

DOI: 10.5846/stxb201408031544

刘少军, 周广胜, 房世波. 中国橡胶种植北界研究. 生态学报, 2016, 36(5): - .

Liu S J, Zhou G S, Fang S B. A preliminary study of the northern planting boundary of rubber tree cultivation in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

中国橡胶种植北界研究

刘少军^{1,2}, 周广胜^{3,*}, 房世波³

1 海南省气象科学研究所, 海口 570203

2 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要: 基于中国橡胶的地理分布信息及其相应的气候资料, 结合最大熵模型, 明确了影响中国橡胶种植的 5 个主导气候因子, 即最冷月平均温度、极端最低温度平均值、月平均温度 $\geq 18^\circ\text{C}$ 月份、年平均气温和年平均降水量。在此基础上, 给出了 80% 气候保证率下中国橡胶树稳产高产的种植北界, 该北界准确覆盖了目前中国橡胶主产区的实际种植区域。研究结果可为中国橡胶种植优势区域布局规划及防灾减灾提供科学决策依据。

关键词: 橡胶种植; 北界; 最大熵模型

Apreliminary study of the northern planting boundary of rubber tree cultivation in China

LIU Shaojun^{1,2}, ZHOU Guangsheng^{3,*}, FANG Shibo³

1 Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou 570203, China

2 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: The rubber tree (*Hevea brasiliensis*) originated in Brazil and was a typical tropical plant with thermophilic and hygrophilous characteristics, sensitive to strong winds. As an untraditional planting area, South China frequently sees tropical cyclones and cold-weather damage to plants. Thus, the climatic conditions were the key factor affecting the planting of the rubber tree in China. The safe northern planting boundary of the rubber tree was guided by the desire to effectively avoid cold-weather damage and strong winds. Various studies (since 1980s) on the suitability of rubber tree planting in China have discussed the northern planting boundary of the rubber tree and provided a rationale for the planting, which promoted development of the rubber tree industry in China. Rubber production was concentrated in the suitable climatic conditions, and regional layout was becoming more suitable gradually. Chinese researchers have developed cold- and wind-resistant strains of the rubber tree and a good base of rubber production. Nowadays, Hainan, Yunnan, and Guangdong Provinces in South China are suitable for rubber tree cultivation, and the amount of rubber trees is increasing continuously.

Nevertheless, climate change has seriously influenced temperature and precipitation on the global and regional scale and is expected to affect the rubber tree cultivation system. The existing research on Chinese rubber tree cultivation has been limited by the shortage of early climatic data and by the insufficient number of meteorological stations. Particularly, climatic factors that affect rubber tree cultivation have been mainly selected in accordance with practical experience, and researchers did not consider the comprehensive effects of all climatic factors on cultivation of the rubber tree. These factors influenced

基金项目: 国家自然科学基金 (41465005, 41175096, 41265007); 海南省自然科学基金项目 (20154172, 409005)

收稿日期: 2014-08-03; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

the boundary of rubber tree cultivation and are important for accurate assessment of suitability of rubber tree planting, for planning of rubber tree plantations, and for formulating response measures to climate change decision-making.

Accordingly, the five main climatic factors, i. e., mean temperature of the coldest month, mean extremely low temperature, the number of monthly days with mean temperature $\geq 18^{\circ}\text{C}$, mean annual temperature, and mean annual precipitation, were confirmed by the maximum entropy model based on the geographical distribution of rubber tree cultivation and the corresponding climatic data. The northern planting boundary of the rubber tree was selected at the 80% rate of climate guarantee, which is believed to correspond to a high and stable yield of rubber cultivation. This boundary covered the actual main production area of rubber tree plantations in China.

The maximum entropy model that we used to confirm the northern planting boundary of rubber tree plantations in China has certain advantages over other methods according to comparison with the existing research results. The maximum entropy model can fully take into account the intrinsic interactions of various factors, to a certain extent, it can overcome the interference by the artificial division factor range and then more objectively predict the potential spatial distribution of Chinese rubber tree planting. This model can prevent blind planting of rubber trees with consequent waste of human labor, materials, and financial resources. Therefore, the maximum entropy model should help to rationally choose a geographic location for rubber production. Nevertheless, the northern planting boundary of the rubber tree was ascertained to offer the 80% rate of climate resource guarantee. Thus, the northern boundary has essentially been a rubber stable and a high-yield planting boundary. Our results should facilitate scientific decision-making regarding distribution of rubber tree planting as well as disaster prevention and mitigation in China.

