

DOI: 10.5846/stxb202106261698

周炳江, 王玉洁, 马长乐, 樊智丰, 郑进烜. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析. 生态学报, 2022, 42(11): 4485-4493.

Zhou B J, Wang Y J, Ma C L, Fan Z F, Zheng J X. Analysis of potential habitat of *Torreya yunnanensis* based on MaxEnt and ArcGIS. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4485-4493.

基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析

周炳江¹, 王玉洁², 马长乐^{1,*}, 樊智丰¹, 郑进烜³

¹ 西南林业大学园林园艺学院, 昆明 650224

² 西南林业大学地理与生态旅游学院, 昆明 650224

³ 云南省林业调查规划院, 昆明 650051

摘要: 为明确国家二级保护树种—云南榿树 (*Torreya yunnanensis*) 的潜在生境分布区和保护现状, 利用 50 个云南榿树的存在记录点和 7 个对其分布影响较高的主导环境因子 (最冷季平均降水量、降水季节性变异系数、年温差范围、土壤容重、土壤类型、坡向和下层土壤中的百分比粘土) 运用最大熵模型 (MaxEnt) 和地理信息系统 (ArcGIS 10.2) 模拟其在云南省的潜在生境的分布状况, 并将其模拟结果与现有的云南省自然保护区的范围进行叠加分析。研究结果显示: (1) MaxEnt 模型对云南榿树潜在生境的模拟的结果所表现出的精度高 (AUC=0.977)。 (2) 云南榿树在云南省的潜在分布区主要集中在三江并流区, 云南榿树潜在生境在云南省自然保护区内主要分布在高黎贡山 (2364.35 km², 58.35%)、白马雪山 (846.46 km², 31.66%) 和云岭 (625.55 km², 82.42%) 自然保护区。 (3) 最冷季平均降水量 (>75.58 mm)、降水季节性变异系数 (<64.28)、年温差 (24.08—26.40 ℃) 是影响云南榿树在云南省潜在生境分布的主要气候因子。 (4) 金沙江可能是一个重要的榿属种间交流通道。 综上, 建议在云南省的维西县建立云南榿树自然保护小区, 并在高黎贡山、白马雪山、云岭自然保护区内的高适宜区对其试点引种栽培, 以探究云南榿树与当地环境的相互作用关系及云南榿树是否适合在当地进行大面积的培育。

关键词: 云南榿树; 最大熵模型; 潜在生境

Analysis of potential habitat of *Torreya yunnanensis* based on MaxEnt and ArcGIS

ZHOU Bingjiang¹, WANG Yujie², MA Changle^{1,*}, FAN Zhifeng¹, ZHENG Jinxuan³

¹ College of Landscape Architecture and Horticulture Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

² School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

³ Forest Inventory and Planning Institute of Yunnan Province, Kunming 650051, China

Abstract: In order to clearly understand the distribution area of the potential habitat and the status quo of the protection for Chinese second-class protected tree species, *Torreya yunnanensis*. In the study, the authors used the Maximum Entropy Model (MaxEnt) and Geographical Information System (ArcGIS 10.2) to simulate *Torreya yunnanensis*' potential habitat distribution by analysing the data on 50 recorded points of *Torreya yunnanensis*' geographical location and the data on 7 main environmental factors. These factors include mean precipitation of the coldest quarter, precipitation seasonality (Coefficient of Variation), annual range of temperature, soil bulk density, soil type, aspect of the terrain, and subsoil clay fraction, which had a high influence on its distributing location in Yunnan Province of China. Then, the geographical range of potential habitat of *Torreya yunnanensis* simulated in this paper was overlapped with that of the nature reserves in Yunnan Province. The results showed that: (1) the MaxEnt model was used to simulate the geographical distribution of *Torreya*

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31360037)

收稿日期: 2021-06-26; 网络出版日期: 2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: machangle@sina.com

yunnanensis' potential habitat indicating high accuracy (AUC=0.977). (2) The distribution area of *Torreya yunnanensis*' potential habitat in Yunnan Province was mainly concentrated in the three-river parallel flow area of China. The future distribution areas of *Torreya yunnanensis*' living environment are mainly distributed in Gaoligong Mountain Nature Reserve (2364.35 km², 58.35%), Baima Snow Mountain Nature Reserve (846.46 km², 31.66%) and Yunling Nature Reserve (625.55 km², 82.42%). (3) Mean precipitation of the coldest quarter (> 75.58 mm) and precipitation seasonality (Coefficient of Variation) (< 64.28) and annual range of temperature (24.08—26.40 °C) were the main climatic factors affecting the future distribution of *Torreya yunnanensis* in Yunnan. (4) The Jinsha River may be an important communication channel for *Torreya* species. Based on the above findings, it is suggested that a *Torreya yunnanensis*' nature conservation community should be established in Weixi County, Yunnan Province. *Torreya yunnanensis* should be introduced and cultivated on a pilot basis in the high suitability areas of Gaoligong Mountain Nature Reserve, Baima Snow Mountain Nature Reserve and Yunling Nature Reserve for exploring the interaction between *Torreya yunnanensis* and the local natural environment and whether *Torreya yunnanensis* is suitable for large-scale cultivation.

