

DOI: 10.20103/j.stxb.202503030460

桂伟峰, 王国华, 温庆忠, 冉雪, 曹顺伟, 吴义远, 钟欢, 浦婵, 李鑫, 董文渊. 箬竹潜在适生区预测及生长关系分析研究. 生态学报, 2025, 45(22): - .

Gui W F, Wang G H, Wen Q Z, Ran X, Cao S W, Wu Y Y, Zhong H, Pu C, Li X, Dong W Y. Growth performance of *Qiongzhusua tumidinoda* across potential suitable habitats under different suitability gradients. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

箬竹潜在适生区预测及生长关系分析研究

桂伟峰^{1,2}, 王国华³, 温庆忠¹, 冉雪⁴, 曹顺伟¹, 吴义远², 钟欢², 浦婵³, 李鑫³, 董文渊^{2,*}

1 云南省林业调查规划院, 昆明 650051

2 西南林业大学, 昆明 650224

3 大关县林业和草原局, 大关 657400

4 云南旅游职业学院, 昆明 650221

摘要: 箬竹(*Qiongzhusua tumidinoda*) 属我国狭域特有竹种, 其秆形独特, 笋味鲜美, 具有重要的生态和经济价值, 但因人为干扰使其天然资源遭受严重退化。目前, 箬竹研究尚存地理适生区分布不清, 不同适生条件生长情况不详等问题, 这对箬竹资源的保护和利用提出了严峻的挑战。在此背景下, 科学预测其地理适生区分布格局, 系统解析不同适生等级与生长指标的响应关系, 已成为制定保护策略、实现资源合理利用的紧迫需求。基于箬竹 139 条地理分布数据和 25 个立地因子数据, 采用最大熵(MaxEnt)模型及 ArcGIS 软件预测并生成箬竹潜在适生区分布, 再基于潜在适生区内 146 个样地调查数据, 运用 R 软件, 分析了潜在适生区箬竹生长状况。结果表明: (1) 箬竹的潜在适生区预测曲线下面积(AUC)值为 0.946, 表明预测结果准确可靠; (2) 气温平均日较差、年温变化范围、最干季降水、最暖季节平均温度和海拔是影响箬竹适生区分布的主要因子, 累计贡献率达 70.6%; (3) 研究区域内箬竹潜在适生区面积为 50091.57 km², 其面积分布情况为云南省>四川省>贵州省, 其中, 最适宜区和高适宜区面积之和前 5 县排序为: 大关县>盐津县>永善县>彝良县>峨边县; (4) 随 AUC 值提高, 箬竹出笋量与立竹数增加($R^2=0.74, 0.57$), 最小值与最大值均增加, 极差扩大; 立竹全高与地径上升($R^2=0.28, 0.32$), 且立竹全高最小值及地径最大值随适生等级提升而增加。本研究结果不仅为箬竹的就地保护、迁地保护、优先保护区建设以及科学引种提供了坚实的理论依据, 而且为制定科学的保护策略、实现箬竹资源的可持续利用, 以及推动箬竹产业的合理布局和健康发展提供了重要的科学依据和实践指导。

关键词: 最大熵(MaxEnt)模型; 箬竹; 立地因子; 潜在适生区; 生长关系

Growth performance of *Qiongzhusua tumidinoda* across potential suitable habitats under different suitability gradients

GUI Weifeng^{1,2}, WANG Guohua³, WEN Qingzhong¹, RAN Xue⁴, CAO Shunwei¹, WU Yiyuan², ZHONG Huan², PU Chan³, LI Xin³, DONG Wenyuan^{2,*}

1 Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China

2 Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

3 Forestry and Grassland Bureau of Daguan County, Daguan 657400, China

4 Yunnan College of Tourism Vocation, Kunming 650221, China

Abstract: *Qiongzhusua tumidinoda*, a narrow-endemic bamboo species in China, held significant ecological and economic value due to its graceful culm form and delicious shoots. However, its natural resources have severely degraded due to human interference. Currently, there are issues such as unclear geographical suitable areas and unknown growth conditions under different suitable environments, posing severe challenges to the conservation and utilization of *Q. tumidinoda* resources. Under this context, scientifically predicting its geographical suitable area distribution and systematically analyzing

基金项目: 云南省国土空间生态修复专题研究(2020103122); 云南省基础研究计划重大项目(202101BC070002)

收稿日期: 2025-03-03; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wydong6839@sina.com

the response relationship between different suitable grades and growth indicators have become urgent needs for formulating conservation strategies and achieving rational resource utilization.. This study employed the MaxEnt and ArcGIS to generate the potential suitable distribution areas of *Q. tumidinoda* based on 139 geographic occurrence records and 25 site factors. Furthermore, by integrating growth investigation data from 146 sample plots within the predicted suitable zones, we utilized R software to analyze the growth performance across different suitability gradients. The results revealed that: (1) The area under the curve (AUC) value for predicting the potential suitable area of *Q. tumidinoda* is 0.946, indicating accurate and reliable prediction results. (2) The main factors affecting the distribution of *Q. tumidinoda* suitable areas are the mean diurnal temperature range, annual temperature range, precipitation of the driest quarter, mean temperature of the warmest quarter, and altitude, with a cumulative contribution rate of 70.6%. (3) The area of the potential suitable region for *Q. tumidinoda* within the study area is 50,091.57 km², with the distribution being Yunnan Province > Sichuan Province > Guizhou Province. Among them, the top five counties in terms of the combined area of the most suitable and highly suitable areas are Dagan County > Yanjin County > Yongshan County > Yiliang County > Ebian County. (4) As the AUC value increases, the yield of shoots and number of living culms of *Q. tumidinoda* increase ($R^2 = 0.74, 0.57$), with both the minimum and maximum values increasing and the range expanding. The total height and ground diameter of standing bamboos also rise ($R^2 = 0.28, 0.32$), and the minimum total height and maximum ground diameter of standing bamboos increase with the improvement of suitable grades. The results of this study not only provide a solid theoretical basis for the in-situ conservation, ex-situ conservation, priority protection zone construction, and scientific introduction of *Q. tumidinoda* but also offer important scientific evidence and practical guidance for formulating scientific conservation strategies, achieving sustainable utilization of *Q. tumidinoda* resources, and promoting the rational distribution and healthy development of the *Q. tumidinoda* industry.