Key Words: rubber plantation; northern boundary; maximum entropy model

橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 原产于巴西, 具有喜温怕寒、喜微风怕强风以及喜湿润等生态习性^[1]。中国在 1904 年开始引种橡胶树, 但直到 20 世纪 50 年代初才开始尝试在北纬 18° – 24° 地区大面积种植橡胶^[2], 目前橡胶树种植已经从海南岛发展到北纬 20° 以北的广西、云南、广东、福建等地, 修正了北纬 17° 以北不能植胶的传统论断。1982 年, 中国宣告种植橡胶树北移成功, 并建立了以海南岛、西双版纳为主的橡胶生产基地, 同时在接近北纬 25° 南亚热带的一些地区也植胶成功^[3]。由于中国橡胶种植区属于非传统种植区, 气候因子是影响橡胶种植的关键因素之一^[4], 决定橡胶树北移成败的关键是否能避免寒害和风害^[1]。研究表明^[5], 橡胶树的抗寒性是确定其种植北界的生物学因素。徐其兴^[3]认为, 胶树北移的主要限制因素是由最冷月均温与极端低温共同构成的越冬条件, 并确定了橡胶树生产性植胶温度北界指标为最冷月平均温度 $>14^{\circ}\text{C}$, 极端最低温平均值 $>3^{\circ}\text{C}$ 。自 20 世纪 80 年代开始, 中国针对橡胶的种植适宜性开展了许多区划研究, 直接或间接探讨了橡胶种植的北界^[5-7]。这些研究成果有力地促进了中国橡胶种植业的发展, 橡胶生产逐步向气候条件适宜、效益较高的优势区域集中, 区域布局日趋合理, 已基本形成了海南、云南、广东三大橡胶生产优势区。

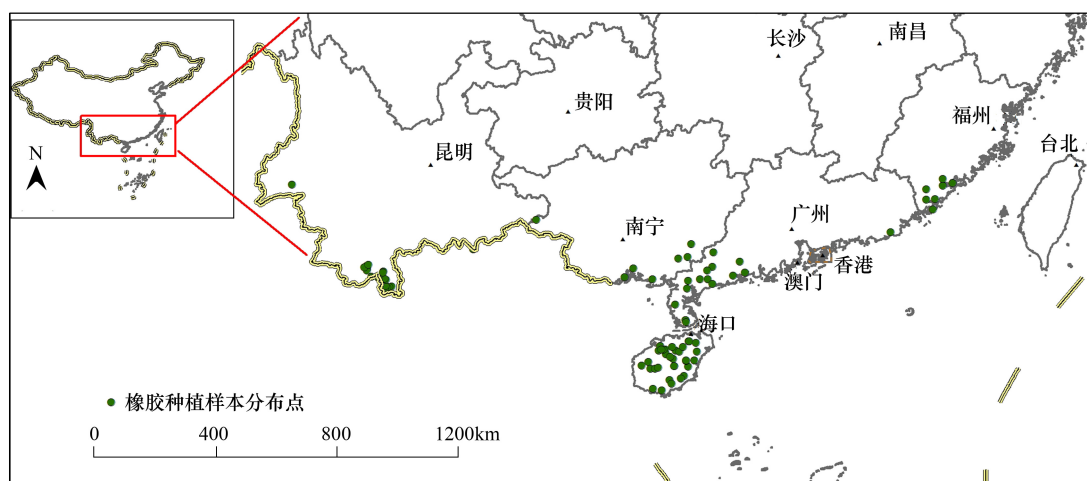
尽管如此, 以气候变暖为标志的全球环境变化已经严重地影响了全球和区域的温度与降水的变化趋势与格局, 也必将影响橡胶林种植制度。已有关于中国橡胶林种植制度的相关知识受制于早期的气候数据且气象站点数量, 特别是关于影响橡胶林种植气候因子选取主要还是基于实践经验, 也还没有考虑各气候影响因子对橡胶林种植的综合影响, 影响着中国橡胶林种植界限及适宜性的准确评估, 制约着中国橡胶林种植规划及其应对气候变化决策的制定。

为此, 本研究试图基于 1981—2010 年的气象资料和橡胶的地理分布信息, 利用最大熵模型构建中国橡胶的分布与气候因子的关系模型, 明确影响中国橡胶种植的主导气候因子, 探讨中国橡胶的种植北界, 以为中国橡胶林种植规划及科学应对气候变化提供决策依据。

1 数据和方法

1.1 数据

1981—2010 年气候标准年的中国地面气象逐日数据来源于中国气象局国家气象信息中心,包括温度、降水、风速、辐射等要素。1981—2010 年影响中国的台风灾害数据库。中国橡胶林地理分布数据来自中国数字植物标本馆(61 条)、国内外公开发表的相关论文(3 条)和实地考察数据(32 条)等,共 106 条(时间段:1954—2009 年)(图 1)。中国国界、省界和县界行政区划图来源于国家基础地理信息网站提供的 1:400 万基础地理信息数据(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。



