎树猝死病菌(*Phytophthora ramorum*)具有传播速度快、传播方式多、寄主种类繁多、症状表现缓慢、隔离与防控非常困难等特点, 因此急需提前预测该病在我国的潜在适生区从而及时采取措施预防该病的传入与扩散. 本文选取影响病菌繁殖与传播的 4 个气象因子(累年月均最高温、累年月均最低温、累年月均降水量、累年月均相对湿度), 基于 AHP-模糊综合评价方法和气候相似性分析方法, 预测“树流感”在我国的适生度, 综合 2 种方法的适生度分布预测结果, 并把该结果与“树流感”潜在寄主植物分布进行叠置分析, 得到“树流感”在我国的潜在分布区. 结果表明, 2 种方法综合比 2 种方法各自得到的潜在最适宜区域面积都有一定的减小; 但不管哪种方法, 得到“树流感”在中国的适生分布从西南往东北方向都是呈降低的趋势, 在靠近沿海纬度较低的区域, 适生度明显较高. 最终得到“树流感”潜在最适宜区域包括福建、江西、湖南, 以及浙江、安徽、湖北、贵州、广西、广东和台湾的部分区域. 本文的研究将对提高政府和民众对外来有害生物危害的认识, 保障我国森林资源和生态环境、维护经济利益, 具有重要的理论意义和实际价值.

关键词

树流感

栎树猝死病

GIS

潜在适生区

AHP-模糊综合评价

气候相似性

“树流感”在美国被人们称为“sudden oak death”, 简称“SOD”^[1]. 该病是由栎树猝死病菌(*Phytophthora ramorum*)感染引起的一种毁灭性林木和观赏植物病害, 相当于植物“口蹄疫”, 具有广泛快速传播的特点, 能够在短时间内对树木造成致命伤害, 从入侵到全部树叶变褐只需 2~3 周的时间^[2~4]. 由于该病会引起林木及苗木大范围地快速死亡, 且爆发后没有有效的防治方法, 因此也被称为“树流感”. “树流感”的爆发历史只有 20 年, 但其影响范围和影响力度却很大. 1996 年, 美国加利福尼亚州暴发“树流感”以来, 该病已造成加州上万棵栎树(*Quercus robur*)和石栎树

(*Lithocarpus glabra*)的毁灭, 每年加州都有“树流感”感染点不断被发现^[5,6]. 英国也是“树流感”的严重疫区之一, 2011 年, 英格兰西南部和威尔士部分地区的日本落叶松首次遭遇了“树流感”的袭击并迅速扩散, 致使政府不得不伐倒约 10000 英亩(约 4000 hm^2)森林; 到 2012 年, 英国受害落叶松(*Larix gmelini*)的立木材积估计高达 678000 m^3 ^[7,8]. 从 1993 年发现其病原菌至今, “树流感”已造成了欧洲、北美很多地区的栎属(*Quercus*)、石栎属(*Lithocarpus*)、落叶松(*Larix gmelini*)、月桂(*Laurus nobilis*)和杜鹃(*Rhododendron*)等林木及苗木大面积死亡, 极大破坏了北美及欧洲

引用格式: 刘诚, 曹春香. 基于 GIS 的“树流感”在中国潜在适生区预测. 科学通报, 2014, 59: 1732–1747

Liu C, Cao C X. Prediction of potentially suitable distributions of sudden oak death in China based on GIS technology (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1732–1747, doi: 10.1360/972013-867

部分国家的森林资源,严重影响了当地的生态环境,造成了大量的经济损失^[9]。

“树流感”对林木的危害极大,其病原菌——栎树猝死病菌可入侵 100 多种植物^[10]。尽管到目前为止中国还没有暴发“树流感”,但其病原菌是我国出入境重要的检疫性有害生物,植物检疫处等国家相关检疫部门已多次从引自德国、意大利、比利时等国家的输华苗木中截获该病害^[11,12]。另外“树流感”病菌的寄主植物在我国均广泛分布,如壳斗科的栎属和石栎属、杜鹃花科的杜鹃、忍冬科的荚蒾(*Viburnum*)和忍冬(*Lonicera*)、蔷薇科的石楠(*Photinia serrulata*)、松科的冷杉(*Abies fabri* (Mast.) Craib)、金缕梅科的金缕梅(*Hamamelis mollis* Oliv.)等^[13,14]。因此一旦我国暴发“树流感”,将极大的危害我国森林资源,破坏我国的生态环境并造成不可估计的经济损失。“树流感”在中国的暴发隐患不容忽视,必须防患于未然,提前探明“树流感”在中国的潜在适生区。

外来物种的适生性分析作为有害生物风险分析的重要组成部分和关键因素,是指有害生物从原分布区被携带到新区后能否定居并造成危害的能力;适生区则是新区域能够满足外来物种生存、繁殖所需条件的区域,是判断外来物种能否在该区域造成危害的重要前提^[15]。早期适生性分析主要是对气候资料进行简单对比,如农业气候相似距方法,是早期有害生物适生性研究最经典的技术^[16,17]。随后基于统计方法,通过建立环境因子数据库,对影响物种分布的环境因子进行统计分析,提取有害生物分布与环境因子之间的关系,建立最优适生模型,如判别分析(discriminate analysis, DA)、广义线性模型(generalized linear models, GLMs)、逻辑回归分析(logistic regression analysis, LRA)、支持向量机(support vector machine, SVM)、神经网络(neural networks)、决策树(decision trees)和主成分分析(principle components analysis, PCA)等。近年来则主要建立生物-气候评价模型(机理模型),即基于物种对环境的基本需求,通过模拟生物种群在已知地点的生长情况,确定其生长的模型和参数,再利用该参数分析生物种群在未知地点的生长情况,由此预测种群潜在适生区。常用的生物-气候评价模型有 CLIMEX 生物种群生长模型、最大熵模型(maximum entropy models, MAXENT)、生态位因素分析模型(ecological niche

factor analysis, ENFA)、BIOCLIM 模型等^[15,18-21]。

总结国内外学者在“树流感”适生性方面研究现状,在国外“树流感”的适生性研究比较成熟,充分利用地理信息系统(geographic information system, GIS)与遥感(remote sensing, RS)技术的优势并采用多种模型进行适生预测,在各个模型中最常选用的指标因子是寄主植物类型和气候因子。Meetemeyer 等人^[22]考虑寄主植物类型、病原菌传播及繁殖的气候条件,用基于规则的方法把寄主种类指数、温湿度等共 5 个变量引入 GIS 中,预测 SOD 在美国加州的适生区。Guo 等人^[5]考虑气候、地形及寄主植物类型选取了 14 个变量用 2 类支持向量机方法预测了 SOD 在加州的潜在分布。Magarey 等人^[23]选取温度、降水量、湿度及云覆盖量等气候因子构建气候风险图及寄主植物分布图,基于传染病模型对 SOD 在全美及全球的风险进行制图。Venette 和 Cohen^[24]用 CLIMEX 模型预测了该病在全美的潜在分布。Kelly 等人^[25]对比分析了基于规则的专家引导方法、线性回归方法、分类与回归树方法、遗传算法、支持向量机算法这 5 种模型预测 SOD 风险的精度,结果表明,支持向量机法具有最高的准确度。Kluza 等人^[26]用地形因子、气候因子以及归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)等因子建立图层,把这些图层引入 GARP(genetic algorithm for ruleset production)模型评估 SOD 的地理风险,得到该病在美国及全球的适生区划,并认为 SOD 可能起源于东亚。Václavík 等人^[27]用多标准评价方法与最大熵模型预测了 SOD 在美国俄勒冈的适生分布。在欧洲, Sansford 等人^[28]基于气候图以及 Meetemeyer 建立的分级系统预测了 SOD 在欧洲的潜在分布。在我国,“树流感”的适生性研究十分缺乏,仅 2008 年邵立娜等人^[14]基于 CLIMEX 软件预测了栎树猝死病原在中国的适生区。

GIS 作为预测模型运行的支撑平台,可实现数据的管理与综合分析,为研究影响物种分布的各种因素开辟了新的途径^[29,30]。本文利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-模糊综合评价方法和气候相似性分析方法预测“树流感”病菌在中国的适生分布,综合 2 种方法的适生度分布预测结果,并把该结果与中国“树流感”寄主植物分布叠加,进而得到“树流感”在我国的潜在分布区。

1 数据收集与处理

1.1 “树流感”分布数据

本文收集的“树流感”在全球的暴发分布数据(locality records): (i) 来自美国加利福尼亚大学伯克利分校的 Kelly 实验室基于 WebGIS 开发的 OakMapper 系统, 该系统提供了加利福尼亚州自“树流感”暴发以来的调查数据(调查时间为 2000~2010 年), 数据为矢量格式, 爆发点是监测区的随机采样点. 该数据集是当前最完善的加州“树流感”暴发数据^[31,32], 数据下载地址为 <http://www.oakmapper.org/>; (ii) 来自公开发表的相关文献、网络资料, 收集了美国俄勒冈、荷兰、英国、爱尔兰等地的“树流感”暴发分布信息. 这部分数据不包含空间信息, 必须首先进行矢量化处理.

