

• 研究报告 •

气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区 清香木潜在分布格局模拟

应凌霄¹ 刘 晔² 陈绍田³ 沈泽昊^{1*}¹ (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)² (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东深圳 518055)³ (中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650204)

摘要: 清香木(*Pistacia weinmannifolia*)是中国西南干旱河谷植被的特征种。本文利用野外调查的165个清香木分布点信息以及22个环境变量数据, 基于最大熵(Maxent)算法构建清香木分布的适宜生境预测模型, 并据此模拟清香木在我国西南地区的适宜分布区, 以及历史和未来不同气候情景下的分布格局变化。结果表明: 清香木生境预测的Maxent模型准确性非常高(AUC = 0.974), 温度季节性变化、极端低温和降水量是限制其分布的主要气候因子。清香木当前的潜在分布区集中在我国西南干旱河谷区, 其适宜生境的气候特征是降水少、温度季节性变化小且无极端低温。对清香木在末次间冰期和末次冰盛期分布的模拟结果表明, 其分布区范围均以诸大江河的河谷为中心, 随气候变化在我国西南地区主要呈现先向东扩张, 然后向西退缩的趋势, 并印证了“冰期走出横断山(glacial out-of-Hengduan Mts.)”的观点。在未来(2061–2080年)3种典型浓度路径(representative concentration pathway, RCP)的气候情景下, 清香木在我国西南地区的分布都向东扩张, 主要分布在云贵高原与四川盆地结合地带的河谷, 以及云贵高原与广西西部交界地带的河谷中, 这也反映了这些地区河谷地段干旱化的可能, 而当前的潜在分布区趋于消失; 清香木的潜在适宜分布面积在中低浓度路径情景下均将减少约33%, 而在高浓度路径情景下有所增加。

关键词: 最大熵(Maxent)模型; 清香木; 物种分布区; 适宜生境; 气候变化

Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model

Lingxiao Ying¹, Ye Liu², Shaotian Chen³, Zehao Shen^{1*}¹ Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871² School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055³ Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204

Abstract: *Pistacia weinmannifolia* is a characteristic species of dry valleys in Southwest China. In this study, 165 presence points of *P. weinmannifolia* were identified through field surveys, along with point data of 22 environmental factors. The suitable habitat model was formulated using the maximum-entropy (Maxent) algorithm and applied to simulate the potential range of the species in Southwest China, and to project the change of species range in past and future climate scenarios. The results indicate that the Maxent model gave a high accuracy in habitat predictions for *P. weinmannifolia*. Temperature seasonality, minimum temperature and precipitation were the major constraining climatic factors. Contemporarily, the environment suitable for *P. weinmannifolia* was located in the dry valleys of major rivers in Southwest China, and the regions was characterized by decreased temperature variability, no temperatures below 0°C, and low precipitation. Simulations using climate scenarios of the Last Inter-Glacial (LIG) and Last Glacial Maximum (LGM) periods in-

收稿日期: 2015-09-14; 接受日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

indicated that the distribution of *P. weinmannifolia* was centered around the valleys of major rivers in Southwest China, substantially expanded eastward first, and retreated westward following climate change during glacial and inter-glacial periods, supporting the hypothesis of “glacial out-of-Hengduan Mts.”. Under the future climate scenario (2061–2080) with three representative concentration pathways (RCPs), the potential distribution of *P. weinmannifolia* was projected to migrate eastward to the valleys in the adjacent region of the Yunnan-Guizhou Plateau and Sichuan Basin, and the adjacent region of the Plateau and western Guangxi, reflecting a high possibility of increasing dryness in the river valleys in the future, while its current distribution might disappear. The potential distribution of *P. weinmannifolia* would decrease by 33% in Southwest China under the future scenario with both RCP2.6 and 4.5, but would increase with RCP8.5.

Key words: Maxent model; *Pistacia weinmannifolia*; species range; suitable habitat; climate change

植被–气候相互作用关系是生物地理学和全球变化研究的热点问题之一(Bellard et al, 2012)。气候变化对生态系统结构和功能、群落组成及物种分布均有影响(Chen et al, 2011; Ruiz-Labourdette et al, 2012; Pio et al, 2014; Dieleman et al, 2015)。气候的历史变化塑造了物种当前的分布格局(Veloz et al, 2012), 未来的气候变化会继续对它施加影响(Thuiller et al, 2011; Bellard et al, 2012)。气候作为重要的环境驱动因子, 物种分布格局对其变化有着最直接的响应。利用物种分布模型(species distribution model, SDM)模拟气候变化情景下物种的适宜分布格局已得到广泛应用(van der Wal et al, 2013; Gelviz-Gelvez et al, 2015; Moor et al, 2015)。最大熵(maximum-entropy, Maxent)模型是其中的一种机器学习算法模型, 该算法采取Maxent原则, 可最大程度不约束任何未知分布信息, 而更多地保留物种已有分布环境变量数据的信息约束, 从而可以科学地预测物种潜在的分布区域。与其他SDM相比, Maxent模型在只依据存在数据、存在分布点数量不定、各气候环境因子之间相关性不明确的情况下, 预测效果较好(Elith et al, 2006; Philips et al, 2006; Philips & Dudik, 2008)。

