



中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征

王华辰, 朱弘, 李涌福, 伊贤贵, 李蒙, 南程慧, 王贤荣

引用本文:

王华辰, 朱弘, 李涌福, 等. 中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(2): 136–144.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性变化遥感监测及其驱动机制分析

Dynamic Monitoring of Ecological Vulnerability in the Semi-arid Desert and Steppe Ecological Zone of Northern China Based on RS and Its Driving Mechanism Analysis

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 1–12 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3749>

锐药竹种子苗光合生理生态特性分析

Research on Photosynthetic Eco-physiological Characteristics of *Oxytenanthera abyssinica* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 233–240 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3694>

贵州特有药用植物毕节小檗的形态变异

Morphological Variation of Endemic Medicinal Plant *Berberis guizhouensis* Ying (Berberidaceae) from Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2016, 24(1): 29–36 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.01.004>

亚热带果园土壤固碳潜力估算——以永春县为例

Estimation of Soil Carbon Sequestration Potential of Orchard in Subtropical China: A Case of Yongchun Xian

热带亚热带植物学报. 2015(4): 428–434 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.04.010>

贵州特有植物长柱红山茶种群年龄结构及空间分布格局研究

Age Structure and Spatial Distribution Pattern of Endemic Plant *Camellia mairei* var. *lapidea* Population in Guizhou Province, China

热带亚热带植物学报. 2015(2): 205–210 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.013>

中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征

王华辰^{1,2}, 朱弘^{2*}, 李涌福², 伊贤贵², 李蒙², 南程慧³, 王贤荣^{2**}

(1. 广东海洋大学农学院, 广东 湛江 524088; 2. 南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 生物与环境学院, 亚热带森林生物多样性保护国家林业局重点实验室, 南京 210037; 3. 南京森林警察学院, 南京 210023)

摘要: 为明确中国特有植物雪落樱桃(*Cerasus xueluoensis*)的潜在分布与居群生态特征, 利用 DIVA-GIS 软件及其耦合的 BIOCLIM 模型, 首次绘制了雪落樱桃适生区分布模拟图, 并对影响其分布的主导气候因子进行了定性定量分析。结果表明, 雪落樱桃当前潜在适生区主要分布在亚热带长江流域 1 200 m 以上高海拔山区, 其中渝-鄂-湘三省交界的大巴山-巫山山脉可视为现代核心分布区, 湘黔交界及湘南的南岭山脉可视为雪落樱桃潜在分布的南界, 陕-豫-鄂交界山区的秦岭南麓可能是其潜在分布的北界。主成分分析(PCA)筛选的主导气候因子及其贡献率依次为: 年降水量(bio12)>最冷季降水量(bio19)>最暖季降水量(bio18)>最湿季降水量(bio16), 累计频率曲线进一步确定其适宜范围分别为: 993.00~1 870.22、500.00~680.00、430.00~669.16 和 500.00~680.00 mm, 表明降水是影响雪落樱桃当下分布格局的主导气候限制因子。Pearson 相关性分析表明, 雪落樱桃分布格局在区域尺度上受海拔、经、纬度影响; 最小树分析和聚类分析表明, 雪落樱桃 7 个野生居群可划分为中西部与东部两大分支; 受试者工作特征曲线(ROC) AUC 值达到 0.751, 满足模型预测精度的基本要求。这些有助于为雪落樱桃制定科学合理的资源保护与科学引种规划。

关键词: 雪落樱桃; DIVA-GIS 软件; 生态位模型; 气候因子; 潜在分布

doi: 10.11926/jtsb.4102

Potential Distribution and Ecological Characteristic of Chinese Endemic Species *Cerasus xueluoensis*

WANG Hua-chen^{1,2}, ZHU Hong^{2*}, LI Yong-fu², YI Xian-gui², LI Meng², NAN Cheng-hui³, WANG Xian-rong^{2**}

(1. College of Agriculture, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China; 2. Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Biology and the Environment, Key Laboratory of State Forestry Administration on Subtropical Forest Biodiversity Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Nanjing Forest Police College, Nanjing 210023, China)

Abstract: To clarify the potential distribution and habitat ecological characteristics of Chinese endemic species *Cerasus xueluoensis*, the simulated diagram of suitable distribution of *C. xueluoensis* was drawn for the first time by using DIVA-GIS software coupled with the ecological niche model (BIOCLIM). Meanwhile, the qualitative and quantitative analysis of main climate factors influencing their distribution was also carried out. The results showed that the current suitable region of *C. xueluoensis* was mainly distributed in subtropical Yangtze River basin of China at high altitude mountainous above 1 200 m. Among them, the junctions of Chongqing-Hubei-Hunan belonging to the Daba-Wushan Mountain ranges were considered as the modern core distribution area, and

收稿日期: 2019-06-03 接受日期: 2019-07-20

基金项目: 广东海洋大学科研启动经费项目; 江苏省林业三新工程项目(LYSX[2015]17); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX17_0815); 2017 年南京林业大学优博士创新基金项目; 四川省应用基础研究项目(2019YJ0715)资助

This work was supported by the Project for Research Start-up, the Project for Three New Forestry in Jiangsu (Grant No. LYSX[2015]17), the Program for Postgraduate Research & Practice Innovation of Jiangsu Province (Grant No. KYCX17-0815), the Doctorate Fellowship Foundation of Nanjing Forestry University in 2017, and the Project for Applied Basic Research in Sichuan Province (Grant No. 2019YJ0715).