利用 ArcGIS 软件的地理配准功能, 把不包含地理信息的 JPEG 格式的分布图与全球各国行政区划矢量图进行配准, 生成“树流感”在这些地区的暴发点的空间分布矢量图. 然后与来自 OakMapper 系统的暴发点数据进行综合得到了“树流感”在全球的暴发点矢量数据图层. 删除重复点, 得到的暴发点数据共 1771 个, “树流感”分布如图 1 所示.

1.2 气象数据

本文收集的气象数据是用于“树流感”适生区预测的基础环境数据, 包括 1950~2000 年的 WorldClim 气象数据和 1960~1990 年的相对湿度数据. 其中,

Worldclim 全球气象数据格式为 ESRI 格式, 使用环境数据集的空间分辨率为 30", 下载地址为 <http://www.worldclim.org/>. 数据层是由气象站收集的月均气象数据插值而来, 变量包括 1950~2000 年每个月的月均降水量、月均最大平均气温、月均最小平均气温以及 19 个派生的生态气候变量^[33]. 全球 1960~1990 年的月均相对湿度数据下载自生物圈地图集(Atlas of the Biosphere), 地址为 <http://www.sage.wisc.edu/atlas/index.php>^[34]. 数据原始分辨率为 8 km, 重采样为 1 km. 所有气象数据是多年月平均数据, 假定在气候条件稳定的情况下不考虑时相的差异.

1.3 中国土地覆盖数据

数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>). 数据集在评价已经有土地覆盖数据的基础上, 基于证据理论, 将 2000 年中国 1:100000 土地利用数据、中国植被图集(1:1000000)的植被型分类、中国 1:100000 冰川图、中国 1:1000000 沼泽湿地图和中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)2001 年土地覆盖产品(MOD12Q1)进行了融合, 最终基于最大信任度原则进行决策, 产生了新的、IGBP (international geosphere-biosphere programme)分类系统的 2000 年中国土地覆盖数据. 新的土地覆盖数据在保持了土地利用数据的总体精度的同时, 补充了中国植被图中对植被类型及植被季相的信息, 更新了中国湿地图, 增加了中国冰川图最新信息, 使分类系统更

图1 “树流感”分布图
(a) 美国“树流感”分布图; (b) 欧洲“树流感”分布图

加通用^[35-37]。

2 预测方法与过程

限制物种的潜在分布区的因素包括生物学特性、环境和人为等因素，但气候条件始终是制约物种陆地分布的最基本的因素^[38,39]。大量研究表明，许多物种的分布与气候密切相关，利用物种已知地理分布的气候因子去预测其潜在适生区依然是目前最有效的方法^[40]。

在本文使用的2种适生区预测方法中，AHP-模糊综合评价方法在专家知识和主观经验的基础上，利用具有严密逻辑性的数学方法较全面地综合评价主体的意见，客观反映评价对象的隶属程度，合理确定评价指标权重，用定量手段刻画适生评价中的定性问题，从而为“树流感”在中国的适生区预测提供客观公正、准确可靠的依据。气候相似性分析方法用空间距离来定量、综合、有序地度量两地的相似程度，直观、可操作性强，通过运用农业气候相似距对我国气候条件的相似性分析，说明相似距较好地反映了不同地区间气候的相似程度，从而论证了农业气候相似距应用的可靠性和可行性。鉴于气候数据易于获得和定量化表达，基于气候数据的预测结果对于决策工作具有参考价值，是一种易于实现且有较强实用性的方法。

2.1 AHP-模糊综合评价方法

(1) AHP-模糊综合评价原理。该方法是将层次分析法和模糊综合评价结合起来，使用层次分析法确定评价指标体系中各指标的权重，用模糊综合评价方法对模糊指标进行评定^[41]。其中，层次分析法是美国运筹学家 A. L. Satty 于 20 世纪 70 年代提出的。该方法将复杂问题分解为若干层次和若干因素，对两两指标之间的重要程度作出比较判断，建立判断矩阵，计算判断矩阵的最大特征值以及对应特征向量，得出不同方案重要性程度的权重，为最佳方案的选择提供依据^[42,43]。模糊综合评价方法就是借助模糊数学工具对多种因素所影响的事物或现象做出综合评价^[44,45]。通过建立每个评价因子的权重和隶属度函数，经模糊变换建立模糊关系矩阵；最后经模糊运算并归一化处理求得模糊综合评判结果集，构建一个综合评判模型。

(2) AHP-模糊综合评价过程。影响栎树猝死病

菌繁殖与传播的主要气候预测因子具有一定程度的模糊性，如病菌的限制生存气候条件、最适生存气候条件等。预测“树流感”在中国的潜在适生区的 AHP-模糊综合评价模型的建立包括以下几个步骤：

(i) 确定适生评价因子和评判标准。温度和降水是栎树猝死病菌繁殖与传播的主要气候限制因子。实验研究表明，病菌生长的最低气温、最高气温以及最适宜温度分别为 2℃、30℃ 和 18~22℃。Davidson 等人^[46]通过相关分析发现温度与病菌孢子繁殖力呈显著相关。病菌适合于阴冷潮湿环境下生存，且通过空气和雨水传播进而感染寄主植物，雨季也是孢子繁殖和寄主是否受感染的主要限制条件，雨量与病菌繁殖能力成正相关关系^[22,46]。Kliejunas^[47]研究认为，湿度对病菌孢子的产生起至关重要的作用，当湿度为 100% 时，孢子产生能力达到最高。至少 60 d 的较宜生存气候能使病菌传播并感染植物，是有效的病菌传播风险因子^[23]。根据病菌的生理生态特性，并调研总结国内外学者选择的“树流感”适生区预测因子，本文选取的“树流感”适生评判因子为以下 4 个环境变量：降水量、最高气温、最低气温和相对湿度。

本文利用收集的中国气候数据，通过 GIS 的空间插值功能，得到每个变量在中国大陆地区的栅格图层，并计算 4 个环境变量在病菌繁殖期(12 月~次年 5 月)的多年月均值。为了确定最终的适生预测结果评价标准，这里把“树流感”的适生等级分为 4 个层次，分别为最适宜区域、中等适宜区域、不适宜区域、极不适宜区域。

(ii) 建立隶属函数及模糊关系矩阵。应用模糊综合评价方法建立每个因子的数学模型，得到隶属函数，进而计算每个因子对不同适生等级模糊子集的隶属度，各变量的隶属函数如表 1 所示。

(iii) 确定评价因子的权重集。应用层次分析软件 yaahp v0.5.3 完成评价因子权重的赋值。模型最终计算得到的适生因子判断矩阵以及特征值见表 2。

(iv) 计算模糊综合评价矩阵。根据公式(1)计算模糊综合评价矩阵。

$$Y = W \times R = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_i), \quad (1)$$

其中， W 为各个因子的权重集， R 为 4 个环境变量图层构成的集合； y_i 表示评价目标对评判等级 v_j 的隶属程度。

2.2 气候相似性分析方法

(1) 气候相似性分析原理。在自然环境下生存

表 1 评价因子隶属函数表

变量	隶属函数	变量	隶属函数
降水量	$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 125 \\ e^{\frac{x-125}{125}} & x < 125 \end{cases}$	最低温	$\mu_3(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
最高温	$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & 18 \leq x \leq 22 \\ 1 - \frac{x-22}{8} & 22 \leq x \leq 30 \\ \frac{x-2}{16} & 2 \leq x < 18 \\ 0 & x < 2 \text{ 或 } x > 30 \end{cases}$	相对湿度	$\mu_4(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 80 \\ \frac{x-40}{40} & 40 < x < 80 \\ 0 & x \leq 40 \end{cases}$