Key Words: *Torreya yunnanensis*; maximum entropy model; potential habitat

植物资源的多样性可调节气候、稳定生态环境,为人类提供积极的生态系统服务^[1-2]。受自然灾害和人类活动的影响,全球范围内部分地区的原生植物的生长环境被严重破坏,造成其生境的丧失和破碎化^[3]。而原生植物生境丧失及破碎化是植物濒危的首要因子^[4-5],如何保持植物资源的多样性和可持续利用已是全球共同关注的热点^[6-7]。基于此,保护野生濒危植物迫在眉睫,保护的前提在于了解其生境条件、及其生长状态与环境因子的关系,从而制定出合理的保护对策。

物种分布模型是基于现有样本的地理位置数据,依据特定的算法和该物种特有的生态学原理来模拟出该物种的生态位并将其投影到生态环境中,以该物种未来是否出现于此地的概率的形式来反映该物种对生境的适应性^[8]。物种分布模型广泛应用于物种资源管理与可持续利用^[9]、物种保护决策^[10-11]、入侵物种防控^[12-14]、气候变化对物种分布的影响^[15-16]等方面的研究中。常见的物种分布模型^[17]有生态位模型(Maximum Entropy Model, MaxEnt)、生态位因子分析模型(Ecological Niche Factor Analysis, ENFA)、广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)、广义加法模型(Generalized Additive Model, GAM)、基于规则集的遗传算法(Genetic Algorithm for Rule-set Prediction, GARP)、边界函数方法(Border Function, BF)等。其中,MaxEnt模型的使用最为广泛^[18],预测效果相对其他模型较好^[19-20]。主要体现在即使样本数据量小,MaxEnt模型也能提供稳定、可靠的预测结果^[21-22]。MaxEnt模型是依据仅存在的物种记录来确定其潜在分布区,并且输入因子的数据格式可以是离散型也可以是连续型数据,可以在确定该物种的分布模型结构、生成该模型分布所需的决策条件、以及通过与可能影响这些决策的数据之间建立联系,进而综合反映该物种的生长环境^[23-24]。当研究对象是生存条件更为复杂的濒危物种时,该模型也能表现出优于其他模型的优势,继而为该物种的保护区规划、生物多样性保护提供重要指导意见^[25-27]。

云南榧树(*Torreya yunnanensis*)简称云南榧,是红豆杉科(Taxaceae)榧树属(*Torreya*)第三纪孑遗珍稀濒危植物,是中国二级保护植物^[28],也是中国重要的经济树种和生态树种。目前,云南榧仅分布在云南省西北部海拔2000—3400 m的高山地带,包括丽江、维西、贡山、中甸等地。云南榧适宜生存在温凉湿润的气候条件下与酸性棕色的森林土壤中,后期能长成胸径60—100 cm的乔木,宜作为云南省西北森林更新和造林树种^[29]。近年来,受气候变化和人为活动的影响,野生云南榧的现存种群数量、分布面积都在以不同的速率减少,濒危趋势进一步加重^[30-31]。目前,云南榧的研究主要集中在营养成分、药理作用和遗传多样性等方面^[32-36],对其潜在的适宜分布区的研究尚属空白。通过研究云南榧潜在生境的分布情况及其与环境因子的关系,可为其保护开发与利用提供重要的科学理论和实践依据。基于此,本文根据云南榧生长环境的特点,以云南省为界,收集与其相关的环境数据如气候、土壤和地形因子等,样点采用存在记录点,利用MaxEnt与

ArcGIS 构建其潜在生境的空间适宜性分布模型,并推断出影响其分布的主要环境因子,同时将云南榧的潜在生境的地理范围与云南省现有的自然保护区的地理范围进行叠加分析,为云南榧这种孑遗植物的系统保护规划提供科学依据。

1 数据处理与研究方法

1.1 研究区概况

云南省($21^{\circ}8' - 29^{\circ}15'N$, $97^{\circ}31' - 106^{\circ}11'E$)总面积为 39.41 万 km^2 ,属山地高原地形,山地面积占全省总面积的 88.64%,地势呈西北高、东南低,海拔 76.4—6740 m。气候属亚热带高原季风型,气候带垂直差异显著;年温差小、日温差大。全省降水在季节上和地域上分布差异大,年均降水量 1278.8 mm,多数地区年降水量大于 1000 mm,有些地方降水量最多可达 2200—2700 mm,有些地方降水量最少仅 584 mm^[37]。云南省植物资源丰富且独特,有超过 18000 多种高等植物物种,占中国总数的 51.6%,在云南发现的 15000 种种子植物中,有 151 种稀有和濒危植物(占中国受保护植物的 42.6%)^[38],三江并流区在更新世期间被鉴定为植物的避难所^[39]。

1.2 云南榧地理分布数据来源

云南榧的地理分布点主要通过中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、全球生物多样性信息设施(<https://www.gbif.org>)、相关文献资料^[40—42]和实地调查获得。对有地名无坐标信息的样点通过谷歌地图补全其地理坐标,同时去除错误坐标信息和在同网格重复的样点,最终获得 50 个云南榧有效的存在记录点(图 1),年份范围为 1928—2019 年,以上存在记录点均为自然分布点。

1.3 环境数据的收集与处理

气候因子 19 个,来自世界气候数据库(www.worldclim.org);土壤因子 29 个,来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)和世界土壤数据库(http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1247);海拔数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),经 ArcGIS 10.2 处理得到坡度和坡向;云南

