

# 基于 Maxent 模型的原种红椿适生区 变迁预测及在引种区划上的应用\*

张春华<sup>1</sup>, 和 菊<sup>2</sup>, 孙永玉<sup>1</sup>, 李 昆<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. 云南林业科学院, 云南 昆明 650241)

**摘要:** 利用原种红椿 (*Toona. ciliata* Roem. var. *ciliate*) 在云南实际分布数据及 19 个生物气象因子数据 Max-Ent 软件对其在当代、未来 (2050、2070 s) 气候条件下的适生区分布及面积 (包括云南省和全国 2 种区域尺度) 进行预测。原种红椿最大熵模型平均训练 AUC 值、测试 AUC 值分别为 0.820、0.826, 表明该模型对它们适生区的预测精度能达较好水平。最暖季度降水量、昼夜温差月均值、年均温变化范围、最暖季度平均温度、最湿季度降水量、最冷季度平均温度、最冷月最低温、最湿季度平均温度、年均温原种红椿分布的主要因子, 在云南省尺度下原种红椿的适生区, 特别是中、高度适生区与实际分布高度一致, 对它们在该区域内的人工林发展区域的选择具有直接指导意义。在全国尺度下, 适生区范围和面积可能大于实际分布, 但中、高度适生区与实际分布记录相似度较高, 可为其物种保护、异地引种保存提供借鉴作用。另外, 与当代相比未来的适生面积变化不大, 但有一定幅度增加, 说明全球变暖有利于原种红椿繁衍 (至少无负面影响)。

**关键词:** 原种红椿; MaxEnt; 全球变暖; 适生区变迁

**中图分类号:** S 718.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2018)01-0164-10

原种红椿 (*Toona. ciliata* Roem. var. *ciliate*) 是红椿 (*Toona. ciliata* Roem) 的 5 个变种之一, 与其它变种最明显的区别是小叶基部一侧圆型、一侧楔型, 表面无毛, 背面仅脉腋具毛束, 其余无毛。因心材呈褐色、纹理漂亮、质适中、机械加工性能好、尺寸稳定、经久耐腐, 是高档家具、装饰、雕刻、乐器优良用材, 树皮是烤胶的重要来源<sup>[1-2]</sup>。由于生境破碎、人为破坏、过度开发利用天然植株数量减少, 5 个变种以红椿总称列入我国第一批濒危保护植物名录<sup>[3]</sup>。尽管红椿的种苗培育技术、幼林施肥、造林技术上取得了一定成果<sup>[4]</sup>, 目前的研究成果仅限于少量科学试验林<sup>[5-6]</sup>, 且受缺乏人工林发展的气候相似性基础研究的制约, 导致其速生丰产人工林发展受阻。MaxEnt 最大熵生态模拟模型可在物种对水热条件要求层面精准预测树种适生区<sup>[7-8]</sup>, 且精度高于目前常用的 Bioclim、Climex、Domain、Garp

生态位模拟模型<sup>[9-10]</sup>, 可快速依据气候相似性原理解决某一树种的适地适树的长期选择过程<sup>[11]</sup>。本文基于原种红椿 (云南) 实际分布点数据, 对其在云南省和中国尺度上的潜在分布区及在未来几十年中随全球气候变暖大背景下的适生区变迁进行研究, 为原种红椿原地保存、异地引种、人工林的发展提供理论支持。

## 1 材料与方法

**1.1 原种红椿分布数据收集与整理** 于 2015 年 7—9 月, 依据《云南植物志》和《云南树木图志》对红椿在云南省的分布情况进行实地调查。地势平坦地带每 80~100 km 调查 1 次 (种名和经纬度), 而在海拔变化较大的山区则海拔每变化 50~80 m 调查 1 次, 区域内存在胸径大于 60 cm 的个体则认为该区域其原生分布区。并根据 MaxEnt 软件型的要

\* 收稿日期: 2017-01-04

基金项目: 林业行业专项 (201304202)。

作者简介: 张春华 (1975-), 男, 云南人, 硕士, 主要从事植被恢复与森林培育研究。E-mail: cafzhang@163.com。

通信作者: 李 昆 (1958-), 男, 云南人, 博士, 主要从事植被恢复与森林资源培育研究。E-mail: cailikun@163.com。

求在 excel 中整理成只包含有物种名、经度、纬度 CRV 格式文件<sup>[12]</sup>。

**1.2 气候数据查询与获取** 研究所需当代 (1950—2000 年)、未来 (2050 s 和 2070 s (RCP2.6 情景)) 气候数据从 World Clim (<http://www.world-clim.org/>) 下载空间分辨率为 30 arc-seconds (相当 1 km<sup>2</sup>), 由美国环境系统研究公司 (Environmental Systems Research Institute, Inc., 简称 ESRI 公司) 提供的基于 CNRM-CM3 大气环流模型气候数据, 所包括生物气候指标见表 1. 并应用 Arc-gis10 在 1:400 万云南省和中国边界图提取云南省和中国当代及未来气候图层, 也被用于后继适生区面积计算及分析中。

**1.3 环境因子筛选** 为了选择能为模型贡献更大的预测变量, 消除变量之间多重线性相关, 建立一个具有较少变量性能更好的模型, 对物种分布记录地的 19 个生物气候因子和 1 个地形因子进行皮尔逊相关系数 (Cross-correlations) 计算. 只有相关系数大于 0.8 的 9 个变量 (alti、bio1、bio4、bio6、bio9、bio10、bio11、bio18、bio19) 保留用于后继分析研

