

DOI: 10.5846/stxb202007211908

王鑫,任亦钊,黄琴,邓小兵,陈才文,邓洪平.基于 GIS 和 Maxent 模型的赤水河地区濒危植物桫欏生境适宜性评价.生态学报,2021,41(15): 6123-6133.

Wang X, Ren Y Z, Huang Q, Deng X B, Chen C W, Deng H P. Habitat suitability assessment of endangered plant *Alsophila spinulosa* in Chishui River area based on GIS and Maxent model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6123-6133.

基于 GIS 和 Maxent 模型的赤水河地区濒危植物桫欏生境适宜性评价

王鑫¹, 任亦钊¹, 黄琴¹, 邓小兵¹, 陈才文³, 邓洪平^{2,*}

1 四川省林业科学研究院, 成都 610081

2 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

3 四川省合江县自然资源和规划局, 合江 646200

摘要:桫欏有“蕨类植物之王”赞誉,有“活化石”之称,曾是地球上最繁盛的植物,与恐龙同期。由于地质变迁和气候变化,目前只能在极少数的“避难所”才能寻其踪迹,而赤水河地区是当下桫欏种群较为集中分布的区域。所以,了解桫欏在赤水河地区的适生区分布,对于桫欏种质资源保护、桫欏种群的恢复重建具有重要意义。基于桫欏在赤水河流域的 80 个桫欏分布点位、20 个样地信息和 22 个环境因子变量,借助 ArcGIS 运用 Maxent 模型软件预测了桫欏的潜在地理分布,综合环境因子变量贡献率、刀切法检验和土地利用现状变化对赤水河地区桫欏的生境适宜性进行评价分析,确定桫欏的生境适宜潜在地理分布区域和面积。研究表明:(1)Maxent 模型的预测准确度极高,模型的预测结果为“极好”;(2)最暖季的降水(39.65%)、温度日平均范围(18.21%)、温度季节性变化标准差(12.69%)和降水量季节性变异性系数(6.87%)是影响桫欏生长和分布的主导环境因子,累积贡献率达 77.42%,可见桫欏在生长过程中对降水、温度的变化较为敏感;(3)模型预测高适生区主要集中在四川(泸州、宜宾、自贡)、重庆、贵州(遵义),在空间上存在明显连续性,从高适生区到不适生区呈辐射状由中心向外围逐渐递减;虽桫欏高适生区面积高达 49842 km²,但现状生境破碎化,人为干扰,人工植被较多等的影响会对桫欏种群造成不利影响。综上,赤水河地区桫欏适生生境面积大、连通性好,为本地区的桫欏提供了优质的生存环境,森林的人工抚育可促进桫欏种群的延续。

关键词:桫欏;Maxent 模型;赤水河;生境适宜性;主导环境因子

Habitat suitability assessment of endangered plant *Alsophila spinulosa* in Chishui River area based on GIS and Maxent model

WANG Xin¹, REN Yizhao¹, HUANG Qin¹, DENG Xiaobing¹, CHEN Caiwen³, DENG Hongping^{2,*}

1 Sichuan Academy of Forestry Sciences, Chengdu 610081, China

2 Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

3 Hejiang Natural Resources and Planning Bureau, Sichuan Province, Hejiang 646200, China

Abstract: The *Alsophila spinulosa* is praised as “king of pteridophytes” and “living fossil”. It was once the most prosperous plant on the earth, when was the same period with dinosaurs. Due to the geological changes and climate changes, the trace of *Alsophila spinulosa* can only be found in a few “refuges” at present, and Chishui River area is the area where the population of *Alsophila spinulosa* is more concentrated. Therefore, understanding the distribution of *Alsophila spinulosa* in Chishui River area is of great significance for protection of *Alsophila spinulosa* germplasm resources and the restoration and

基金项目:自然保护地典型受损生态系统修复技术研究与应用(cstc2019jsex-tjsbX0005);环保部生物多样性保护及监测项目(2015)

收稿日期:2020-07-21; 网络出版日期:2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: denghp@swu.edu.cn

reconstruction of *Alsophila spinulosa* population. Based on 80 distribution points, 20 sample plots, and 22 environmental variables of *Alsophila spinulosa* in Chishui River Basin, the potentially geographical distribution of *Alsophila spinulosa* was predicted by Maxent model and ArcGIS software. The habitat suitability of *Alsophila spinulosa* in Chishui River region was evaluated and analyzed by combining with the contribution rate of environmental variables, knife cutting method, and land use status change. The suitable potential geographical distribution area and the area of *Alsophila spinulosa* habitat were determined. The results show that (1) the prediction accuracy of Maxent model is very high, and the prediction result of Maxent model is “Excellent”. (2) Precipitation in the warmest quarter (39.65%), mean diurnal range (mean of monthly (max temp-min temp)) (18.21%), temperature seasonality (standard deviation $\times 100$) (12.69%), and precipitation seasonality (Coefficient of Variation) (6.87%) are the main environmental factors affecting the growth and distribution of *Alsophila spinulosa*. The cumulative contribution rate of the three factors is 77.42%. It shows that *Alsophila spinulosa* is sensitive to the changes of precipitation and temperature during the growth process. (3) The model predicts that the high suitable areas are mainly concentrated in Sichuan (Luzhou, Yibin, Zigong), Chongqing and Guizhou (Zunyi), and there is obvious continuity in space. From the high suitable areas to the unsuitable areas, they radiate and gradually decrease from the middle to the outside. Although the high suitable area of *Alsophila spinulosa* is as high as 49842 km², the impacts of habitat fragmentation, human disturbance and more artificial vegetation on *Alsophila spinulosa* population will be adverse. In conclusion, the suitable habitat area of *Alsophila spinulosa* in Chishui River area is large and the connectivity is good, which provides a high-quality living environment for *Alsophila spinulosa* in this area, and the artificial tending of forest can promote the continuation of *Alsophila spinulosa* population.