Key Words: MaxEnt; *Qiongzhusa tumidinoda*; standing factors; potential suitable habitats; growth relationship

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,尽管全球已广泛应用低碳排放技术,但预计到2100年,全球气温升幅仍可能超1.5℃^[1]。这一剧烈气候变化深刻影响植物分布,是栖息地破碎化与物种灭绝的重要推手,对狭域或濒危物种影响尤甚^[2-5]。在此背景下,揭示物种对环境变迁的适应机制成为制定保护策略的关键前提。

迁移是物种应对环境变化的核心适应策略,而潜在适生区的存在与否、面积大小、质量如何,将直接影响迁移成功与否,关乎物种存续。当前,关于不同物种潜在适生区的研究已广泛开展,涉及多个生物门类^[6-11],跨越过去、现在及未来^[6,9,12]。物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)作为预测物种环境条件下潜在地理分布范围的重要工具^[13-14]已被学界普遍认可,在众多SDMs方法中,最大熵(MaxEnt)模型凭借其卓越的表现和广泛的应用范围而备受关注^[15-16],并被应用于外来物种入侵预防、珍稀濒危物种保护、病虫害管理、保护区规划评估等多个领域^[17-21]。

中国作为竹类植物的重要分布中心,现分布有40个属753种竹类植物(含22个引进种)^[22-23]。目前,学界针对竹子潜在适生区开展了一定数量的研究,包括歪脚龙竹(*Dendrocalamus sinicus*)^[24]、毛竹(*Phyllostachys edulis*)^[25]、雷竹(*Phyllostachys violascens*)^[26]、非洲高地竹(*Arundinaria alpina*)^[27]、缺苞箭竹(*Fargesia denudata*)^[21]、金佛山方竹(*Chimonobambusa utilis*)^[28]等多类型竹种。这些研究主要聚焦于两大方向:其一是适生区现状评估,其二是对气候变化背景下适生区动态演变的预测,尤其关注未来气候情景中竹类分布范围的迁移轨迹与面积增减趋势^[21,24-28]。然而,现有研究体系中,尽管已对适生区空间变化展开大量预测,但针对不同适生等级区间内竹子实际生长状况(如生物量积累、存活率、繁殖能力等表型特征)的实证研究仍极为匮乏,这导致适生区预测结果与物种生态适应性之间缺乏有效的验证衔接。

箬竹(*Qiongzhusa tumidinoda*),隶属于禾本科竹亚科箬竹属,是一种中小型混生竹类^[29],是我国国家三级保护竹种之一。箬竹仅分布于云贵高原向四川盆地过渡地带的金沙江下游区域,是中国西南地区特有的狭域竹种,因其喜温凉潮湿的生长特性,通常作为林下伴生物种,分布于海拔1300—2200m的中山湿性常绿阔叶

林下^[30]。目前,关于箬竹的研究是多方面的,包括生物构件、立地因子、竹木混交林、遗传多样性、引种育苗、产品加工等,然而关于箬竹潜在适生区的研究主要聚焦于历史潜在适生区的变化及未来潜在适生区的模拟预测^[12,31],尚未见到关于箬竹当前潜在适生区的详细报道。此外,关于箬竹适生区内适宜度与其生长指标(如竹高、地径/胸径、株数、出笋量等)之间的关系研究尚存空白。

近年来,随着箬竹笋、材市场价格的持续上涨,对天然箬竹资源的开发利用方式逐渐趋于掠夺性利用,导致这一原本脆弱的物种种群加速退化^[32]。因此,箬竹潜在适生区及适宜度生长状况研究,对于箬竹天然资源的保护与恢复具有重要意义。鉴于此,本研究选取箬竹资源丰富、分布相对集中的金沙江下游地区的箬竹林为研究对象,基于箬竹 139 条地理分布数据、146 个样地生长调查数据以及 25 个立地因子数据,采用最大熵(MaxEnt)模型预测箬竹潜在适生区分布,旨在解决以下关键问题:一是识别影响当前箬竹潜在适生区模拟的关键立地因子;二是明确箬竹潜在适生区在研究区域内的分布情况;三是分析潜在适生区内不同适宜度条件下箬竹的生长表现。通过上述问题的研究与探讨,旨在为箬竹适生区规划、引种区域选择、适地适竹策略的制定及分类经营提供科学依据与理论指导。

1 材料与方法

1.1 箬竹分布数据获取与筛选

本研究采用多源数据获取箬竹地理分布信息:(1)基于全国森林资源一类、二类调查成果提取分布数据;(2)查阅地方林业工程档案地块信息获取,并经样地核验确保数据准确性;(3)检索已发表的箬竹相关文献获取分布数据;(4)利用 GBIF 数据库获取箬竹全球分布数据。通过 ArcGIS 拓扑工具剔除距离小于 300m 的重复记录,最终获得 139 个有效分布点位。

1.2 立地因子数据获取与筛选

气候、地形、人类活动等环境因素会直接或间接影响物种的分布^[24,33]。因此,本研究选取生物气候因子(bio1—bio19、pet、emi)、地形因子(ele、slope、aspect)和人为因子(hii)作为立地因子变量。生物气候因子数据来源于 Chelsa 气候数据库(www.chelsa-climate.org)和 Worldclimate 气候数据库(www.worldclim.org)^[20]。海拔、坡向和坡度等地形数据从国家地理空间数据平台提供的高程模型(DEM)中获取。人类活动强度指数是基于土地利用的长江经济带 1970s 末至 2015 年的人类活动数据集^[34]。

研究表明,气候数据 bio1—bio19 存在共线性^[11,20]。为避免变量共线性导致模型过拟合,本研究采用 MaxEnt 预实验与皮尔森相关性分析进行双重筛选:首先通过 MaxEnt 预试验计算 19 个气候变量对箬竹潜在适生区预测的贡献率;其次对各分布点气候数据作皮尔森相关性分析,保留 $|r| < 0.8$ 的变量,若 $|r| \geq 0.8$ 则选择预试验中贡献率更高的变量^[35]。

1.3 潜在适生区等级划分

本研究采用刀切法(jackknife)对箬竹的潜在适生区进行分析^[36]。将箬竹分布数据和筛选后的立地因子导入 MaxEnt 模型,设置 70% 的分布数据作为训练集数据,30% 作为测试集数据,及其他参数指标^[37]。我们采用自然分段法将箬竹潜在适生区分为 5 个类型,包括最适宜区、高适宜区、中适宜区、低适宜区以及不适宜区^[14]。最终,在 ArcGIS 软件中形成箬竹潜在适生区分布结果^[12]。

1.4 潜在适生区箬竹生长情况分析

运用形成的箬竹潜在适生区图,以划分的潜在适生区等级为单元,于 2024 年 4 月中旬,在不同适生区箬竹天然林内分别设置 10m×10m 样方,共 146 个,对样方内箬竹数量、全高、地径、出笋数进行了调查,并采用 R 分析箬竹生长指标与分布区域 AUC 值相关性。

2 结果

2.1 立地因子筛选结果

MaxEnt 预试验计算(表 1)以及相关性分析(图 1)表明,bio2、bio5、bio10、bio14 贡献度较高,且累计贡献

度达 67.8%, bio7 年温变化范围与其他各环境因子相关性均低于 0.8, 可以作为筇竹适生区预测的立地因子。最终, 进行筇竹潜在适生区模拟分析的变量确定为: bio2、bio5、bio7、bio10、bio14、pet 潜在蒸散量、cmi 湿润指数、ele 海拔、slope 坡度、aspect 坡向及 hii 人类活动强度指数共 11 个立地因子变量。