表 2 “树流感”病菌评价因子判断矩阵^{a)}

因子	平均降水量	平均最高温	平均最低温	相对湿度	权重
平均降水量	1.0000	1.0000	6.0000	2.0000	0.3704
平均最高温	1.0000	1.0000	7.0000	2.0000	0.3850
平均最低温	0.1667	0.1429	1.0000	0.3333	0.0594
相对湿度	0.5000	0.5000	3.0000	1.0000	0.1852

a) 随机一致性比率(consistency ratio, CR)=0.0011. 得到评价因子的权重集 $W=(W_1, W_2, W_3, W_4)=(0.3704, 0.3850, 0.0594, 0.1852)$

的生物体, 其生长状况很大程度上取决于当地的气候条件, 一般认为, 如果入侵地气候与严重发生地或原产地的气候越相似, 那么物种入侵的可能性就越大^[48]. 气候相似理论是 20 世纪初期德国著名林学家 H. Mayr 在研究树木引种问题时提出的. 他指出, 生物气候相似是针对某种生物本身对气候环境的要求, 根据生物体本身的适宜性决定的各种气候要素域值以及与现实气候环境能提供的吻合程度来衡量其相似程度, 相似离度越小, 二地的气候相似性越大^[49,50]. 魏淑秋^[51]在气候相似理论研究方法的基础上, 提出采用多维空间相似跨度来定量、综合、有序地度量各地之间的相似程度, 这种方法对危险性病虫害的适生地分析提供了有力的气候背景. 各种气候要素在两地之间的相似程度即气候相似距通常用欧氏距离来表示.

(2) 气候相似性分析过程. 使用的气象数据为来自 WorldClim 数据集的全球 1950~2000 年的月均降水量、月均最高温、月均最低温, 以及来自 Climate Research Unit 的 1960~1990 年相对湿度数据, 两种数据存在时相的不一致, 但由于数据是多年平均值, 本文认为各地气候相对稳定, 预测结果具有可信度. 首先选择合适的气候参照点, 通过标准化处理, 消除参照点与预测区域的气候要素的量纲影响; 然后计算参照点与中国的相似距系数, 通过分析系数值大小

进行相似性判断; 最后通过确定适生等级划分标准, 划分适生区等级.

(i) 选择气候参照点. 不考虑寄主分布影响的情况下, 本文假设“树流感”严重疫区的气候条件为最适病害发生的气候条件. 从图 1 中可以看出, 收集的“树流感”分布点数据有大约 1/3 分布在美国加利福尼亚州, 在加州“树流感”感染点主要分布在其西南沿海岸地区. 美国加利福尼亚州位于美国西部太平洋沿岸, 是“树流感”发生最严重的疫区之一, 它与中国均位于北半球, 且纬度相似, 物候也是一样的, 因此本文选取加利福尼亚州为最佳的气候参照区域, 下一步就是确定气候参照点. 为了消除“树流感”分布点的空间自相关, 本文通过建立 5 km×5 km 的空间格网, 找出落有“树流感”分布点的格网, 并提取格网中心点作为筛选后的物种分布点, 最终筛选出了 191 个空间格网并提取其中心点用于进一步确定气候参照点. 利用 ArcGIS 的 Central Feature 功能对这 191 个点进行中心要素的确定, 认为距离所有点最近的这个中心要素点是最佳的参照点. 最终确定的最佳气候参照点位于马林郡(Marin). 另外选取纬度大致相似的荷兰的格尔德兰省埃德, 爱尔兰的科克、基尔肯尼郡、蒂珀雷里郡, 英国的康沃尔郡、德文郡、萨默塞特郡、威尔士共 8 个区域作为其他对比参照点, 参与相似距的计算. 利用 ArcGIS 的 Spatial Analyst

Tools-Extraction by Point 功能把气候要素栅格集中参照点以及中国区域的各项气候要素提取出来构成原始样本集。

(ii) 气候要素标准化。计算气候相似距时,为了能在同一水平上进行各个气象要素比较,首先根据公式(2)对各个气象要素进行无量纲化处理。

$$X'_{kj} = (X_{kj} - X_k) / \delta_k, \quad (2)$$

其中, X_{kj} 为 j 地第 k 个气候要素的值; X_k 为研究范围内 n 个站点的第 k 个气候要素的平均值; δ_k 为 n 个站点的第 k 个气候要素的标准差。

$$X_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{kj}, \quad (3)$$

$$\delta_k = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{kj} - X_k)^2 / n}. \quad (4)$$

(iii) 计算气候相似距。根据欧式距离计算公式(公式(5))分别计算中国地区和选择的8个其他参照点与最佳参照点加利福尼亚州马林郡的气候相似距。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (X'_{ik} - X'_{jk})^2 / m}, \quad (5)$$

其中, d_{ij} 表示潜在适生地 i 与已知分布地 j 地之间的欧氏距离系数, k 表示任意一个气象要素, X'_{ik} 和 X'_{jk} 分别为 i 地和 j 地第 k 个气候要素的标准化值。由于不同的气候要素对病菌的影响程度不同,本文引入各气候要素的权重信息,对欧氏距离计算公式进行修正。修正后的欧氏距离计算如公式(6)所示。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m [W_k (X'_{ik} - X'_{jk})]^2 / m}, \quad (6)$$

其中, W_k 为第 k 个气候要素的权重值,取自上文层次分析法计算的结果。

3 结果与分析

3.1 适生分级预测结果

(i) 基于 AHP-模糊综合评价方法的预测结果。基于 AHP-模糊综合评价方法计算得到的适生度范围为[0, 1], 本文把结果范围线性拉伸到[0, 100], 使结果更具可读性。其中, 适生度值越趋于 100 表示适生度越高, 适生度值越趋于 0 表示适生度越小。适生度分布如图 2 所示。适生度分布结果可以反映出“树流感”在我国的适生分布趋势, 但无法确切反映真正的适生程度, 需要选择合适的阈值对“树流感”在中国

危险适生程度进行划分。把该方法应用于“树流感”严重疫区美国加州, 得到“树流感”在加州的适生度分布(图 3)。

利用 ArcGIS 的点提取功能把物种分布点的适生度值提取出来, 并加以统计。删除其中的一个异常值(-9999), 统计表明, 实际物种分布点中得到的平均适生度只有 70.97, 而最大适生度达到了 81.04, 最小适生度达 62.67。采用等差法对适生值的大小作出划分标准: $A > 80$ 为最适宜; $60 < A < 80$ 为中等适宜; $40 < A < 60$ 为不适宜; $A < 40$ 为极不适宜。利用 ArcGIS 的重分类功能对适生度分布结果进行分类, 得到如图 4 所示的“树流感”在中国的适生分级专题图。

(ii) 基于气候相似性分析方法的预测结果。气候相似性分析方法得到的中国全区域相似距系数分布图(图 5)。“树流感”在中国的相似度系数为 0.25~2.73, 相似度系数平均值为 1.51。从图 5 中可以大致看出, 基于气候相似理论得到的预测结果与基于 AHP-模糊综合评价方法得到的预测结果在空间分布的变化趋势上是一致的。“树流感”在我国中南部的适生度明显高于其他地区, 适生度在西北和东北地区最低, 在西藏和青海的大部分区域内, 适生度甚至低于其周围其他区域, 达到最低值。

相似距系数不能表示实际的相似程度, 因此通过分析最佳参照点与“树流感”其他分布地区的气候相似距, 划分“树流感”在中国潜在适生区的等级指标。首先得到 8 个“树流感”其他参照点与最佳参照点的多维相似距计算结果(表 3)。其中, 相似距最大为 0.306, 在荷兰埃德; 最小为 0.205, 在爱尔兰科克。相似距平均值为 0.24。各个参照点与最佳参照点马林郡的气候相似距系数比较集中。基于该结果, 本文将相似距小于等于平均值 0.24 的地区划为最适宜区域, 相似距为 0.20~0.31 的地区划为中等适宜区域, 相似距为 0.291~0.55 的地区划为不适宜区域, 大于 0.55 的地区划分为极不适宜区域。利用 ArcGIS 重分类功能对“树流感”在中国的相似距分布结果进行分级, 得到“树流感”在中国的适生分级图(图 6)。