Key Words: *Alsophila spinulosa*; Maxent model; Chishui River; habitat suitability; dominant environmental factor

植被对气候变化的响应一直是全球气候变化和生物地理学研究的热点问题^[1]。气候是影响区域乃至全球范围内物种和植被分布最重要的环境因子,气候变化是影响物种分布的决定性因素^[2-4]。20世纪以来,受人类干扰以及自然因素的影响,全球气候变化以变暖为主要特征^[5]。随着全球气候变暖,对物种生活史、物种分布、群落组成、植被格局以及生态系统的结构与功能产生了严重的威胁^[3,6-7]。所以,研究物种的潜在分布区及对未来气候变化的响应,对生态系统的可持续发展及制定生物多样性保护策略具有重要的作用^[6,8-10]。

物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)是基于物种已知的分布数据和相关环境因子,对物种分布及其生态需求进行模拟的一种方法^[11],现已被广泛应用于气候变化对物种潜在地理分布影响的研究^[12-14]。物种分布模型的发展,始于 BIOCLIM 模型^[15]的开发和应用,随后涌现出 HABITAT、DOMAIN、生态位因子分析模型(ENFA)、马氏距离(MD)、边界函数方法(BF)、最大熵模型(Maxent)、广义线性模型(GLM)、广义加法模型(GAM)、分类与回归树模型(CART)、推动回归树模型(BRT)、多元适应性回归样条(MARS)等基于统计的和基于规则集的遗传算法(GARP)、人工神经网络(ANN)等模型^[16-19]。其中,Maxent 模型具有稳定性和扩展性。基于 Maxent 最大模型和 ArcGIS 对物种的潜在地理分布进行预测,从而使研究者和决策者能提出相应的策略来降低气候变化对生物多样性造成的影响^[20]。

桫欏(*Alsophila spinulosa*),是桫欏科、桫欏属蕨类植物,有“蕨类植物之王”赞誉,有“活化石”之称。桫欏曾是地球上最繁盛的植物,与恐龙同期。由于地质变迁和气候变化,特别是第四纪冰期的影响,桫欏大都罹难,只有在极少数的“避难所”才能寻其踪迹^[21]。如今,残存的桫欏受森林破坏、人为砍伐或自然枯死的影响,其种群自然繁衍越来越困难,分布区也大幅度收缩,已处于濒危状态。在1999年,我国将桫欏科所有物种列为国家二级重点保护植物^[22]。然而,目前对桫欏的研究主要集中在生态位^[23-24]、群落特征^[25-27]和毛竹(*Phyllostachys edulis*)干扰^[28]等方面,少见桫欏对气候变化响应的报道。本研究结合泸州市、赤水市内自然保护地内大量样点信息和环境因子,基于 GIS 运用最大熵模型(Maxent)模型预测桫欏的适宜分布区,为赤水河地区野生桫欏种质资源的保护和在适宜分布区进行人工繁育提供理论依据。

1 研究区概况

研究区域地处四川省泸州市和贵州省赤水市,地处四川盆地盆边南部中山植被地区。属中亚热带湿润季风气候区,雨量充沛,立体气候和地区差异显著的气候特点。区域内主要有长江、赤水河和习水河三大水系,溪沟支流众多。年平均气温为 18.1℃,年均降雨量 1000 mm,年均相对湿度 82%,无霜期 340—350 d。土壤类型主要为黄壤、山地黄壤、山地黄棕壤。局部河谷焚风影响较显著,气候干热、降水较少。其主要植被类型有亚热带低山和中山偏湿性常绿阔叶林,亚热带低山常绿针叶林和亚热带丘陵低山竹林^[29]。

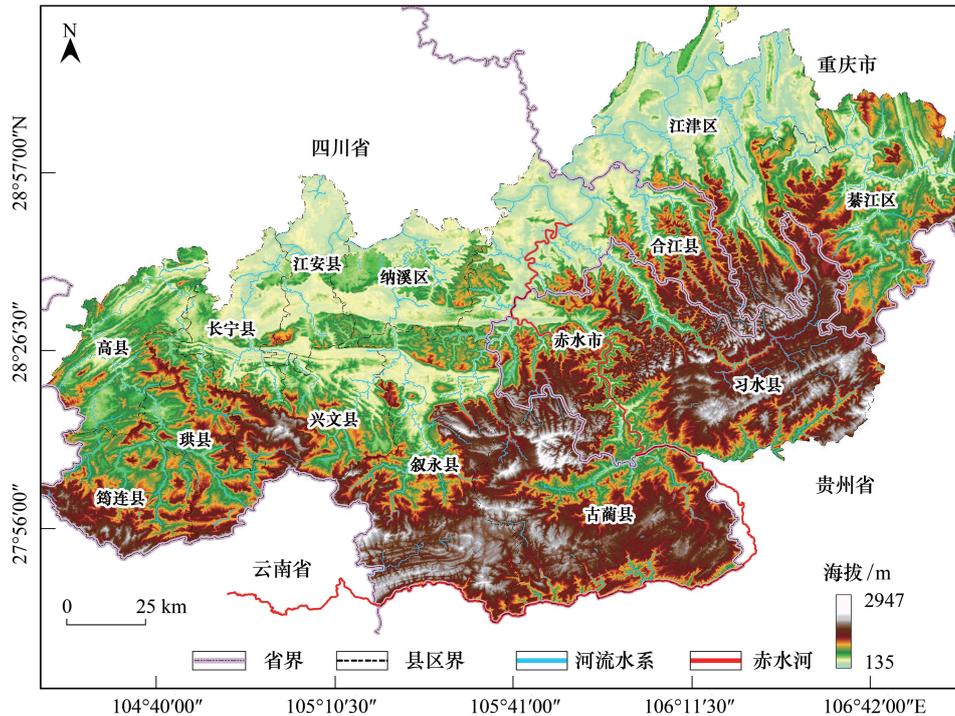


图 1 调查区域地形地貌及水系现状

Fig.1 Current situation of landform and water system in the survey area

2 研究方法

2.1 样地设置

参照巴拿马 Barro Colorado Island (BCI) 样地建设技术和经验^[30],以《生物多样性观测技术导则陆生维管植物(HJ710.1—2014)》的样地建设规范,结合林分和地形等因素进行样地设立,共设置 20 个 20 m×20 m 的样方,对样方内所有胸径大于等于 1 cm (DBH≥1 cm) 的乔木和灌木进行记录登记(不考虑芭蕉、竹类为草本植物和桫欏为蕨类植物),以胸径为依据对每木进行观测,记录物种名称、株高、胸径、冠幅等,并记录样地的郁闭度、海拔、坡度、坡位等环境因子^[26]。