表 1 19 个立地因子变量贡献值

Table 1 The contribution rates of the 19 bioclimatic variables

变量 Variables	贡献度/% Contributions	变量 Variables	贡献度/% Contributions	变量 Variables	贡献度/% Contributions
bio5	26.4	bio7	3.5	bio18	0.2
bio2	24.1	bio17	3	bio8	0.2
bio14	10.1	bio13	0.9	bio4	0.1
bio10	7.2	bio19	0.5	bio9	0
bio15	7.1	bio1	0.4	bio3	0
bio16	7	bio11	0.3		
bio12	6.7	bio6	0.3		

bio1: 年均温; bio2: 气温平均日较差; bio3: 等温性; bio4: 温度季节性变化的标准差; bio5: 最热月份最高温; bio6: 最冷月份最低温; bio7: 年温变化范围; bio8: 最湿季平均温度; bio9: 最干季平均温度; bio10: 最暖季平均温度; bio11: 最冷季平均温度; bio12: 平均年降水量; bio13: 湿月份降水量; bio14: 最干月份降水量; bio15: 降水量变化方差; bio16: 最湿季降水量; bio17: 最干季降水量; bio18: 最暖季降水量; bio19: 最冷季降水量

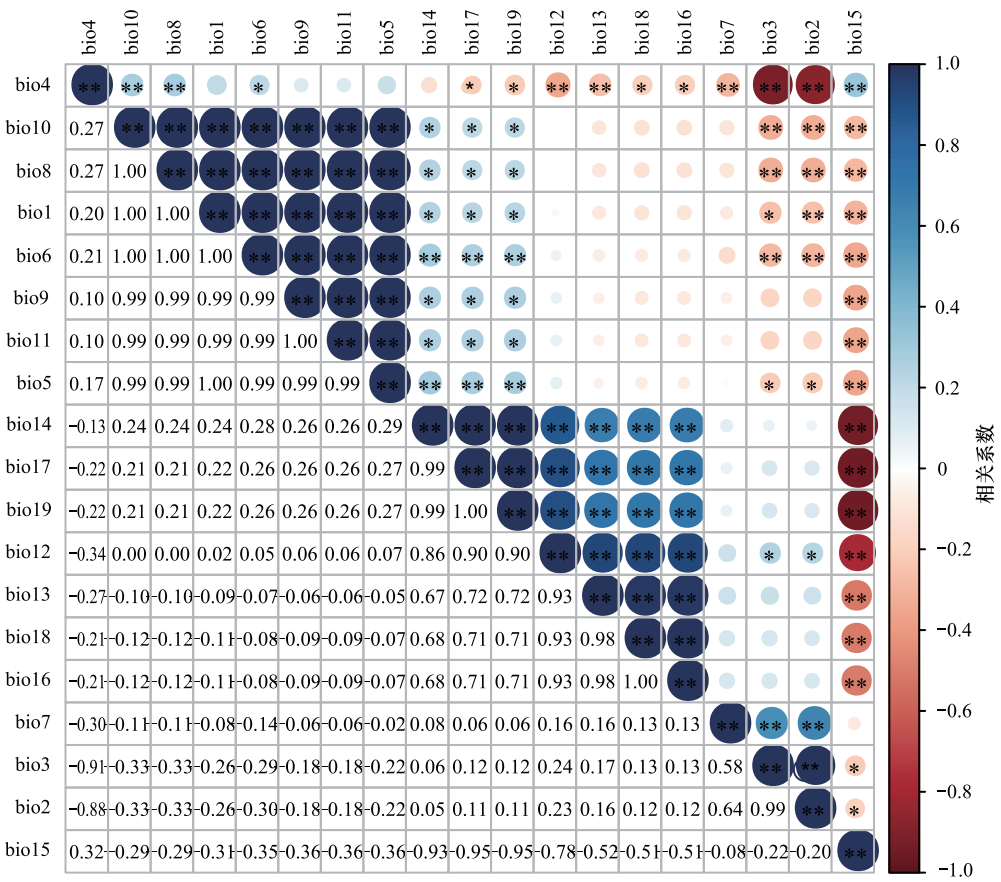


图 1 气候因子的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of climatic factors

bio1: 年均温; bio2: 气温平均日较差; bio3: 等温性; bio4: 温度季节性变化的标准差; bio5: 最热月份最高温; bio6: 最冷月份最低温; bio7: 年温变化范围; bio8: 最湿季平均温度; bio9: 最干季平均温度; bio10: 最暖季平均温度; bio11: 最冷季平均温度; bio12: 平均年降水量; bio13: 湿月份降水量; bio14: 最干月份降水量; bio15: 降水量变化方差; bio16: 最湿季降水量; bio17: 最干季降水量; bio18: 最暖季降水量; bio19: 最冷季降水量

2.2 MaxEnt 模型预测精度

基于组合参数配置运行 MaxEnt 模型后(图 2),测试集 AUC 值达 0.946,远大于随机预测分布模拟值 0.5,表明该模型对箬竹潜在适生区分布具有良好的预测能力,可以准确地划定其潜在适生区范围。

2.3 立地因子的重要性

11 个参与建模的立地因子中贡献率超过 10%的有 6 个(表 2),其中贡献率最大的变量是气温平均日较差,贡献率为 20.4%,其次为年温变化范围(16.5%)。其他贡献率超过 10%生态因子分别为最干月份降水量(11.9%)、海拔(10.9%)、最暖季平均温度(10.9%)和坡度(10.1%),另外,最热月最高温贡献率为 9.8%,接近 10%,上述 7 个生态因子累计贡献率达 90.5%,表明它们对模型预测结果具有主导作用,且气温平均日较差的影响尤为突出。

综合刀切法增益结果和贡献率认为(图 3),气温平均日较差、年温变化范围、最干季降水、最暖季节平均温度和海拔是影响箬竹潜在适宜区地理分布的主导因子,坡度和潜在蒸散量影响次之,最暖月平均温度、坡度、湿润指数、以及人类活动强度等因子则影响较弱。