(iii) 2 种方法预测结果对比。从适生度预测结果(图 2, 5)对比来看, 2 种方法的预测结果具有一致的变化趋势, 即“树流感”在中国的适生度分布从西南往东北方向逐渐降低, 在黄河流域以南的适生度明显高于以北的区域, 在靠近沿海纬度较低的区域, 适生度明显较高。但与图 2 相比, 在图 5 中较高适生度

图 2 基于 AHP-模糊综合评价方法的全国“树流感”适生度分布图

图 3 基于 AHP-模糊综合评价方法的“树流感”在美国加州的适生度分布图

图 4 基于 AHP-模糊综合评价方法的“树流感”在中国的适生分级图

图 5 基于气候相似理论的“树流感”在中国的相似距分布图

表 3 其他发生地与马林郡的修正多维气候相似距

地点	相似距	地点	相似距
荷兰埃德	0.306	英国德文郡	0.241
爱尔兰蒂珀雷里郡	0.223	英国威尔士	0.223
爱尔兰基尔肯尼郡	0.247	爱尔兰科克	0.205
英国康沃尔郡	0.231	英国萨默塞特郡	0.263

图 6 基于气候相似理论的“树流感”在中国的适生分级图

(红色区域)区域略向东部偏移。另外在西北地区，图 2 中新疆中部地区适生度比周围偏高，而图 5 中西藏大部分地区却表现出偏低的适生度；在东北地区，图 2 和 5 都表现出类似的适生度变化趋势，即越往东北方向，适生度越低。

从适生分级结果(图 4, 6)对比中可以进一步看出适生度变化的趋势，与图 4 相比，图 6 中最适宜地区的面积明显增大，按省份来看，云南已完全不在最适宜地区内，广东、广西的最适宜区域面积明显减少，贵州、重庆、湖北、安徽、江苏的最适宜区域面积明显增加，台湾大部分地区是最适宜区域。至于中等适宜地区，基于气候相似距理论得到的结果面积也明显高于基于 AHP-模糊综合评价方法的结果面积，多出的区域包括广西、广东的西南部分区域，山西南部

部分区域、河南部分区域，以及河北的东北部和辽宁的部分区域。不适宜与极不适宜地区的预测结果差异较大，如图 4 和 6 中的青色与蓝色区域所示，青色均为不适宜地区，蓝色均为极不适宜地区。

AHP-模糊综合评价方法得到的适生分级预测结果(图 4, 表 4)中，最适宜区域总面积为 $92.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占中国国土总面积的 9.59%，包括广西、广东、福建、江西、贵州、湖南、湖北的部分区域，以及台湾西南部的小部分区域，云南只有极少部分区域为最适宜。中等适宜区域总面积为 $140.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占国土总面积的 14.60%，包括云南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏以及浙江的部分区域，以及台湾大部分区域。最适宜区域与中等适宜区域面积约占总面积的 24.2%。

表 4 2 种方法预测结果面积统计对比

适生分级	AHP-模糊综合评价方法		气候相似理论	
	面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)	比例(%)	面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)	比例(%)
最适宜区域	92.06	9.59	100.05	10.42
中等适宜区域	140.05	14.60	61.44	6.4
不适宜区域	146.34	15.25	198.34	20.67
极不适宜区域	581.10	60.56	599.7	62.47

气候相似性分析方法得到的适生分级预测结果(图 6, 表 4)中, 最适宜区域总面积为 $100.05 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占总面积的 10.42%, 包括广西、广东、福建、江西, 和贵州、湖南、湖北的部分区域, 以及台湾的绝大部分区域. 云南只有西北部有极少部分区域为最适宜. 中等适宜区域总面积为 $61.44 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占总面积的 6.4%, 包括云南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏, 浙江以及台湾部分区域. 最适宜区域与中等适宜区域面积约占总面积的 16.82%.

3.2 潜在适生区预测结果

(i) 综合 2 种方法的适生区预测结果. 为了得

到更细致的“树流感”在中国的适生分布, 把 2 种方法得到的适生分级结果进行叠置分析, 得到 2 种方法预测结果的对比变化分布图(图 7), 图例记为“级别-级别”(前后不区分方法).

由此本文得到“最适宜-最适宜”区域面积为 $57.75 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要包括以下地区: 广西、贵州、湖南、湖北、江西、福建、安徽以及浙江的部分区域. 得到“最适宜-中等适宜”区域的面积为 $66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该部分区域呈环状围绕在最适宜区域的周围, 主要包括以下地区: 广西、广东、贵州、重庆、湖南、湖北、安徽、江苏、浙江福建及台湾的部分区域. 得到“中等适宜-中等适宜”区域面积为 $31.65 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该部分区

图 7 适生分级预测结果变化图

域呈条状分布于前 2 个区域之外, 主要包括以下地区: 海南、云南、四川、陕西、河南、江苏以及山东的部分区域. 这 3 部分的面积总和为 $155.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的比例为 16.19%.

(ii) 叠加寄主植被分布的适生区预测结果. 如果没有寄主植被, 即使“树流感”病菌在中国被发现, 也不可能暴发. 因此可以考虑“树流感”寄主植物在中国的分布情况, 从而剔除无寄主的范围, 进一步缩小“树流感”在中国的适宜区域. 由于“树流感”寄主植物有 100 余种^[10], 比如乔木中的栎树、落叶松, 灌木中的杜鹃、荚蒾等, 寄主植物详细空间分布信息的获取难度很大. 本文收集的中国土地覆盖数据把地类分为 17 类, 其中有常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林等林地共 9 大类. 因此根据中国土地覆盖数据, 并参考“树流感”寄主植物列表, 掩膜去除土地覆盖数据中不可能成为寄主的类别, 得到“可能”寄主植物分布图. 掩膜的规则如下: 查看“树流感”寄主植物表(表 S1, S2)确定每种植物所

属的土地覆盖类别, 汇总后把不可能有寄主植物的土地覆盖类别综合作为非寄主植物分布区域. 最终得到“树流感”寄主植物可能分布于所有林地区域: 常绿针叶林(花旗松(*Pseudotsuga menziesii*))、红杉(*Sequoia sempervirens*))、落叶针叶林(日本落叶松(*Larix kaempferi*))、常绿阔叶林(栎类、红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairei*))、落叶阔叶林(如槭树(*Acer serrulatum*))、栎类)、混交林、灌木林(荚蒾、杜鹃花科、山茶属(*Camellia japonica*)). 因此, 这里把有林地都作为潜在寄主分布区域. 由此得到“树流感”在我国的潜在分布如图 8 所示. 利用 ArcGIS 的空间叠置分析功能, 把“树流感”寄主植被分布图与适生分级预测结果变化图进行空间叠置分析.

可以看出, 由于缺乏寄主植物分布, 西北及部分东北地区“树流感”没有发生的可能, “树流感”的潜在寄主分布主要在东南地区, 较高适生度(红色区域)区域的有林地较广泛, 剔除林业前后其范围几乎没有太大的变化. 结果表明, 在有林地区, “最适宜-最适宜”

图 8 “树流感”在中国的潜在适生区

区域面积为 $42.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 比剔除有林地之前的面积减少了 $15.02 \times 10^4 \text{ km}^2$; “最适宜-中等适宜”区域面积为 $34.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 比剔除有林地之前的面积减少了 $31.6 \times 10^4 \text{ km}^2$; “中等适宜-中等适宜”区域面积为 $29.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 比剔除有林地之前的面积减少了 $2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$, 说明差异不大. 其中, 认为“最适宜-最适宜”区域是“树流感”危险性最高的适生区, 这些地区的寄主需要引起重点关注. 剔除非林地后的适生分布结果更能准确反映“树流感”在中国的潜在分布情况.

从图 9 中可以看出剔除有林地前后的“树流感”在中国适生分布面积的变化情况. 在较高适宜区域, 剔除非林地前后的面积变化不大; 在不适宜区域, 剔除非林地前后面积变化非常大. 这说明潜在寄主几乎都分布在高适宜区域范围内, 这也增加了“树流感”在高适生区发生的危险性.