究<sup>[13-14]</sup>。

**1.4 最大熵模型 (MaxEnt) 构建** 将分布点位文件 (CRV 格式) 作为样点 (samples)、云南省行政范围内当代 7 个环境变量作为样点环境图层 (environmental layers) 导入 MaxEnt v3.3.3.k<sup>[15]</sup> 来建立原种红椿适生区分布模型. 利用此模型对云南省未来 (2050、2070 s) 和将全国当代、未来 (2050、2070 s) 的适生区情况进行预测. 软件设置除最大叠代次数设为 5 000 次及 25% 分布点作为随机测试集外, 其它为系统默认设置. 模型运行输出结果为适生概率介于 0~1 之间的 ASC 格式的栅格文件. 为了提高模型精准性, 取 10 次运算结果的 AUC 平均值 (训练和测试) 作为评价模型预测精度的标准; 其值越大, 说明预测精度越高<sup>[7-9, 11]</sup>. 参照 Hewitt G 方法<sup>[16]</sup> 用受试者工作曲线 (receive operating characteristic curve, ROC) 分析模型预测精度; ROC 曲线下面积 (area under the curve, AUC) 的大小与模型预测精度呈正相关. 另参照 HILL 方法<sup>[17]</sup> 应用模型自带的刀切法 (Jack knife test) 对各变量因子进行对模型贡献进行评估。

表 1 生物气候指标

Tab.1 Bioclimate variables

代码	描述	代码	描述
bio1	年均温 Annual mean temperature	bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest quarter
bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean diurnal temperature range	bio12	年均降水量 Annual average precipitation
bio3	等温性 Isothermality [( Bio2 /Bio7) ×100]	bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month
bio4	温度季节性变化的标准差 Standard deviation of temperature seasonal change	bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month
bio5	最暖月最高温 Max temperature of the warmest month	bio15	降水量变异系数 CV of precipitation
bio6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	bio16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter
bio7	年均温变化范围 Range of annual temperature	bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	bio18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter	bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	alti	海拔 Altitude

**1.5 原种红椿适生区分布预测** 应用最大熵模型的 10% 训练集阈值 (percentile training presence 10%) 将预测结果为 0~1 的连续分布概率 ( $P$ ) 划分为适生区和非适生区 ( $P \leq 10\%$  训练集阈值为非适生区,  $P > 10\%$  训练集阈值为适生区), 再将适生区自然三等分来划分低、中、高适生区<sup>[18]</sup>.

## 2 结果与分析

**2.1 MaxEnt 模型评价及适生区等级划分** 研究得到原种红椿适生区分布最大熵模型的平均训练 AUC、测试 AUC 分别为 0.820、0.862, 根据 Swets 提出的模型评价标准<sup>[19]</sup>, 表明该模型对它们适生区的预测精度能达较好水平, 但达不到优级.

刀切法 (Jack knife test) 检验结果 (图 1) 表明最冷季度平均温度 (bio11) 提供增益率最大, 说明当使用独立 bio11 时能比其他变量所包含更有用的信息. 年均温 (bio1)、最干季度平均温度 (bio9)、最暖季度平均温度 (bio10)、海拔 (alti)、最冷月最低温 (bio6) 有适度的增益; 而温度季节性变化的标准差 (bio4)、最冷季度降水量 (bio19)、最暖季度降水量 (bio18) 在单独使用时增益较低, 表明它们本身没有包含很多信息. bio9、bio11、bio6 是影响原种红椿适生区分布的最重要因子, 对模型的贡献率分别为 30.2%、19.5%、12.3%; 其次为 bio19 (8.8%)、bio1 (7.5%)、bio18 (7.4%)、bio4 (7.4%)、bio10 (4.4%)、alti (2.5%). 与前人研究结果<sup>[20]</sup> (海拔对植物地理分布有较大影响) 相比, 海拔对模型的贡献率较小. 另外, 在影响原种红椿适生区分布的 9 个环境因子中, 温度因子占 6 个, 且它们对模型的

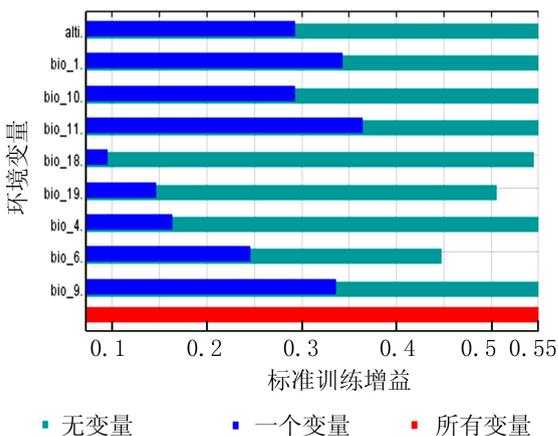


图 1 标准训练增益

Fig.1 Regularized training gain

累积贡献率 72.3%; 降水因子仅有 2 个, 占 16.2%. 这说明温度是控制原种红椿适生区分布的重要因子, 降水条件对其分布影响次之, 而海拔对其影响最小. 这与该树种实际分布 (干热河谷至热带雨林边缘) 是一致的<sup>[2]</sup>.

物种适生区的发生概率与环境因子密切相关, 图 2 说明了 9 个环境变量对原种红椿适生区分布概率的响应. 根据响应曲线, 原种红椿适生区的环境条件为海拔 500~2 000 m, 这与《云南植物志》对其分布海拔记载是一致的; 年平均温度大于 12 °C、温度季节性变化的标准差小于 8.5 °C、最冷月最低温大于 -5 °C、最干季度平均温度大于 0 °C、最暖季度平均温度大于 10 °C、最冷季度平均温度大于 0 °C、最暖季度降水量大于 200 mm、最冷季度降水量大于 20 mm 均符合其是热带、亚热带树种生态习性<sup>[2]</sup>.