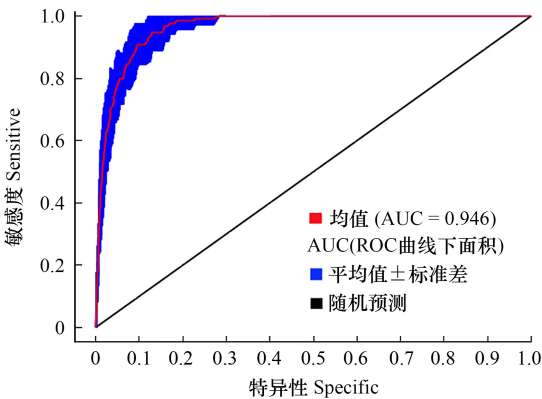


图 2 感受性曲线(Roc)验证结果

Fig.2 Roc verification

AUC:感受性曲线下面积; Roc:感受性曲线

表 2 11 个立地因子贡献率

Table 2 Contribution rate of 11 standing variables

变量 Variables	贡献度/% Contributions	变量 Variables	贡献度/% Contributions	变量 Variables	贡献度/% Contributions	变量 Variables	贡献度/% Contributions
bio2	20.4	bio5	9.8	ele	10.9	aspect	1.5
bio7	16.5	pet	5	bio10	10.9	hii	0.6
bio14	11.9	cmi	2.4	slope	10.1		

aspect:坡向; cmi:湿润指数; ele:海拔; hii:人类活动强度指数; pet:潜在蒸散量; slope:坡度

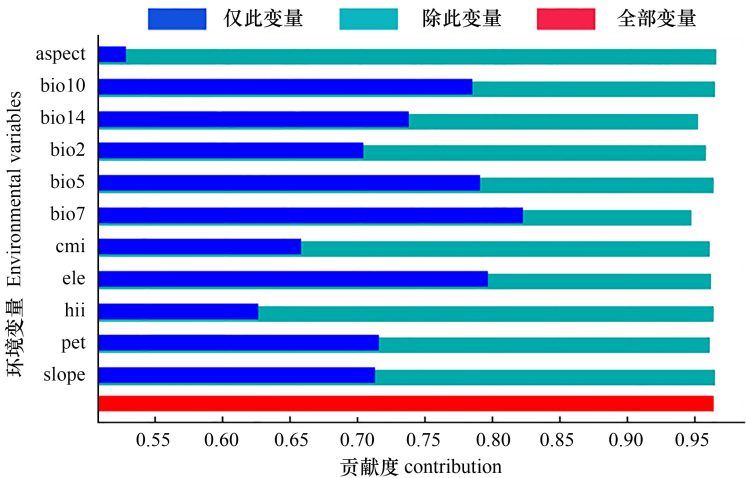


图 3 立地因子刀切法检验结果

Fig.3 The Jackknife test results of standing factors

aspect:坡向; cmi:湿润指数; ele:海拔; hii:人类活动强度指数; pet:潜在蒸散量; slope:坡度

2.4 箬竹潜在适生区预测

研究区域总面积 50091.57km²,箬竹潜在适生区面积分布情况为云南省>四川省>贵州省,其中,云南省潜

在适生区面积分布情况为低适宜区>中适宜区>高适宜区>最适宜区,而最适宜区和高适宜区的面积相近;四川省潜在适生区面积分布情况为低适宜区>中适宜区>高适宜区>最适宜区;贵州省潜在适生区面积分布情况为低适宜区>中适宜区>高适宜区>最适宜区(表3)。

表 3 箬竹潜在适生区省级分布情况

Table 3 The distribution of potential suitable area of *Qiongzhusua tumidinoda* in province scale

研究区 Province	适宜等级 Categories	面积/km ² Areas	占比/% Propotion	研究区 Province	适宜等级 Categories	面积/km ² Areas	占比/% Propotion	研究区 Province	适宜等级 Categories	面积/km ² Areas	占比/% Propotion
云南省	计	16487.82	32.92	四川省	计	18351	36.63	贵州省	计	15252.75	30.45
	最适宜区	757.62	4.6		最适宜区	137.88	0.75		最适宜区	32.58	0.21
	高适宜区	762.84	4.62		高适宜区	291.6	1.59		高适宜区	86.94	0.57
	中适宜区	1256.58	7.62		中适宜区	612.09	3.34		中适宜区	239.04	1.57
	低适宜区	2733.84	16.58		低适宜区	1437.03	7.83		低适宜区	808.74	5.3
	不适宜区	10976.94	66.58		不适宜区	15872.4	86.49		不适宜区	14085.45	92.35

箬竹潜在适生区主要分布于四川省西南部、云南省东北部及贵州省西南部,在四川主要分布于雷波、筠连、马边及峨边等 9 个县级行政区,在云南主要分布于大关、盐津、彝良等 9 个县级行政区,在贵州主要分布于毕节、大方等 5 个县级行政区(图 4)。