省范围和境内主要河流数据来自中国科学院资源环境科学数据中心;云南省自然保护区的面积及分布地理位置数据来自云南省林业调查规划院,包括国家级、省级、州县级自然保护区。以上数据采用 ArcGIS 10.2 处理并统一坐标,空间分辨率为 1 $km \times 1$ km ,输出为 .asc 格式文件,用于 MaxEnt 软件对潜在生境的模拟。

1.4 MaxEnt 软件参数设置

首先利用 MaxEnt 软件中的刀切法(Jackknife)评价 51 个环境因子对影响云南榧潜在生境分布情况的贡献率,并利用 SPSS 软件对 51 个环境因子进行斯皮尔曼(spearman)相关性分析。其次为避免过度拟合,取贡献率 $\geq 1\%$ 的因子,去除相关系数 $|r| \geq 0.8$ 和贡献率较低的因子^[43—44]。最后得到 7 个对云南榧潜在生境的分布影响较高的因子:最冷季平均降水量(Mean precipitation of the coldest quarte, Bio19)、降水季节性变异系数(Precipitation seasonality (Coefficient of Variation), Bio15)、年温差范围(Annual range of temperature, Bio7)、土壤容重(Soil bulk density, Sio27)、土壤类型(Soil type, Sio1)、坡向(Aspect of the terrain, Asp)、下层土壤中的百分比粘土(Subsoil clay fraction, Sio2)作为主导环境因子。通过利用云南榧的存在记录点和主导环境因子

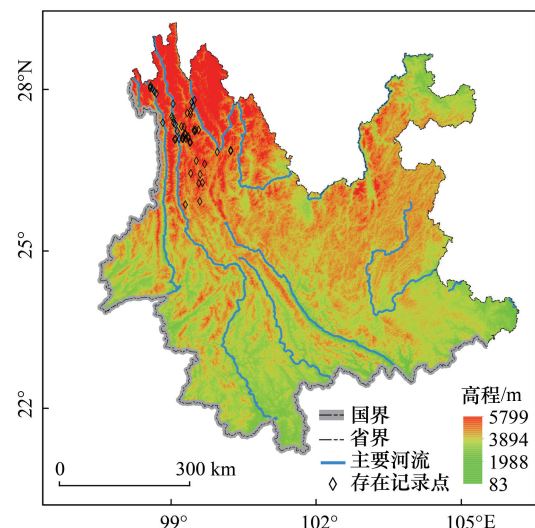


图 1 云南榧在云南省的存在记录点的地理位置示意图

Fig.1 The geographical location of *Torreya yunnanensis* efficiently distributed points in Yunnan province, China

数据在 MaxEnt 软件中对其潜在生境的范围进行预测(图 4)。其中,分别使用所有环境因子和主导环境因子在 MaxEnt 软件中模拟时,训练集数据量为云南榧存在记录点的 75%,测试集数据量为云南榧存在记录点的 25%,重复 10 次,其他参数为默认^[45]。

1.5 云南榧的适宜生境的划分依据

生境的变化是影响植物分布的重要因子^[46],政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)曾评估全球气候变化将使得许多植物的生存受到威胁^[47-48],特别对于遗植物而言,生境的变化尤为重要。在现有的云南榧的调查数据中,野生云南榧主要分布在三江并流区的特殊气候地形环境中,利用 Maxent 模型模拟出的云南榧潜在生境也主要分布在三江并流区(图 3)。它的潜在分布主要受气候因子的影响(图 4)。因此,参照 IPCC^[49]关于评估物种适宜生存“可能性”的划分标准,将云南榧在研究区域的潜在生境按适宜程度划分为: $P < 0.05$ 为不适宜区; $0.05 \leq P < 0.33$ 为低适宜区; $P \geq 0.33$ 为高适宜区。

2 结果与分析

2.1 模型适用性评价

利用受试者工作特征(Receiver Operator Characteristic, ROC)曲线作为模型模拟预测精度的评判方法,所有环境因子和主导环境因子的 AUC 值的平均值分别为 0.973 和 0.977(图 2),均大于 0.9,说明使用主导环境因子利用 MaxEnt 模型来预测云南榧的潜在生境分布情况的性能出色,预测结果精度高^[50],能有效避免过拟合现象。

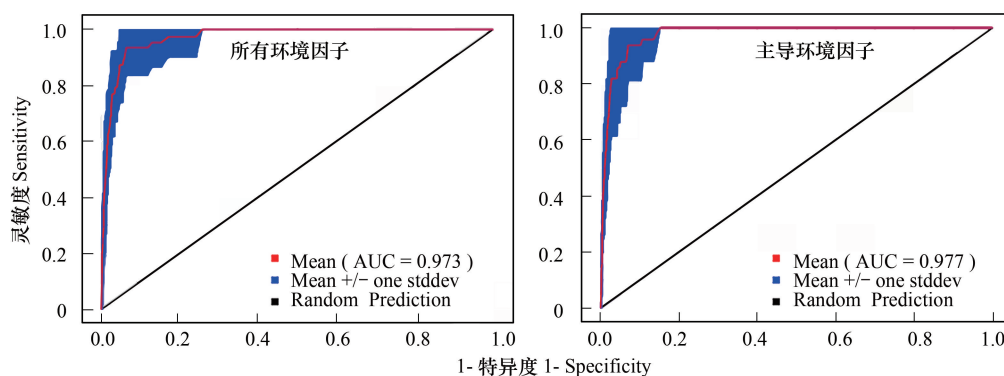


图 2 不同环境因子组合下的云南榧潜在生境预测结果 ROC 曲线

Fig.2 ROC curve of *Torreya yunnanensis*' potential habitat under different combinations of environmental factors