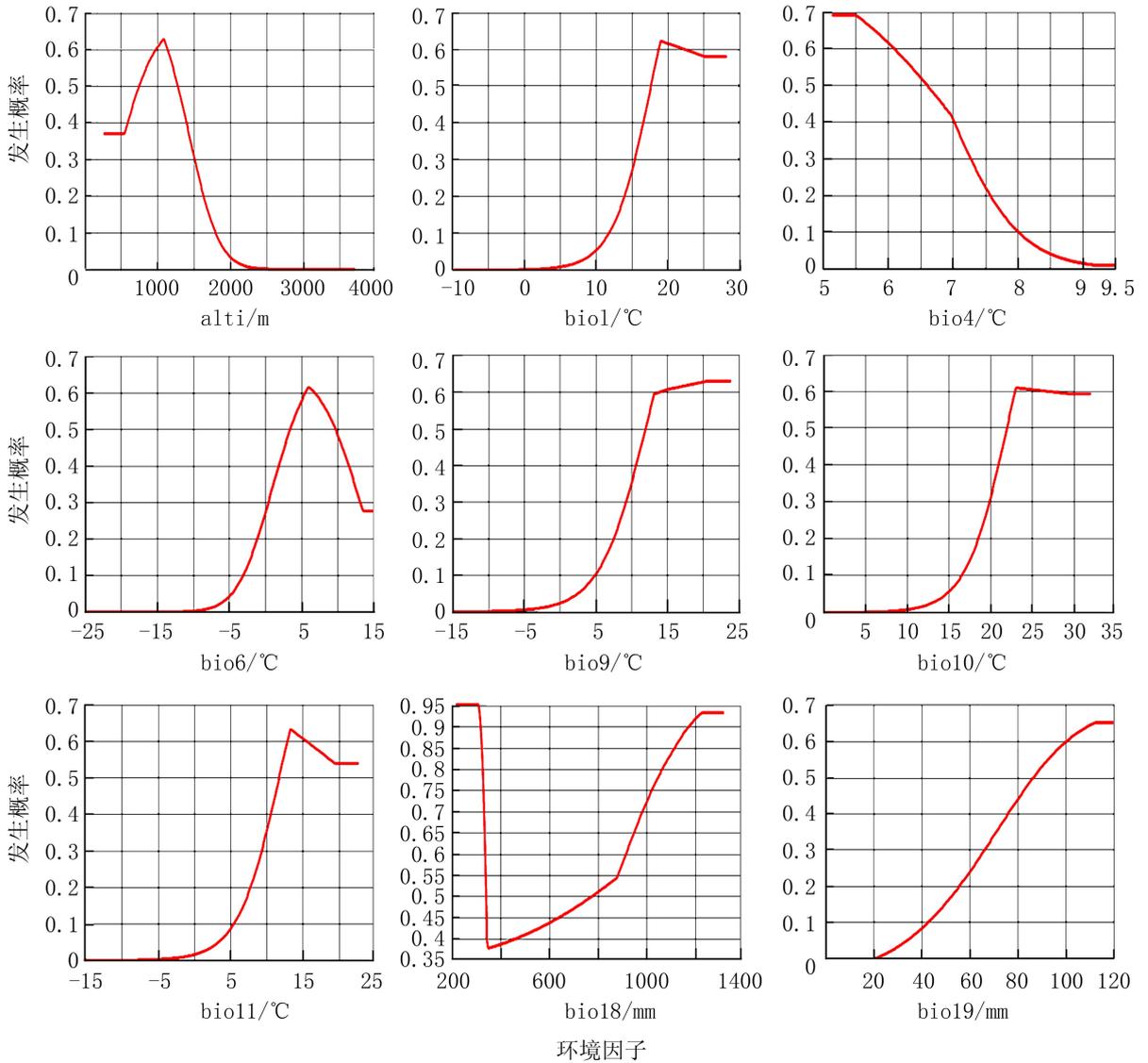
MaxEnt 模型 10% 训练阈值为 0.229, 根据模型模拟得到的分布概率 ( $P$ ) 图层, 将适生概率低于 10% 训练阈值的区域当为非适生区, 而适生概率在 10% 训练阈值至 1 区间为适生区, 再用自然三等份法将适生区区划分为: 低度适生区 ( $0.229 < P \leq 0.486$ )、中度适生区 ( $0.486 < P \leq 0.743$ )、高度适生区 ( $0.743 < P \leq 1$ ).

### 2.2 模型的应用

#### 2.2.1 当代气候条件下原种红椿在云南省适生区

根据原种红椿在云南省的分布 (图 3(a)), 应用 MaxEnt 软件对其在云南省的适生区进行模拟. MaxEnt 软件模拟结果显示原种红椿在云南适生总面积为 180 599 km<sup>2</sup> (表 2), 占云南省国土面积的 45.84%. 广泛分布于云南省 16 州 (市), 但主要集中于金沙江、怒江、澜沧江流域以及瑞丽江、南盘江流域的低海拔地区; 迪庆州、昭通市、曲靖市和文山州只有少量低适生区. 其中, 高度适生区面积 2 214 km<sup>2</sup>、占总适生面积的 1.23%, 主要分布在德宏州、临沧市、普洱市; 中度适生区面积 60 511 km<sup>2</sup>、占总适生面积的 33.51%, 分布同高适生区; 低度适生区面积 117 874 km<sup>2</sup>、占总适生面积的 65.27%, 分布区较中适生区扩张至全省 (图 3(b)).