4 讨论和结论

4.1 基础数据分析

在数据收集与处理方面, 本文收集了近 10 年以来调查统计的“树流感”分布数据, 并利用 ArcGIS9.3 软件对“树流感”分布数据进行空间化处理, 数据来源可靠. 但由于中国还没有“树流感”暴发的案例, 收集的分布数据仅局限在北美与欧洲, 尤其是北美的数据较为丰富. 由于研究区的物种分布数据严重缺失, 对预测“树流感”在我国的适生区域中变量及模型的选择上都有一定的局限性. 本文收集的气象数据包括 1950~2000 年全球温度与降水数据和 1960~

1990 年全球相对湿度数据, 并对气象数据进行重采样等预处理, 使不同数据源具有统一的分辨率. 2 类气候数据源时间段不完全一致, 但本文基于多年气候平均值进行预测, 因此认为各地的气候条件稳定, 可以忽略时相范围不同的影响. 在寄主植物分布数据方面, 由于缺乏详细的寄主植物空间分布信息, 本文借助中国土地覆盖数据, 对收集的中国土地覆盖数据进行重分类, 通过设定剔除规则, 得到“树流感”寄主植物在中国的可能分布范围. 要想得到更精确的适生区域, 以用于林业病虫害预防等林业保护与管理工作, 还需进一步确定主要寄主植物在中国的分布范围.

4.2 预测因子及预测方法分析

“树流感”的暴发和传播受多种因素的影响, 包括地理与气候环境、寄主植物、病菌生理特征以及人为因素等. 由于环境差异大、影响因素多, “树流感”在空间尺度上的传播与分布有明显的区域性差异. 本文基于“树流感”病原菌适合于阴冷潮湿环境下生长等先验知识, 选取了 4 个气候因子(月均降水量、月均最高温、月均最低温以及相对湿度)作为“树流感”的适生预测因子, 认为它们能综合反映病菌繁殖传播的气候条件, 并考虑了每个气候变量对病菌的不同影响程度而引入了权重信息, 使得预测结果更加客观准确. 尽管气候条件是限制病菌生存与繁殖的主要因子, 但很多学者也考虑了其他因子如 NDVI、太阳辐射、地形等变量进行“树流感”的适生预测研究. 预测因子的选择对预测结果起到至关重要的作用, 因子选取的好坏直接影响预测结果的准确与否, 因此在以后的研究中应该更多地考虑其他因子, 从病菌的生理生态特征以及病菌传播的物理机理等多方面、多角度出发, 研究影响“树流感”生存与繁殖传播的重要限制因子.

本文选择的 2 种预测方法——AHP-模糊综合评价方法和气候相似性分析方法都是基于 4 个气候因子来建立预测模型的. AHP-模糊综合评价方法不需要物种分布数据, 仅从客观条件出发, 依赖病菌生理生态特征等先验知识建立评价模型, 在每个因子的隶属函数的选择及基于层次分析法的权重的确定中可能存在一定的主观性. 另外该方法得到的结果为适生度分布, 这里的适生度为绝对值, 若缺少一个参考值, 则无法确定适生度的大小与适生程度的关系, 因此

图 9 剔除有林地前后的“树流感”在中国适生分布面积的变化

本文假定“树流感”严重发生地美国加州的气候条件为“树流感”最适宜气候条件,通过把该方法应用于美国加州,计算“树流感”分布点的适生度大小作为“树流感”在中国的适生分级划分标准.本文统计“树流感”分布点适生度为 81.04~62.67,平均值为 70.97,并采用等差法划分适生值的大小进而对适生程度分级.这里的划分标准同样存在主观性,对预测结果可能产生较大的影响.气候相似性分析方法需要物种分布数据,通过对比物种分布区的气候条件与研究区的气候条件的差异程度,得到研究区的适生程度,认为差异越大,适生度越低.本文得到的“树流感”在中国的相似度系数为 0.25~2.73,相似度系数平均值为 1.51,而计算出的其他参照点与最佳参照点的相似距平均值为 0.24,相似距最大为 0.306(荷兰埃德)、最小为 0.205(爱尔兰科克).本文基于这个计算进行适生等级的划分.相似距的大小能够反映适生程度的高低,但在适生程度分级时,亦受到主观因素的影响,进而影响预测结果.

两种预测方法各有优缺点,得到的结果都存在一定程度的主观性,为了提高预测的精度,本文通过简单叠加 2 种方法的预测结果细化“树流感”在中国的适生区范围,认为该区域是林业管理相关部门最需要关注“树流感”的区域.另外在提取“树流感”寄主植物分布的过程中,提取规则十分粗略,只能得到寄主植物的大致分布,在这个分布范围内仍需细化寄主植物的实际分布.

4.3 预测结果分析

AHP-模糊综合评价方法和气候相似性分析方法得到的预测结果在整体变化上趋势一致,即在黄河流域以南的适生度明显高于以北的区域,在靠近沿海纬度较低的区域,适生度明显较高,但变化趋势并不能反映实际的适生程度.为此 2 种方法都通过确定适生分级标准对适生度进行划分,得到适生分级结果.

从最适宜区域预测面积上看,AHP-模糊综合评价方法得到的最适宜区域总面积达 $92.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,气候相似性分析方法得到的最适宜区域总面积达 $100.05 \times 10^4 \text{ km}^2$.这 2 个面积结果与 2007 年 Kluza 等人^[26]基于 GARP 生态位模型预测“树流感”病菌在全球的适生分布结果对比,区域明显偏大.分析其原因为:(i) 变量的选取对预测结果影响较大.本文仅考

虑了气候变量对“树流感”病菌生存与繁殖的影响,并未考虑地形、太阳辐射等其他因素,变量选取过于单一,且每个气候变量均为多年平均值,从而影响最终的预测结果,造成过度模拟的情况;(ii) 分级标准确定存在主观因素,严重影响预测结果.AHP-模糊综合评价方法与气候相似性分析方法均基于等差法确定划分等级,实验表明,划分阈值的细微变化会引起适宜区域面积的显著改变.事实上,分级方法有很多,等差法未必是最佳的分级方式,可考虑选择其他的分级方法.叠加 2 种方法得到“最适宜-最适宜”区域面积为 $57.75 \times 10^4 \text{ km}^2$,并认为该结果综合了 2 种方法的预测结果,得到的范围更加精确可信.相对单独使用前 2 种方法得到的结果,叠加后得到的最适宜区域面积有了明显的减少,从而显著改善了过度模拟的情况.

从最适宜区域分布范围上看,综合 2 种方法后最终得到的“树流感”在中国的潜在适生区主要分布在福建、江西、湖南,以及浙江、安徽、湖北、贵州、广西、广东、台湾的部分区域.而 2008 年邵立娜等人^[14]用 CLIMEX 模型预测栎树猝死病原在中国的适生区,研究认为,“树流感”病菌在中国的适宜区域和最适宜区域主要集中在我国西南地区的四川、贵州、云南、重庆和中部的湖北,以及东南部的浙江、江苏、安徽、福建和台湾;而广西、广东、江西和海南的大部分地区受热胁迫影响均不适宜“树流感”病菌生存.二者都使用多年平均月气候数据作为预测因子,但预测结果存在一定的差异.本文把广西东北部、广东东北部、江西的全部区域划为最适宜区域,把四川、云南的几乎全部区域划为非适宜区域.统计以上各个区域 4 个气候因子的隶属值,广西、广东和江西的 4 个气候因子的隶属值普遍很高,都在 80 以上,说明这几个地区的温度及降水条件是适宜“树流感”病菌生存的;而四川、云南的相对湿度与降水量的隶属值平均在 60 以下,说明这 2 个区域由于降水条件不足,使得病菌的繁殖与传播受到限制,进而降低了病菌的适生度.