审图号: GS (2015) 641号

图 1 中国橡胶种植分布点

Fig. 1 Samples of rubber plantation in China

1.2 研究方法

橡胶种植北界确定主要是通过橡胶种植的地理信息和潜在的气候因子,利用最大熵模型评价的各气候因子对橡胶林存在的贡献率,筛选并确定影响中国橡胶种植的主导气候因子;构建中国橡胶种植分布与气候因子的关系模型;基于构建模型给出的橡胶林存在概率,结合已有的相关研究结论^[8-12],确定中国橡胶可能种植的北界(图 2)。

1.2.1 影响橡胶种植分布的可能气候因子

水热因子是影响植被分布的主要因子。橡胶树生长发育的温度指标以平均气温计量:10℃时细胞可进行有丝分裂;15℃为组织分化的临界温度,18℃为正常生长的临界温度;20℃—30℃适应生长和产胶;其中 26—27℃时橡胶树生长最旺盛。适宜橡胶树生长和产胶的降水指标,以年降雨量在 1500mm 以上为宜。年降雨量 1500—2500 mm,相对湿度 80% 以上,年降雨日 > 150 d,最适宜于橡胶的生长和产胶。橡胶树性喜微风,惧怕强风,在不考虑强风的影响下,当平均风速 < 1.0 m/s,对橡胶树生长有良好效应;平均风速 1—1.9 m/s,对橡胶树生长无影响;平均风速 2.0—2.9 m/s,对橡胶树生长、产胶有抑制作用;平均风速 ≥ 3.0 m/s,严重抑制橡胶树的生长和产胶^[13]。影响中国橡胶树存活以及产胶量的主要自然因素为寒潮低温与台风的强风^[14-16]。徐其兴^[3]认为,胶树北移的主要限制因素是由最冷月均温与极端低温共同构成的越冬条件。因此,基于已有研究^[5-7,14-19],选取年平均降水量、最冷月平均温度、最暖

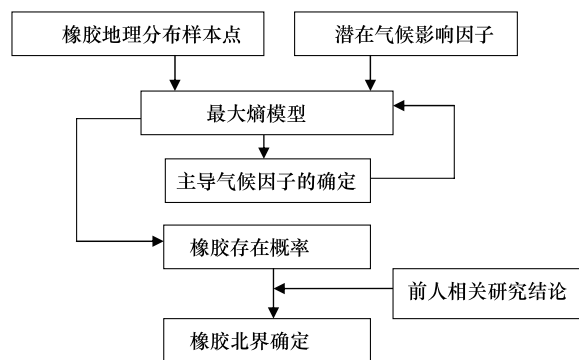


图 2 橡胶种植北界确定技术流程图

Fig. 2 Flow chart of determining northern boundary of rubber plantation

月平均温度、极端最低温度平均值、年辐射量、年平均温度、月平均气温 $\geq 18^{\circ}\text{C}$ 的月份、该区的台风影响概率、年平均风速等 9 个要素,作为影响橡胶种植分布的可能气候因子。

1.2.2 最大熵模型

熵是一个系统具有的不确定度的量度,在信息论、统计物理、热力学等中广为应用^[20]。

Jaynes^[21]于 1957 年提出了最大熵理论,最大熵模型主要是基于已有的有限信息估计未知的概率分布。最大熵统计建模是以最大熵理论为基础的一种选择模型的方法,即从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为最优的分布。在已知条件下,熵最大的事物最接近它的真实状态。因此,最大熵模型可以对物种分类和分布进行预测^[22-23]。

预测橡胶分布北界的原理为:假设橡胶树生存条件未知,判断橡胶在某地是否存在的最合理预测就是存在与不存在各占 50%。最大熵模型是选择最大熵的分布作为最优分布,估计具有同样环境变量的其他站点橡胶的存在概率,根据存在概率的大小,确定橡胶种植的可能上限^[8,24]。模型计算采用采用最大熵 MaxEnt 模型 3.3.3k 版实现 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>)。最大熵模型具体算法见参考文献^[8,23,25]。

1.2.3 模型精度检验

常用的模型评价指标有总体准确度、灵敏度、特异度、Kappa 统计量、TSS(true skill statistic)和 AUC(Area under curve)等^[26]。最大熵模型的精度检验采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)与横坐标围成的面积即 AUC 值来评价模型预测结果的精准度,AUC 值的大小作为模型预测准确度的衡量指标,取值范围为 $[0, 1]$,值越大表示模型判断力越强^[26]。AUC 值取 0.50—0.60 为失败,0.60—0.70 为较差,0.70—0.80 为一般,0.80—0.90 为好,0.90—1.0 为非常好^[27]。

2 结果分析

2.1 模型适用性检验

为了检验最大熵模型在预测橡胶种植分布区的适用性,随机选取 75%的橡胶分布点数据用于构建模型,剩下 25%的橡胶分布点用于模型的验证。通过最大熵模型和 9 个可能的气候因子构建的橡胶种植分布—气候关系模型,模型运算的结果的训练集和验证集 AUC 值分别为 0.994 和 0.989(图 3),表明所构建的模型的预测精度达到了“非常好”标准,可以用于预测橡胶种植区范围。