2.2 云南榧潜在分布区的范围

云南榧潜在生境主要分布在云南省西北部的三江并流区(图 3),具体分布在怒江州、丽江市、迪庆州和大理市,其潜在生境面积为 35243.43 km²,占云南省总面积的 8.95%。高适宜区仅占云南省面积的 2.72%,为 10711.35 km²,其中高适宜区在迪庆州维西县的占地面积最广。同时,靠近云南省东北部的昭通市的金沙江段的江边也存在云南榧的低适宜区。将云南榧潜在生境的地理范围和云南省自然保护区的地理范围叠加后(图 3),云南榧潜在生境在云南省自然保护区内的面积为 4170.38 km²,仅占有所有潜在生境面积的 11.83%。云南榧潜在生境主要分布在高黎贡山(I)、白马雪山(II)、云岭(III)自然保护区内,以分布在高黎贡山自然保护区内的面积最大(2364.35 km², 58.35%),其次为白马雪山自然保护区(846.46 km², 31.66%),云岭自然保护区(625.55 km², 82.42%)。云南榧的高适宜区在云南省自然保护区内的面积为 1081.72 km²,占有所有高适宜区面积的 10.10%。云南榧的高适宜区占高黎贡山自然保护区的面积最大(710.72 km², 17.54%),其次为白马雪山自然保护区(229.38 km², 8.58%),云岭自然保护区(55.20 km², 7.27%)。云南榧潜在生境在现有的自然保护区内的面积少,其高适宜区在现有的自然保护区的面积更少。

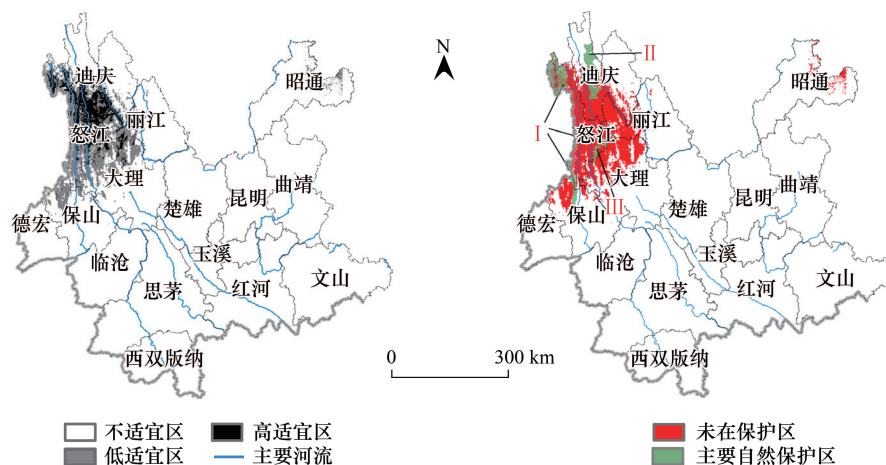


图 3 云南榧在云南省的适宜性分布图和云南榧的潜在生境分布区与云南省自然保护区的关系的示意图

Fig.3 Suitability distribution of *Torreya yunnanensis* and schematic diagram of the relationship between potential habitat distribution areas of *Torreya yunnanensis* and Nature Reserves in Yunnan Province, China

I. 高黎贡山自然保护区 (Gaoligong Mountain Nature Reserve), II. 白马雪山自然保护区 (Baima Snow Mountain Nature Reserve) 和 III. 云岭自然保护区 (Yunling Nature Reserve)