模型预测结果与原种红椿的分布记载<sup>[21]</sup> 中的昆明市、丽江市无分布有出入外, 在其它州市是高度一致的. 根据实地核查, 处于金沙江沿岸的昆明市 (禄劝县)、丽江市 (华坪县、永胜县) 有实际分布, 是原种红椿分布新记录地.



alti:海拔(m);bio1:年均温(°C);bio4:度季节性变化的标准差;bio6:最冷月最低温(°C);bio9 最干季度平均温度(°C);bio10 最暖季度平均温度(°C);bio11:最冷季度平均温度(°C);bio18:最暖季度降水量(mm);bio19 最冷季度降水量(mm)

图 2 原种红椿适生分布模型 9 个变量因子响应曲线

Fig.2 Response curves of 9 environmental variables in *Toona. ciliata* Roem. var. *ciliate*'s habitat distribution model

表 2 不同年代原种红椿在云南和全国的适生区预测

Tab.1 Predicted suitable area for *Toona. ciliata* Roem. var. *ciliate* under different decade in Yunnan and China

区域	年代	总适生区/km <sup>2</sup>	低度适生区/km <sup>2</sup>	中度适生区/km <sup>2</sup>	高度适生区/km <sup>2</sup>
云南	1995—2000	180 599	117 874	60 511	2 214
	2050 s	203 191	120 844	77 997	4 350
	2070 s	21 1775	125 254	83 915	2 605
全国	1995—2000	1 600 422	576 540	832 403	191 479
	2050 s	2 113 131	990 157	664 849	458 124
	2070 s	2 009 029	990 523	664 394	354 112

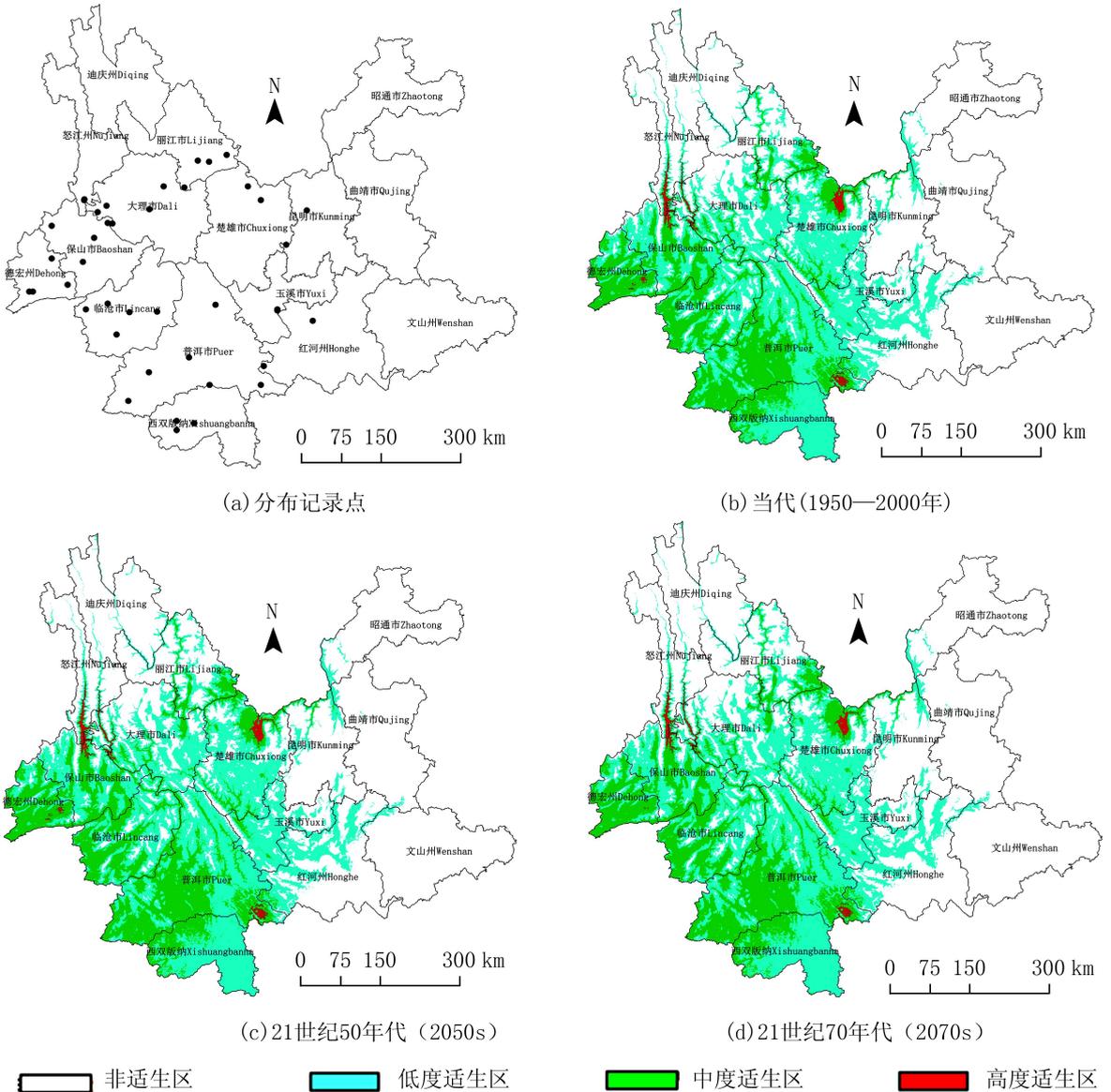


图 3 分布记录点及不同时期在云南适生区分布预测

Fig.3 Sample record points and predicted distribution map under different decade in Yunnan