清香木(*Pistacia weinmannifolia*)是漆树科黄连木属(*Pistacia*)的一种常绿灌木或小乔木, 耐寒、耐旱, 是广泛分布于中国西南干旱河谷的特有种(傅立国, 2001)。目前, 对清香木的研究多集中在其种群生态、生理生化、药用价值等方面(Zhao et al, 2005; 周葆华, 2008; 王妍等, 2014; 余德会等, 2014), 而对其地理分布的研究很少(王妍等, 2013)。王妍等(2013)初步调查了云南省干旱河谷地区清香木的分布现状, 发现尽管其分布范围较大, 但由于砍伐、火烧以及开荒等人为因素的干扰, 其

野外种群分布已明显减少, 且其分布格局多呈零散状。

本文利用我国西南地区主要河流的干旱河谷野外调查的植被数据, 运用Maxent算法构建了清香木的物种分布模型, 着重研究以下问题: (1)清香木在中国西南地区的潜在适宜分布格局及其与环境因子的关系; (2)历史气候变化情景下, 清香木在中国西南地区的潜在适宜分布范围和空间格局的变化; (3)根据这一西南干旱河谷特有种的分布变化, 预测在未来气候变化情景下, 中国西南干旱河谷的环境范围与分布的变化。研究结果将为清香木资源的保护和管理提供科学依据。

1 方法

1.1 研究区域与野外数据收集

根据《中国高等植物》(傅立国, 2001)记录的清香木县域分布范围, 划定研究区为我国西南地区, 即西藏、云南、广西、贵州、四川和重庆; 在2009–2014年期间, 通过对该区域内各大江河干旱河谷植被进行系统的样方调查, 共采集到165个清香木种群, 得到其地理坐标信息(图1)。

1.2 环境变量数据及预处理

从世界气候数据库(WorldClim v1.4, <http://www.worldclim.org/>)中, 提取研究区的19个气候指标数据。该数据库利用全球各地气象站记录的气象信息, 通过整合插值生成全球气候栅格数据(1950–2000年平均值), 空间分辨率为30" (约1 km)(Hijmans et al, 2005)。由于WorldClim v1.4数据在我国西南地区所用气象站数目较少, 较难反映西南干旱河谷气候的实际空间格局, 为了提高模型模拟的精度, 本文采用如下校正: 选取位于研究区内气候记录连贯性较好的133个气象站(图1, 附录1), 利用

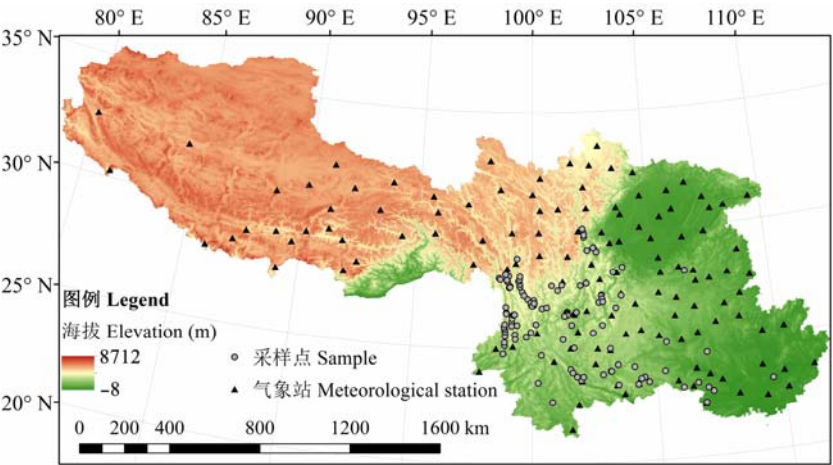


图1 研究区165个采样点和133个气象站的位置
Fig. 1 Study area and locations of 165 samples and 133 meteorological stations

表1 22个用于清香木潜在适宜分布模拟的环境变量
Table 1 22 environmental variables used for modeling potential suitable distribution of *Pistacia weinmannifolia*

环境变量 Environmental variables	代号 Code
年均温 Mean annual temperature	Bio1
昼夜温差月均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max temperature – min temperature))	Bio2
等温性 Isothermality (Bio2/Bio7 × 100)	Bio3
温度季节性变化标准差 Standard deviation of temperature seasonality	Bio4
最暖月最高温 Max. temperature of warmest month	Bio5
最冷月最低温 Min. temperature of coldest month	Bio6
温度年较差 Temperature annual range (Bio5 – Bio6)	Bio7
最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter	Bio8
最干季均温 Mean temperature of driest quarter	Bio9
最暖季均温 Mean temperature of warmest quarter	Bio10
最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter	Bio11
年降水量 Annual precipitation	Bio12
最湿月降水量 Precipitation of wettest month	Bio13
最干月降水量 Precipitation of driest month	Bio14
降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	Bio15
最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	Bio16
最干季降水量 Precipitation of driest quarter	Bio17
最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	Bio18
最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter	Bio19
海拔 Elevation	–
坡度 Slope	–
坡向 Aspect	–

中国气象科学数据共享服务网提供的相关点的观测数据(中国地面气候资料日值数据集v3.0, <http://cdc.nmic.cn/home.do/>)计算相应的气候变量, 采用