2.2 主导气候因子分析

将年平均降水量、最冷月平均温度、最暖月平均温度、极端最低温度平均值、年辐射量、年平均温度、月平均气温 $\geq 18^{\circ}\text{C}$ 的月份、台风影响该区域概率、年平均风速等 9 个因子转换为 ASCII 文件,坐标系为 WGS-84,作为环境变量输入到最大熵模型;将 106 个橡胶种植分布信息点数据将其按经度和纬度顺序储存成 csv 格式的文件,作为训练样本输入到最大熵模型。由于选取的 9 个影响橡胶种植区分布的可能气候因子来源于文献的分析,其在全国层次和年尺度上的适用性及其重要性需要进行进一步评估。为此,基于中国现有橡胶种植资料及其相应的气候资料,利用最大熵模型评价所选取的各可能气候因子对橡胶林存在重要性和贡献率,筛选并确定影响中国橡胶种植的主导气候因子。

基于最大熵模型的 Jackknife 模块评价可以得到,9 个潜在气候因子的重要性排序为:最冷月平均温度>极端最低温度平均值>月平均温度 $\geq 18^{\circ}\text{C}$ 月份>年平均气温>年平均降水量>台风影响概率>最暖月平均温度>

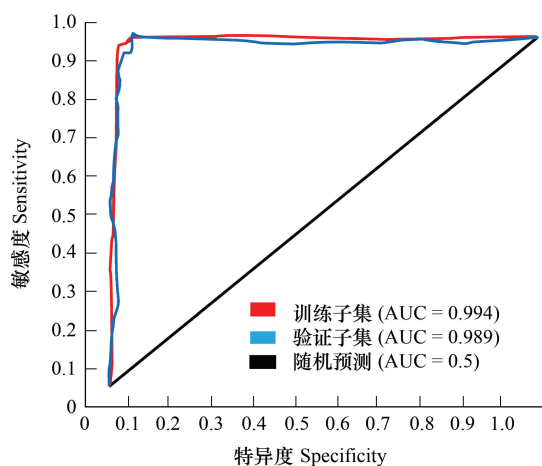


图 3 模型适用性检验 AUC 值

Fig. 3 AUC value of test on applicability of the MaxEnt model

年辐射量>年平均风速(图4)。9个可能影响气候因子对橡胶林存在的贡献率见表1。根据9个潜在因子的重要性和贡献率的大小^[8],确定影响橡胶种植的主导气候因子为最冷月平均温度、极端最低温度平均值、月平均温度≥18℃月份、年平均气温、年平均降水量,5个因子的累积贡献率为93.45%。这表明,橡胶种植分布对温度有很高的要求。

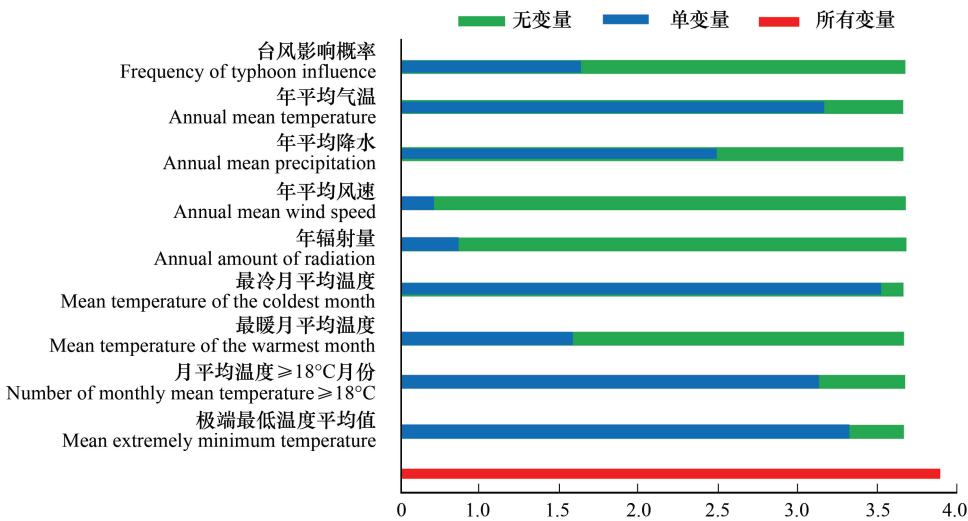


图4 基于 Jackknife 的潜在气候因子对中国橡胶种植区分布的重要性

Fig. 4 Importance of potential climatic factors to the distribution of rubber planting in China based on Jackknife