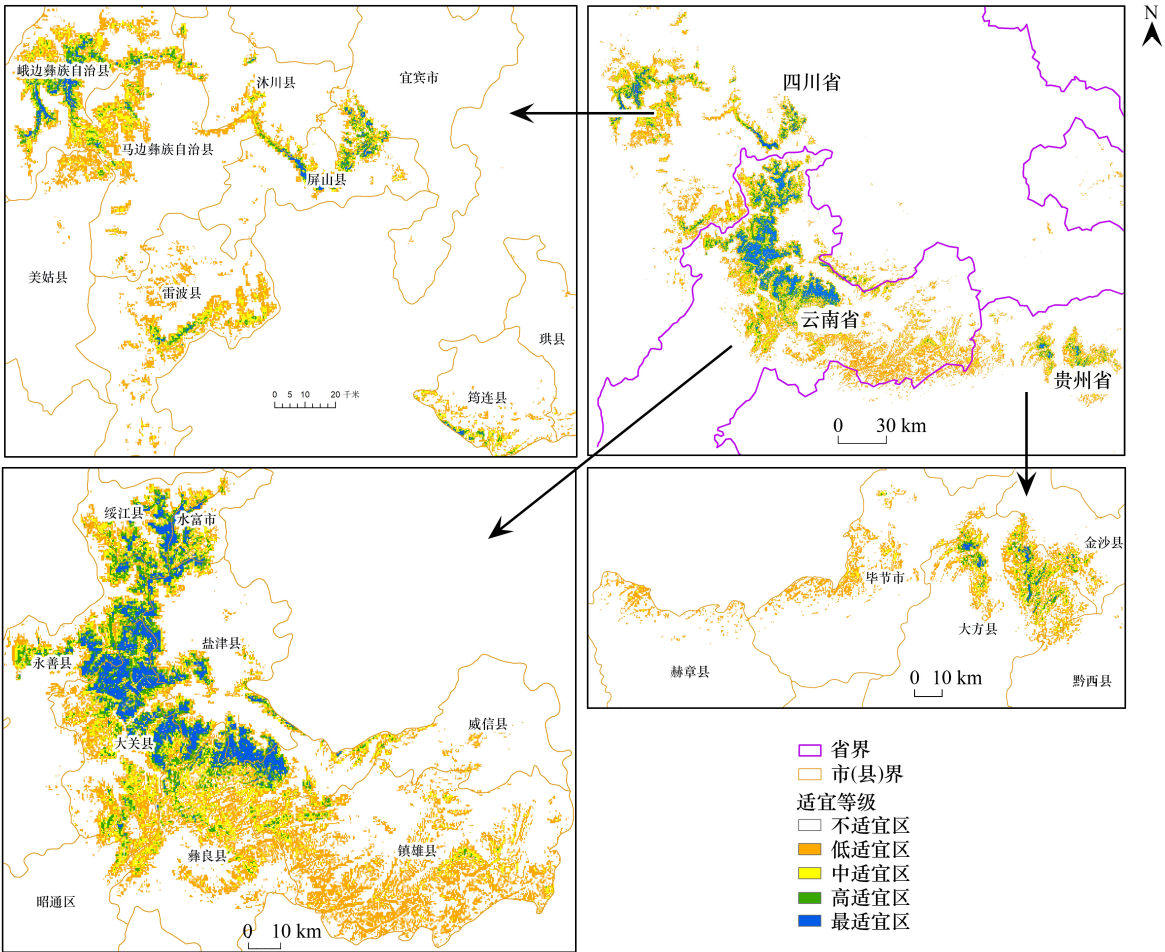


图 4 研究区域箬竹潜在适生区分布图

Fig.4 The distribution of potential suitable area of *Qiongzhusua tumidinoda*

适宜性分区统计结果表明,在研究区域内的生态适生格局呈现显著的空间异质性(表 4)。其中,最适宜生长区集中分布于大关县、盐津县及永善县等 18 个县级行政区;高适宜区范围扩展至 21 个县级行政区,仍以大关县、永善县及盐津县为核心分布区;中适宜区覆盖彝良县、大关县、盐津县等 23 个县级行政区;低适宜区则广泛分布于镇雄县、彝良县及大关县等 23 个县级行政区。最适宜区和高适宜区面积之和前 5 县排序为:大关县>盐津县>永善县>彝良县>峨边县。各适宜性等级中云南省辖区均占据主导地位;在按分布面积排序的前五位区域中,云南省县级行政区数量占比均超过 80%,且累计面积贡献率呈现梯度递减特征。具体而言,最适宜区前五位区域累计面积占比达 78.90%,高适宜区前五位区域占比为 66.57%,中适宜区与低适宜区前五位区域占比分别为 56.63%和 56.34%。

表 4 箬竹潜在适生区市(县)级分布情况

Table 4 The distribution of potential suitable area of *Qiongzhusua tumidinoda* in county scale

		最适宜区		高适宜区		中适宜区		低适宜区	
		High potential area		Good potential area		Moderate potential area		Least potential area	
		区域	面积/km ²	区域	面积/km ²	区域	面积/km ²	区域	面积/km ²
排序 Rank	1	大关	287.37	大关	213.39	彝良	319.68	镇雄	1086.3
	2	盐津	201.15	永善	148.41	大关	308.52	彝良	601.2
	3	永善	92.25	盐津	141.75	盐津	224.64	大关	388.71
	4	彝良	80.19	彝良	130.59	大方	175.59	大方	367.29
	5	峨边	71.28	峨边	125.73	镇雄	165.15	盐津	361.8
	6	绥江	63.81	绥江	76.5	永善	144.18	雷波	358.47
	7	屏山	40.86	大方	75.15	峨边	135.36	马边	285.57
	8	水富	32.04	屏山	40.86	马边	118.08	毕节	231.39
	9	大方	29.43	水富	40.14	绥江	102.87	峨边	200.25
	10	宜宾	10.26	马边	26.91	雷波	92.43	永善	189.81
	11	雷波	4.77	宜宾	26.46	屏山	51.21	绥江	126
	12	筠连	4.68	雷波	26.28	水富	51.03	美姑	96.66
	13	马边	3.15	镇雄	20.97	筠连	39.06	金沙	95.04
	14	金沙	3.15	筠连	13.59	宜宾	37.44	屏山	94.23
	15	沐川	2.88	沐川	13.5	沐川	35.82	筠连	89.37
	16	镇雄	0.63	金沙	10.08	金沙	29.88	赫章	82.62
	17	威信	0.09	昭阳	5.49	毕节	26.64	沐川	80.01
	18	昭阳	0.09	美姑	2.25	昭阳	17.19	水富	61.02
	19			威信	1.62	美姑	12.96	宜宾	57.96
	20			毕节	1.53	威信	12.6	威信	47.7
	21			黔西	0.18	黔西	3.6	昭阳	32.85
	22					赫章	3.33	黔西	32.4
	23					珙县	0.45	珙县	12.96

2.5 潜在适生区箬竹生长情况

由图 5 与表 5 分析表明,出笋量随 AUC 值的增加显著上升,且随着适宜等级的增加集中分布区间范围逐渐扩大,最小值和最大值都随之增加;立竹数随 AUC 值的增加显著上升,且随着适宜等级的增加集中分布区间范围逐渐扩大,最大值随适宜等级的增加而增加,最小值则无明显差异;竹高随 AUC 值的增加而上升,但相关性不高,随着适宜等级的增加集中分布区间及最大值变化不明显,最小值则随适宜等级的增加而增加;平均地径随 AUC 值的增加而上升,但相关性不高,随着适宜等级的增加集中分布区间及最小值变化不明显,最大