作者简介: 王华辰(1976~), 男, 博士, 讲师, 主要从事国产樱属植物分类与资源利用。E-mail: 361152247@qq.com

* 并列第一作者

** 通信作者 Corresponding author. E-mail: wangxianrong66@njfu.edu.cn

boundary areas between Hunan and Guizhou Provinces belonging to the Nanling Mountains should be regarded as the southern distributional border. What's more, the southern foothill of the Qinling Mountain from the junction of Shanxi-Henan-Hubei provinces should be the northern border of suitable distribution. Principal component analysis (PCA) showed that the dominant climate factor and its contribution rates was in the order of annual precipitation (bio12)>precipitation of the coldest quarter (bio19)>precipitation of the warmest quarter (bio18)>precipitation of the wettest quarter (bio16). The cumulative frequency curve further confirmed their optimal ranges were 993.00–1 870.22, 500.00–680.00, 430.00–669.16 and 500.00–680.00 mm, respectively, indicating the precipitation is the dominant climate limiting factor affecting the current distribution pattern of *C. xueluoensis*. Pearson correlation analysis indicated that the distribution pattern of *C. xueluoensis* was affected by altitude, longitude and latitude at a regional scale. The seven wild populations of *C. xueluoensis* could be divided into two major branches, such as central & western China and eastern China, according to minimum tree analysis and cluster analysis. The receiver operating characteristic curve (ROC) was reached to 0.751, which met the basic requirements of model prediction accuracy. So, these would be help to formulate scientific plans for resource protection and reasonable introduction of *C. xueluoensis*.

Key words: *Cerasus xueluoensis*; DIVA-GIS software; Niche model; Climatic factor; Potential distribution

雪落樱桃(*Cerasus xueluoensis*)是南程慧等^[1]于2013年发表的蔷薇科(Rosaceae)野生樱属我国特有植物,源于最早在湖北省鹤峰市雪落寨村发现而得名,其花色淡雅,树姿优美,是一种极具观赏价值的矮生类樱花资源,开发应用潜力较大^[2]。野外调查发现,雪落樱桃居群主要零星散布在中国亚热带高海拔的山顶灌丛,因其花期较早、落叶灌木或小乔木的生活型属性,常与同属山樱花(*C. serrulata*)、毛叶山樱花(*C. serrulata* var. *pubescens*)等近缘种混生导致鉴定错误,长期未能得到足够关注,在森林群落中常处于劣势或边缘地位,此外,近年来人为干扰加剧,加上全球气候的异常,使其面临生境破碎化、岛屿化与种群衰退的威胁。因此开展雪落樱桃的地理分布调查研究对研究亚热带樱属的特有种质资源具有重要意义。

近年来,基于生态位理论的物种分布模型(species distribution models, SDM)快速发展,已经成为林业生态管理中的一种重要工具,使得野外调查从传统单一的方式发展至由种群生态地理学与现代计算机、数理统计方法、地理信息系统(GIS)技术相互渗透产生的生态位模拟软件系统,从而实现物种生态位对环境要求的精准对接^[3]。其中,由国际马铃薯中心(CIP)开发的DIVA-GIS软件^[4],具有操作便捷、数据库开放、通用性强等特色,还能以直观预测图的形式输出物种潜在适生区,因此在预测物种潜在适生区的研究中有着较为广泛的应用与报道^[5-8]。

环境因子对植物生长和地理分布具有重要影

响,尤其在较大的时空尺度上,气候因素往往是限制植物分布和生长发育的主要原因之一^[9]。由于传统人工调查在人力、精力和时间方面的局限,我们团队目前仅在中国大陆发现了雪落樱桃的7个野生分布居群,已初步开展了有关群落特征与种子萌发的前期研究(尚未发表),但对其自然分布格局与生态适应特征尚无系统报道。因此利用地理信息技术结合生态位模型等相关手段开展其生物地理学方面的研究,为模拟雪落樱桃最可能分布的适生区域,提高未来发现目标物种新分布的可能,从而全面地提高我们对该新物种的了解。

1 材料和方法

1.1 物种分布数据获取和地图绘制

本研究前期(2014–2017年)野外调查及采样共获得7个实际存在的野生居群,即四川峨眉山,湖北利川、建始、雪落寨,湖南大围山,江西庐山和浙江大仰山(表1)。利用GPS仪获得取样点精确的经纬度,并输入Google Earth保存雪落樱桃坐标点位置。基于DIVA-GIS (Version 7.5)软件包(<http://www.diva-gis.org>),以中国省级行政区划矢量图(地图比例尺为1:400万,下载自国家测绘地理信息局标准地图服务网站(<http://bzdt.nasg.gov.cn/index.jsp>)作为分析底图,导入雪落樱桃地理分布的CSV格式数据,绘制实际分布点。采用DIVA-GIS耦合的BIOCLIM模型,完成雪落樱桃当前适生区可视化模拟分布预测。

1.2 气候因子的提取

当前气候数据来源于世界气候数据库 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>), 当前气候数据主要是根据 1950–2000 年世界各地气象站的观测记录, 采用空间插值法生成全球气候数据(空间分辨率为 2.5', 约 5 km²); 参考田聪等^[10]的方法, 将气候数据导入 DIVA-GIS 软件, 获取 19 个生物气候因子^[11]作为通用环境变量, 包括与温度相关的年均温(bio1)、平均日

温差(bio2)、等温性(bio3)、温度季节性变化的标准差(bio4)、最暖月最高温(bio5)、最冷月最低温(bio6)、年均温度变化范围(bio7)、最湿季均温(bio8)、最干季均温(bio9)、最暖季均温(bio10)、最冷季均温(bio11)和与降水相关的年降水量(bio12)、最湿月降水量(bio13)、最干月降水量(bio14)、降水量的季节变异系数(bio15)、最湿季降水量(bio16)、最干季降水量(bio17)、最暖降水量(bio18)和最冷季降水量(bio19)。