2.3 主导影响因子的贡献率

刀切法的检验结果显示 (图 4), 在气候因子中的最冷季平均降水量 (Bio19)、降水季节性变异系数

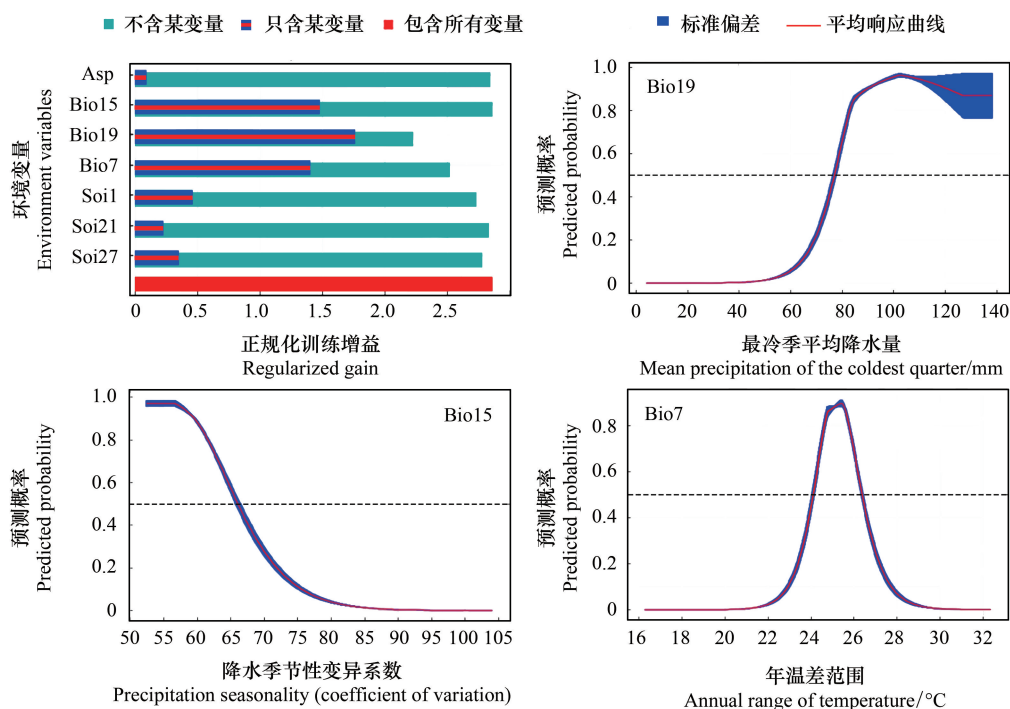


图 4 主导环境因子对云南榧潜在分布的贡献率及其对云南榧潜在分布的响应曲线示意图

Fig.4 Schematic diagram of the contribution rate of dominant environmental factors to the potential distribution of *Torreya yunnanensis* and the response curve of dominant environmental factors to the potential distribution

Bio19 为最冷季平均降水量 (Mean precipitation of the coldest quarter (mm)); Bio15 为降水季节性变异系数 (Precipitation seasonality (Coefficient of Variation)); Bio7 为年温差范围 (Annual range of temperature (°C)); S27 为土壤容重 (Soil bulk density (kg/dm³)); S1 为土壤类型 (Soil type); Asp 为坡向 (Aspect of the terrain); S2 为下层土壤中的百分比粘土 (Subsoil clay fraction (Percentage by weight))

(Bio15)和年温差(Bio7)的累计贡献率>80.00%。在土壤因子中的土壤容重(Sio27)、土壤类型(Sio1)、下层土壤中的百分比粘土(Sio2),在地形因子中的坡向(Asp),以上因子的累计贡献率为12.70%。气候因子是影响其潜在分布的主要因子,土壤、地形因子次之。其中,降水量为气候因子中影响云南榧潜在生境分布的最主要因子,其次为温度。

根据 MaxEnt 模型定义物种出现的概率 $P=0.5$ ^[24],结合前人利用 MaxEnt 模型模拟植物潜在生境的相关研究^[43,51],本文以预测概率 $P=0.5$ 为预测阈值。云南榧的分布概率—环境因子的响应曲线显示,预测得到的云南榧的分布区的最冷季平均降水量的适宜值为 75.58 mm 以上,降水季节性变异系数的适宜值小于 64.28,适宜其生长的年温差范围为 24.08—26.40℃。以上结果说明,过高或过低的降水量、年温差均不适宜云南榧的生长,充足而又稳定的降水量、稳定的温度是影响云南榧生存的首要环境因子。综上,影响云南榧分布的气候条件较严苛。

3 讨论

3.1 影响云南榧的潜在分布范围的环境因子

根据 Maxent 模型的预测结果,云南榧的潜在生境分布主要受到气候与地形限制。三江并流区内高山河谷相间呈纵列分布,海拔高差大,造就了此地区气候的特殊性。受全球气候变化和人类活动的影响,此区的生物多样性遭到不同程度的破坏。区域内温度升高和雪线上升^[52—54],在低海拔区常形成干热河谷^[55—56],从而形成山顶寒冷而山脚干热的独特气候,这使一些非高寒植物(中低海拔)迁移至高寒生物区,有适应性演化的行为而演变成高寒植物^[57]。云南榧与其他孑遗植物如云南红豆杉(*Taxus yunnanensis*)和珙桐(*Davidia involucrata*)的生境特征有一定的相似性。云南红豆杉的潜在生境也似云南榧分布,其主要分布在三江并流区,主要受海拔和年均温等环境因子的影响^[58],但在地理分布上,云南红豆杉的生长环境没有像云南榧这样严格受到气温与降水的限制,在三江并流区外也分布较多。珙桐在中国广泛分布,影响其潜在生境的主要因子也与云南榧相似,为年温差、海拔、最冷月最低温、季节性降水变异系数等^[26,59]。本研究的预测结果显示,海拔不是 Maxent 模型预测结果中影响云南榧潜在生境分布的主要因子,但云南榧的潜在分布区主要在云南省西北部的高海拔地区。综上,稳定、充足的降水量和稳定的温度是影响云南榧适宜性生存的重要条件。三江并流区特殊的高“寒”低“热”气候,使其只能向高山迁移,不能往低处迁移,造成其生境范围在不断变小。榧属中的四川榧、巴山榧和云南榧的形态特征较为相似,此三种植物在种属界定上仍存在较大争议^[29,60—63]。云南榧的近缘种—四川榧分布在四川乌衣乡,金沙江沿岸,外观与云南榧最为接近,但体态却与云南榧有较大差异^[63]。巴山榧在秦岭、大娄山、大巴山、邛崃山、巫山、武陵山和大别山等地呈零星的斑块状分布,分别跨四川、山西、湖南、湖北、贵州、重庆等省^[64—65],在金沙江沿岸也有分布。此三种榧属植物在相似的纬度、海拔均有分布,在金沙江沿岸也均有个体的分布。这些相似的生态地理分布可能是使它们有相似的形态特征的主要原因之一。榧属植物的种子呈卵形—圆形,种皮外壳坚硬光滑,耐泡水,在 9—10 月份种子成熟,常需层积处理促进发芽^[66—68]。因此,充足的最冷季降水和稳定的降水季节性变异系数是其催熟的重要因素。云南省西北部的降水增多会使云南榧更易于冲刷至河流^[69—70],金沙江可能是榧属植物的一个重要的种间交流通道。