这些数据减去对应位置的WorldClim数据, 得到每个变量的残差值, 然后用其结合100 m分辨率的数字高程模型数据进行协同克里金(Co-Kriging)插值, 生成分辨率为100 m的残差空间分布数据, 再叠加在研究区的WorldClim数据上。

地形数据来自美国国家航空航天局发布的分辨率3"的全球数字高程模型(SRTM v4.1, <http://datamirror.csdb.cn/>), 空间分辨率约为100 m (Farr & Kobrick, 2000; van Zyl, 2001), 在ArcGIS v10.2 (<http://www.esri.com/software/arcgis/>) 中应用 Asia North Albers Equal Area Conic投影提取研究区内的海拔数据, 利用Spatial Analyst Tools工具中Surface模块的Slope和Aspect算法提取坡度和坡向数据, 其中坡向设定以正北为0°, 往南逐渐增大, 正南为180°。综上得到22个环境变量数据(表1)。

除当前气候外, 末次间冰期(Last Inter-Glacial, LIG, 120–140 ka)气候情景直接采用WorldClim数据库中唯一公布的美国国家大气研究中心开发的CCSM模型的推算数据(Otto-Bliesner et al, 2006); 末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM, 距今约21 ka)气候情景则来自日本东京大学气候系统研究中心、日本环境研究所和日本地球环境研究中心联合开发的适合东亚地区的MIROC模型的推算数据(Hasumi & Emori, 2004); 未来(2061–2080年)气候情景采用我国国家气候中心开发的BCC_CSM模型, 其对温度和降水各变量的模拟和预测都有较高的准确性, 并已得到广泛应用(石彦军等, 2012; 董敏

等, 2013; 周鑫等, 2014; 林壬萍和周天军, 2015)。同时, 未来气候情景包括 4 种典型浓度路径 (representative concentration pathway, RCP), 其中 RCP4.5 和 RCP6 都代表中间稳定路径, 且前者的优先性大于后者 (Moss et al, 2010)。最终我们选取了其中的 3 种: RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5, 分别代表低、中、高 3 种 CO₂ 浓度排放情景。

1.3 模型分析

将 165 个清香木种群分布的地理坐标信息和环境变量数据导入 Maxent v3.3.3 软件 (Philips et al, 2006; Philips & Dudík, 2008) 进行模拟。采用接受者操作特性 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析法进行模型精度检验, 它基于非阈值依赖判断模型精度, 以特异度 (1-specificity) 即假阳性率 (实际上不出现而预测结果出现的概率) 为横坐标, 以灵敏度 (sensitivity) 即真阳性率 (实际上出现且预测结果也出现的概率) 为纵坐标绘制曲线。ROC 曲线下方面积 (area under curve, AUC) 的大小能很好地说明模型模拟的准确性, 其取值范围为 [0, 1], AUC 越大表示模型模拟越准确。交叉验证 (cross-validation) 重复运算 10 次, 以使检验结果更加准确。同时用 Maxent v3.3.3 软件自带的 Jackknife 检验 (Miller, 1968) 确定各环境变量对清香木分布的贡献。不同历史时期的 Maxent 模拟结果均导入 ArcGIS v10.2 中进行可视化处理。为了得到物种出现概率的模型预测结果, 利用在研究区域内各大江河干旱河谷调查的 597 个样点数据 (其中包含清香木种群的样点 165 个) (刘晔等, 2016), 根据 Royle 等 (2012) 的方法, 估计模型中的 τ 值 (Merow et al, 2013) 为 0.5108。为了便于显示, 设定物种出现概率为 0.75–1.00 的地区为清香木最适宜分布区, 出现概率为 0.50–0.75 的地区为比较适宜分布区, 出现概率小于 0.50 的地区为不适宜分布区, 计算各个时期清香木潜在适宜分布区面积。

2 结果

2.1 清香木潜在适宜分布格局及主要环境影响因子

由图 2 可知, 模型的 AUC 值达 0.974, 表明模型预测的准确性非常高。温度季节性变化标准差、等温性、最湿月降水量、温度年较差、最湿季均温、年均温、年降水量、最冷季均温等是影响清香木潜在分布的主要环境变量, 其总贡献超过 80% (表 2)。

清香木适宜分布于温度季节性变化小、无低温冻害、降水少的生境 (表 2)。当前, 研究区内清香木的最适宜和比较适宜分布区集中于各干旱河谷中, 主要包括怒江和澜沧江中上游、元江和南盘江上游、金沙江的全部以及雅砻江、大渡河下段 (图 3c)。

2.2 气候变化情景下清香木的潜在适宜分布范围和空间格局的变化

在末次间冰期, 研究区内清香木的潜在适宜分布范围非常小, 集中在云南中东部的高原河谷中,

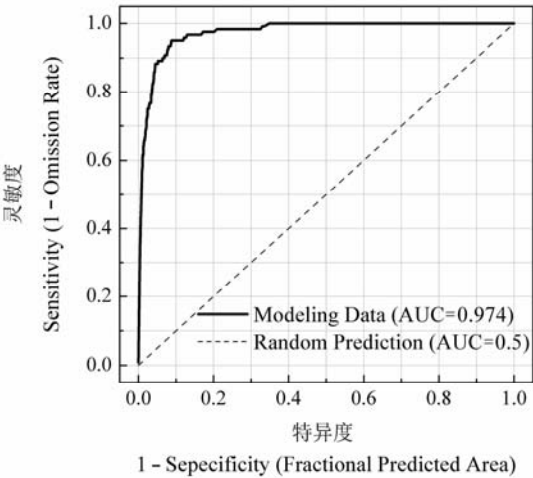


图2 清香木Maxent模型的接受者操作特性曲线
Fig. 2 Reveiver operating characteristic (ROC) curve of Max-ent model for *Pistacia weinmannifolia*