2.2.2 未来气候条件下原种红椿在云南省适生区预测 21 世纪 50 年代,原种红椿在云南省范围内的适生区总面积是当代的 1.13 倍,为 203 191  $\text{km}^2$ ,预计能覆盖全省国土面积的 51.57%。其中,高度适生区面积 4 350  $\text{km}^2$ ,是当代的 1.29 倍,占总适生面积的 2.14%;中度适生区面积 77 997  $\text{km}^2$ ,是当代的 1.29 倍,占总适生面积的 38.39%;低度适生区面积 120 844  $\text{km}^2$ ,占总适生区生面积的 59.47%,是当代的 106.26%(图 3(c))。

21 世纪 70 年代,原种红椿在云南的适生区总面积是当代的 1.17 倍,为 211 775  $\text{km}^2$ ,预计能覆盖

全省国土面积的 53.75%。其中,高度适生区面积为 2 605  $\text{km}^2$ ,是当代的 1.18 倍,占总适生面积的 1.23%;中度适生区面积为 83 915  $\text{km}^2$ ,是当代的 1.39 倍,占总适生面积的 39.62%;低度适生区面积为 125 254  $\text{km}^2$ ,是当代的 1.72 倍,占总适生面积的 59.14%。分布区与当代及 2050 s 相近(图 3(d))。

2.2.3 原种红椿在全国区域尺度下适生区变迁 根据原种红椿在云南省的分布(图 3(a)),应用 MaxEnt 软件对其在全国范围适生区进行模拟。当代,原种红椿在中国的适生总面积为 1 600 422  $\text{km}^2$ (表 2),占我国国土面积的 16.67%(图 4(b))。其

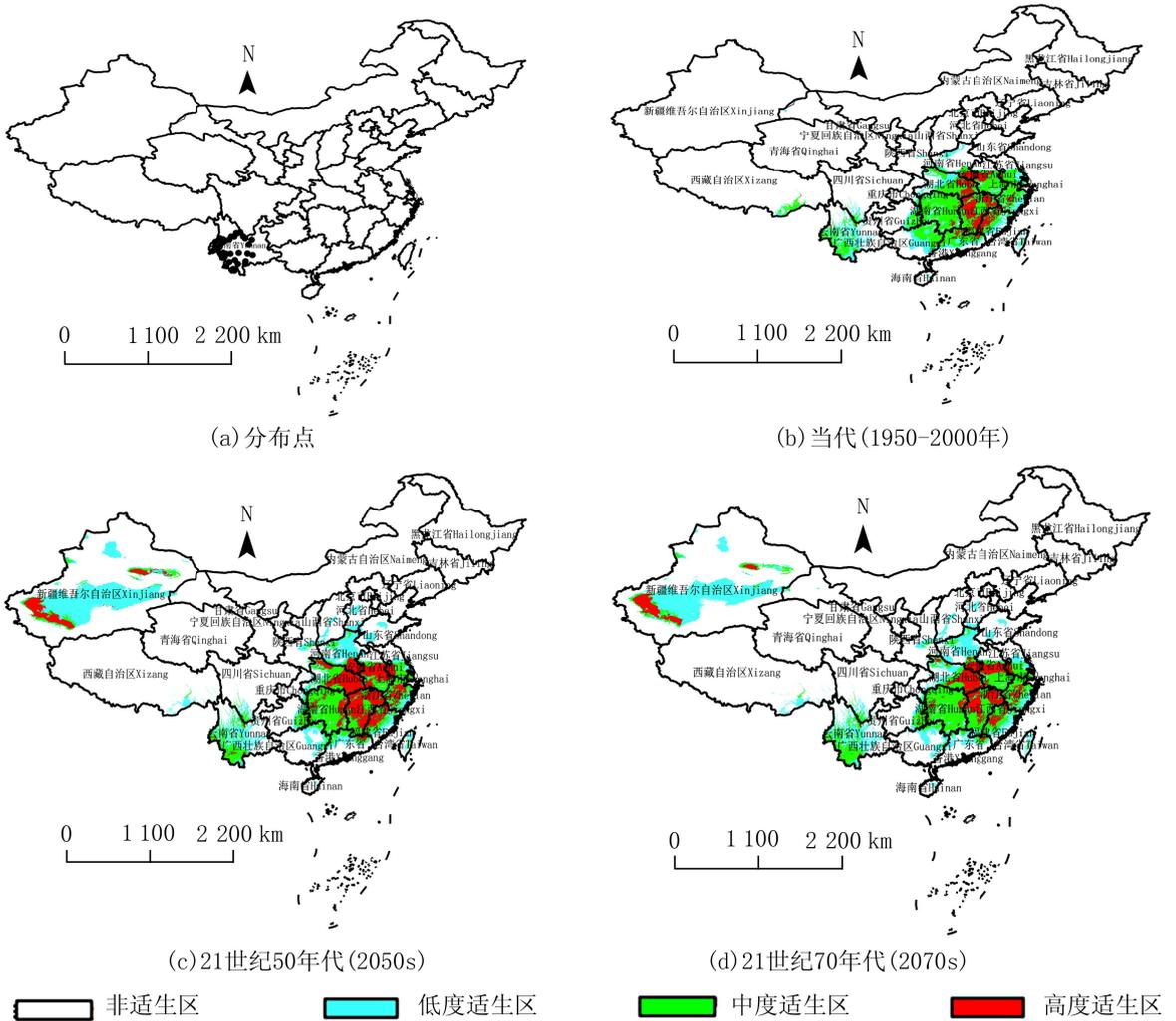


图 4 分布记录点及不同时期在中国适生区分布预测

Fig.4 Sample record points and predicted distribution under different decade in China