2.2 数据来源及处理

2.2.1 桫欏分布点数据及预处理

本研究主要通过样线踏查、文献资料获取桫欏分布点数据。共在研究区域内布设了 110 条调查样线,总长度约 210 km,海拔跨度 135—1257 m,基本覆盖了桫欏在赤水河流域分布的主要海拔段。共得到 80 个桫欏分布点位,20 个样地信息,最后把 20 个样地信息转换成 ASCII 格式待用。

表 1 样方基本信息

样方号 Quadrat No.	海拔/m Altitude	坡向/(°) Aspect	坡度/(°) Slope	坡位 Slope position	干扰强度 Interference intensity	距水源距离 Distance from water source	优势物种 Dominant species
1	473	东 96	18	谷地	3	5	慈竹、银毛叶山黄麻、水麻 <i>Bambusa emeiensis</i> , <i>Trema nitida</i> , <i>Debregeasia orientalis</i>
2	602	东南 119	14	下坡	1	5	毛竹、银毛叶山黄麻、野桐 <i>Phyllostachys edulis</i> , <i>Trema nitida</i> , <i>Mallotus tenuifolius</i>
3	635	东南 126	8	谷地	1	5	红椿、毛竹 <i>Toona ciliata</i> , <i>Phyllostachys edulis</i>
4	590	东北 61	23	下坡	2	4	慈竹、樟、野桐 <i>Bambusa emeiensis</i> , <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Mallotus tenuifolius</i>
5	556	东南 115	25	下坡	4	5	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>
6	517	东 109	18	下坡	2	4	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>
7	421	西 280	31	下坡	4	3	毛竹、杉木、毛桐 <i>Phyllostachys edulis</i> , <i>Cunninghamia lanceolata</i> , <i>Mallotus barbatus</i>
8	444	西南 226	26	下坡	3	5	毛竹、穗序鹅掌柴、山杜英 <i>Phyllostachys edulis</i> , <i>Schefflera delavayi</i> , <i>Elaeocarpus sylvestris</i>
9	560	北 22	17	下坡	3	4	慈竹、灯台树 <i>Bambusa emeiensis</i> , <i>Cornus controversa</i>
10	569	东北 63	25	谷地	2	5	杉木、水麻 <i>Cunninghamia lanceolata</i> , <i>Debregeasia orientalis</i>
11	644	西北 300	19	谷地	3	5	野桐、胡桃楸、樟、毛竹 <i>Mallotus tenuifolius</i> , <i>Juglans mandshurica</i> , <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Phyllostachys edulis</i>
12	445	南 161	17	下坡	1	5	慈竹、木油桐、毛桐、芭蕉、穗序鹅掌柴 <i>Bambusa emeiensis</i> , <i>Vernicia montana</i> , <i>Mallotus barbatus</i> , <i>Musa basjoo</i> , <i>Schefflera delavayi</i>
13	479	西北 327	16	下坡	4	1	野漆、川桂、罗伞、慈竹 <i>Toxicodendron succedaneum</i> , <i>Cinnamomum wilsonii</i> , <i>Brassaiopsis glomerulata</i> , <i>Bambusa emeiensis</i>
14	550	东北 57	30	谷地	1	1	芭蕉、罗伞 <i>Musa basjoo</i> , <i>Brassaiopsis glomerulata</i>
15	900	东北 57	30	谷地	1	1	四川大头茶、赤杨叶、亮叶桦 <i>Polyspora speciosa</i> , <i>Alniphyllum fortunei</i> , <i>Betula luminifera</i>
16	913	西南 227	12	中坡	1	1	杉木、栲、杜鹃 <i>Cunninghamia lanceolata</i> , <i>Castanopsis fargesii</i> , <i>Rhododendron sp.</i>
17	560	东南 62	28	中坡	3	5	毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>
18	521	东南 143	9	谷地	5	5	脚骨脆、芭蕉 <i>Casuarina sp.</i> , <i>Musa basjoo</i>
19	514	东南 35	15	下坡	5	2	毛竹、芭蕉 <i>Phyllostachys edulis</i> , <i>Musa basjoo</i>
20	600	西南 65	18	中坡	4	2	毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>

①距水源距离: <20 m = 5; 20 m—40 m = 4; 40 m—60 m = 3; 60 m—80 m = 2; >80 m = 1 ②干扰强度: 强 = 5; 较强 = 4; 一般 = 3; 较弱 = 2; 弱 = 1.