表 1 雪落樱桃 7 个采样点的地理信息

Table 1 Geographic information of seven sampling sites of *Cerasus xueluoensis*

编号 No.	地点 Location	代码 Code	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	海拔 Altitude (m)
1	四川乐山峨眉山 Emei Mountain, Leshan, Sichuan	EMS	29°33'	103°21'	1 645
2	湖北利川汪营 Wangying, Lichuan, Hubei	LC	26°25'	114°08'	1 662
3	湖北恩施建始 Jianshi County, Enshi City, Hubei	JS	30°42'	109°46'	1 575
4	湖北鹤峰雪落寨 Xueluozhai, Hefeng, Hubei	XLZ	29°45'	109°36'	1 244
5	湖南衡阳大围山 Dawei Mountain, Hengyang, Hunan	DWS	28°26'	114°03'	1 426
6	江西九江庐山 Lushan Mountain, Jiujiang, Jiangxi	LS	29°33'	115°59'	1 226
7	浙江丽水大仰山 Dayang Mountain, Lishui, Zhejiang	DYS	27°51'	119°35'	1 430

1.3 主导气候因子筛选与生境地比较分析

利用 DIVA-GIS 提取雪落樱桃 7 个实际有效分布点对应的当前气候变量数据, 利用 SPSS 16.0 对获取的 19 个生物气候因子进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 进而筛选出决定雪落樱桃当前地理分布的限制气候因子, 并与各居群实测海拔、经纬度进行 Pearson 相关性分析。参考朱弘等^[12]的方法, 将累积频率 >90% 的连续高频率区间作为其适宜生长范围; 7 个居群生境地气候进行欧式距离(neighbour joining)聚类分析及靴带值验证(bootstrap test)、最小生成树(MST)分析, 均采用 PAST 3 (Version 3.16)软件包(<http://folk.uion.no/hammer/past/>)绘制分析。

1.4 模型模拟的评价

为验证模型预测的精度, 参考张兴旺等^[13]的方法, 随机选取 75% 的物种存在点作为训练子集(sample size training date), 剩余 25% 存在点与随机抽取数倍于物种分布点的背景点作为验证子集(samples size testing data), 用训练子集进行模型预测, 重复 3 次, 取平均值, 输出保存为 grd 格式; 通过 DIVA-GIS 软件中受试者功能曲线(receiver operation characteristic, ROC)模块输出模型的模拟精度。其模型预测结果评价的标准是: 较差(AUC=0.5~0.6)、一般(0.6~0.7)、较准确(0.7~0.8)、很准确

(0.8~0.9)和极准确(0.9~1.0)。

2 结果和分析

2.1 适生区的划分和地理分布格局

将 BIOCLIM 模型潜在分布区预测的结果划分为 4 个等级(颜色越深分布概率越大), 分别为: 白色-非适生区(2.5%~5.0%), 黄色-低度适生区(5.0%~10%), 橙色-中度适生区(10%~20%), 红色-高度适生区(20%~29%); 无数据也以白色表示。当前适生区分布预测表明, 中国中部、西部山区是雪落樱桃潜在分布集中的地方, 尤其以重庆、湖北和湖南三省交界的大巴山-巫山山脉、湘黔交界及湘南所处的南岭山脉可以视为雪落樱桃潜在分布的南界, 陕-豫-鄂交界的秦岭南麓可能是其潜在分布的北界(图 1)。

2.2 主导气候因子的筛选

PCA 分析结果表明, 19 个主成分中的前 2 个主成分方差贡献率分别为 90.61% 和 7.09%, 累计贡献率达 98.51%, 足以代表 19 个气候变量的绝大部分信息量(表 2)。同时, 在第 1 主成分中年降水量(bio12)、最湿季降水量(bio16)、最暖季降水量(bio18)和最冷季降水量(bio19)得分系数最高, 分别为 0.902 8、0.240 4、0.207 3 和 0.243 2, 可见这些指标均与降水相关(表 3)。