表2 影响清香木潜在适宜分布的主要环境变量
Table 2 Dominant environmental variables for potential suitable distribution of *Pistacia weinmannifolia*

环境变量 Environmental variables	贡献率 Contribution (%)	相关性 Correlation*
温度季节变化标准差 SD of temperature seasonality	24.2	—
等温性 Isothermality	15.3	+
最湿月降水量 Precipitation of wettest month	11.2	—
温度年较差 Temperature annual range	9.8	—
最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter	7.6	—
年均温 Mean annual temperature	6.7	+
年降水量 Annual precipitation	4.5	—
最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter	4.2	+

*清香木出现概率与环境变量的相关性, “+”: 正相关, “—”: 负相关。
* The correlation between probability of occurrence for *Pistacia weinmannifolia* and environmental variable, “+”, Positive correlation, “—”, Negative correlation.

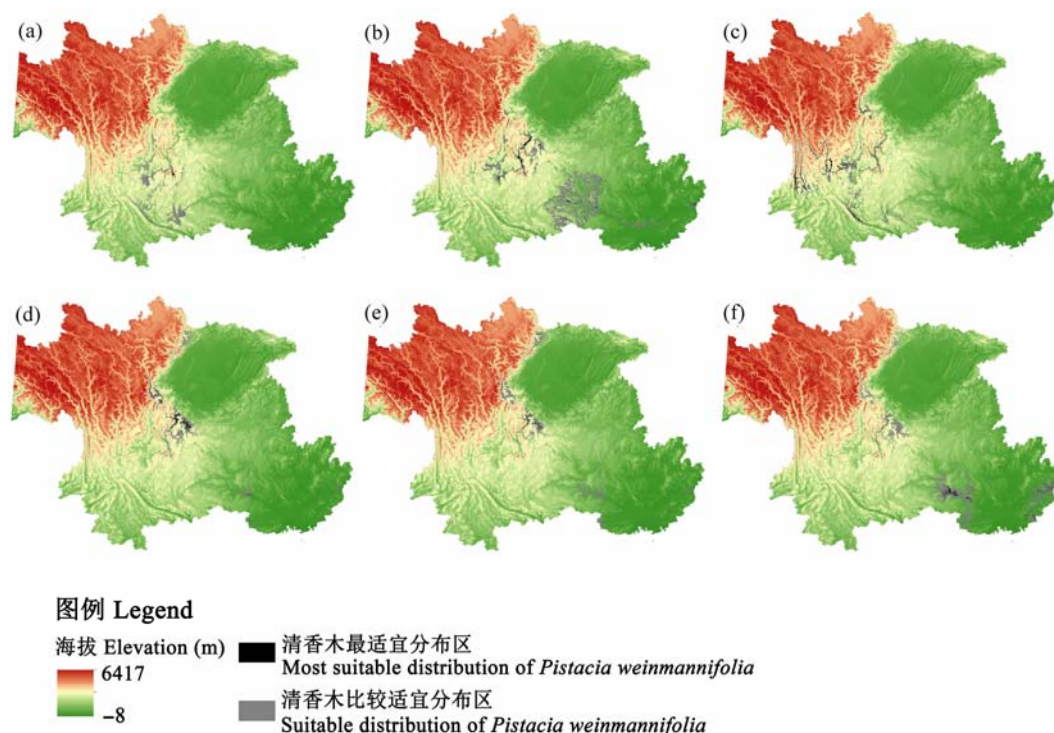


图3 气候变化下清香木在中国西南地区的潜在分布格局。为了突出显示适宜分布区, 只显示了研究区域内东部(95° E以东)的结果, 95° E以西的区域无适宜分布。(a)末次间冰期; (b)末次冰盛期; (c)当前历史时期; (d)未来时期(RCP2.6); (e)未来时期(RCP4.5); (f)未来时期(RCP8.5)。

Fig. 3 Patterns of potential distribution for *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China under climate change in different periods, and only the east region of the study area (east of 95° E) was showed to highlight the suitable distributions for *Pistacia weinmannifolia*. There is no distribution in the west of 95° E. (a) Last Inter-Glacial (LIG); (b) Last Glacial Maximum (LGM); (c) Current period; (d) Future with RCP2.6; (e) Future with RCP4.5; (f) Future with RCP8.5.