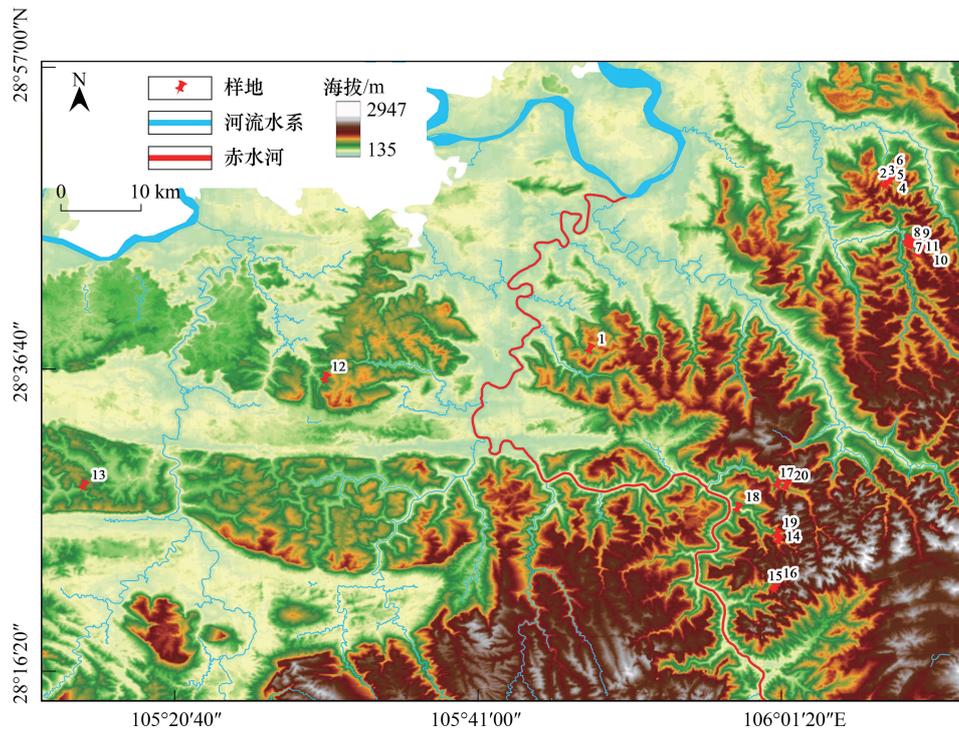


图 2 样方空间分布位置
Fig.2 Spatial distribution of quadrats
 1—20:样方号

2.2.2 环境变量数据及预处理

根据桫欏的生境,选择 21 个气候变量和 1 个海拔变量共计 22 个环境变量^[31-32]作为模型的备选变量(表 2)。其中,21 个气候变量从 WorldClim 数据库(<http://www.worldclim.org>)下载获得;海拔变量由中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台下载 30 m 分辨率的 DEM 计算所得^[33]。在 ArcGIS 10.6 中,将 22 个环境变量(表 2)图层的栅格大小、坐标系统一,并将图层边界统一,再将环境变量图层转化为 Maxent 模型软件需要的 ASCII 格式。

2.2 模型过程

将桫欏分布点数据和筛选得到的 22 个环境变量数据导入 Maxent 3.4.1 中,随机选取 75% 的分布点作为训练数据集用于建立模型,剩余 25% 的分布点作为检验数据集,其余设置为默认,用于模型验证。为保证模型结果的稳定性,进行 10 次自举法重复。以软件内建的变量贡献分析、响应曲线和 jackknife 检验分析模型中各环境变量的相对重要性及其对桫欏生境适宜性的影响。以受试者工作特征曲线(ROC)下的面积(Area Under Curve, AUC)对模型结果的优劣进行评价,其评判标准为:AUC 在 0.5—0.6 为 Fail;0.6—0.7 为 Poor;0.7—0.8 为 Fair;0.8—0.9 为 Good;0.9—1 为 Excellent^[34]。

2.3 生境适宜性划分

根据 10 次重复后 Maxent 输出的平均生境适宜度指数(Habitat suitability index, HSI)对桫欏的生境适宜性进行评价^[35]。在 ArcGIS 10.6 中对预测分布图以自然间断点分级法(Jenks)进行重分类,将生境分为不适生区、低适生区、中适生区和高适生区 4 类。

3 结果与分析

3.1 模型精度评价

根据平均 ROC 曲线评价结果(图 3)显示:桫欏生境预测模型训练数据 AUC 值与验证数据的 AUC 值均为

0.999, 明显大于随机分布的 AUC 值(0.500), 由此, 表明 Maxent 模型的预测结果为“Excellent”, 预测结果并非随机, 拟合程度相对较高, 结果是可信的, 可以用于桫欏的生境评价。

表 2 环境变量及代码

Table 2 Environment variables and codes

类别 Category	因子代码 Factor code	单位或说明 Unit or description	描述 Describe
生物气候变量 Bioclimatic variables	Bio_1	℃	年平均温度
	Bio_2	℃	日平均范围(每月平均值(最高温度-最低温度))
	Bio_3	ratio	等温(Bio_2/Bio_7)(×100)
	Bio_4	标准差	温度季节性(标准偏差×100)
	Bio_5	℃	最暖月的最高温度
	Bio_6	℃	最冷月份的最低温度
	Bio_7	℃	温度年度范围(Bio_5-Bio_6)
	Bio_8	℃	湿季平均温度
	Bio_9	℃	最干燥季度的平均温度
	Bio_10	℃	最暖季的平均温度
	Bio_11	℃	最冷季的平均温度
	Bio_12	mm	年降水量
	Bio_13	mm	湿月降水
	Bio_14	mm	最干旱月份的降水
	Bio_15	变异系数	降水季节(变异系数)
	Bio_16	mm	湿季降水
	Bio_17	mm	最干燥区的降水
	Bio_18	mm	最暖季的降水
	Bio_19	mm	最冷季的降水
	地形变量 Topographical factor	Srad_01	$\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Srad_07		$\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	7月太阳辐射
Alt_2.5		m	海拔高度

Bio: 生物气候 Bioclimatic; Srad: 太阳辐射 Sun radiation; Alt: 海拔 Altitude

3.2 桫欏分布与环境因子响应分析

物种的分布区主要取决于其主导环境因子, 在 Maxent 模型刀切法(Jackknife)分析各个生物环境因子对分布增益的贡献结果中表明(表 3), 主要环境因子及其贡献率为: Bio_2(18.21%)、Bio_4(12.69%)、Bio_14(6.58%)、Bio_15(6.87%)、Bio_18(39.65%)、Alt_2.5(6.82%), 以上 6 个因子总的贡献率达 90.81%。其中, 又以 Bio_18、Bio_2、Bio_4 和 Bio_15(6.87%) 为最主要的影响因子, 贡献率达 77.42%。