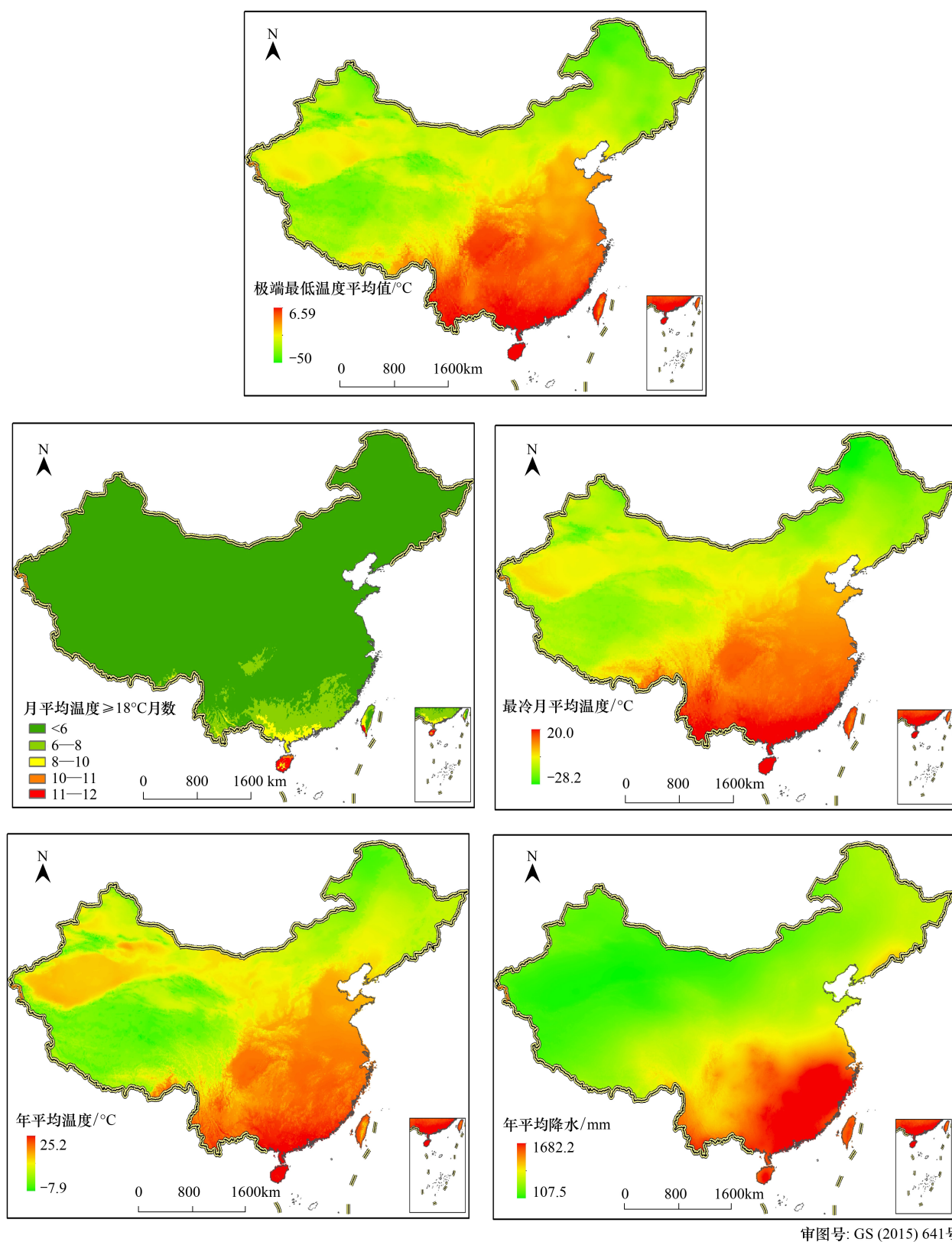
表1 潜在气候因子贡献率

Table 1 Contribution rate of potential climate factors									
气候因子 Cimate factors	极端最低 温度平均值 Mean extremely minimum temperature	最冷月 平均温度 Mean temperature of the coldest month	年平均降水 Annual mean precipitation	年平均风速 Annual mean wind speed	月平均温度 ≥18℃月份 Number of monthly mean temperature ≥18℃	最暖月 平均温度 Mean temperature of warmest month	年平均气温 Annual mean temperature	年辐射量 Annual amount of radiation	台风影响 概率 Frequency of typhoon influence
贡献率(%) Contribution rate	69.24	15.94	4.38	3.98	2.92	1.70	0.97	0.53	0.34

2.3 橡胶的种植北界

将最冷月平均温度、极端最低温度平均值、月平均温度≥18℃月份、年平均气温、年平均降水量5个主导气候因子(图5)作为环境变量输入到最大熵模型,运行最大熵模型,得到了橡胶种植分布—气候关系模型,模型的AUC值为0.993,表明所构建模型的预测准确性达到“非常好”的标准,可以用于橡胶种植空间分布的预测。