3.2 云南榧的潜在分布区与云南省主要自然保护区的关系

云南榧的潜在生境主要分布在三江并流区,面积为 35243.43 km²,占云南省总面积的 8.95%,主要分布在丽江市、怒江州、迪庆州、大理市等地。在云南省自然保护区内的云南榧的潜在生境仅占有潜在生境的 11.83%,主要分布在高黎贡山、白马雪山、云岭自然保护区内,但其潜在生境大多分布在现有自然保护区之外。三江并流区是中国的生物多样性富集地区,也是全球生物多样性热点地区^[71—72],其独特的地形气候为许多物种提供了适宜的生存条件,虽然三江并流区的大部分环境适宜云南榧的生存,但此地区受河谷切割和气候限制,其立地条件复杂,动物并不能作为植物迁徙主要传播者,亟需对云南榧引种保护。自然保护区作为云南省生物多样性保护地的主要类型,主要保存了最为原始、完整的森林生态系统和丰富的生物多样性,在物种

多样性、遗传多样性及生态系统多样性的保护方面取得显著成效^[73-74]。云南榧在云南省自然保护区的高适宜区的面积占有高适宜区面积的 10.10%,面积仅为 1081.72 km²,它的多数高适宜区位于未保护的地区内,在高适宜区建立云南榧的自然保护小区是其发展的重要保护措施之一。其中,维西县是云南榧潜在分布区和高适宜区面积重叠最多的地区,建议在维西县的云南榧高适宜区建立自然保护小区,对其进行就地保护。同时,维西县也是受生态系统退化威胁最严重的地区之一,建立自然保护小区也能保护当地的生态环境^[75]。生物多样性的提高也能提高自然保护区内的生态稳定性^[30],云南榧曾为滇西北主要的优势树种,它的存在对当地的生物多样性的提高、生态系统的稳定功不可没。因此,也应在高黎贡山、白马雪山、云岭自然保护区内的高适宜区对其进行试点引种栽培,进行迁地保护,以探究其生长与当地环境的关系。

4 结论

(1)气候是影响云南榧潜在分布的关键因素,主要为降水量,其次为温度。加上三江并流区特殊地形特征,造成其潜在分布区的范围小。云南榧种子具有难以发芽的特性,主导气候因子—年温差—可为其种子层积处理的温度选择提供思路。

(2)云南榧的潜在分布区主要集中在三江并流区,但其潜在分布区在云南省自然保护区内的面积小,仅占有潜在生境面积的 11.83%。需在维西县为其建立保护小区,并在高黎贡山、白马雪山、云岭自然保护区内的高适宜区对其进行引种栽培。此外,云南榧潜在分布的高适宜区可优先作为对其进行保育调查的地区。

(3)金沙江可能是云南榧与其他相似种的一个重要的种间交流通道。在对云南榧与其他相似种的种间分类鉴定时,应考虑其所在地地形与气候特征,特别是它们在金沙江流域的分布特点。

本研究仅从环境因素的角度考虑云南榧的潜在分布,未将云南榧的遗传变异、人文环境等因子相结合分析,其潜在生境分布结果可能会与实际结果有一定的偏差。后续研究可将云南榧潜在生境的分布与种质竞争、遗传分子、植物形态、人为环境等方面的工作相结合进行比较研究,从而为云南榧的保育工作提供更科学的理论依据。

参考文献(References):

- [1] Chen S P, Wang W T, Xu W T, Wang Y, Wan H W, Chen D W, Tang Z Y, Tang X L, Zhou G Y, Xie Z Q, Zhou D W, Shangguan Z P, Huang J H, He J S, Wang Y F, Sheng J D, Tang L S, Li X R, Dong M, Wu Y, Wang Q F, Wang Z H, Wu J G, Chapin F S, Bai Y F. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (16): 4027-4032.
- [2] Quijas S, Schmid B, Balvanera P. Plant diversity enhances provision of ecosystem services; a new synthesis. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11 (7): 582-593.
- [3] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, Da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403 (6772): 853-858.
- [4] 覃海宁, 赵莉娜, 于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林秦文, 薛纳新. 中国被子植物濒危等级的评估. *生物多样性*, 2017, 25(7): 745-757.
- [5] Huang H W. Plant diversity and conservation in China: planning a strategic bioresource for a sustainable future. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2011, 166(3): 282-300.
- [6] Mittermeier R A, Turner W R, Larsen F W, Brooks T M, Gascon C. Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots//Zachos F E, Habel J C, eds. *Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [7] Brooks T M, Mittermeier R A, Da Fonseca G A B, Gerlach J, Hoffmann M, Lamoreux J F, Mittermeier C G, Pilgrim J D, Rodrigues A S L. Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 2006, 313(5783): 58-61.
- [8] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 杨军, 张新时, 郭柯. 物种分布模型理论研究进展. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [9] Liu C X, Chen L S, Tang W, Peng S F, Li M Q, Deng N, Chen Y Z. Predicting potential distribution and evaluating suitable soil condition of oil tea camellia in China. *Forests*, 2018, 9(8): 487.
- [10] Liu C R, White M, Newell G, Griffioen P. Species distribution modelling for conservation planning in Victoria, Australia. *Ecological Modelling*, 2013, 249: 68-74.
- [11] Fajardo J, Lessmann J, Bonaccorso E, Devenish C, Muñoz J. Combined use of systematic conservation planning, species distribution modelling,