中,高度适生区面积 191 479 km<sup>2</sup>,占其适生总面积的 11.96%,分布于华中(河南省、湖北省、安徽省、湖南省、江西省)、华东(江苏省、浙江省、福建省),华南(广东省)、西南(云南省和贵州省)虽有分布但面积较小;中度适生区面积 832 403 km<sup>2</sup>,占其适生总面积的 52.01%,分布于我国的西南(云南省、贵州省、四川省、西藏自治区)、华南(广东省、广西壮族自治区、海南省)、华东(上海市、台湾省)、华中(河南省、湖北省、安徽省、湖南省、江西省);低度适生区面积 576 540 km<sup>2</sup>,占其适生总面积的 36.02%,分布区较中适生区扩大到西北(陕西省)。资料记载西藏自治区-四川省-陕西省-安徽省-浙江省一线以南(不包括重庆市、湖北省和台湾省)是原种红椿在我国主要分布区域<sup>[21]</sup>;而研究结果

显示其分布北界线为西藏自治区-四川省-陕西省-河南省-安徽省-江苏省一带以南(南至海南省和台湾省),适生分布区域稍大于资料记载。

21 世纪 50 年代,原种红椿在中国的适生区总面积是当代 1.32 倍,面积达 2 113 131 km<sup>2</sup>,预计能覆盖全国国土面积的 23.58%。分布区在当代基础上扩张至华东地区(山东省)、华北地区(山西省、河北省、北京市、天津市)及西北地区(新疆维吾尔自治区)。其中,高度适生区面积 458 124 km<sup>2</sup>,是当代的 2.39 倍,占其适生总面积的 21.68%;中度适生区面积 664 849 km<sup>2</sup>,是当代的 79.87%,占其适生总面积的 31.46%;低度适生区面积为 990 157 km<sup>2</sup>,是当代的 1.72 倍,占其适生总面积的 46.86%(图 4 (c))。

21 世纪 70 年代,原种红椿在中国的适生区总面积是当代 1.26 倍,面积为 2 009 029 km<sup>2</sup>,预计能覆盖云南省国土面积的 22.06%。其中,高度适生区面积为 354 112 km<sup>2</sup>,是当代的 1.84 倍,占其适生总面积的 17.63%;中度适生区面积为 664 394 km<sup>2</sup>,是当代的 79.81%,占其适生总面积的 33.07%;低度适生区面积为 990 523 km<sup>2</sup>,是当代的 1.72 倍,占其适生总面积的 49.30%。适生区分布与 2050 s 相近类似(图 4(d))。

### 3 结 论

**3.1 原种红椿在云南的分布特点** 基于分布数据调查结果及文献记载,原种红椿在云南主要分布于海拔 1 900 m 以下的低海拔地区,在南部地区的高大山体上可分布至海拔 2 000 m 区域(无量山、哀牢山),其分布最低海拔为 570 m(西双版纳州)。其分布范围大至为南至西双版纳州,北至丽江市和迪庆州境内的金沙江及支流;西至德宏州,东至曲靖市金沙江沿岸。分布区涵盖了云南省境内的金沙江、怒江、澜沧江、瑞丽江、南盘江等主要水系流域,生长良好。分布区涵盖了云南省境内的金沙江、怒江、澜沧江、瑞丽江、南盘江等主要水系流域。

**3.2 影响原种红椿分布的气候因子** 气候、土壤、坡度、坡向等环境条件对植物分布均有影响,但气候是主要因子<sup>[22-23]</sup>,也是众多植物引种栽培的前提条件<sup>[24-27]</sup>。研究基于气候相似性原理,应用原种红椿在云南的实际分布构建其适生区分布最大熵模型,模型的平均训练 AUC (0.831)、测试 AUC (0.827) 以及预测结果与原种红椿在云南省的实际分布高度一致,表明用该模型预测未来在云南省的适生区、全国当代、未来适生区分布的结果是可信的。应用 Jack knife test 对 9 个生物气象因子对模型的贡献率进行检验,影响原种红椿适生区分布的环境因子有最冷季度平均温度、年均温、最干季度平均温度、最暖季度平均温度、海拔、最冷月最低温、温度季节性变化的标准差、最冷季度降水量、最暖季度降水量;且温度是主要因子,降水为次要因子,海拔对其影响最小。

**3.3 原种红椿在未来的适生区变迁** 在全球变暖的大背景下,未来的平均温度较当代有继续升高的可能<sup>[28-29]</sup>。对原种红椿未来几十年的适生区预测

结果表明:原种红椿的适生区有一定幅度增加,但面积变化不大,说明它对未来全球变暖反应不敏感。

在云南省区域尺度下,21 世纪 50 年代和 80 年代的适生区面积是当代的 1.13~1.17 倍,云南省 16 个州(市)均有分布。但当代气候条件下的怒江、澜沧江流域高适生区在未来气候条件演替为中度适生区;德宏州南部、临沧市西部、普洱市中部则由当代的中度适生区演变为高度适生区,普洱市南部高度适生区面积扩大至当代的 2.15~3.81 倍。在全国区域尺度下,21 世纪 50 年代和 80 年代的适生区面积是当代的 1.25~1.32 倍,分布区在当代基础上扩张至华东地区(山东省)、华北地区(山西省、河北省、北京市、天津市)及西北地区(新疆维吾尔自治区),但多以低度适生区为主。虽在新疆维吾尔自治区有一定的适生区,但与中国南、西南地区的大面积分布呈现为不连续分布;这可能与研究只考虑了水热条件有关。在当代,原种红椿在四川省仅分布于川滇交界的金沙江河谷及支流河谷地带,但在气候变化过程中却始终保持着中度适区特性。在未来气候条件下,西南地区的西藏自治区、广西壮族自治区只留存了少量的低度适生区;大面积的中度适生区在广东省消失,仅在其东部存有少量的中高度适生区。而河南省、湖北省、安徽省、湖南省、江西省、江苏省、浙江省、福建省、云南省和贵州省的中度、高度适生区面积随气候变化有一定幅度波动,但 2 者分布区域及面积之和大致相近,为 1 000 000 km<sup>2</sup> 左右。