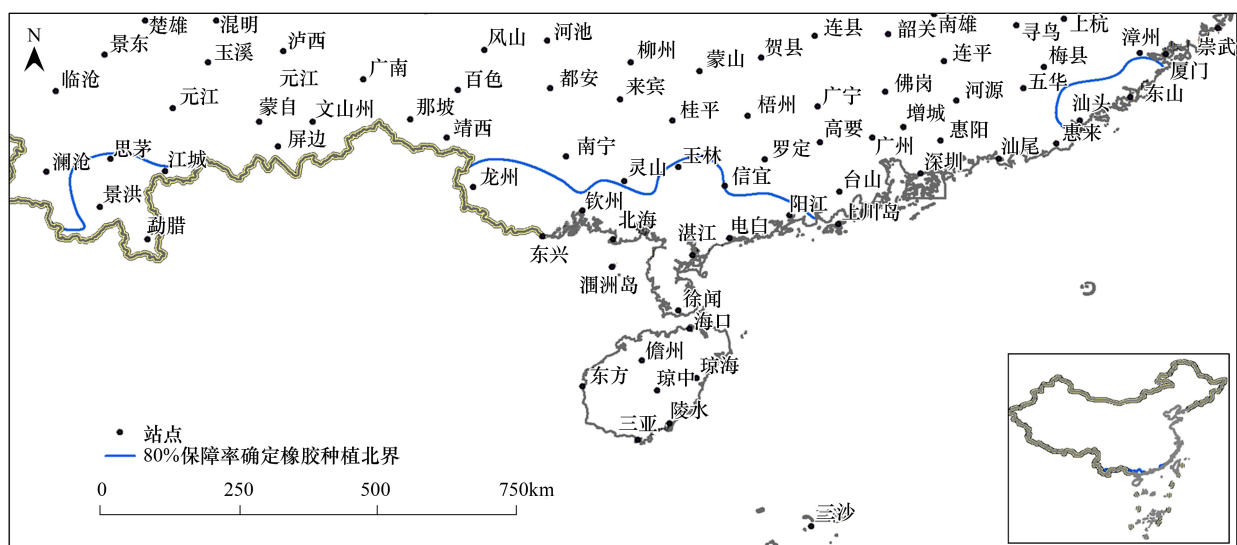
考虑到气候资源80%保证率以及影响中国橡胶林种植分布的5个主导气候因子,则某地可安全种植橡胶树的概率拟为适宜气候条件下的 $0.8^5=0.33$ 。因此,根据橡胶种植信息与气候关系的最大熵模型给出橡胶在待预测区的存在概率,可以给出80%气候保证率下中国橡胶种植的北界(图6)。可以看出,橡胶种植北界主要分布在云南、广西、广东、福建境内。其中,云南的橡胶种植北界分布在勐海—澜沧—思茅—江城一带,广西的种植北界分布在龙州—大新—抚绥—钦州—浦北—北流一带,广东的种植北界分布在粤西南部的信宜—阳春—阳江一带,及粤东部的潮阳—揭阳—丰顺—饶平一带,福建的种植北界分布在诏安—云霄—平和—龙海一带。中国橡胶种植北界的临界条件为极端最低温度大于0℃,最冷月温度大于13℃,月平均温度≥18℃月份大于7,年平均气温大于20℃、年平均降水量大于1250mm。



审图号: GS (2015) 641号

图5 影响中国橡胶种植的气候主导因子空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of main climate factors influencing rubber plantation in China



审图号: GS (2015) 641号

图 6 80%保证率下中国橡胶种植北界

Fig. 6 The northern boundary of rubber plantation with 80% guarantee rate in China