值则随适宜等级的增加而增加。

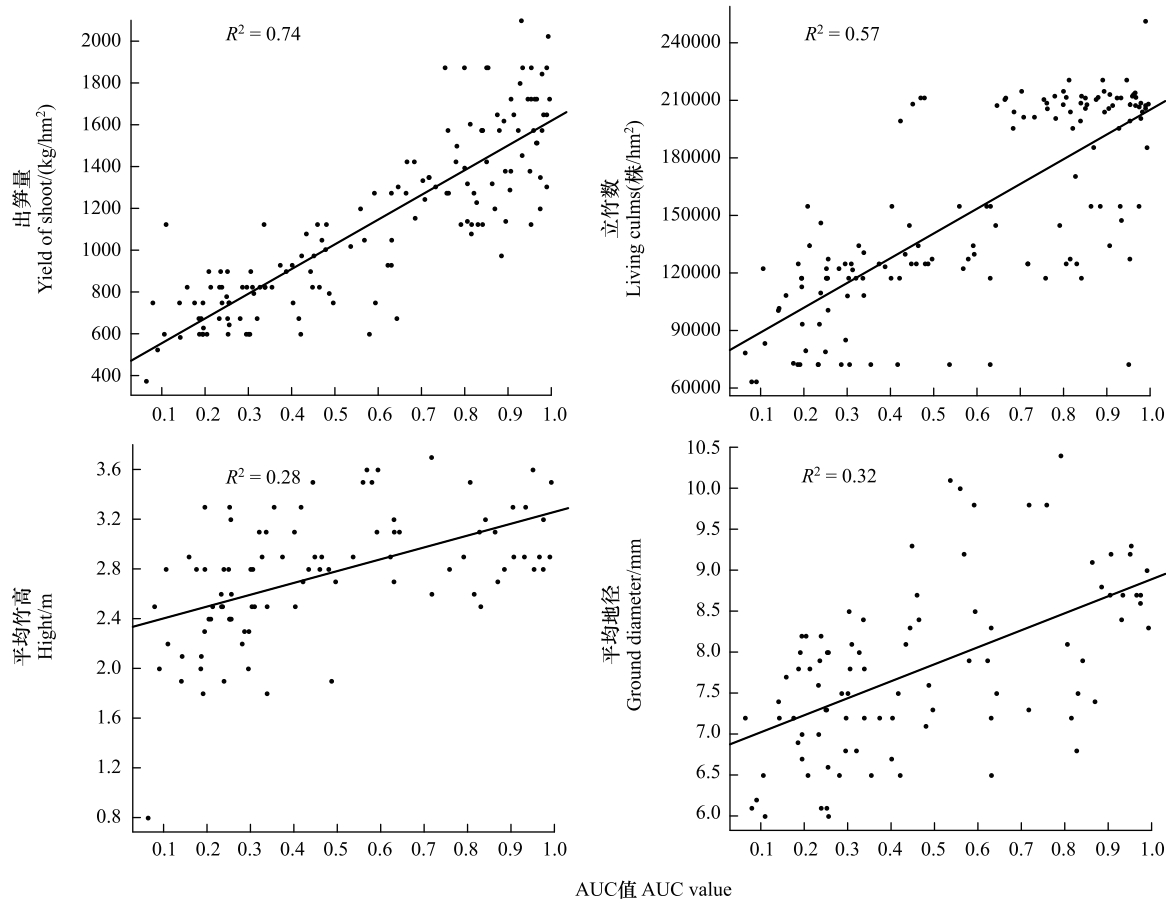


图5 研究区域箬竹潜在适生区生长情况图
Fig.5 The growth of *Qiongzhusa tumidinoda* with different AUC value

表5 研究区域箬竹潜在适生区生长情况表

适宜等级 Categories	出笋量/(kg/hm ²) Yield of shoot			立竹数/(株/hm ²) Living culms			竹高/m Hight			平均地径/mm Ground diameter		
	集中分 布区间	最小值	最大值	集中分 布区间	最小值	最大值	集中分 布区间	最小值	最大值	集中分 布区间	最小值	最大值
不适宜区 Least potential area	375—750	375	1125	63495—117000	124995	63495	1.8—2.8	3.3	0.8	6.0—7.4	8.2	6
低适宜区 Least potential area	600—930	600	1125	72495—133500	154995	72495	1.8—3.1	3.3	1.8	6.1—8.0	8.5	6
中适宜区 Moderate potential area	675—1125	600	1275	72495—154500	211515	72495	1.9—3.3	3.6	1.9	6.5—9.3	10.1	6.5
高适宜区 Good potential area	945—1425	675	1875	117510—210000	214500	72495	2.6—3.2	3.7	2.3	7.2—9.2	12.2	7.5
最适宜区 High potential area	1125—1875	975	2100	124500—220500	251475	72495	2.5—3.5	3.6	2.5	7.2—8.7	14.2	7.5

3 讨论

3.1 MaxEnt 预测结果

箬竹属于金沙江下游分布的特有竹种,分布区域相对狭窄,因此通过资料收集及外业调查的数据在一个

栅格像素元内仍然存在较多的重复记录点,对最初调查数据进行去重复后获得 139 个用于预测的记录点数据。有 MaxEnt 模型的预测研究指出,模型的预测点位数最少不得少于 25 个,不然会影响预测的精度^[38],因此本研究的点位数完全满足预测精度。另外,本研究还通过预实验和 R 相关性分析的方法,筛选去除自相关高、共线性低的立地因子变量,进一步提高模型预测的精度^[13],研究结果 AUC 值大于 0.9,这也说明预测结果很好。

研究采用自然分断法的方式^[27],把研究区域划分成了 5 种适宜类型,与 Dou 等人对云南省西部、西南部歪脚龙竹潜在适生区的研究中采用了 5 级分类的方式^[24]类似,相较于 Wang 等人采用的三级分类方式(不适宜区、中适宜区、高适宜区)更加细化,这便于我们针对潜在适生区分级及其与立竹生长关系研究^[32]。

环境要素在物种进行栖息地迁移时起到关键作用,物种往往针对于特定的环境要素组合进行选择而非某个单一因子,以最大限度满足其生存需求^[25, 39]。本研究结果显示,影响箬竹潜在适生区预测的重要立地因子为气温平均日较差、年温变化范围、海拔、最暖季节平均温度和最干季降水。气温平均日较差做为箬竹潜在适生区预测贡献度最高的因子,董文渊对箬竹无性种群退化及恢复机制的研究中提到,箬竹在白昼的高生长量要远高于黑夜的生长量,温差影响箬竹的高生长,这进一步证实了气温平均日较差是影响箬竹生长发育的关键因子^[40]。Dou 等人通过研究发现,温度的显著波动会对歪脚龙竹的生长产生明显的不良影响,即良好的生长需要一定的等温性,而等温性则是以气温平均日较差(bio2)与年温变化范围(bio7)之比来衡量,这也进一步证实了气温平均日较差和年温变化范围在箬竹潜在适宜区预测中的重要性^[24]。Wang 等人指出,当最干月降水量低于 7mm 时,箬竹将无法存活^[33],体现了最干季降水在适生区预测预中的意义。海拔在塑造山地植物的分布格局方面起着至关重要的作用^[41-43],我们的研究结果也切合这种关系,证明海拔确实是影响箬竹潜在适生区预测的重要因子。竹子个体数量呈现周期性增长,董文渊等人对箬竹的生长发育规律进行研究,发现箬竹的集中发笋时间在 4 月上、中旬,然而从箬竹发笋到成竹这个阶段则需要 50d 左右^[31],这个期间正好开始进入研究区域的最暖季,从发笋到成竹这个阶段温度对箬竹的发育起到关键作用。

3.2 潜在适生区分布格局及建议

箬竹的潜在适生区主要分布于四川美姑—云南昭阳—贵州赫章线以北,这条线与西南准静止锋的走向及位置接近,形成了箬竹独特的生存环境^[44]。箬竹的最适宜区和高适宜区主要分布于云南省的大关、盐津、永善、彝良四县以及四川省的峨边县,这与以往研究中对箬竹分布区域的描述大致相同^[45-46],其中,箬竹最适宜区和高适宜区分布面积最大、最集中的区域为云南大关县,进一步验证了“云南昭通大关是箬竹的现代分布中心”这一论断^[47]。尽管在贵州省也有箬竹潜在适生区的分布,但相关研究报道和科学考察相对较少。然而,李德铨和薛纪如曾在该区域内采集过天然箬竹标本,这足以证明箬竹在贵州省确有分布,只是资源相对稀缺^[48]。而目前,仅有 Gui 等人和 Wang 等人^[12, 31]进行了箬竹潜在适生区的研究,且两个研究主要是针对气候变化背景下箬竹潜在适生区的变化情况,本研究的潜在适生区主要分布于云、贵、川三省,这与 Gui 等人的研究结果类似,而 Wang 等人的研究认为随着气候变化的发生,箬竹的潜在适生区存在迁移至四川省中部,乃至陕西省北部的可能,出现这种情况的主要是因为 Wang 等人主要是对未来不同气候变化情景下的预测,而 Gui 等人则是从 1987 年至 2012 年进行的每 5 年一个时间节点的预测。