从潜在适生分布结果上看,叠加了“树流感”寄主植物分布的结果缩小了潜在适生范围.“树流感”的寄主植物达百种以上,可危害多种乔木、灌木及苗圃植物,2010 年美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)动植物卫生检验局公布了已发现的寄主植物有 127 种(属),其中经柯赫法则检验确定

的寄主有 45 种(属), 经 PCR 检验确定的相关寄主有 82 种(属), 主要包括壳斗科的栎属、杜鹃花科的杜鹃花属、槭树科的槭属, 忍冬科, 樟科的山月桂(*Kalmia latifolia*), 松科的花旗松, 杉科的红杉, 蔷薇科的石楠、蔷薇(*Rosa* spp.)、冬青(*Ilex purpurea* Hassk)等。我国的“树流感”寄主植物分布广泛, 以栎类为例, 在我国的总面积高达 $1610 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占乔木林面积比例的 10.35%。尽管到目前为止只有部分栎属植物被证实为寄主植物, 但由于“树流感”的潜在寄主还在不断发现, 不排除其他栎属植物为寄主的可能性。另外还有很多寄主植物在中国都有广泛分布, 如杨树(*Populus tremula*)、榆树(*Ulmus pumila*)、桉树(*Eucalyptus* spp.)、桑树(*Morus alba* L.)、槭树、桦木(*Betula*)、桤木(*Alnus*)、椴树(*Tilia*)、悬钩子(*Rubus chingii*)、杜鹃、山茶(*Camellia*)和桃树(*Prunus persica*)等。本文在剔除非寄主植物时, 仅排除了非林地、草地及农业与自然植被镶嵌体几种土地类型所包括的

区域, 得到的分布范围并不准确, 却也能一定程度地缩小适生区。

“树流感”是暴发在植物中的一种真菌类传染性病害, 类似于人类的流行性感冒, 具有广泛传播的特点, 但其对植物的危害却远远大于流行性感冒对人类的危害, 一旦某一地区暴发了“树流感”, 对该区域的林业是致命性的打击。“树流感”的相关研究仍在不断发展中, 众多学者从病菌的生理特征、病害的潜在分布、传播风险、寄主植物的特性等方面进行了大量的研究。基于 GIS 的空间数据管理、空间分析以及可视化等优势, 本文采用 AHP-模糊综合评价与气候相似性分析 2 种方法预测“树流感”病菌在中国的适生分布, 同时叠加中国“树流感”寄主植物分布, 得到“树流感”在中国的潜在适生区。本文的研究勾画了“树流感”在我国的潜在分布区, 为我国防治该森林病害, 对适生性高的地区加强管理管制, 提供了重要科学依据。

致谢 感谢审稿人为本文提出宝贵的修改意见。

参考文献

- 1 陈培昶, 池杏珍. 栎树猝死病菌对城市绿地的风险性分析. 中国森林病虫, 2008, 27: 20–23
- 2 Werres S, Marwitz R, Wamit V, et al. *Phytophthora ramorum* sp. nov., a new pathogen on *Rhododendron* and *Viburnum*. Mycol Res, 2001, 105: 1155–1165
- 3 廖太林, 李百胜. 栎树猝死病菌传入中国的风险分析. 西南林学院学报, 2004, 24: 34–37
- 4 Oregon Department of Agriculture. Sudden Oak Death Regulations. Salem: Oregon Department of Agriculture, 2011
- 5 Guo Q H, Kelly M, Graham C H. Support vector machines for predicting distribution of sudden oak death in California. Ecol Model, 2005, 182: 75–90
- 6 Animal and Plant Health Inspection Service. *Phytophthora ramorum*: Stopping the Spread. Riverdale: Animal and Plant Health Inspection Service, United States Department of Agriculture, 2009
- 7 Jones B. *Phytophthora ramorum*: Operational experience from the UK. In: Sudden Oak Death 5th Science symposium, June 19–22, Petaluma, 2012
- 8 Forestry Commission. *Phytophthora ramorum*. Bristol, Edinburgh, Cardiff: Forestry Commission, United Kingdom, 2012
- 9 Food and Environment Research Agency. A Threat to Our Woodlands, Heathlands and Historic Gardens, *Phytophthora ramorum*. Plant Disease Factsheet. Food and Environment Research Agency, United Kingdom, 2010
- 10 Animal and Plant Health Inspection Service. APHIS List of Regulated Hosts and Plants Proven or Associated with *Phytophthora ramorum*. Riverdale: Animal and Plant Health Inspection Service, United States Department of Agriculture, 2010
- 11 陈小龙, 赵守歧, 吴品珊. 从德国引进的高山杜鹃上首次检出栎树猝死病菌. 中国植保导刊, 2007, 3: 37
- 12 吴品珊, 巫燕, 严进, 等. 栎树猝死病菌检疫鉴定方法. 植物检疫, 2007, 21: 281–284
- 13 朱春艳, 李志炎, 鲍淳松, 等. 我国杜鹃花资源的保护与开发利用. 中国野生植物资源, 2007, 26: 28–30
- 14 邵立娜, 赵文霞, 淮稳霞, 等. 栎树猝死病原在中国的适生区预测. 林业科学, 2008, 44: 85–90
- 15 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2010, 21: 3063–3069
- 16 周国梁, 李尉民, 印丽萍. 有害生物风险分析研究工作的进展. 植物检疫, 2006, 20: 162–164
- 17 程俊峰, 万方浩, 郭建英. 西花蓟马在中国适生区的基于 CLIMEX 的 GIS 预测. 中国农业科学, 2006, 39: 525–529

- 18 王颖, 章桂明, 杨伟东, 等. 基于 MAXENT 的大豆南北方茎溃疡病菌在中国适生区的预测. 植物检疫, 2006, 23: 14–17
- 19 李双成, 高江波. 基于 GARP 模型的紫茎泽兰空间分布预测——以云南纵向岭谷为例. 生态学杂志, 2008, 27: 1531–1536
- 20 余岩, 陈立立, 何兴金. 基于 GARP 的加拿大一枝黄花在中国的分布区预测. 云南植物研究, 2009, 31: 57–62
- 21 曹向锋. 外来入侵植物黄顶菊在中国潜在适生区预测及其风险评估. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学, 2010
- 22 Meentemeyer R, Rizzo D, Mark W, et al. Mapping the risk of establishment and spread of sudden oak death in California. For Ecol Manage, 2004, 200: 195–214
- 23 Magarey R, Fowler G, Colunga M, et al. Climate and Host Risk Map for Sudden Oak Death Risk (*Phytophthora ramorum*). California: Proceedings of the Sudden Oak Death 3rd Science Symposium, 2006
- 24 Venette R C, Cohen S D. Potential climatic suitability for establishment of *Phytophthora ramorum* within the contiguous United States. For Ecol Manage, 2006, 231: 18–26
- 25 Kelly M, Guo Q, Liu D, et al. Modeling the risk for a new invasive forest disease in the United States, an evaluation of five environmental niche models. Comp Environ Urban Syst, 2006, 31: 689–710
- 26 Kluza D A, Vieglaiss D A, Andreasen J K, et al. Sudden oak death: Geographic risk estimates and predictions of origins. Plant Pathol, 2007, 56: 580–587
- 27 Václavík T, Kanaskie A, Hansen E M, et al. Predicting potential and actual distribution of sudden oak death in Oregon: Prioritizing landscape contexts for early detection and eradication of disease outbreaks. For Ecol Manage, 2010, 260: 1026–1035
- 28 Sansford C E, Inman A J, Baker R, et al. Report on the risk of entry, establishment, spread and socio-economic loss and environmental impact and the appropriate level of management for *Phytophthora ramorum* for the EU. European Union Sixth Framework Project Risk Analysis for *Phytophthora ramorum*, Deliverable Report 28, 2009
- 29 党安荣, 毛其智, 王晓栋. 空间信息技术在人居环境研究中的应用. 中国环保产业, 2001, 7: 16–17
- 30 Anderson R P, Peterson A T, Gómez-Laverde M. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. Oikos, 2002, 98: 3–16
- 31 Kelly M, Tuxen K. WebGIS for monitoring “sudden oak death” in coastal California. Comp Environ Urban Syst, 2003, 27: 527–547
- 32 Kelly M, Tuxen K, Kearns F. Geospatial informatics for management of a new forest disease: Sudden Oak Death. Photogramm Eng Remote Sens, 2004, 70: 1001–1004
- 33 Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int J Climatol, 2005, 25: 1965–1978
- 34 New M G, Hulme M, Jones P D. Representing 20th century space-time climate variability. I: Development of a 1961–1990 mean monthly terrestrial climatology. J Clim, 1999, 12: 829–856
- 35 冉有华, 李新, 卢玲. 基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图. 地球科学进展, 2009, 24: 192–203
- 36 Ran Y H, Li X, Lu L. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China. Int J Remote Sens, 2010, 31: 391–401
- 37 Ran Y H, Li X, Lu L, et al. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. Int J Geogr Inf Sci, 2012, 26: 169–191
- 38 Willis K J, Whittaker R J. Species diversity-scale matters. Science, 2002, 29: 1245–1248
- 39 Sutherst R W, Maywald G. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania. Environ Entomol, 2005, 34: 317–335
- 40 周国梁, 李尉民, 印丽萍. 外来有害生物适生性研究方法及需要注意的若干问题. 植物检疫, 2006, 20 (增刊): 1–7
- 41 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用. 中国安全科学学报, 2008, 18: 148–153
- 42 Saaty T L. Modeling unstructured decision problems—the theory of analytical hierarchies. Math Comput Simul, 1978, 20: 147–158
- 43 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究. 系统工程理论与实践, 2006, 9: 107–112
- 44 王丽丽. 模糊数学法结合层次分析法用于清洁生产潜力评估研究. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2010
- 45 张丽娜. AHP-模糊综合评价法在生态工业园区评价中的应用. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2006
- 46 Davidson J M, Wickland A C, Patterson H A, et al. Transmission of *Phytophthora ramorum* in mixed-evergreen forest in California. Phytopathology, 2005, 95: 587–596
- 47 Kliejunas J T. Sudden Oak Death and *Phytophthora ramorum*: A Summary of the Literature. United States Department of Agriculture, 2010
- 48 Scott J K, Panetta F D. Predicting the Australian weed status of southern African plants. J Biogeogr, 1993, 20: 87–93
- 49 魏淑秋. 农业气候相似距简介. 北京农业大学学报, 1984, 10: 427–428
- 50 袁淑荣, 李天亮. 气候相似理论在引种中的应用与探讨. 种子世界, 2006, (7): 36–38
- 51 魏淑秋. 气候相似论的发展. 见: 魏淑秋, 刘桂莲. 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社, 1994. 1–5