通过对 4 个最主要的影响因子的响应曲线分析可以发现桫欏对不同环境因子的偏好性(图 4)。桫欏偏好于温度日平均范围(Bio_2)偏低的生境, 生存概率 >0.5 的适应范围约为 5.8—6.8℃, 其最适生境 Bio_2 值为 6.5℃左右, 昼夜温差太高或太低均不适宜桫欏分布; 温度季节性(Bio_4)在 750 左右对其生境影响最为显

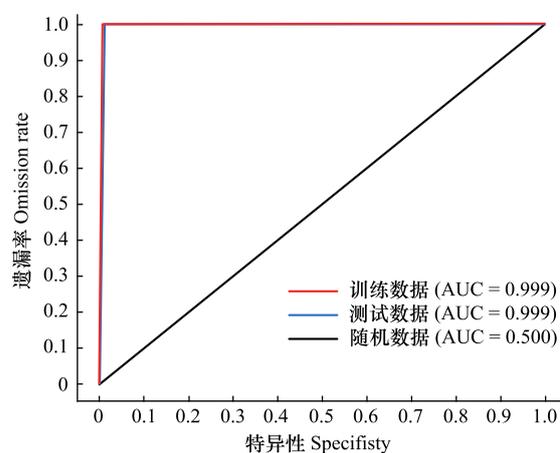


图 3 桫欏生境预测结果的 ROC 验证曲线

Fig.3 ROC validation curve for habitat prediction of *Alsophila spinulosa*

著,生存概率>0.5 的适应范围约为 700—830;桫欏对最暖季的降水量(Bio_18)有明显偏好,500 mm 时达到峰值,为桫欏最适分布条件,其生存概率>0.5 的适应范围约为 400—600 mm;降水量季节性变异性系数(Bio_15)在 65 左右对其生境影响最为显著,生存概率>0.5 的适应范围约为 60—70。

表 3 环境因子对 Maxent 模型的贡献率

Table 3 Contribution rate of environmental factors to Maxent model

环境变量 Environment variable	贡献率/% Contribution rate	环境变量 Environment variable	贡献率/% Contribution rate
Bio_1	0	Bio_12	0
Bio_2	18.21	Bio_13	0.02
Bio_3	1.33	Bio_14	6.58
Bio_4	12.69	Bio_15	6.87
Bio_5	1.09	Bio_16	0
Bio_6	1.52	Bio_17	0.43
Bio_7	0	Bio_18	39.65
Bio_8	0.11	Bio_19	2.48
Bio_9	0.32	Alt_2.5	6.82
Bio_10	0.20	Srad_01	1.65
Bio_11	0	Srad_07	0.03

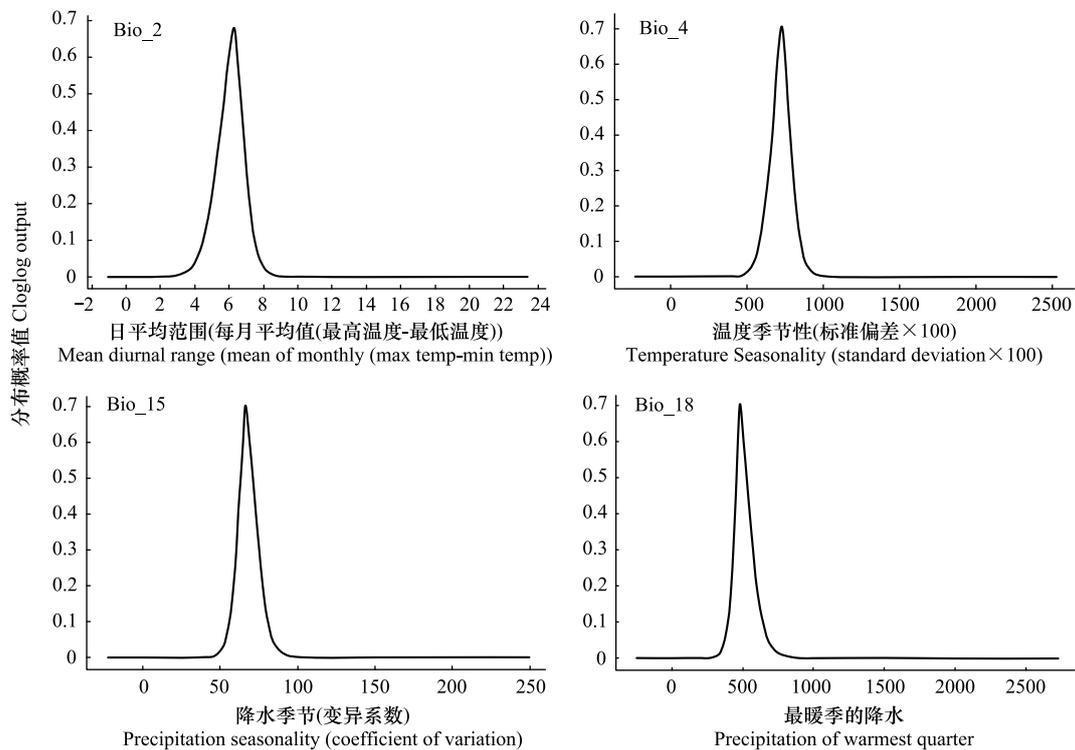


图 4 主导环境因子响应曲线

Fig.4 Response curve of dominant environmental factors

3.3 生境适宜性评价

生境适宜性是指生境能支持一个特定物种的潜在能力,对物种的生存和发展有着极为重要的意义。根据

Maxent 模型预测结果(图 5), 桫欏在赤水河地区的适生区的分布范围在空间上存在明显连续性, 从高适生区到不适生区成辐射状。模型预测高适生区主要集中在四川(泸州、宜宾、自贡)、重庆、贵州(遵义), 这与实地调查的结果基本一致, 也与文献资料已知桫欏种群在西南地区的集中分布区相似。