包括元江在我国境内的全部、南盘江中上游、金沙江中游和雅砻江下段(图3a)。在末次冰盛期, 清香木在我国西南地区的适宜分布范围向东显著扩张, 到达川西高原和云贵高原东部临近河谷的开阔地带, 在云贵高原东南部和桂西南山地邻接地带近连片分布, 并有沿珠江上游河谷向东扩张的趋势, 其在我国西南地区的潜在适宜分布面积较末次间冰期增加了222.5% (图3b)。而从末次冰盛期到目前, 研究区内清香木的适宜分布面积减少44.4%, 并向西大大退缩, 但较末次间冰期时的范围稍大并偏西北, 主要集中在金沙江河谷全部和横断山区其余各条江中上游的干旱河谷(图3c)。在未来时期(2061–2080年)不同情景下, 研究区内清香木的适宜分布范围均再次向东推进, 大致到云贵高原和丘陵盆地邻接地带的长江水系和珠江水系的河谷中, 但本来在云贵高原中西部干旱河谷的适宜分布区趋于消失; 在低、中浓度路径的情景下, 清香木的潜在分

布面积分别比当前减少32.7% (RCP2.6情景)和32.9% (RCP4.5情景) (图3d, 3e), 而在高浓度路径的情景下, 清香木的潜在分布面积比当前增加28.9% (图3f)。

3 讨论

本文利用Maxent模型预测了清香木在中国西南地区的潜在分布区, 结果表明其分布主要集中在各干旱河谷地带, 该物种可作为干旱河谷的指示物种。影响清香木分布的主要环境变量均为气候因子(表2), 它适宜于温度变异性低和较干旱的环境。

分子系统发育学研究表明, 伴随着青藏高原的隆起, 清香木作为古老的支系(~15 mya), 早在第三纪中新世便与黄连木属的古地中海起源中心分离(Xie et al, 2014)。第四纪气候变化深刻地影响了中国古老植物的种群历史(Qiu et al, 2011), 清香木也不例外。在末次冰盛期, 清香木在中国西南地区可

能经历了自西向东的大范围扩张,向北甚至到达四川盆地北缘山麓(图3),可见有耐寒耐旱特性的清香木在冰期有着更广泛的适宜分布区。Kozhoridze等(2015)利用全球尺度较低的2.5'分辨率数据和偏最小二乘回归方法,模拟了气候变化情景下黄连木属的潜在分布格局,指出从末次间冰期到末次冰盛期,主要由于温度的季节性变异减小,等温性增大,降水减少,导致黄连木属在全球的分布发生大面积扩展。这与本文根据清香木当前分布构建的适宜环境预测模型所得的结果一致。而进入全新世以来,上述主要气候因子变化趋势反转,导致全球黄连木属分布面积减少(Kozhoridze et al, 2015),位于中国西南地区的清香木种群也再次退缩到西部横断山脉和云贵高原的干旱河谷中,适宜分布区大大缩小(图3)。第四纪以来青藏高原的持续抬升,加强了来自热带印度洋的西南季风及其对我国西南山地的影响(An, 2000; Wang, 2002),并通过平行岭谷地形的强化效应形成了大面积非地带性的干旱河谷气候,使得清香木的适宜分布区趋于这一地区河流的中上游,分布位置大致较末次间冰期偏北(图3)。利用Maxent模型模拟的不同时期清香木潜在适宜分布范围和格局的变化,反映了清香木在研究区域内可能的种群历史动态,在冰期与非冰期东西往返的扩张与退缩,印证了关于中国西南干旱河谷植物种群的“冰期走出横断山(glacial out-of-Hengduan Mts.)”的观点(Fan et al, 2013),而不支持田中-楷永线(Tanaka-Kaiyong Line)为一条普适的生物地理分界线假说(Coyne & Orr, 2004)。根据最低迁移成本的原则,研究区域内的河谷是清香木扩张和退缩最可能的途径(Cox et al, 1993)。

在当今全球变暖的大背景下,气候变化及其复杂性引起了前所未有的重视(IPCC, 2013),极端气候事件越来越频繁和剧烈(Planton et al, 2008; Kodra et al, 2011; Cai et al, 2014; Patricola et al, 2015)。在此趋势下,清香木的适宜分布区或将进一步缩小(中低浓度路径)。同时,由于西南季风的加强,在青藏高原东南部地区未来降水可能进一步增加(刘晓东等, 2009; 胡琴等, 2015),也许会导致当前研究区内干旱河谷范围缩小,清香木的潜在分布区仅在云贵高原与四川盆地结合地带的河谷,以及云贵高原与广西西部交界地带的河谷中,也反映了这些地区在未来有干旱河谷发育的可能(图3)。而对于完全不采

取任何措施的高浓度路径,清香木在研究区内的适宜分布区有所增加,或许跟该情景下温度的季节性变异和极端低温事件大大减少有关(Xu & Xu, 2012; Kharin et al, 2013)。总之,在较切合实际的中低浓度路径下,未来清香木适宜分布区的减小,意味着该物种以及其他亚热带半干旱环境适宜种的生存风险加剧,这对于清香木所指示的生态系统类型的结构、功能与服务(包括生物多样性)在气候变化情景下的保护和管理提出了严峻的挑战。