Prediction of potentially suitable distributions of sudden oak death in China based on GIS technology

LIU Cheng^{1,2,3} & CAO ChunXiang^{1,3}

¹ Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² School of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Center for Applications of Spatial Information Technologies in Public Health, Beijing 100101, China

“Tree flu” has the scientific name “Sudden Oak Death” (SOD). This disease, which initially broke out in California in 1996, has caused the death of thousands of trees in Europe and North America. The pathogen causing SOD, which has a broad and diverse host range, may be spread or dispersed by various means. The symptoms manifest slowly and the disease is difficult to control. Therefore, preventive measures such as predicting the potentially suitable distributions should be taken as soon as possible in case SOD spreads to China. In this paper, we selected climate variables that are strongly correlated to SOD: precipitation, maximum and minimum temperature, and relative humidity. A comprehensive evaluation by analytic hierarchy process fuzzy mathematics and climate similarity theory were used to predict the potential distributions of SOD in China by synthesizing the results of these two methods overlain with the host distribution. The results showed that even though the area of susceptibility was reduced, the distribution of SOD exhibited a decreasing trend from the southwest to the northeast for each method, and that coastal regions had a significantly higher susceptibility. Those areas most susceptible to SOD include Fujian, Jiangxi, Hunan, and parts of Zhejiang, Anhui, Hubei, Guizhou, Guangxi, Guangdong, and Taiwan. This research will be of great theoretical significance and practical value in increasing awareness of the dangers of invasive pathogen, ensuring the safety of forest resources and the environment, and in protecting economic benefits.

tree flu, sudden oak death, GIS, potential suitable distribution, AHP-fuzzy mathematics, climate similarity

doi: 10.1360/972013-867

补充材料

表 S1 栎树猝死病菌已证实的寄主植物(45 种)

表 S2 栎树猝死病菌相关的寄主植物(82 种)

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责。

表 S1 栎树猝死病菌已证实的寄主植物(45 种)^{a)}

编号	学名	中文名	英文名
槭树科(Aceraceae)			
1	<i>Acer macrophyllum</i>	槭树	big leaf maple
铁线蕨科(Adiantaceae)			
2	<i>Adiantum aleuticum</i>	铁线蕨	western maidenhair fern
3	<i>Adiantum jordanii</i>	加州铁线蕨	California maidenhair fern
忍冬科(Caprifoliaceae)			
4	<i>Lonicera hispidula</i>	加州忍冬	California honeysuckle
5	<i>Viburnum bodnantense</i>	博得南特荚蒾	Bodnant viburnum
6	<i>Viburnum plicatum</i>	蝴蝶荚蒾	doublefile viburnum
7	<i>Viburnum tinus</i>	地中海荚蒾	laurustinus, viburnum
山茱萸科(Cornaceae)			
8	<i>Griselinia littoralis</i>	滨海山茱萸	Griselinia
杜鹃花科(Ericaceae)			
9	<i>Arbutus menziesii</i>	优材草莓树	madrone
10	<i>Arctostaphylos manzanita</i>	北加州熊果树	manzanita
11	<i>Calluna vulgaris</i>	欧洲石楠	heath
12	<i>Pieris formosa</i>	美丽马醉木	Himalaya andromeda
13	<i>Pieris floribunda</i>	马醉木	mountain andromeda
14	<i>Pieris japonica</i>	日本马醉木	Japanese pieris
15	<i>Rhododendron</i> spp.	杜鹃花属	Rhododendron
16	<i>Vaccinium ovatum</i>	加州越橘	huckleberry
壳斗科(Fagaceae)			
17	<i>Lithocarpus densiflorus</i>	密花石栎	tanoak
18	<i>Quercus agrifolia</i>	加州栎	coast live oak
19	<i>Quercus chrysolepis</i>	黄鳞栎	canyon live oak
20	<i>Quercus kelloggii</i>	加州黑栎	California black oak
21	<i>Quercus parvula</i> var. <i>shrevei</i>	希氏栎	Shreve oak
22	<i>Quercus falcata</i>	西班牙栎	southern red oak
23	<i>Quercus ilex</i>	圣栎	holm oak
24	<i>Castanea sativa</i>	欧洲栗	sweet chestnut
金缕梅科(Hamamelidaceae)			
25	<i>Hamamelis virginiana</i>	美洲金缕梅	witch-hazel
26	<i>Parrotia persica</i>	波斯铁木	Persian ironwood
七叶树科(Hippocastanaceae)			
27	<i>Aesculus californica</i>	加州七叶树	California buckeye
樟科(Lauraceae)			
28	<i>Umbellularia californica</i>	山月桂	California bay laurel, Oregon myrtlewood, pepperwood
百合科(Liliaceae)			
29	<i>Maianthemum racemosum</i> (= <i>Smilacina racemosum</i>)	舞鹤草	false Solomon's seal
木犀科(Oleaceae)			
30	<i>Fraxinus excelsior</i>	欧洲白蜡树	European ash
31	<i>Syringa vulgaris</i>	欧洲丁香	lilac
松科(Pinaceae)			
32	<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>menziesii</i>	花旗松	Douglas fir

报春花科(Primulaceae)			
33	<i>Trientalis latifolia</i>	西部七瓣莲	western starflower
鼠李科(Rhamnaceae)			
34	<i>Rhamnus californica</i> (= <i>Frangula californica</i>)	加州鼠李	California coffeeberry
35	<i>Rhamnus Purshiana</i> (= <i>Frangula Purshiana</i>)	药鼠李	cascara
蔷薇科(Rosaceae)			
36	<i>Heteromeles arbutifolia</i>	加州冬青	toyon
37	<i>Photinia fraseri</i>	红叶石楠	red tip photinia
38	<i>Rosa gymnocarpa</i>	木蔷薇	wood rose
39	<i>Pyracantha koidzumii</i>	台湾火棘木	Formosa firethorn
红豆杉科(Taxaceae)			
40	<i>Taxus baccata</i>	欧洲红豆杉	European yew
杉科(Taxodiaceae)			
41	<i>Sequoia sempervirens</i>	北美红杉	coast redwood
山茶科(Theaceae)			
42	<i>Camellia</i> spp.	山茶属	Camellia
杨柳科(Salicaceae)			
43	<i>Salix caprea</i>	山羊柳	goat willow
美国石南科(Kalmia)			
44	<i>Kalmia</i> spp.	山月桂	mountain laurel
樟科(Lauraceae)			
45	<i>Laurus nobilis</i>	月桂树	bay laurel

a) Animal and Plant Health Inspection Service, United States Department of Agriculture, 2010. 树流感已证实的寄主植物, 这些植物的特点是它们是以自然方式感染栎树猝死病菌, 并已被建档、审查, 且通过了柯赫法则假设检验