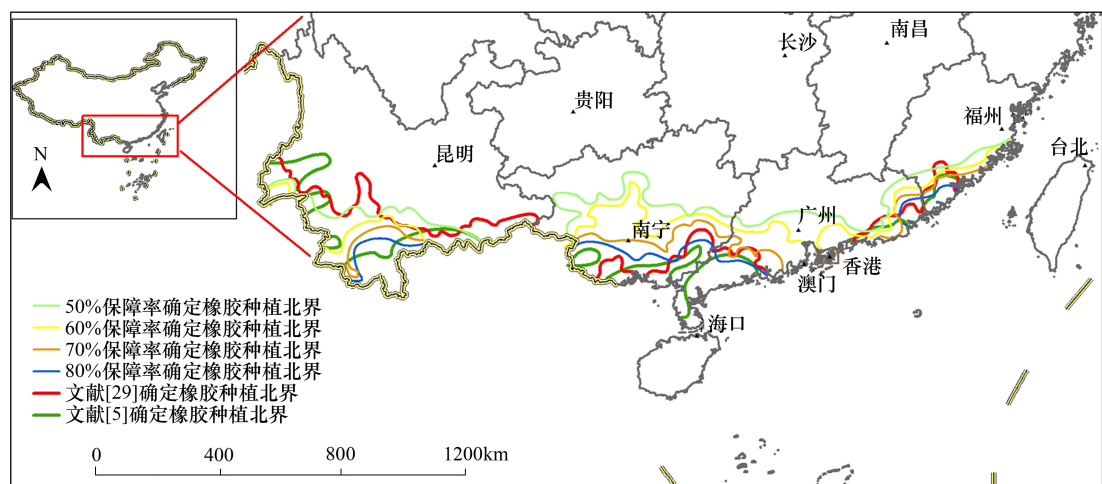
3 讨论

关于橡胶种植北界,不同学者按照不同的指标进行了划分,确定了不同的范围,如极端最低温度出现 ≤ 0 °C 概率、阴雨大于 20 d 内平均温度出现 ≤ 10 °C 概率、日平均气温 ≥ 15 °C 的活动积温、月平均气温 ≥ 18 °C 的月份、年平均降水量、年平均风速、 ≥ 10 级风出现的概率等指标^[5-7,19]通过不同组合,进行了中国橡胶的适宜度区划,划分了中国橡胶的北界,但彼此间的界限均存在差异。其主要原因在于该类方法涉及到因子阈值划分和未考虑因子之间的综合作用。

根据中国农林气候区划协作组提出的中国橡胶种植北界方法所确定的北界^[6]、农业部热带作物区划办公室编制的中国橡胶种植北界^[28-29]及王利溥^[7]、王菱^[5]等的研究成果,橡胶树种植北界的分布特点是中部纬度偏低,大约位于北纬 22° 以南,东部和西部纬度偏高,约在北纬 24° 附近,云南潞江坝生产性植胶可达 24°59′^[5]。在 80% 气候保证率下最大熵模型确定的中国橡胶种植整体趋势与已有研究确定的北界存在一定的差异。这是因为本研究给出的北界是 80% 气候保证率下橡胶树稳产高产的种植北界,气候保证率低于 80% 时橡胶树仍可种植,但可能会因气候波动影响其产量、甚至出现死亡。图 6 给出了 50%、60%、70% 和 80% 气候保证率下中国橡胶的种植北界。50% 气候保证率下中国橡胶种植的北界覆盖范围最大,80% 气候保证率下北界覆盖范围最小,且随着气候保证率的增加,橡胶种植覆盖范围由北向南推移。除在云南境内和福建的少部分区域外,50%、60% 和 70% 气候保证率下确定的橡胶种植北界范围均大于现有研究确定的北界^[5-7,28-29],采用 80% 气候保证率下确定的橡胶种植北界更加安全。同时,基于最大熵模型确定的中国橡胶种植北界(80% 气候保证率)与农业部热带作物区划办公室编制的中国橡胶种植北界^[28-29]和王菱^[5]等的研究成果相比,在云南、福建和广东的东部,北界的范围偏小,但在广西境内,北界向北扩大(图 7)。这是因为不同研究者采用的指标及其划分范围的意义不同造成的。本研究基于影响橡胶种植的潜在气候因子筛选出了影响中国橡胶种植的 5 个主导气候因子,并基于最大熵原理给出了不同气候条件下橡胶种植的存在概率,结合橡胶稳产高产的 80% 气候保证率,给出的中国橡胶种植北界,较已有研究考虑的影响因子更全面,且由于采用存在概率指标反映了各影响因子的相互作用,同时也考虑了橡胶种植的稳定性和可持续性。进一步基于目前中国橡胶主产区实际种植范围检验橡胶种植北界(海南省植胶现状图(49 万公顷)、云南省植胶现状图(49.13 万公顷)、广东省植胶现状图(4.13 万公顷))^[28],采用 80% 气候保证率下确定的中国橡胶种植北界范围准确

覆盖了三个省份的现有橡胶主产分布区,表明基于最大熵模型与 80%气候保证率确定的中国橡胶种植北界范围更符合实际情况。

物种—环境关系是研究物种生境需求和分布的重要方面^[10]。决定植物分布的控制因子有能忍受的最低温度、生长季热量、水分供应等 3 类^[12]。本研究在最大熵模型的基础上,选择了年降水量、最冷月平均温度、最暖月温度、极端最低温度平均值、年辐射量、年均温(T)、月平均气温 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的月份、台风影响该区域概率、年平均风速等 9 个要素,根据最大熵模型的分析,确定了在自然条件下影响橡胶种植的主导气候因子为最冷月平均温度、极端最低温度平均值、月平均温度 $\geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月份、年平均气温、年平均降水量等。从潜在气候因子的重要性和贡献率来看,主导因子排名前 2 位的极端最低温度平均值、最冷月平均温度的总贡献率占 85.18%,与徐其兴^[3]等提出的生产性植胶温度北界指标为最冷月平均温度和极端最低温平均值相一致,说明所选的 5 个主导气候因子能影响和决定橡胶种植的分布。