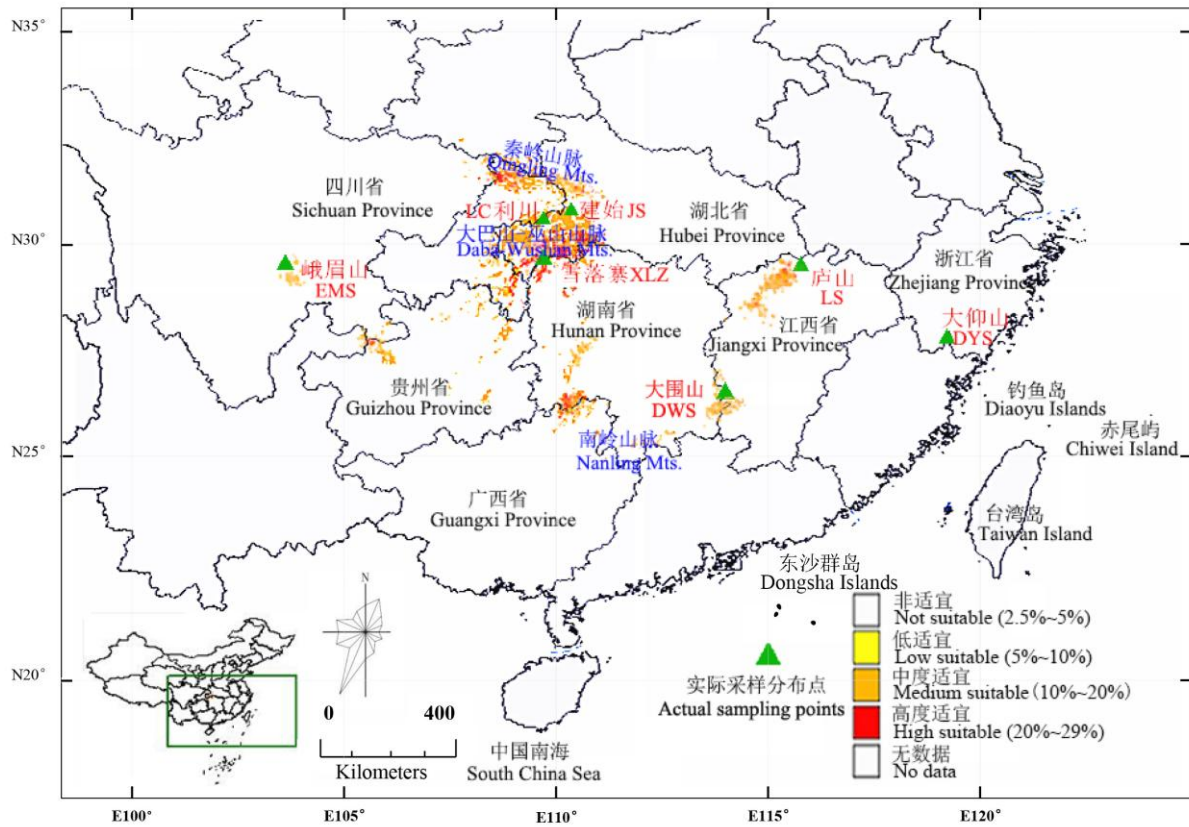


图 1 雪落櫻桃实际分布点与当前潜在适生区分布预测

Fig. 1 Distribution of actual sampling sites and prediction of current potential area of *Cerasus xueluoensis*

表 2 前 6 个主成分方差解释

Table 2 Explanation of the first six principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 / % Variance contribution rate	累计贡献率 / % Cumulative contribution rate
PC 1	143 086.00	90.61	90.61
PC 2	12 468.20	7.90	98.51
PC 3	1 617.52	1.02	99.53
PC 4	577.99	0.37	99.90
PC 5	147.63	0.09	99.99
PC 6	21.13	0.01	100

表 3 前 2 个主成分相对于 19 个气候因子的得分系数

Table 3 Coefficient of first two principle components corresponding to nineteen environmental factors

气候因子 Climatic factor	主成分 Principal component		气候因子 Climatic factor	主成分 Principal component	
	PC1	PC2		PC1	PC2
bio1	0.004 1	-0.005 1	bio11	0.004 1	0.000 9
bio2	-0.000 3	-0.000 3	bio12	0.902 8	-0.180 8
bio3	-0.000 9	0.012 7	bio13	0.103 2	0.234 5
bio4	-0.000 2	-0.512 3	bio14	0.004 2	-0.005 5
bio5	0.003 6	-0.013 5	bio15	-0.028 8	0.087 9
bio6	0.003 9	-0.000 2	bio16	0.240 4	0.355 6
bio7	-0.000 3	-0.001 4	bio17	0.170 7	0.184 8
bio8	-0.000 3	-0.003 3	bio18	0.207 3	0.653 1
bio9	0.006 6	-0.001 2	bio19	0.243 2	-0.226 5
bio10	0.003 8	-0.001 8			

表 4 PCA 筛选后的 4 个主导气候因子变量统计

Table 4 Variable statistics of four dominant climatic factors after PCA screening

气候因子 Climatic factor	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准误 Std. error	分布范围 Suitable distributing region (mm) [累计频率 Cumulative frequency (CP) ≤90%]
bio12	993.00	1 895.00	1 057.00	129.33	993.00~1 870.22
bio16	500.00	716.00	664.71	38.73	500.00~680.00
bio18	430.00	717.00	609.86	41.38	430.00~669.16
bio19	34.00	220.00	127.00	37.39	34.00~127.00

2.3 主要限制气候因子分布范围及其与海拔、经纬度的相关性

对雪落樱桃分布的主要限制气候因子进行定量分析(表 4),从频率曲线可看出,年降水量(bio12)的适宜范围为 993.00~1 870.22 mm,最湿季降水量(bio16)的适宜范围为 500.00~680.00 mm,最暖季降水量(bio18)的适宜范围为 430.00~669.16 mm,最冷季降水量(bio19)的适宜范围为 34.00~127.00 mm。

主要限制气候因子与海拔、经纬度的 Pearson 相关性分析结果表明(表 5),年降水量(bio12)与海拔和经度呈现显著负相关($P<0.05$)和极显著正相关($P<0.01$),与最湿季降水量(bio16)呈极显著正相关($P<0.01$);最湿季降水量(bio16)和最暖季降水量(bio18)呈极显著正相关($P<0.01$);最冷季降水量(bio19)分别与海拔、年降水量呈极显著正相关($P<0.01$),与纬度和最湿季降水量分别呈显著负相关和显著正相关($P<0.05$)。

表 5 主导限制气候因子与海拔、经纬度的 Pearson 相关性分析

Table 5 Person correlation analysis of dominant climatic factors with altitude, latitude and longitude