- and connectivity analysis reveals severe conservation gaps in a megadiverse country (Peru). *PLoS One*, 2014, 9(12): e114367.
- [12] Descombes P, Petitpierre B, Morard E, Berthoud M, Guisan A, Vittot P. Monitoring and distribution modelling of invasive species along riverine habitats at very high resolution. *Biological Invasions*, 2016, 18(12): 3665-3679.
- [13] Hunt E R Jr, Gillham J H, Daughtry C S T. Improving potential geographic distribution models for invasive plants by remote sensing. *Rangeland Ecology & Management*, 2010, 63(5): 505-513.
- [14] Srivastava V, Lafond V, Griess V C. Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. *CAB Reviews*, 2019, 14(20): 1-13.
- [15] Beaumont L J, Hughes L, Pitman A J. Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important? *Ecology Letters*, 2008, 11(11): 1135-1146.
- [16] Forester B R, DeChaine E G, Bunn A G. Integrating ensemble species distribution modelling and statistical phylogeography to inform projections of climate change impacts on species distributions. *Diversity and Distributions*, 2013, 19(12): 1480-1495.
- [17] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- [18] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 273-283.
- [19] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A, NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [20] Chen X M, Lei Y C. Effects of sample size on accuracy and stability of species distribution models: a comparison of GARP and Maxent//Qian Z H, Cao L, Su W L, Wang T K, Yang H M, eds. *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 601-609.
- [21] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [22] Fois M, Fenu G, Cuena Lombraña A, Cogoni D, Bacchetta G. A practical method to speed up the discovery of unknown populations using Species Distribution Models. *Journal for Nature Conservation*, 2015, 24: 42-48.
- [23] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [24] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [25] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 李同艳, 余岚. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估. *生态学报*, 2019, 39(24): 9033-9043.
- [26] 王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1230-1237.
- [27] 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.
- [28] 国家林业局, 农业部. 国家重点保护野生植物名录. [2021-10-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm
- [29] 郑万钧, 傅立国. 中国植物志(第七卷) 裸子植物门. 北京: 科学出版社, 1978.
- [30] 胥辉, 许彦红, 覃家理. 滇西北典型森林生态系统及珍稀濒危植物保育研究. 昆明: 云南科技出版社, 2014.
- [31] 胡晓立, 侯玉平, 王跃华. 丽江老君山地区重要的珍稀、濒危种子植物. *云南大学学报: 自然科学版*, 2003, 25(S1): 107-109, 114-114.
- [32] 陈振德, 侯连兵, 谢立, 许重远, 郑汉臣. 榧子药材性状与商品鉴定. *中药材*, 2000, 23(1): 19-22.
- [33] 陈振德, 郑汉臣, 傅秋华, 周亚峰, 翁益明. 国产榧属植物种子油含量及其脂肪酸测定. *中国中药杂志*, 1998, 23(8): 456-457, 482-482.
- [34] 周炳江, 李靖, 马长乐, 张金丽. 基于广泛代谢组学的云南榧子营养成分分析. *食品研究与开发*, 2020, 41(12): 42-47.
- [35] 李向楠, 周稚凡, 刘凤路, 李靖. 云南榧种子内生真菌的分离鉴定及抑菌活性筛选. *生物灾害科学*, 2016, 39(1): 20-26.
- [36] 马长乐, 周稚凡, 李向楠, 付荣, 黄晓霞, 李靖. 云南榧子和香榧子营养成分比较研究. *食品研究与开发*, 2015, 36(14): 92-94.
- [37] 熊俊楠, 彭超, 程维明, 李伟, 刘志奇, 范春捆, 孙怀张. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1830-1840.
- [38] Yang Y M, Tian K, Hao J M, Pei S J, Yang Y X. Biodiversity and biodiversity conservation in Yunnan, China. *Biodiversity & Conservation*, 2004, 13(4): 813-826.
- [39] López-Pujol J, Zhang F M, Sun H Q, Ying T S, Ge S. Centres of plant endemism in China: places for survival or for speciation? *Journal of Biogeography*, 2011, 38(7): 1267-1280.
- [40] 侯昭强, 文光玉, 周丹, 李敏敏, 杜凡. 云南榧树群落及其植物区系特征研究. *西部林业科学*, 2015, 44(3): 37-44.
- [41] 沈登峰, 付秋华, 骆成方, 曾燕如, 喻卫武, 戴文圣, 黎章矩. 榧树变异类型的初步研究. *林业科技开发*, 2014, 28(2): 68-71.
- [42] 陈振德, 谢立, 何英, 梁强. 云南榧子中多糖的含量测定及其高效毛细管电泳指纹图谱分析. *中国药房*, 2005, 16(23): 1817-1818.
- [43] 郭燕青, 史梦竹, 李建宇, 傅建炜, 吴梅香. 基于 Maxent 模型的假臭草潜在分布区预测. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(3): 250-260.
- [44] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia*

- adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [45] Moreno R, Zamora R, Molina J R, Vasquez A, Herrera M Á. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, 2011, 6(6): 364-370.
- [46] Mantyka-Pringle C S, Visconti P, Di Marco M, Martin T G, Rondinini C, Rhodes J R. Climate change modifies risk of global biodiversity loss due to land-cover change. *Biological Conservation*, 2015, 187: 103-111.
- [47] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Bindi M, Brown S, Camilloni I, Diedhiou A, Djalante R, Ebi K L, Engelbrecht F, Guiot J, Hijioka Y, Mehrotra S, Payne A, Seneviratne S I, Thomas A, Warren R, Zhou G S. Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H O, Roberts D, Skea J, Shukla P R, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews J B R, Chen Y, Zhou X, Gomis M I, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T, eds. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report*. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2018.
- [48] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, De Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Townsend Peterson A, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [49] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2007: 104-104.
- [50] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [51] 郭杰, 刘小平, 张琴, 张东方, 谢彩香, 刘霞. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 992-1000.
- [52] 王文礼. 滇西北"三江并流"区高山树线的分布格局及其形成机制[D]. 昆明: 云南大学, 2014.
- [53] 张志坤, 杨昆, 王加胜, 朱彦辉, 洪亮. 三江并流区德钦县积雪面积时空变化分析. *人民长江*, 2017, 48(23): 29-34.
- [54] 杜建括, 辛惠娟, 何元庆, 牛贺文, 蒲焘, 曹伟宏, 张涛. 玉龙雪山现代季风温冰川对气候变化的响应. *地理科学*, 2013, 33(7): 890-896.
- [55] 明庆忠, 史正涛. 三江并流区干热河谷成因新探析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 99-104.
- [56] 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 欧晓昆, 耿宇鹏, 杨明玉. 云南干热河谷植被与环境研究进展. *生物多样性*, 2016, 24(4): 462-474.
- [57] Ding W N, Ree R H, Spicer R A, Xing Y W. Ancient orogenic and monsoon-driven assembly of the world's richest temperate alpine flora. *Science*, 2020, 369(6503): 578-581.
- [58] 庄鸿飞, 秦浩, 王伟, 张殷波. 基于 MaxEnt 模型的云南红豆杉潜在适宜分布预测. *山西大学学报: 自然科学版*, 2018, 41(1): 233-240.
- [59] 陈俪心, 和梅香, 王彬, 谭进波, 黄耀华, 冉江洪. 基于 MaxEnt 模型的凉山山系珙桐种群适宜生境分布及其影响因素分析. *四川大学学报: 自然科学版*, 2018, 55(4): 873-880.
- [60] 康宁, 汤仲坝. 榧属分类学研究. *植物研究*, 1995, 15(3): 349-362.
- [61] 周先容, 尚进, 陈发波, 宋晓宏, 江波. 巴山榧树及近缘种的 *psbA-trnH* 序列分析. *西部林业科学*, 2015, 44(1): 16-21.
- [62] 马俊, 陈发波, 周先容, 汪建华, 宋晓宏. 不同地理种群巴山榧树及近缘种叶绿体 *trnL-trnF* 序列的分析. *基因组学与应用生物学*, 2014, 33(5): 1053-1058.
- [63] 易同培, 杨林, 隆廷伦. 榧属(红豆杉科)一新种——四川榧. *植物研究*, 2006, 26(5): 513-515.
- [64] 周先容, 张薇, 何兴金, 周颂东, 余岩, 汪建华. 巴山榧树(*Torreya fargesii*)资源及其保护. *东北林业大学学报*, 2012, 40(2): 42-46.
- [65] 周先容, 余岩, 周颂东, 何兴金. 巴山榧树地理分布格局及潜在分布区. *林业科学*, 2012, 48(2): 1-8.
- [66] 江波, 周先容, 龚练, 秦明一, 盛亚莉, 郑永红, 李枝. 巴山榧树种子特性与幼苗生长规律. *种子*, 2016, 35(10): 14-18.
- [67] 司倩倩. 粗榧种子休眠特性及萌发生理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [68] 李金霞. 榧树种子层积过程中种胚发育及生化物质变化规律[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [69] 刘芳今, 张万诚, 陈艳, 马涛. 云南 50 年降水均一性与变化趋势分析. *云南大学学报: 自然科学版*, 2016, 38(6): 888-896.
- [70] 荣艳淑, 巩琳, 卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析. *水资源保护*, 2018, 34(3): 22-29.
- [71] 陈虹, 曹礼昆, 陆树刚. 三江并流的世界自然遗产价值——生物多样性. *中国园林*, 2004, 20(2): 40-43.
- [72] 刘硕然, 杨道德, 李先福, 谭路, 孙军, 和晓阳, 杨文书, 任国鹏, Fornacca D, 蔡庆华, 肖文. 滇西北高山微水体与溪流生境底栖动物多样性和环境特征. *生物多样性*, 2019, 27(12): 1298-1308.
- [73] 刘春晖, 杨京彪, 尹仑. 云南省生物多样性保护进展、成效与前瞻. *生物多样性*, 2021, 29(2): 200-211.
- [74] 邱成, 胡金明, 杨飞龄. 基于 NDVI 的云南省自然保护区保护成效分析. *生态学报*, 2020, 40(20): 7312-7322.
- [75] 任平, 程武学, 洪步庭, 周介铭. 基于 PSDR 理论框架下长江上游生态系统退化威胁评价与空间分布研究. *地理科学*, 2013, 33(2): 189-194.