审图号: GS (2015) 641号

图 7 中国橡胶种植北界对比

Fig. 7 Compared with the northern boundaries of rubber plantation in China

4 结论

本研究基于最大熵模型,在已有橡胶种植信息的基础上,采用主导因子估计具有同样环境变量的其他站点橡胶的存在概率,通过概率的界限,确定了中国橡胶种植北界。通过对比已有研究结果,发现基于最大熵模型确定的中国橡胶种植北界具有一定的优势,充分考虑了各种影响因子的内在相互作用,在一定程度上克服了人为划分因子范围的干扰,更加客观反映了中国橡胶种植的潜在空间分布,从而可以避免盲目橡胶种植引种造成的人力、物力和财力等资源的浪费,对指导合理选择有利的地理位置开展橡胶生产中具有一定的意义。同时,种植北界是在气候资源 80%保证率的前提条件下确定的,因此本研究划分的橡胶种植北界实质上是一个橡胶稳产高产的种植北界。

由于本研究仅从宏观上给出的 1980—2010 年的中国橡胶种植北界,对于在不同区域的气象灾害风险未考虑在列,对橡胶是否在北界附近能正常生长、产胶,以及不同生育期内的条件是否适宜,需要开展进一步的研究和验证,以保证橡胶种植北界的正确性。

致谢:感谢国家气候中心段居琦博士、尹宜舟博士在模型和数据处理方面给与的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 江爱良. 橡胶树北移的几个农业气象学问题. 农业气象, 1983, 4(1): 9-21.

- [2] 李国华, 田耀华, 倪书邦, 原慧芳. 橡胶树生理生态学研究进展. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1146-1154.
- [3] 徐其兴. 温度、热量与橡胶产量的关系及橡胶树北移的温度指标分析. 广西热带农业, 1988, 1(1): 9-16.
- [4] 李国尧, 王权宝, 李玉英, 周双喜, 于海英. 橡胶树产胶量影响因素. 生态学杂志, 2014, 33(2): 510-517.
- [5] 王菱. 我国橡胶树生长北界的地理环境评价. 自然资源, 1987, 11(2): 54-61.
- [6] 中国农林作物气候区划协作组. 中国农林作物气候区划. 北京: 气象出版社, 1987: 205-205.
- [7] 王利溥. 橡胶树气象. 北京: 气象出版社, 1989: 230-230.
- [8] 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究. 中国农业科学, 2012, 45(2): 218-227.
- [9] 何奇瑾, 周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性. 科学通报, 2012, 57(4): 267-275.
- [10] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 欧阳志云, 郑华, 甘德欣. 基于 MAXENT 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价. 生物多样性, 2011, 19(3): 343-352.
- [11] 孙敬松, 周广胜. 利用最大熵法(MaxEnt)模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化. 中国农业气象, 2012, 33(4): 481-487.
- [12] 段居琦, 周广胜. 中国单季稻种植北界的初步研究. 气象学报, 2012, 70(5): 1166-1172.
- [13] 中国热带农业科学院, 华南热带农业大学. 中国热带作物栽培学. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [14] 江爱良. 青藏高原对我国热带气候及橡胶树种植的影响. 热带地理, 2003, 23(3): 199-203.
- [15] 江爱良. 中国热带东、西部地区冬季气候的差异与橡胶树的引种. 地理学报, 1997, 52(1): 45-53.
- [16] 何康, 黄宗道. 热带北缘橡胶树栽培. 广州: 广东科技出版社, 1987.
- [17] 江爱良. 云南南部、西南部生态气候和橡胶树的引种. 中国农业气象, 1995, 18(5): 26-31.
- [18] Jiang A L. Climate and natural production of rubber (*Hevea brasiliensis*) in Xishuangbanna, southern part of Yunnan province, China. International Journal of Biometeorology, 1988, 32(4): 280-282.
- [19] 诏安县橡胶站区划组. 诏安县橡胶生产与区划报告. 福建热作科技, 1985, 10(3): 1-9.
- [20] 刘智敏. 扩展最大熵原理及其在不确定度中的应用. 中国计量学院学报, 2010, 21(1): 1-4.
- [21] Jaynes ET. Information theory and statistical mechanics. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [22] Phillips S J, Anderson R P, Schapired R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [23] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [24] 雷军成, 徐海根. 基于 MaxEnt 的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 137-141.
- [25] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [26] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [27] 车乐, 曹博, 白成科, 王娟娟, 张琳琳. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 对太白米的潜在分布预测及适宜性评价. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1-6.
- [28] 郑文荣. 我国天然橡胶发展情况和产胶趋势. [2014-6-30]. <http://www.docin.com/p-245944869.html>.
- [29] 农牧渔业部热带作物区划办公室. 中国热带作物种植业区划. 广州: 广东科技出版社, 1989.