参数 Parameter	海拔 Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	bio12	bio16	bio18	bio19
海拔 Altitude	1						
经度 Longitude	-0.535 7	1					
纬度 Latitude	0.221 4	-0.541 2	1				
bio12	-0.726 8*	0.829 3**	-0.619 4	1			
bio16	-0.536 4	0.477 6	-0.645 6	0.857 3**	1		
bio18	-0.445 6	0.260 8	-0.210 0	0.678 0	0.858 6**	1	
bio19	-0.623 1	0.892 6**	-0.750 1*	0.942 9**	0.743 1*	0.425 9	1

**: $P<0.01$; *: $P<0.05$

2.4 基于气候因子的不同居群最小生成树与聚类分析

基于气候因子的雪落樱桃 7 个野生居群生境的最小生成树(MST)结果表明,雪落寨居群处于树状网络的中心,暗示其气候特征最能代表雪落樱桃自然生存所需的气候条件,建始居群与雪落寨居群关系最近(图 2),这也与图 1 中豫-鄂-湘交界的核心分布区地理关系相吻合。利川居群虽然与前两者在地理上关系很近,却关系甚远,表明其所在生境与雪落寨和建始居群有较大的差异,推测与其海拔分布最高有关(图 2);欧氏距离聚类分析和靴带值验证 1 000 次的结果进一步将 7 个雪落樱桃居群划分为中西部支(bootstrap=69)与东部(bootstrap=85)两大分支。第一分支由峨眉山、建始、雪落寨和利川 4 个居群构成,其中利川居群单独与前 3 个居群构成姊妹支,东部分支(第二分枝)中,庐山、大仰山和大围山 3 个居群在地理位置上彼此间比较均匀,但

庐山和大仰山居群首先聚为一支,表明两个居群拥有相似的生境,与最小树分析结果一致。总体来看,聚类分析的结果与最小树分析的结论相一致(图 3)。

2.5 模型的验证与评估

BIOCLIM 模型 AUC 值为 0.751,显著大于随机分布模型(0.500),阈值位于较准确区间(0.7~0.8),说明基于 BIOCLIM 模型对雪落樱桃当代潜在的分布模拟是可靠的。

3 结论和讨论

研究植物地理分布及其空间格局特征,是植物生态学的重要研究领域,对制定有效的生物多样性保护策略具有重要的理论与实践价值^[14]。生物地理模型的应用在近些年得到了许多植物学家和生态

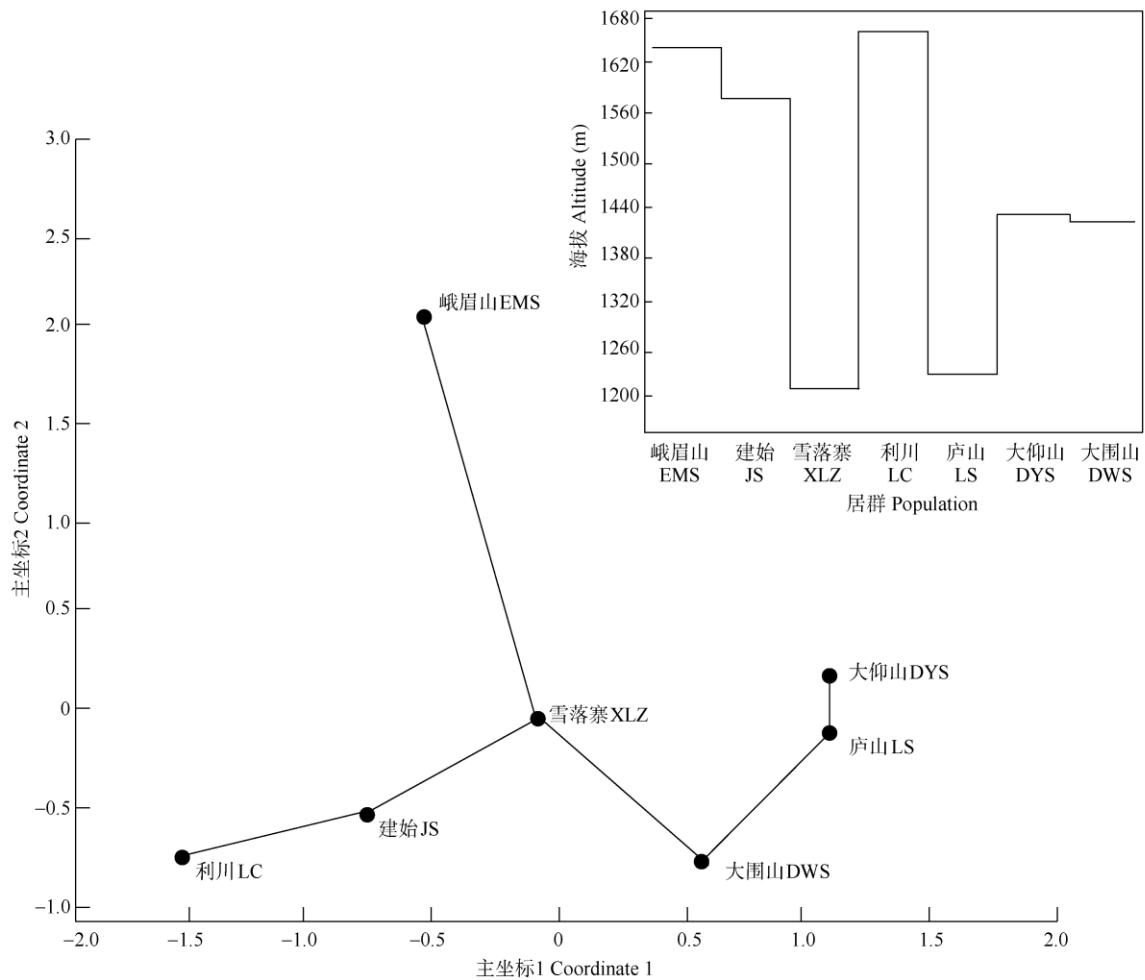


图 2 基于气候变量的雪落樱桃居群最小生成树(MST)分析和平均海拔分布。EMS: 峨眉山; JS: 建始; XLZ: 雪落寨; LC: 利川; LS: 庐山; DYS: 大仰山; DWS: 大围山。下图同。

Fig. 2 Minimum spanning tree (MST) analysis based on climatic variables and average altitude distribution of populations. EMS: Emei Mountain; JS: Jianshi; XLZ: Xueluozhai; LC: Lichuan; LS: Lushan Mountain; DYS: Dayang Mountain; DWS: Dawei Mountain. The same is followed Figure.