Maxent模型是近年来广泛应用的物种潜在适宜分布区预测模型,本文利用其较好地模拟了气候变化下清香木的适宜分布格局。然而,本研究仍然存在一些局限性。首先,只依据存在数据(presence-only data),即物种出现或“1”值数据建立的模型会有一定的偏差(Raes & ter Steege, 2007; Phillips et al, 2009; Yackulic et al, 2013)。Yackulic等(2013)指出这样建立模型得到的预测概率结果实际上由采样概率、被发现概率和物种本身存在概率3个部分组成。Elith等(2011)认为采样效应的影响可以凭借一定的先验知识降低,对于本研究来说就是乡土物种清香木主要分布在研究区内各干旱河谷中(傅立国, 2001),几乎不会出现在其他地区。被发现概率或多或少会受到样点的自然或人为生境破坏的影响。这两种概率都会对我们期望得到的物种存在概率带来偏差。另外,我们对于古气候和未来气候情景下的模拟和预测结果都基于一个假设,那就是根据当前气候情景和物种分布建立起来的模型,二者之间的相互作用关系会在过去和未来保持不变。最后,包括Maxent模型在内,目前常见的线性或非线性SDM模型,都是基于物种的现实生态位来模拟适宜分布区,但实际上还会受到物种个体生命周期造成的时滞效应、物种的扩散和定殖能力、种间竞争等的影响(Boulangéat et al, 2012)。因此,对于模型预测结果中的不确定性,在应用中需要予以考虑。

参考文献

- An Z (2000) The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quaternary Science Reviews*, 19, 171–187.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365–377.
- Boulangéat I, Gravel D, Thuiller W (2012) Accounting for dispersal and biotic interactions to disentangle the drivers of

- species distributions and their abundances. *Ecology Letters*, 15, 584–593.
- Cai W, Borlace S, Lengaigne M, van Rensch P, Collins M, Vecchi G, Timmermann A, Santoso A, McPhaden MJ, Wu L, England MH, Wang G, Guilyardi E, Jin FF (2014) Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4, 111–116.
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024–1026.
- Cox CB, Moore PD, Marquardt WC, Demaree RS, Grieve RB (1993) *Biogeography: An Ecological and Evolutionary Approach* 6th edn. Blackwell Scientific Publications, London.
- Coyne JA, Orr HA (2004) *Speciation*. Sinauer Associates, Sunderland.
- Dieleman CM, Branfireun BA, McLaughlin JW, Lindo Z (2015) Climate change drives a shift in peatland ecosystem plant community: implications for ecosystem function and stability. *Global Change Biology*, 21, 388–395.
- Dong M, Wu TW, Wang ZZ, Xin XG, Zhang F (2013) Simulation of the precipitation and its variation during the 20th century using the BCC climate model (BCC_CSM1.0). *Journal of Applied Meteorological Science*, 24(1), 1–11. (in Chinese with English abstract) [董敏, 吴统文, 王在志, 辛晓歌, 张芳 (2013) BCC_CSM1.0模式对20世纪降水及其变率的模拟. *应用气象学报*, 24(1), 1–11.]
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JM, Peterson AT, Phillips SJ, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE, Araujo M (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ (2011) A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43–57.
- Fan DM, Yue JP, Nie ZL, Li ZM, Comes HP, Sun H (2013) Phylogeography of *Sophora davidii* (Leguminosae) across the 'acros-Kaiyong Line', an important phytogeographic boundary in Southwest China. *Molecular Ecology*, 22, 4270–4288.
- Farr TG, Kobrick M (2000) Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81, 583–585.
- Fu LG (2001) *Higher Plants of China*, Vol. 8. Qingdao Publishing House, Qingdao. (in Chinese with English foreword) [傅立国 (2001) 中国高等植物第八卷. 青岛出版社, 青岛.]
- Gelviz-Gelvez SM, Pavón NP, Illoldi-Rangel P, Ballesteros-Barrera C (2015) Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration in Central Mexico. *Ecological Engineering*, 74, 302–309.
- Hasumi H, Emori S (2004) K-1 Coupled GCM (MIROC) description. Center for Climate System Research (CCSR), University of Tokyo, Tokyo.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hu Q, Jiang DB, Fan GZ (2015) Climate change projection on the Tibetan Plateau: results of CMIP5 models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 39, 260–270. (in Chinese with English abstract) [胡琴, 姜大膀, 范广洲 (2015) 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5 模式结果. *大气科学*, 39, 260–270.]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X, Wehner M (2013) Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119, 345–357.
- Kodra E, Steinhäuser K, Ganguly AR (2011) Persisting cold extremes under 21st-century warming scenarios. *Geophysical Research Letters*, 38, L08705.
- Kozhoridze G, Orlovsky N, Orlovsky L, Blumberg DG, Golan-Goldhirsh A (2015) Geographic distribution and migration pathways of *Pistacia*—present, past and future. *Ecography*, 38, 1–14.
- Lin RP, Zhou TJ (2015) Reproducibility and future projections of the precipitation structure in East Asia in four Chinese GCMs that participated in the CMIP5 experiments. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 39, 338–356. (in Chinese with English abstract) [林壬萍, 周天军 (2015) 参加CMIP5计划的四个中国模式模拟的东亚地区降水结构特征及未来变化. *大气科学*, 39, 338–356.]
- Liu XD, Cheng ZG, Zhang R (2009) The A1B scenario projection for climate change over the Tibetan Plateau in the next 30–50 years. *Plateau Meteorology*, 28, 475–484. (in Chinese with English abstract) [刘晓东, 程志刚, 张冉 (2009) 青藏高原未来30~50年A1B情景下气候变化预估. *高原气象*, 28, 475–484.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. *生物多样性*, 24, 378–388.]
- Merow C, Smith MJ, Silander JA (2013) A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058–1069.
- Miller RG (1968) Jackknifing variances. *The Annals of Mathematical Statistics*, 39, 567–582.