表 S2 栎树猝死病菌相关的寄主植物(82 种)^{b)}

松科(Pinaceae)			
1	<i>Abies concolor</i>	白冷杉	white fir
2	<i>Abies grandis</i>	巨冷杉	grand fir
3	<i>Abies magnifica</i>	红冷杉	red fir
槭科(Aceraceae)			
4	<i>Acer circinatum</i>	圆叶槭	vine maple
5	<i>Acer davidii</i>	条纹树皮槭	striped bark maple
6	<i>Acer laevigatum</i>	常绿槭	evergreen maple
杜鹃花科(Ericaceae)			
7	<i>Arbutus unedo</i>	杨梅树	strawberry tree
8	<i>Gaultheria shallon</i>	沙龙白珠树	salal
9	<i>Leucothoe axillaris</i>	绊脚灌木	fetterbush
10	<i>Leucothoe fontanesiana</i>	下垂木藜芦	drooping leucothoe
11	<i>Vaccinium myrtillus</i>	越桔	bilberry
12	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	越橘	cowberry
13	<i>Arctostaphylos columbiana</i>	石兰科常绿灌木	manzanita
14	<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	熊果	kinnikinnick
紫金牛科(Myrsinaceae)			
15	<i>Ardisia japonica</i>	紫金牛	Ardisia

葡萄科(Vitaceae)			
16	<i>Berberis diversifolia</i>	俄勒冈葡萄	Oregon grape
樟科(Lauraceae)			
17	<i>Calycanthus occidentalis</i>	西美腊梅	spicebush
18	<i>Cinnamomum camphora</i>	樟脑树	camphor tree
百合科(Liliaceae)			
19	<i>Clintonia andrewsiana</i>	珠百合	Andrew's clintonia bead lily
山茱萸科(Cornaceae)			
20	<i>Cornus kousa</i>	山茱萸	kousa dogwood
21	<i>Cornus kousa</i> × <i>Cornus capitata</i>	诺曼哈登山茱萸	cornus Norman Haddon
金缕梅科(Hamamelidaceae)			
22	<i>Corylopsis spicata</i>	斯派克金缕梅	spike witch hazel
23	<i>Distylium myricoides</i>	蚊母树	myrtle-leafed Distylium
24	<i>Hamamelis</i> × <i>intermedia</i>	杂交金缕梅	hybrid witchhazel
25	<i>Hamamelis mollis</i>	中国金缕梅	Chinese witchhazel
26	<i>Loropetalum chinense</i>	檵木属	Loropetalum
桦木科(Betulaceae)			
27	<i>Corylus cornuta</i>	加州榛子	California hazelnut
交让木科(Daphniphyllaceae)			
28	<i>Daphniphyllum glaucescens</i>	虎皮楠	Daphniphyllum
桑科(Moraceae)			
29	<i>Drimys winteri</i>	桑白皮	winter's bark
鳞毛蕨科(Dryopteridaceae)			
30	<i>Dryopteris arguta</i>	加州鳞毛蕨属	California wood fern
桃金娘科(Myrtaceae)			
31	<i>Eucalyptus haemastoma</i>	涂胶	scribbly gum
卫矛科(Celastraceae)			
32	<i>Euonymus kiautschovicus</i>	卫矛	spreading euonymus
丝穗木科(Garrya)			
33	<i>Garrya elliptica</i>	丝绸流苏树	silk tassel tree
冬青科(Aquifoliaceae)			
34	<i>Ilex aquifolium</i>	欧洲冬青	European holly
35	<i>Ilex purpurea</i>	东方冬青	oriental holly
壳斗科(Fagaceae)			
36	<i>Castanopsis orthacantha</i>	栲属	Castanopsis
37	<i>Lithocarpus glaber</i>	日本栎树	Japanese oak
38	<i>Quercus acuta</i>	日本长青栎树	Japanese evergreen oak
39	<i>Quercus petraea</i>	无梗花栎	sessile oak
40	<i>Quercus rubra</i>	北方红栎	northern red oak
木兰科(Magnoliaceae)			
41	<i>Magnolia cavaleri</i>	含笑属	Michelia
42	<i>Magnolia denudata</i> × <i>salicifolia</i>	木兰	Magnolia
43	<i>Magnolia ernestii</i>	含笑属	Michelia
44	<i>Magnolia foveolata</i>	含笑属	Michelia
45	<i>Magnolia figo</i>	含笑花	banana shrub
46	<i>Magnolia grandiflora</i>	南方木兰	southern magnolia
47	<i>Magnolia kobus</i>	皱叶木兰	kobus magnolia
48	<i>Magnolia liliiflora</i>	紫木兰	purple magnolia
49	<i>Magnolia</i> × <i>loebneri</i>	洛伯纳木兰	Loebner magnolia

50	<i>Magnolia maudiae</i>	含笑属	Michelia
51	<i>Magnolia salicifolia</i>	茴香木兰	anise magnolia
52	<i>Magnolia × soulangeana</i>	碟木兰	saucer magnolia
53	<i>Magnolia stellata</i>	星木兰	star magnolia
54	<i>Magnolia × thompsoniana</i>	木兰	Magnolia
55	<i>Manglietia insignis</i>	红色莲花树	red lotus tree
56	<i>Parakmeria lotungensis</i>	东部快乐莲花树	eastern joy lotus tree
夹竹桃科(Apocynaceae)			
57	<i>Nerium oleander</i>	夹竹桃	Oleander
山毛榉科(Fagaceae)			
58	<i>Nothofagus obliqua</i>	钟花山毛榉	roble beech
木犀科(Oleaceae)			
59	<i>Osmanthus decorus</i>	桂花	Osmanthus
60	<i>Osmanthus delavayi</i>	特拉佛桂花	Delavay Osmanthus
61	<i>Osmanthus fragrans</i>	芳香橄榄	sweet olive
62	<i>Osmanthus heterophyllus</i>	冬青橄榄	holly olive
63	<i>Fraxinus latifolia</i>	阔叶白蜡木	Oregon ash
伞形科(Umbelliferae)			
64	<i>Osmorhiza berteroi</i>	野胡萝藦	sweet cicely
蔷薇科(Rosaceae)			
65	<i>Physocarpus opulifolius</i>	九层皮	ninebark
66	<i>Prunus lusitanica</i>	葡萄牙月桂樱桃	Portuguese laurel cherry
67	<i>Prunus laurocerasus</i>	桂樱	English laurel
68	<i>Pyracantha koidzumii</i>	福尔摩沙火棘	Formosa firethorn
69	<i>Rosa</i>	杂交玫瑰	hybrid roses
70	<i>Rosa rugosa</i>	玫瑰	rugosa rose
71	<i>Rubus spectabilis</i>	美洲大树莓	salmonberry
海桐花科(Pittosporaceae)			
72	<i>Pittosporum undulatum</i>	维多利亚海桐	Victorian box
茶藨子科(Grossulariaceae)			
73	<i>Ribes laurifolium</i>	醋栗	bayleaf currant
山茶科(Theaceae)			
74	<i>Schima wallichii</i>	木荷	Chinese guger tree
红豆杉科(Taxaceae)			
75	<i>Taxus brevifolia</i>	太平洋紫衫	pacific yew
76	<i>Taxus × media</i>	紫衫	yew
77	<i>Torreya californica</i>	加州榧	California nutmeg
漆树科(Anacardiaceae)			
78	<i>Toxicodendron diversilobum</i>	毒栎	poison oak
小檗科(Berberidaceae)			
79	<i>Vancouveria planipetala</i>	红杉	redwood ivy
豆科(Leguminosae)			
80	<i>Cercis chinensis</i>	中国紫荆	Chinese redbud
鼠李科(Rhamnaceae)			
81	<i>Ceanothus thyrsiflorus</i>	加州紫丁香	blueblossom
芸香科(Rutaceae)			
82	<i>Choisya ternate</i>	墨西哥桔	Mexican orange

b) Animal and Plant Health Inspection Service, United States Department of Agriculture, 2010. 树流感相关的寄主植物, 这些植物的特点是它们也是以自然方式感染, 并经由聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)检验发现栎树猝死病菌