学家的重视和应用, 基于物种分布模型的精确采样, 可以提高目标物种的发现概率, 从而有效地提高我们对物种分布的了解, 尤其在珍稀濒危及子遗生物物种保护方面^[15-17]。与此同时, 物种分布模型还为全面了解气候因子与其分布格局的关系提供可能, 对于指导物种的保育是十分重要的。相比 GARP、MAXCENT 等生态位软件^[18-19], BIOCLIM 模型作为经典的生态位模型可以有效地应用于物种分布的研究, 并且表现出理想的预测效果^[20-22]。近年来, 亦有学者不断尝试将其运用在樱属植物的研究中, 李蒙等^[23]对山樱花地理分布与气候因子的关系研究表明, 影响其分布的重要环境因子为年均温、纬度、极端低温、1 月均温与海拔; 朱弘等^[12]基于 32 个分布点信息成功模拟了狭域分布的浙闽

樱桃(*C. schneideriana*)当前适生区以及未来气候情境下的分布范围变化趋势; 朱淑霞等^[24]比较高盆樱桃(*C. cerasoides*)及其近缘种钟花樱桃(*C. campanulata*)在区域尺度下的地理分布格局与生态特征, 综合 PCA 分析、频率直方图与正态曲线拟合的结果表明“热量变异幅度”是两个物种分布存在差异的主导气候因子。在本研究中, 7 个分布点均是野外考察的实际分布点, 具有客观真实性, 同时基于地理信息技术的 DIVA-GIS 软件耦合 BIOCLIM 模型, 提取所在生境的气候因子, 并利用 PCA 分析、最小树分析、相关性分析、聚类分析等多种生物统计学方法, 开展对雪落樱桃自然分布格局和主导气候因子的关系进行定性、定量分析, 以明确其生态适应性特征。

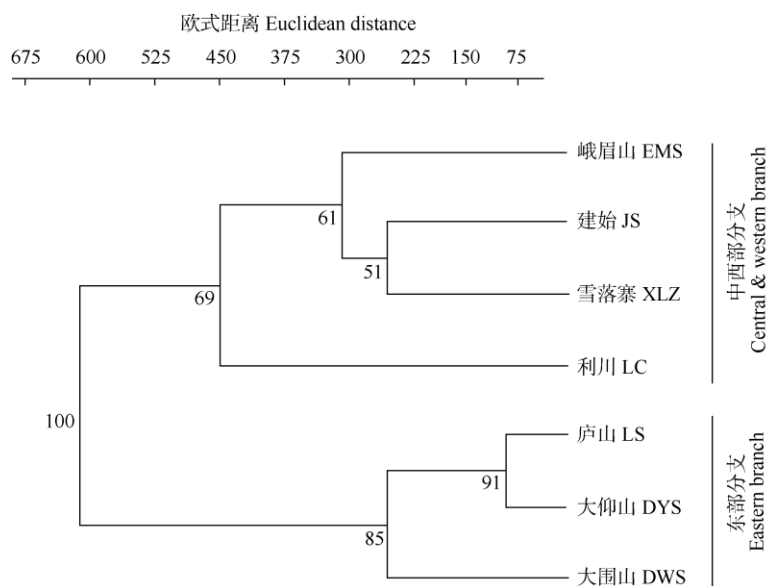


图 3 基于气候变量的雪落樱居群的欧式距离聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of populations based on climatic variables by using Euclidean distance

水热条件的分配直接反映了气候状况，从而影响植物的地理分布^[25]。从分布区的地理环境结合多年野外实际调查来看，雪落樱桃虽然分布较广，但其生境特征均具有相似性：主要集中在亚热带长江流域 1 200 m 以上高海拔的山顶灌丛或高山湿地，常年阴凉湿润，矮生、冬季三芽并生、叶片狭小、叶柄较短、总花梗短缩等表型特征均可视为长期高山生态适应性选择的结果，暗示其具有较强的适应高寒、高湿的抗逆性和可塑性。气候因子 PCA 分析也表明，影响雪落樱桃分布的气候限制因子依次为年降水量 > 最冷季降水量 > 最暖季降水量 > 最湿季降水量，均反映了降水是影响雪落樱桃当前分布格局的主导气候限制因子。主要限制气候因子与海拔、经纬度的 Pearson 相关性分析结果表明，年降水量主要与海拔和经度呈现显著负相关 ($P < 0.05$) 和极显著正相关 ($P < 0.01$)；最冷季降水量分别与海拔、年降水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与纬度和最湿季降水量分别呈显著负相关和显著正相关 ($P < 0.05$)，从而体现了雪落樱桃分布格局的差异在其区域尺度上受海拔、经纬度不同程度影响。最小树分析和聚类分析结果将雪落樱桃 7 个野生居群所在生境划分为中西部(峨眉山、建始、雪落寨和利川)与东部(庐山、大仰山和大围山)两大地理分支，亚热带山区的地理-气候异质性的选择压力可能促使雪落樱桃居群间产生了适应性进化。由此也可以制定科学的管理计划，即不同的地理组应该视为独立的