- Moor H, Hylander K, Norberg J (2015) Predicting climate change effects on wetland ecosystem services using species distribution modeling and plant functional traits. *AMBIO*, 44, 113–126.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756.
- Otto-Bliesner BL, Marshall SJ, Overpeck JT, Miller GH, Hu A (2006) Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. *Science*, 311, 1751–1753.
- Patricola CM, Chang P, Saravanan R (2015) Impact of Atlantic SST and high frequency atmospheric variability on the 1993 and 2008 Midwest floods: regional climate model simulations of extreme climate events. *Climatic Change*, 129, 397–411.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Phillips SJ, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
- Phillips SJ, Dudík M, Elith J, Graham CH, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S (2009) Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19, 181–197.
- Pio DV, Engler R, Linder HP, Monadjem A, Cotterill FPD, Taylor PJ, Schoeman MC, Price BW, Villet MH, Eick G, Salamin N, Guisan A (2014) Climate change effects on animal and plant phylogenetic diversity in southern Africa. *Global Change Biology*, 20, 1538–1549.
- Planton S, Déqué M, Chauvin F, Terray L (2008) Expected impacts of climate change on extreme climate events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340, 564–574.
- Qiu YX, Fu CX, Comes HP (2011) Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 225–244.
- Raes N, ter Steege H (2007) A null-model for significance testing of presence-only species distribution models. *Ecography*, 30, 727–736.
- Royle JA, Chandler RB, Yackulic C, Nichols JD (2012) Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 545–554.
- Ruiz-Labourdette D, Nogués-Bravo D, Ollero HS, Schmitz MF, Pineda FD (2012) Forest composition in Mediterranean mountains is projected to shift along the entire elevational gradient under climate change. *Journal of Biogeography*, 39, 162–176.
- Shi YJ, Ren YL, Wang SG, Shang KZ, Li X, Zhou GL (2012) Verification of simulation ability of BCC_CSM climate model in regional climate change in China. *Plateau Meteorology*, 31, 1257–1267. (in Chinese with English abstract) [石彦军, 任余龙, 王式功, 尚可政, 李旭, 周甘霖 (2012) BCC_CSM气候模式对中国区域气候变化模拟能力的检验. *高原气象*, 31, 1257–1267.]
- Thuiller W, Laverigne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Araujo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, 470, 531–534.
- van der Wal J, Murphy HT, Kutt AS, Perkins GC, Bateman BL, Perry JJ, Reside AE (2013) Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change*, 3, 239–243.
- van Zyl JJ (2001) The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48, 559–565.
- Veloz SD, Williams JW, Blois JL, He F, Otto-Bliesner, Liu Z (2012) No-analog climates and shifting realized niches during the late quaternary: implications for 21st-century predictions by species distribution models. *Global Change Biology*, 18, 1698–1713.
- Wang B (2002) Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *Journal of Climate*, 15, 386–398.
- Wang Y, Zhang C, Li K (2013) Investigation on the distribution of *Pistacia weinmannifolia* in dry-hot valley of Yunnan Province. *Forest Resources Management*, (3), 156–160. (in Chinese with English abstract) [王妍, 张超, 李昆 (2013) 云南干热河谷地区清香木分布调查. *林业资源管理*, (3), 156–160.]
- Wang Y, Zhang C, Li K (2014) Responses of *Pistacia weinmannifolia* seedling to different water gradient in dry-hot valley. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 34(10), 19–25. (in Chinese with English abstract) [王妍, 张超, 李昆 (2014) 干热河谷乡土树种清香木幼苗生长对不同水分梯度的响应. *中南林业科技大学学报*, 34(10), 19–25.]
- Xie L, Yang ZY, Wen J, Li DZ, Yi TS (2014) Biogeographic history of *Pistacia* (Anacardiaceae), emphasizing the evolution of the Madrean-Tethyan and the eastern Asian-Tethyan disjunctions. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 77, 136–146.
- Xu CH, Xu Y (2012) The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5, 527–533.
- Yackulic CB, Chandler R, Zipkin EF, Royle JA, Nichols JD, Campbell GEH, Veran S (2013) Presence-only modelling using Maxent: when can we trust the inferences? *Methods in Ecology and Evolution*, 4, 236–243.
- Yu DH, Yuan CJ, An MT, Li H, Yan LB (2014) Study on the niche characteristics of main tree species of *Pistacia weinmannifolia* community in natural forest along Chishui River.

- Journal of West China Forestry Science, 43(6), 91–96. (in Chinese with English abstract) [余德会, 袁丛军, 安明态, 李鹤, 严令斌 (2014) 赤水河流域清香木天然群落主要树种生态位研究. 西部林业科学, 43(6), 91–96.]
- Zhao X, Sun H, Hou A, Zhao Q, Wei T, Xin W (2005) Antioxidant properties of two gallotannins isolated from the leaves of *Pistacia weinmannifolia*. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1725, 103–110.
- Zhou BH (2008) Volatile oil in the leaves of *Pistacia weinmannifolia* and their antibacterial effects. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 25, 305–308. (in Chinese with English abstract) [周葆华 (2008) 清香木叶挥发油成分及其抑菌作用. 应用化学, 25, 305–308.]
- Zhou X, Li QQ, Sun XB, Wei M (2014) Simulation and projection of temperature in China with BCC_CSM1.1 model. *Journal of Applied Meteorological Science*, 25, 95–106. (in Chinese with English abstract) [周鑫, 李清泉, 孙秀博, 魏敏 (2014) BCC_CSM1.1模式对我国气温的模拟和预估. 应用气象学报, 25, 95–106.]