**3.4 原种红椿人工发展区域选择基础及目标** 云南省大理市鹤庆县龙开口镇原种红椿个体数量多而集中,其中 256 株胸径大于 60 cm,420 株胸径介于 40~59 cm 之间,635 株胸径介于 20~39 cm 之间,胸径小于 19 cm 植株数量 1 500 余株,是不常见的集中分布区之一,且长势良好。另外,在普洱市、临沧市、德宏州、西双版纳州分布的原种红椿无病虫害,生长健壮。原种红椿适生区等级划分结果上述地区同为中度适生区。因此,中度适生等级以上区域是原种红椿理想生长、繁衍场所。

云南省西南至西部地区的西双版纳州、普洱市、临沧市、德宏州及怒江河谷、澜沧江河谷和北部金沙江河谷区域的适生等级与未来气候条件下均

为中度适生等级以上,是云南省发展原种红椿人工的理想区域.在全国区域尺度下,华中(河南省、湖北省、安徽省、湖南省、江西省)、华东(江苏省、浙江省、福建省),西南(云南省和贵州省)地区在当代和未来气候条件下的中度以上适生区其本一致,是其原地保存、资源保护的重点区域.但原种红椿树冠较大(多为 100 m<sup>2</sup> 左右),宜采用宽行大株距(即行距为 15~20 m,株距 6~8 m),并与新农村建设工程中的移民搬迁、路、水网改造<sup>[30-32]</sup> 同步实施,在实现环境美化的同时达到物种保护、珍贵用材树种培育等社会、经济、生态效益最大化目标.

## 参考文献:

- [1] 西南林学院.云南树木图志[M].昆明:云南科技出版社,1988.  
Southwest Forestry College. Iconographia arbororum Yunnanicorum[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1988.
- [2] 云南省植物研究所.云南植物志(第一卷)[M].北京:科学出版社,1977.  
Yunnan Institute of Botany. Flora of Yunnan (volume 1) [M]. Beijing: Science press, 1977.
- [3] 傅立国.中国植物红皮书[M].北京:科学出版社,1991.  
FU L G. China rare and endangered plants[M]. Beijing: Science Press. 1991.
- [4] 周火明,陈松,付翠林,等.红椿和毛红椿栽培与药用研究进展[J].农业科学与技术,2015(4):722-726.  
ZHOU H M, CHEN S, FU C L, et al. Research progress in cultivation and pharmaceutical chemicals of *Toona ciliata* and *Toona ciliata* var. *pubescens* [J]. Agronomy and Horticulture, 2015(4):722-726.
- [5] 邹高顺.珍贵速生树种红椿与毛红椿引种栽培研究[J].福建林学院学报,1994(3):271-276.  
ZOU G S. The study on introduction and cultivation on valuable fast-growing species of *Toona ciliates* and *Toona vest* [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1994(3):271-276.
- [6] 沈承权,陈东,刘度南,等.红椿引种栽培试验[J].四川林业科技,1991(1):71-74.  
SHEN C Q, CHENG D, LIU D N, et al. Cultivation experiment on *Toona sureni* [J]. Sichuan Forestry Science and Technology, 1991(1):71-74.
- [7] YI Y J, CHENG X, YANG Z F, et al. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H riparia*, Lour) in Yunnan, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 92:260-269.
- [8] YOUNG B E, FRANKE I, HEMANDEZ P A, et al. Using spatial models to predict areas of endemism and gaps in the protection of andean slope birds [J]. Auk, 2016, 126(3):554-565.
- [9] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. Ecography, 2006, 29(2):129-151.
- [10] 孙文涛,刘雅婷.生物入侵风险分析的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(7):233-236.  
SUN W T, LIU Y T. Research progress of risk analysis of biological invasion [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(7):233-236.
- [11] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4):231-259.
- [12] WITTMANN M E, BARNES M A, JERDE C L, et al. Confronting species distribution model predictions with species functional traits [J]. Ecology & Evolution, 2016, 6(4):873-879.
- [13] YI Y J, CHENG X, YANG Z F, et al. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H riparia*, Lour) in Yunnan, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 92:260-269.
- [14] HERKT K M B, BARNIKEL G, SKIDMORE A K, et al. A high-resolution model of bat diversity and endemism for continental Africa [J]. Ecological Modelling, 2016, 320:9-28.
- [15] SHABANI F, KUMAR L. Sensitivity analysis of Climex parameters in modeling potential distribution of *Phoenix dactylifera* L [J]. Plos One, 2014, 9(4):e94867.
- [16] HILL M P, HOFFMANN A A, MCCOLL S A, et al. Distribution of cryptic blue oat mite species in Australia: current and future climate conditions [J]. Agricultural & Forest Entomology, 2012, 14(2):127-137.
- [17] HEWITT G. The genetic legacy of the Quaternary ice ages [J]. Nature, 2000, 405(6789):907-13.
- [18] 周天华,钱增强,王勇.基于最大熵值模型的山白树适生区分布变化研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015(9):51-56.  
ZHOU T H, QIAN Z Q, WANG Y. Distribution change in suitable area of *Sinowilsonia Henryi* Hemsl. Baesd on