单元进行原地保护及异地引种。

本文基于气候变量与生态位模型模拟雪落樱桃的适生区域，BIOCLIM 模型根据各个因子对研究物种生存限制的范围形成包络，因其对研究区域的环境条件要求比较苛刻，所以在小样本容量预测能力相比其他模型相对谨慎与客观；同时应用 ROC 分析法进行评价，由于 AUC 值不受阈值影响、评价客观，因此被广泛地应用在生态位模型效果评价中^[26]。结合图 1 可知，雪落樱桃当代的潜在分布区与实际采样点有很好的 consistency，即表明了针对狭域型、环境耐特化、小样本的物种，应用 BIOCLIM 模型仍可以获得较准确的地理分布预测，这与前人的研究结果相一致^[12,21]。但由于生态位模型是在理想化的前提假设“植物物种与气候保持静态平衡”下进行的^[27]，模拟理论结果与实际复杂自然分布区难免存在误差，且物种的现实分布常常受很多因素限制，其中采集记录点的分布数量是最重要的因素之一^[28]，雪落樱桃居群零星分布的物种特性，可能会降低模拟的精度；当然物种的分布除了受海拔、经纬度及气候因素的影响外，也受到来自非生物因子(土壤类型、地形地貌)和生物因子(物种扩散能力、种间关系)等其他因素的共同影响^[15]，因此在未来整个模拟过程还可在更充分的数据(如群落样方调查)支持下进行更新，甚至是未来一定时期的更广时空尺度预测，例如由于雪落樱桃高海拔分布的生态特性，往往对气候变化较为敏感，还可以模拟比较

未来不同气候情境下的分布变化趋势,使模型界定的潜在生态位能更好地反映该植物的分布与环境要素之间的匹配。此外,今后若能开展7个居群的生态地理与其对应的遗传多样性数据或居群间亲缘演化距离关系的研究,将无疑是生态地理学领域一个有趣的课题,能够进一步加强我们对于与物种分化的过程与形成机制的理解,从而为雪落樱桃保护利用对策提供依据。

参考文献

- [1] NAN C H, WANG X R, TANG G G, et al. *Cerasus xueluoensis* (Rosaceae), a new species from China [J]. *Ann Bot Fenn*, 2013, 50(1/2): 79–82. doi: 10.5735/085.050.0114.
- [2] SHI G Y, NAN C H, YI X G, et al. Establishment of regeneration system in *Cerasus xueluoensis* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2014, 38(S1): 20–24. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.S1.005.
史港影, 南程慧, 伊贤贵, 等. 雪落樱再生体系的建立[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(S1): 20–24. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.S1.005.
- [3] ZHU G P, LIU G Q, BU W J, et al. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiv Sci*, 2013, 21(1): 90–98. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.09106.
朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90–98. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.09106.
- [4] HIJMANS R J, GUARINO L, CRUZ M, et al. Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS [J]. *Plant Genet Resour News*, 2001(127): 15–19.
- [5] HIJMANS R J, SPOONER D M. Geographic distribution of wild potato species [J]. *Amer J Bot*, 2001, 88(11): 2101–2112. doi: 10.2307/3558435.
- [6] JIANG F J, FAN X C, ZHANG Y, et al. Modeling the geographic distribution of three endangered *Vitis* L. species in China [J]. *Chin J Ecol*, 2014, 33(6): 1615–1622. doi: 10.13292/j.1000-4890.20140327.022.
姜建福, 樊秀彩, 张颖, 等. 中国三种濒危葡萄属(*Vitis* L.)植物的地理分布模拟 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1615–1622. doi: 10.13292/j.1000-4890.20140327.022.
- [7] RAINA A P, ABRAHAM Z, SIVARAJ N. Diversity analysis of *Kaempferia galanga* L. germplasm from South India using DIVA-GIS approach [J]. *Ind Crops Prod*, 2015, 69: 433–439. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.02.052.
- [8] ZHANG L Y, WEI J W, YANG Z W, et al. Distribution and diversity of twelve *Curcuma* species in China [J]. *Nat Prod Res*, 2018, 32(3): 327–330. doi: 10.1080/14786419.2017.1350667.
- [9] WANG W G, TANG X Y, ZHU Q L, et al. Predicting the impacts of climate change on the potential distribution of major native non-food bioenergy plants in China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(11): e111587. doi: 10.1371/journal.pone.0111587.
- [10] TIAN C, MU N R, ZHU Z Y, et al. Method for the rapid obtaining of climate data based on DIVA-GIS [J]. *J Agric*, 5(5): 109–113. doi: 10.11923/j.issn.2095-4050.2014-xb0621.
田聪, 穆尼热, 朱忠艳, 等. 基于 DIVA-GIS 快速获取气候信息的方法 [J]. *农学学报*, 2015, 5(5): 109–113. doi: 10.11923/j.issn.2095-4050.2014-xb0621.
- [11] WANG G, MENG Y Q, SUN J, et al. Modeling the geographic distribution of *Rhododendron maculiferum* [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2013, 41(5): 173–177. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2013.05.032.
王刚, 孟艳琼, 孙婧, 等. 麻花杜鹃的地理分布模拟 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 173–177. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2013.05.032.
- [12] ZHU H, YOU L X, LI Y F, et al. Modeling the geographical distribution pattern and climatic limited factors of *Cerasus schneideriana* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, 25(4): 315–322. doi: 10.11926/jtsb.3702.
朱弘, 尤禄祥, 李涌福, 等. 浙闽樱桃地理分布模拟及气候限制因子分析 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(4): 315–322. doi: 10.11926/jtsb.3702.
- [13] ZHANG X W, LI Y, FANG Y M. Geographical distribution and prediction of potential ranges of *Quercus acutissima* in China [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2014, 34(8): 1685–1692. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1685.
张兴旺, 李垚, 方炎明. 麻栎在中国的地理分布及潜在分布区预测 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(8): 1682–1692. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1685.
- [14] ZHANG X W, LI Y, XIE Y P, et al. Effect of climate change on potential geographical distribution of *Sorbus amabilis* [J]. *J Plant Resour Environ*, 2014, 27(4): 31–41. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.04.04.
张兴旺, 李垚, 谢艳萍, 等. 气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 27(4): 31–41. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.04.04.
- [15] WEN Z B, ZHANG J, ZHANG M L. Geographical distribution and prediction on potential distribution areas of Chinese endemic species *Salsola junatovii* [J]. *J Plant Resour Environ*, 2016, 25(1): 81–87. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.01.10.
闻志彬, 张杰, 张明理. 中国特有种天山猪毛菜的地理分布及潜在分布区预测 [J]. *植物资源与环境学报*, 2016, 25(1): 81–87. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.01.10.