(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究所用气象站点基本信息

Appendix 1 Information of meteorological stations applied in this study

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015246-1.pdf>

应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, **24** (4): 453-461.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015246>

附录1 本研究所用气象站的基本信息
Appendix 1 Information of meteorological stations applied in this study

气象站 Meteorological station	纬度 Latitude	经度 Longitude
狮泉河	32.50	80.08
普 兰	30.28	81.25
改 则	32.15	84.42
聂拉尔	28.18	85.97
定 日	28.63	87.08
拉 孜	29.08	87.60
申 扎	30.95	88.63
日喀则	29.25	88.88
帕 里	27.73	89.08
江 孜	28.92	89.60
班 戈	31.38	90.02
尼 木	29.43	90.17
安 多	32.35	91.10
当 雄	30.48	91.10
拉 萨	29.67	91.13
泽 当	29.25	91.77
错 那	27.98	91.95
那 曲	31.48	92.07
隆 子	28.42	92.47
嘉 黎	30.67	93.28
索 县	31.88	93.78
林 芝	29.67	94.33
丁 青	31.42	95.60
波 密	29.87	95.77
洛 隆	30.75	95.83
昌 都	31.15	97.17
察 隅	28.65	97.47
左 贡	29.67	97.83
瑞 丽	24.02	97.85
石 渠	32.98	98.10
腾 冲	25.02	98.50
德 格	31.80	98.58
怒江州	25.87	98.85
德 钦	28.48	98.92
巴 塘	30.00	99.10
保 山	25.12	99.18
得 荣	28.72	99.28
甘 孜	31.62	100.00
大 理	25.70	100.18
理 塘	30.00	100.27
稻 城	29.05	100.30
新 龙	30.93	100.32
色 达	32.28	100.33
景 东	24.47	100.87
道 孚	30.98	101.12

应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, **24** (4): 453-461.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015246>

气象站 Meteorological station	纬度 Latitude	经度 Longitude
木里	27.93	101.27
九龙	29.00	101.50
楚雄	25.03	101.55
勐腊	21.48	101.57
阿坝	32.90	101.70
攀枝花	26.58	101.72
仁和	26.50	101.73
江城	22.58	101.85
元谋	25.73	101.87
康定	30.05	101.97
元江	23.60	101.98
马尔康	31.90	102.23
会理	26.65	102.25
西昌	27.90	102.27
小金	31.00	102.35
越西	28.65	102.52
红原	32.80	102.55
玉溪	24.33	102.55
昆明	25.00	102.65
汉源	29.35	102.68
昭觉	28.00	102.85
若尔盖	33.58	102.97
雅安	29.98	103.00
宜良	24.92	103.17
会泽	26.42	103.28
峨眉山	29.52	103.33
蒙自	23.38	103.38
松潘	32.65	103.57
雷波	28.27	103.58
都江堰	31.00	103.67
屏边	22.98	103.68
昭通	27.35	103.72
乐山	29.57	103.75
成都	30.70	103.83
沾益	25.58	103.83
文山	23.38	104.25
威宁	26.87	104.28
砚山	23.62	104.33
盘县	25.72	104.47
平武	32.42	104.52
资阳	30.12	104.65
绵阳	31.45	104.73
内江	29.62	105.12
兴义	25.43	105.18
毕节	27.30	105.28
纳溪	28.78	105.38
叙永	28.17	105.43

应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, **24** (4): 453-461.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015246>

气象站 Meteorological station	纬度 Latitude	经度 Longitude
遂 宁	30.50	105.55
那 坡	23.42	105.83
安 顺	26.25	105.90
阆 中	31.58	105.97
黔 西	27.03	106.02
望 谟	25.18	106.08
南 充	30.78	106.10
习 水	28.33	106.22
靖 西	23.13	106.42
沙坪坝	29.58	106.47
涪 陵	29.58	106.47
百 色	23.90	106.60
贵 阳	26.58	106.73
巴 中	31.87	106.77
罗 甸	25.43	106.77
桐 梓	28.13	106.83
龙 州	22.33	106.85
遵 义	27.70	106.88
田 东	23.60	107.12
彭 水	29.75	107.42
湄 潭	27.77	107.47
达 县	31.20	107.50
独 山	25.83	107.55
平 果	23.32	107.58
梁 平	30.68	107.80
凯 里	26.60	107.98
南 宁	22.63	108.22
思 南	27.95	108.25
万 县	30.77	108.40
榕 江	25.97	108.53
三 穗	26.97	108.67
酉 阳	28.83	108.77
铜 仁	27.72	109.18
来 宾	23.75	109.23
灵 山	22.42	109.30
融 安	25.22	109.40
奉 节	31.02	109.53
桂 平	23.40	110.08
玉 林	22.65	110.17
桂 林	25.32	110.30
梧 州	23.48	111.30