本研究发现预测的箬竹潜在适生区比目前标本采集区广泛得多。这一方面归因于数据库的组建是由历史分布数据和当前调查数据组合而成,近年来的可用分布点数据占比不占主导地位;另一方面,箬竹的扩散主要是通过竹鞭扩散和种子传播的方式进行,但由于其开花结实周期长^[49],鞭生长成为了主要的扩散途径,尽管其效果有限。再一方面,箬竹野生种群主要分布在四川盆地到云贵高原过渡地带,地表沟壑纵横,地形地貌复杂^[41],尚存在较多未被发现野生新种分布可能。

研究针对不同适宜度梯度的箬竹生长指标调查结果显示,天然箬竹林出笋量、立竹数、竹高以及平均地径均随着适宜度的增加而增加。其中,出笋量和立竹数与适宜度的关系尤为显著,而竹高和平均地径与适宜度的关系则相对较弱。这主要是因为大径级、高大的箬竹具有较高的经济价值,容易被当地民众采挖。陈新等人的研究表明,在最适宜区且受干扰较少的天然箬竹林中,平均地径可达 16.7mm,平均高度可达 3.6m^[50]。此

外,当地民众“采大留小”甚至“全面采挖”的采收方式也是导致箬竹细小的原因之一。

针对箬竹野生无性系种群保护和可持续利用工作,提出以下建议:(1)详尽资源调查:在物种分布模型预测的最适宜区和高适宜区内,开展更为详尽的资源调查,以保护更多的野生箬竹无性系种群,提高其遗传多样性。(2)限制过度采收:鉴于箬竹的笋、秆具有较高的经济价值,应制定相关措施限制过度采收活动,以减少对天然箬竹资源的破坏。(3)加强科普宣教:提高民众对天然箬竹资源的保护意识,通过科普宣教活动减少人为干扰。(4)制定可持续利用规范:在保护的前提下,制定天然箬竹可持续利用的采笋、采材规范,规定大笋、大竹的保留比率,形成良性循环。(5)合理布局产业发展:根据箬竹潜在适生区分布情况,合理布局箬竹产业发展规划。在较高适宜区布局以经济价值为主的高质量发展区;在较低适宜区则以生态价值为主,经济价值为辅,在满足生态保护需求的同时获得部分经济收益。(6)开展培育目标定向研究:首先,结合箬竹的适生区情况,开展不同类型的定向培育实验,如高产笋用林、优质竹材林、工艺材林及碳汇林等;其次,探索不同适生等级下的最优培育目标,确保资源利用与生态保护的双赢;最后,针对这些具体目标,深入研究并优化相应的培育手段,包括品种选择、种植密度、施肥灌溉及病虫害防治等,以提升箬竹的生长速度与品质,从而满足经济、生态及社会的多元化需求。

4 结论

迄今为止箬竹潜在适生区预测及适宜分区生长关系的研究鲜有报道。本研究基于最大熵(MaxEnt)模型、ArcGIS及R软件,预测箬竹潜在适生区分布,并结合箬竹潜在适生区分布进行生长情况调查和分析。结果表明:(1)模型AUC值为0.946,表明模拟效果很好;(2)影响箬竹潜在适生区预测的主要立地因子为气温平均日较差、年温变化范围、最干季降水、最暖季节平均温度和海拔;(3)箬竹潜在适生区中的最适宜区和高适宜区在云南省分布最多,而云南省大关县是这两类适宜区分布最多的地区;(4)箬竹的出笋量、立竹数、平均地径以及林分平均高均随预测曲线下面积值的增加而增加,出笋量和立竹数与预测曲线下面积值的关系较显著,而竹高和平均地径与适宜度的关系则相对较弱。建议今后在箬竹资源保护和利用方面,可以参照箬竹潜在适生区分布进行合理的分类布局,推动箬竹资源保护和产业的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [2] Qiu L, Fu Q L, Jacquemyn H, Burgess K S, Cheng J J, Mo Z Q, Tang X D, Yang B Y, Tan S L. Contrasting range changes of *Bergenia* (Saxifragaceae) species under future climate change in the Himalaya and Hengduan Mountains Region. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, 155(3): 1927-1939.
- [3] Rong S T, Luo P R, Yi H, Yang X, Zhang L H, Zeng D, Wang L. Predicting habitat suitability and adaptation strategies of an endangered endemic species, *Camellia luteoflora* Li ex Chang (Ericales: Theaceae) under future climate change. *Forests*, 2023, 14(11): 2177.
- [4] Ohlemüller R, Anderson B J, Araújo M B, Butchart S H M, Kudrín O, Ridgely R S, Thomas C D. The coincidence of climatic and species rarity: high risk to small-range species from climate change. *Biology Letters*, 2008, 4(5): 568-572.
- [5] Zhang H Y, Sun P F, Zou H C, Ji X D, Wang Z Y, Liu Z. Adaptive distribution and vulnerability assessment of endangered maple species on the Tibetan Plateau. *Forests*, 2024, 15(3): 491.
- [6] 杨子文, 韩姝伊, 李壹, 王嘉敏, 何宏轩. 气候变化对雪豹全球潜在适生区分布的影响与评估. *生态学报*, 2023, 43(4): 1412-1425.
- [7] 应邦肯, 田阔, 郭浩宇, 杨晓龙, 李伟业, 李启, 骆宇晨, 张秀梅. 基于MaxEnt模型预测未来气候变化情境下红树秋茄(*Kandelia obovata*)在中国潜在适生区的变化. *生态学报*, 2024, 44(1): 224-234.
- [8] 姜明鑫, 钟文玉, 陈李林. 茶园重要捕食性天敌白斑猎蛛在中国的潜在适生区预测. *生态学报*, 2022, 42(10): 4225-4235.
- [9] Untalan M Z G, Burgos D F M, Martinez K P. Species distribution modelling of two species endemic to the Philippines to show the applicability of maxent. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-4/W19: 449-454.
- [10] Rhoden C M, Peterman W E, Taylor C A. Maxent-directed field surveys identify new populations of narrowly endemic habitat specialists. *PeerJ*, 2017, 5: e3632.
- [11] 王剑颖, 丁红秀, 邵明勤, 杨福成, 曾健辉, 曾繁富. 基于MaxEnt模型预测中华秋沙鸭在江西省的潜在分布区. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(1): 117-124.
- [12] Gui W F, Dong W Y, Wen Q Z, Ran X, Cao S W, Zheng J N, Wu Y Y, Zhong H, Xue X. Redistribution of *Qiongzhusia tumidinoda* in southwest China under climate change: a study from 1987 to 2012. *Forests*, 2024, 15(5): 820.