- [16] TANG C Q, DONG Y F, HERRANDO-MORAIRA S, et al. Potential effects of climate change on geographic distribution of the Tertiary relict tree species *Davidia involucrata* in China [J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 43822. doi: 10.1038/srep43822.
- [17] TANG C Q, MATSUI T, OHASHI H, et al. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia [J]. *Nat Commun*, 2018, 9: 4488. doi: 10.1038/s41467-018-06837-3.
- [18] QIN Z, ZHANG J E, DITOMMASO A, et al. Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. with Maxent and GARP models [J]. *J Plant Res*, 2015, 128(5): 763–775. doi: 10.1007/s10265-015-0738-3.
- [19] ZHANG C, CHEN L, TIAN C M, et al. Predicting the distribution of dwarf mistletoe (*Arceuthobium sichuanense*) with GARP and MaxEnt models [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, 38(5): 23–32. doi: 10.13332/j.1000-1522.20150516.
张超, 陈磊, 田呈明, 等. 基于 GARP 和 MaxEnt 的云杉矮榭寄生分布区的预测 [J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5): 23–32. doi: 10.13332/j.1000-1522.20150516.
- [20] QIU J, ZHU H, CHEN X, et al. Modeling the suitable areas and ecological characteristics of *Sorbus alnifolia* using DIVA-GIS software [J]. *J Beijing For Univ*, 2018, 40(9): 25–32. doi: 10.13332/j.1000-1522.20180162.
邱靖, 朱弘, 陈昕, 等. 基于 DIVA-GIS 的水榆花楸适生区模拟及生态特征 [J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(9): 25–32. doi: 10.13332/j.1000-1522.20180162.
- [21] SHAO H, TIAN J Q, GUO K, et al. Effects of sample size and species traits on performance of bioclim in predicting geographical distribution of tree species: A case study with 12 deciduous *Quercus* species indigenous to China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, 33(5): 870–877. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.05.005
邵慧, 田佳倩, 郭柯, 等. 样本容量和物种特征对 BIOCLIM 模型模拟物种分布准确度的影响——以 12 个中国特有落叶栎树种为例 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 870–877. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.05.005.
- [22] WANG J, NI J. Modelling the distribution of five *Caragana* species in temperate northern China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, 33(1): 12–24. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.01.002.
王娟, 倪健. 中国北方温带地区 5 种锦鸡儿植物的分布模拟 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 12–24. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.01.002.
- [23] LI M, YI X G, WANG H C, et al. Studies on the relationship between *Cerasus serrulata* distribution region and the environmental factors [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2014, 38(S1): 74–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.S1.016.
李蒙, 伊贤贵, 王华辰, 等. 山樱花地理分布与水热环境因子的关系 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(S1): 74–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.S1.016.
- [24] ZHU S X, ZHU H, CHEN L, et al. Modeling the geographical distribution pattern and comparison of ecological characteristics between *Cerasus cerasoides* and *C. campanulata* [J]. *Guihaia*, 2019, 39(10): 1398–1406. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201809004.
朱淑霞, 朱弘, 陈琳, 等. 高盆樱桃与钟花樱桃的地理分布模拟及生态特征比较分析 [J]. *广西植物*, 2019, 39(10): 1398–1406. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201809004.
- [25] SUN L Y, JIANG Z, LIU C N, et al. Analysis of the adaptive and geographical distribution of *Yulania liliiflora* based on DIVA-GIS [J]. *Plant Sci J*, 2018, 36(6): 804–811. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.60804.
孙李勇, 蒋政, 刘晨妮, 等. 基于 DIVA-GIS 的紫玉兰地理分布及适生性分析 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36(6): 804–811. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.60804.
- [26] McPHERSON J M, JETZ W, ROGERS D J. The effects of species' range sizes on the accuracy of distribution models: Ecological phenomenon or statistical artefact? [J]. *J Appl Ecol*, 2004, 41(5): 811–823. doi: 10.1111/j.0021-8901.2004.00943.x.
- [27] ANDERSON R P. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2013, 1297(1): 8–28. doi: 10.1111/nyas.12264.
- [28] STOCKWELL D B, PETERSON A T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models [J]. *Ecol Model*, 2002, 148(1): 1–13. doi: 10.1016/S0304-3800(01)00388-X.