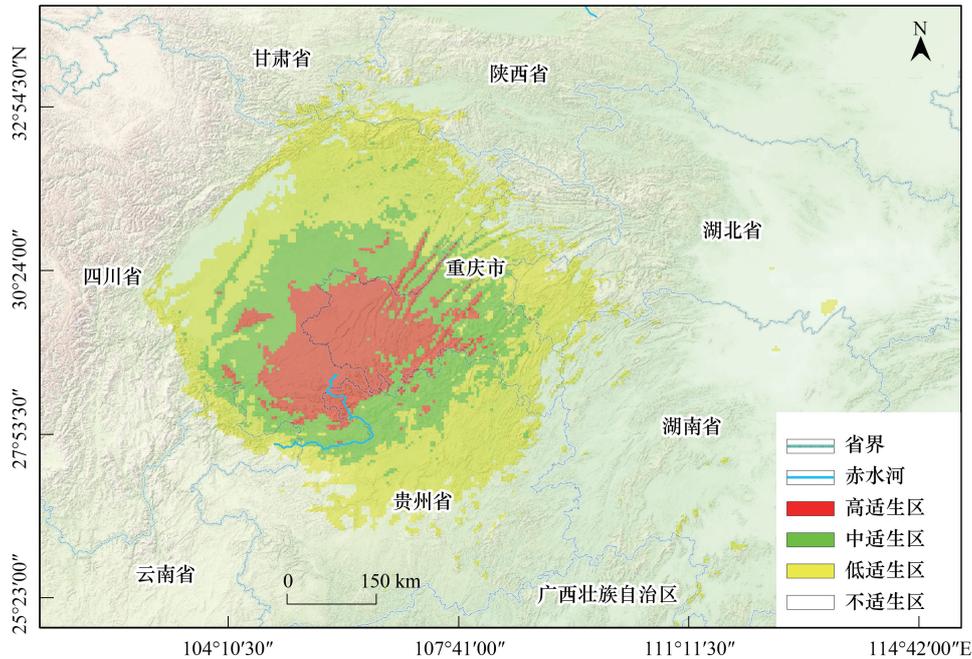


图 5 桫欏生境适生区分布图

Fig.5 Distribution map of suitable habitats for *Alsophila spinulosa*

3.4 桫欏高适生区土地利用类型的时空变化

从 1980—2018 年高适生区土地利用类型^[36]的变化可以看出, 近 38 年以来土地利用类型面积变化最大的为林地、草地和建筑用地。林地的正增长与草地的负增长的主要原因为天保工程、退耕还林工程的稳步推进^[37]。建筑用地的增加主要是城镇化的推进使城市规模不断扩大。

根据桫欏在赤水市、纳溪区、合江县、宜宾市的生境现状来看, 林地的增加主要是竹林面积的增加。竹类是需水性、再生性很强的植物, 生态位比桫欏更宽, 适生性更强^[24]。桫欏的适生生境正在被侵占、萎缩。

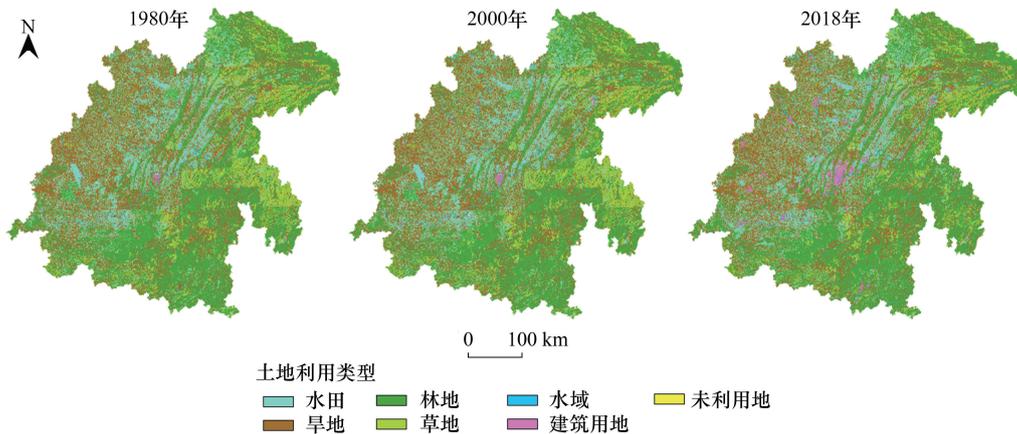


图 6 桫欏高适生区土地利用类型变化

Fig.6 Changes of land use types in high growth areas of *Alsophila spinulosa*

表 4 1980—2018 年高适生区土地利用类型变化统计

Table 4 Statistics of land use type change in high fitness area from 1980 to 2018

土地利用类型 Types of land use	年份 Years/hm ²			2018—1980	变化率/% Rate of change
	1980	2000	2018		
水田 Paddy field	343.97	341.65	332.99	-10.98	3.19%
旱地 Dry land	716.55	714.95	705.91	-10.64	1.48%
林地 Woodland	695.87	695.36	729.73	+33.86	4.87%
草地 Grassland	167.02	167.25	123.39	-43.63	26.12%
水域 Waters	21.13	21.76	27.9	+6.77	32.04%
建筑用地 Construction land	8.46	12.02	40.15	+31.69	374.59%
未利用地 Unused land	0.46	0.47	1.86	+1.4	304.35%

4 讨论

目前对动植物生境进行适宜性评价的模型主要包括 3 种:生态位模型、机理模型和回归模型,相比后两者,生态位模型会更注重考虑物种出现位点和环境变量因子,在一定程度上生态位模型的可信度更高^[38-39]。而 Maxent 模型是生态位模型中的一种典型代表。