- [13] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [14] Vasconcelos T S, Rodríguez M Á, Hawkins B A. Species distribution modelling as a macroecological tool: a case study using New World amphibians. *Ecography*, 2012, 35(6): 539-548.
- [15] 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, McC M Overton J, Townsend Peterson A, 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.
- [16] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [17] McCulloch-Jones E J, Kraaij T, Crouch N, Faulkner K T. Assessing the invasion risk of traded alien ferns using species distribution models. *NeoBiota*, 2023, 87: 161-189.
- [18] Gao X X, Liu J, Huang Z H. The impact of climate change on the distribution of rare and endangered tree *Firmiana kwangsiensis* using the Maxent modeling. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(8): e9165.
- [19] Rawien J, Jairam-Doerga S. Predicted *Batrachochytrium dendrobatidis* infection sites in Guyana, Suriname, and French Guiana using the species distribution model maxent. *PLoS One*, 2022, 17(7): e0270134.
- [20] 苏静, 李海洋, 王瑞, 张梦帆, 李家美. 外来入侵地中海大麦在中国的潜在适生区预测. *生态学报*, 2025, 45(3): 1379-1388.
- [21] 胡淑萍, 何礼文. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 对白水江国家级自然保护区缺苞箬竹适生区分析. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2115-2122.
- [22] Yang Y M, Wang K L, Pei S J, Hao J M. Bamboo diversity and traditional uses in Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, 2004, 24(2): 157-165.
- [23] 史军义, 周德群, 马丽莎, 姚俊, 张德模. 中国竹类多样性及其重要价值. *世界竹藤通讯*, 2020, 18(3): 55-65, 72.
- [24] Dou P T, Dong Y R, Chen L N, Yang H Q. Modeling the potential distribution of different types of *Dendrocalamus sinicus*, the strongest woody bamboo in the world, with MaxEnt model. *PeerJ*, 2022, 10: e13847.
- [25] 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 基于 DOMAIN 和 NeuralEnsembles 模型预测中国毛竹潜在分布. *林业科学*, 2011, 47(7): 20-26.
- [26] 朱婉. 基于 DEM 数字高程的雷竹引种适生区的筛选方法. *中文科技期刊数据库: 全文版自然科学*, 2022(4): 71-74.
- [27] Yebeyen D, Nemomissa S, Hailu B T, Zewdie W, Sileshi G W, Rodríguez R L, Woldie T M. Modeling and mapping habitat suitability of highland bamboo under climate change in Ethiopia. *Forests*, 2022, 13(6): 859.
- [28] Yang G N, Liu N, Zhang X, Zhou H, Hou Y J, Wu P, Zhang X. Prediction of the potential distribution of *Chimonobambusautilis* (Poaceae, bambusoideae) in China, based on the MaxEnt model. *Biodiversity Data Journal*, 2024, 12: e126620.
- [29] 耿伯介. 中国植物志: 第9卷: 第1分册. 北京: 科学出版社, 1996.
- [30] 董文渊, 黄宝龙, 谢泽轩, 谢周华, 刘厚源. 箬竹生长发育规律的研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2002, 26(3): 43-47.
- [31] Wang W H, Peng S L, Shu H, Fu X, Ye X Y. Potential adaptive habitats for the narrowly distributed and rare bamboo species *Chimonobambusa tumidissinoda* J. R. Xue & T. P. Yi ex Ohrnb. under future climate change in China. *Ecology and Evolution*, 2024, 14(9): e70314.
- [32] 董文渊, 邱月群, 王逸之, 杨奕, 胡戎. 天然箬竹居群形态遗传多样性. *东北林业大学学报*, 2016, 44(5): 101-103.
- [33] 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.
- [34] 李士成, 张学珍. 基于土地利用的长江经济带 1970s 末至 2015 年人类活动强度数据集. *中国科学数据*, 2018, 3(3): 15-22.
- [35] 刘学琴, 白明, 贺达汉, 王新谱. 基于 MaxEnt 模型的草原步甲属潜在地理分布研究. *生态学报*, 2022, 42(10): 4217-4224.
- [36] Zeng Q, Zhang Y M, Sun G Q, Duo H R, Wen L, Lei G C. Using species distribution model to estimate the wintering population size of the endangered scaly-sided merganser in China. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0117307.
- [37] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. 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.
- [38] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. *生态学报*, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [39] Takano K T, Hibino K, Numata A, Oguro M, Aiba M, Shiogama H, Takayabu I, Nakashizuka T. Detecting latitudinal and altitudinal expansion of invasive bamboo *Phyllostachys edulis* and *Phyllostachys bambusoides* (Poaceae) in Japan to project potential habitats under 1.5°C-4.0°C global warming. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(23): 9848-9859.
- [40] 董文渊. 箬竹无性系种群退化及恢复机制的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [41] Du B Y, Wang Z Q, Li X Y, Zhang X, Wang X T, Zhang D Y. Adaptation of tree species in the greater khingan range under climate change: ecological strategy differences between *Larix gmelinii* and *Quercus mongolica*. *Forests*, 2024, 15(2): 283.
- [42] 宦智群, 耿兴敏, 徐小蓉, 刘维, 祝遵凌, 唐明. 基于 MaxEnt 模型分析不同气候变化情景下的黄心夜合 (*Michelia martinii*) 潜在地理分布. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(10): 1277-1287.
- [43] 田蕾, 周璐, 孙佳瑞, 宗桦. 山地乔灌木斑块空间分布格局及其多样性沿海拔梯度的变化规律. *生态学报*, 2023, 43(24): 10320-10333.
- [44] 段旭. 昆明准静止锋. 昆明: 气象出版社, 2017: 1-3.
- [45] 薛纪如, 易同培. 我国西南地区竹类二新属: 香竹属和箬竹属 (二) 箬竹属. *云南植物研究*, 1980(2): 33-38.
- [46] 董文渊. 滇东北箬竹资源保护和开发利用研究. *竹类研究*, 1997(2): 33-38.
- [47] 董文渊. 大关县箬竹产业发展探讨. *西南林业大学学报: 社会科学*, 2020, 4(2): 1-4.
- [48] 李德铎, 薛纪如. 中国箬竹属植物志资料. *植物分类与资源学报*, 1988(01): 51-56.
- [49] 董文渊, 黄宝龙, 谢泽轩, 谢周华, 刘厚源. 箬竹开花结实特性的研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2001, 25(6): 30-32.
- [50] 陈新, 董文渊, 钟欢, 袁翎凌, 夏莉, 黄小东, 浦婵, 吴义远. 箬竹与黄皮树人工混交林中箬竹地上部分生物量模型构建. *世界竹藤通讯*, 2022, 20(2): 23-28.