- Maximum Entropy Model[J]. Journal of Northwest A & F University: Nat Sci Ed, 2015 (9): 51-56.
- [19] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 1988, 240: 1 285-1 293.
- [20] ADHIKARI D, BARIK S K, UPADHAYA K. Habitat distribution modelling fore introduction of *Ilex khasiana* Purk, a critically endangered tree species of north-eastern India Ecol Eng, 2012, 40: 37-43.
- [21] 鲁正宏. 云南香椿属植物的分类研究[D]. 昆明: 云南大学, 2009.  
LU Z H, 2009. Studies on the classification of the genus *Toona* in Yunnan [D]. Kunming: Yunnan University, 2009.
- [22] STOCKWELL D, PETERS D P. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 143-158.
- [23] GUIAN A, THUILLER W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models[J]. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1 009.
- [24] 吴海军, 杨才琼, NASIR IQBAL, 等. 日本大豆引种四川盆地的品质评价研究[J]. 草业学报, 2017, 26(1): 81-89.  
WU H J, YANG C Q, IQBAL N, et al. Evaluation of Japanese soybean varieties in the Sichuan Basin, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(1): 81-89.
- [25] 马林龙, 金孝芳, 曹丹, 等. 湖北引种高氨基酸茶树品种的绿茶适制性分析[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(2): 251-260.  
MA L L, JIN X F, CAO D, et al. Suitability for processing green tea from high amino acid content of tea introduced to Hubei Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(2): 251-260.
- [26] DEL T P, KITAJIMA A. Introduction and cultivation of Chinese hemlock (*Tsuga chinensis*) and its resistance to hemlock woolly adelgid (*Aedes tsugae*) [J]. Journal of Arboriculture, 2004, 30(5): 282-286.
- [27] SHINJO T, HOSHINO M. The introduction and cultivation of tropical pasture grasses to the southwestern Islands of Japan ( II ). The effect of nitrogen fertilizer application on the yield of tropical pasture grasses [ J ]. Analyst, 1990, 107( 1270 ): 67-70.
- [28] CRUTZEN P J, MOSIER A R, SMITH K A, et al. N<sub>2</sub>O release from agro - biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels [ M ] // CRUTZEN P J. A pioneer on atmospheric chemistry and climate change in the anthropocene. Springer International Publishing, 2016: 11 191-11 205.
- [29] 王晓煜, 杨晓光, 吕硕, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅻ. 气候变暖对黑龙江寒地水稻安全种植区域和冷害风险的影响 [ J ]. 中国农业科学, 2016, 49( 10 ): 1859-1871.  
WANG X Y, YANG X G, LYU S, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China XII. The possible effects of climate warming on geographical shift in safe planting area of rice in cold areas and the risk analysis of chilling damage [ J ]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(10): 1859-1871.
- [30] 黄利斌, 张敏, 朱惜晨, 等. 苏南新农村建设村庄绿化民意调查分析 [ J ]. 浙江林学院学报, 2009, 26( 3 ): 411-416.  
HUAN L B, ZHANG M, ZHU X C, et al. Poll investigation of village landscaping in new countryside construction in South Jiangsu Province [ J ]. Journal of Zhejiang Forestry College. 2009, 26(3): 411-416.
- [31] 王显福. 水土保持在新农村建设中的地位与作用——四川省苍溪县庭园水保模式探讨 [ J ]. 中国水土保持科学, 2008, 6: 131-134.  
WANG X F. Position and function of SWC in new socialist countryside construction: discussion on courtyard SWC model in Cangxi County, Sichuan Province [ J ]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6: 131-134.
- [32] 赵凌云, 杨文武. 社会主义新农村建设与新时期水土保持工作的几点探讨 [ J ]. 中国水土保持科学, 2008, 6: 119-120.  
ZHAO L Y, YANG W W. Discussion on new socialist countryside construction and soil and water conservation work in new period [ J ]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6: 119-120.

## Prediction of distributional change of *Toona ciliata* var. *ciliate* and application in regionalization of introduction based on MaxEnt

ZHANG Chun-hua<sup>1</sup>, HE Ju<sup>2</sup>, SUN Yong-yu<sup>1</sup>, LI Kun<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Resources Insects of the Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China;

2. Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650204, China)

**Abstract:** Based on the current distribution of *Toona ciliata* Roem. var. *ciliate* in Yunnan Province, 19 bioclimate factors and the maximum entropy (MaxEnt), the potential distribution area in Yunnan and China under the current and future (2050s, 2070s) climatic situation was predicted. The mean training AUC and testing AUC of MaxEnt of the species were 0.820 and 0.826, meaning the prediction distribution was credible. Monthly mean diurnal temperature range, mean temperature of the coldest quarter, CV of precipitation, mean temperature of the driest quarter, precipitation of the driest quarter, precipitation of the warmest quarter, isothermality, mean temperature of the wettest quarter, mean temperature of the warmest quarter, mean temperature of the coldest month, standard deviation of seasonal temperature change, precipitation of the wettest month, annual mean temperature are mutual influence on the suitable habitats of *T. ciliata* Roem. var. *ciliate*. The suitable habitats, especially the moderately and highly suitable regions are highly consistent with the real distribution area, showing practical guiding significance to the development of planting forestry of *T. ciliata* Roem. var. *ciliate* in Yunnan Province. In China, the suitable habitats are larger, but the moderately and highly suitable regions are highly identical to the real distribution area, which could be used as the reference to the species protection and introduction. Furthermore, the potential habitats and areas in future will get a bit larger which illustrates that the globe warming is favorable for the development and reproduction of *T. ciliata* Roem. var. *ciliate*, or at least, has no adverse effect.

**Key words:** *Toona ciliata* var. *ciliate*; MaxEnt; global warming; distributional change