4.1 影响桫欏生境适宜性的环境因子

根据张华等^[40]、陈爱莉等^[41]和王绮等^[42]分别对胡杨、紫楠和毛榛研究发现,植物对降水、温度的变化响应特别敏感。桫欏喜生存在温暖、潮湿、荫蔽、水分充足、土层肥厚和排水良好的环境中。基于 Maxent 模型的桫欏生境质量评价表明,在赤水河地区桫欏的生境质量非常高,且具有较好的连通性。桫欏的生境质量受多个环境因子的共同影响,其最适生境主要分布于最暖季的降水量约 500 mm,温度日平均范围约 6.5℃,海拔 800 m 左右,最干月份降水量约 20 mm 的区域内。结果表明:虽然,桫欏为高大的树状蕨类,但其孢子萌发、生长过程对降水、温度较为敏感,这与蕨类植物喜阴湿温暖的环境相符。

4.2 桫欏实际分布区与预测分布区生境适宜性评价

植物志记载桫欏生于山地溪傍或疏林中,在国内当前主要分布在贵州、云南、四川、重庆和广西等地^[43-44]。本研究显示桫欏高适生区集中在四川(泸州、宜宾、自贡)、重庆、贵州(遵义)等区域,本区域主要为丹霞地貌,特殊的地址构造为桫欏的繁育提供必备条件^[45],高适生区面积高达 49842 km²。但生境破碎化,人为干扰,人工植被^[46-47]的影响往往会对桫欏种群造成不利影响。据成晓霞^[28]的研究,随着毛竹干扰强度的增加,群落中桫欏和其他树种的立木度逐渐降低,桫欏群落的总立木数(含毛竹)减少,物种组成趋于简单化,幼株缺乏,种群衰退趋势明显。在毛竹群落中桫欏根系生物量密度均远低于毛竹,且二者呈负相关^[48]。

4.3 桫欏高适生区土地利用类型的时空变化与生境现状

赤水河地区的丹霞地貌生境为桫欏的种群延续提供了天然的条件,这一区域零星分布众多桫欏种群。

通过调查研究桫欏的生境现状发现,竹林生境中的桫欏多生于林缘,郁闭度较小的阔叶林中的桫欏可与阔叶树种共存。本次调查研究在合江县佛宝自然保护区内的溪沟边红椿林林缘发现两片较大桫欏种群,可见桫欏喜生水源充足、郁闭度小的林分中。随着天保工程、退耕还林的稳步推进,长江上游的植被覆盖率得到明显提升^[49-50]。赤水河地区的造林树种多以毛竹为主,这对桫欏来讲可能导致其种群衰退,如若不加以干预,长久来讲可能导致毛竹林中的桫欏绝灭。

5 结论和建议

根据 22 个历史环境变量数据预测显示,桫欏在现代气候条件下的潜在地理分布主要集中位于云、贵、川。限制桫欏生长的重要环境因子变量分别为:温度日平均范围、温度季节性、最暖季节降水量和降水季节性变异

性系数,适宜桫欏生长的环境因子变量范围为温度日平均范围为 5.8—6.8℃、温度季节性为 700—830、最暖季降水量为 400—600 mm 和降水量季节性变异性系数为 60—70。赤水河区域桫欏的适生区范围广泛,连通性较好,能够为桫欏提供良好的避难所。但本区域内的阔叶林逐渐被大面积的毛竹林取代,而桫欏为树状蕨类植物,植物体的生长发育维持需要消耗大量的养分,负责供给养分的地下部分却多为柔软纤细,入土不深的不定根^[51]。在根系发达的针阔树种、毛竹的地下竞争中处于劣势^[52],种群更新低、衰退趋势明显^[28]。加之桫欏分布的海拔较低,人为活动可达性较高;成年株限制了孢子繁育的繁育特点影响^[53]及未来气候变化趋势的不确定性。所以,虽然本区域内桫欏种群数量相对较多,但其生存现状不容乐观。因此,应在孢子成熟期人工收集桫欏孢子,在适生区内水热条件充足的区域开展人工繁育;在受毛竹中度及重度干扰及针阔混交林郁闭度较高的桫欏林中适度间伐、疏伐,避免桫欏的适生区被进一步侵占;根据实际加强普法教育,识别、保护桫欏,并在桫欏集中分布区设立警示标志和围栏或建立保护小区等保护措施。

参考文献 (References):

- [1] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [2] Lawler J J, Shafer S L, White D, Kareiva P, Maurer E P, Blaustein A R, Bartlein P J. Projected climate-induced faunal change in the western Hemisphere. *Ecology*, 2009, 90(3): 588-597.
- [3] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. *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, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 江泽慧. 全球变化背景下土地退化防治的挑战与创新. *世界林业研究*, 2013, 26(6): 1-4.
- [5] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [6] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1326-1334.
- [7] Thuiller W, Lavorel S, Araújo M B. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology & Biogeography*, 2005, 14(4): 347-357.
- [8] Williams J W, Jackson S T, Kutzbach J E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(14): 5738-5742.
- [9] 马松梅, 聂迎彬, 段霞, 余存生, 王荣学. 蒙古扁桃植物的潜在地理分布及居群保护优先性. *生态学报*, 2015, 35(9): 2960-2966.
- [10] Fitzpatrick M C, Gove A D, Sanders N J, Dunn R R. Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: the *Banksia* (Proteaceae) of western Australia. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1337-1352.
- [11] Heikkinen R K, Luoto M, Araújo M B, Virkkala R, Thuiller W, Sykes M T. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2006, 30(6): 751-777.
- [12] Wiens J A, Stralberg D, Jongsomjit D, Howell C A, Snyder M A. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(S2): 19729-19736.
- [13] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [14] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [15] Hutchinson G E. *The Niche: An Abstractly Inhabited Hypervolume. The Ecological Theatre and the Evolutionary Play*. New Haven: Yale University Press, 1995.
- [16] 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.
- [17] 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 刘凤权. 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(12): 3063-3069.
- [18] Franklin J. Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges. *Diversity & Distributions*, 2013, 19(10): 1217-1223.
- [19] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [20] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37:

637-669.

- [21] 徐振朋, 张佳琦, 宛涛, 蔡萍, 伊卫东. 孑遗植物裸果木历史分布格局模拟及避难区研究. 西北植物学报, 2017, 37(10): 2074-2081.
- [22] 国家林业局, 农业部. 国家重点保护野生植物名录(第一批). [2020-06-27]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2000/content_60072.htm.
- [23] 徐德静, 王鹏鹏, 何跃军, 郭能彬, 张仁波, 吴长榜, 穆军, 李崇清. 黔北丹霞地貌桫欏群落优势种群生态位研究. 植物研究, 2014, 34(5): 612-618.
- [24] 李丘霖, 宗秀虹, 邓洪平, 万海霞, 吴洪英, 梁盛, 刘邦友. 赤水桫欏群落乔木层优势物种生态位与种间联结性研究. 西北植物学报, 2017, 37(7): 1422-1428.
- [25] 吉也, 曹孟岩, 白楚锋, 金林琦, 李畅, 李萍. 峨眉山桫欏种群结构与动态特征. 西北植物学报, 2019, 39(3): 543-551.
- [26] 刘钦, 邓洪平, 李宗峰, 梁盛, 李丘霖, 倪东萍. 贵州赤水桫欏国家级自然保护区植物群落特征. 北京林业大学学报, 2019, 41(1): 19-31.
- [27] 谢春平, 赵柏松, 刘大伟, 方彦. 霸王岭自然保护区黑桫欏种群结构特征分析. 四川农业大学学报, 2018, 36(6): 765-771.
- [28] 成晓霞. 赤水桫欏国家级自然保护区桫欏群落对毛竹干扰的生态响应[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [29] 四川植被协作组. 四川植被. 成都: 四川人民出版社, 1980: 272-275.
- [30] 谭珊珊, 王忍忍, 龚筱玲, 蔡佳瑶, 沈国春. 群落物种及结构多样性对森林地上生物量的影响及其尺度效应: 以巴拿马 BCI 样地为例. 生物多样性, 2017, 25(10): 1054-1064.
- [31] 刘红玉, 李兆富, 李晓民. 小三江平原湿地东方白鹳(*Ciconia boyciana*)生境丧失的生态后果. 生态学报, 2007, 27(7): 2678-2683.
- [32] 马晓龙, 程勇, 代世红, 周勇军, 叶信初, 杨彪. 四川黑竹沟国家级自然保护区珙桐和光叶珙桐种群特征及生境适宜性评价. 林业科技, 2019, 44(5): 37-41.
- [33] 韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率 DEM 的地形特征提取与分析. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(1): 33-36.
- [34] 钟雪, 王彬, 胡大明. 基于 Maxent 模型的藏酋猴生境适宜性评价——以四川白水河国家级自然保护区为例. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2020, 41(3): 227-234.
- [35] 金龙如, 孙克萍, 贺红土, 周宇飞. 生境适宜度指数模型研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(5): 841-846.
- [36] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 资源环境科学数据注册与出版系统. [2020-06-27]. <http://www.resdc.cn/DOI>.
- [37] 仇三军. 退耕还林、天保工程的历史观. 中国林业, 2002, (19): 1-1.
- [38] 林源, 徐雪怡, 伊剑锋, 陆舟. 基于 Maxent 模型的广西黑颈长尾雉潜在栖息地预测与保护空缺分析. 四川动物, 2017, 36(3): 328-333.
- [39] 王学志, 徐卫华, 欧阳志云, 刘建国, 肖毅, 陈佑平, 赵联军, 黄俊忠. 生态位因子分析在大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境评价中的应用. 生态学报, 2008, 28(2): 821-828.
- [40] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [41] 陈爱莉, 赵志华, 龚伟, 孔芬, 张克亮. 气候变化背景下紫楠在中国的适宜分布区模拟. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(5): 435-444.
- [42] 王绮, 樊保国, 赵光华. 气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3774-3784.
- [43] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志·第6(3)卷 蕨类植物门, 石杉科 木贼科 石松科 松叶蕨科 卷柏科 合囊蕨科 水韭科 桫欏科. 北京: 科学出版社, 2004: 249-259.
- [44] 《四川植物志》编辑委员会. 四川植物志·第1卷-种子植物. 成都: 四川人民出版社, 1981: 165-167.
- [45] 姚学良, 马庆东. 四川荣县桫欏谷桫欏树幸存之谜——恐龙王国的“香格里拉”何以能保存至今. 四川地质学报, 2012, 32(2): 247-249.
- [46] 陈俊, 姚兰, 艾训儒, 朱江, 吴漫玲, 黄小, 陈思艺, 王进, 朱强. 基于功能性状的水杉原生母树种群生境适应策略. 生物多样性, 2020, 28(3): 296-302.
- [47] 韩大勇, 杨永兴, 杨允菲, 李建东, 杨杨. 松嫩平原破碎化羊草草甸退化演替系列植物多样性的空间格局. 应用生态学报, 2012, 23(3): 666-672.
- [48] 瞿欢欢, 邓洪平, 梁盛, 刘邦友, 程莅登. 毛竹扩张对濒危植物桫欏根系形态可塑性的影响. 生态学报, 2020, 40(4): 1219-1227.
- [49] 周晓峰. 天然林保护工程与可持续林业. 东北林业大学学报, 2000, 28(5): 62-66.
- [50] 中华人民共和国国史网. 退耕还林工程. [2020-06-27]. http://www.hprc.org.cn/gsgl/dsnb/zdsj/200912/t20091230_39594.html.
- [51] 周梅, 张祖荣. 重庆市两种观赏与药用黑桫欏的濒危原因调查与分析. 科技信息, 2011, (11): 26-28.
- [52] 王来, 高鹏翔, 仲崇高, 刘滨, 侯琳, 赵玉健, 张硕新, 张远迎. 核桃-小麦复合系统中细根生长动态及竞争策略. 生态学报, 2018, 38(21): 7762-7771.
- [53] 程洽英, 陶国达, 许再富. 桫欏濒危原因的探讨. 云南植物研究, 1990, 12(2): 186-190.