

# 浙闽樱桃地理分布模拟及气候限制因子分析

朱弘, 尤禄祥, 李涌福, 王华辰, 王贤荣\*

(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, 南京 210037)

**摘要:** 为了解浙闽樱桃(*Cerasus schneideriana*)地理分布特征及与气候限制因子之间的关系, 基于 DIVA-GIS 平台获取实际地理分布点的气候资料, 利用 BIOCLIM 模型预测当下适生区范围以及预测其未来潜在分布。结果表明, 浙闽樱桃实际分布区覆盖浙江、福建、安徽、江西、广西及湖南 6 省, 浙闽交界的山区是自然分布的核心区, 浙皖交界是其分布的北界。未来气候变化情境(CCM3)下, 浙闽樱桃的潜在分布区概率将增大, 且有北扩的趋势。主成分分析(PCA)表明, 年降水量(bio12)、最湿季降雨量(bio16)、最暖季降雨量(bio18)、温度季节变化方差(bio4)是影响浙闽樱桃当下适生区的气候限制因子, 频率直方图进一步确定他们的适宜范围分别为 1503~2003 mm、604~951 mm、528~791 mm 和 601~872 (标准差\*100)。ROC 曲线检验表明 BIOCLIM 对浙闽樱桃分布预测的精度很高(AUC=0.998), 结果是可信的。因此, 浙闽樱桃适合生长在我国北亚热带温暖湿润区, 水热因子是造成其分布格局的主导气候限制因子。

**关键词:** 浙闽樱桃; 地理分布; 气候限制因子; BIOCLIM 模型; 潜在分布区预测

doi: 10.11926/jtsb.3702

## Modeling the Geographical Distribution Pattern and Climatic Limited Factors of *Cerasus schneideriana*

ZHU Hong, YOU Lu-xiang, LI Yong-fu, WANG Hua-chen, WANG Xian-rong\*

(Collaborative Innovation Center of the Southern Modern Forestry, College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** To understand the relationship between geographical distribution pattern of *Cerasus schneideriana* and its climatic limited factors, the DIVA-GIS software and BIOCLIM model were applied to predict the present and future potential spatial areas on the basis of actual distribution points. The results showed that the actual distributions of *C. schneideriana* covered 6 provinces of east China, including Zhejiang, Fujian, Anhui, Jiangxi, Guangxi and Hunan. The natural distribution core area located in mountain areas of Zhejiang-Fujian border, and the north boundary arrived at Zhejiang-Anhui border. Under future climate change situation (CCM3), the probability of potential areas of *C. schneideriana* would increase, and had a tendency to the north expansion. The principal component analysis (PCA) indicated that the annual precipitation (bio12), precipitation of the driest quarter (bio6), precipitation of the warmest quarter (bio18) and temperature seasonality (bio4) were the dominant factors for geographical distribution of *C. schneideriana*. The frequency histograms further showed the factor's optimum range were 1503~2003 mm, 604~951 mm, 528~791 mm and 601~872 (SD\*100), respectively. Evaluation by the ROC curve proved the BIOCLIM model predicted the distribution accurately (AUC=0.998) and reliably. Therefore, these revealed that *C. schneideriana* were suited to live in north subtropical region of China, with warm and humid condition, water and heat were the two key climatic factors to the distribution

收稿日期: 2016-11-21

接受日期: 2017-01-15

基金项目: 江苏省林业三新工程项目(LYSX[2015]17)资助

This work was supported by the Three New Forestry Project of Jiangsu (Grant No. LYSX[2015]17).

作者简介: 朱弘(1990~), 男, 博士研究生, 主要从事樱属植物资源等方面研究。E-mail: 1107401987@qq.com

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

pattern.

**Key words:** *Cerasus schneideriana*; Geographical distribution; Climatic limited factor; BIOCLIM model; Prediction of potential distribution

植物地理分布格局的模拟和预测及其与气候因子相互关系, 已经成为植物生态学和生物地理学的研究热点<sup>[1-2]</sup>。随着气候变化情景研究及计算机科学的发展, 许多物种分布模型及相关软件应运而生, 如 CLMEX<sup>[3]</sup>、GARP<sup>[4]</sup>、MAXCENT<sup>[5]</sup>等不仅可以预测评估气候变化对物种分布的影响, 也在珍惜濒危物种保护<sup>[6-8]</sup>、生物多样性监测<sup>[9-11]</sup>、外来生物入侵机制<sup>[12-15]</sup>等领域广泛应用。其中 DIVA-GIS 作为国际马铃薯中心(CIP)开发的一款经典软件, 具有操作便捷、数据库开放、通用性强等特色<sup>[16-17]</sup>, 其自带的 BIOCLIM 模型主要原理是依据已知分布点与预测点气候变量的一致性进行预测, 特别是它更适用于狭域型植物分布类型的分析, 且在较少的样本容量下也能获得准确的预测<sup>[18]</sup>, 已经得到了广泛接受与认可。

浙闽樱桃(*Cerasus schneideriana*)隶属蔷薇科(Rosaceae)樱属, 落叶小乔木, 特产我国浙江南部、福建北部、广西北部等地, 生于海拔 600~1300 m 的亚热带山地<sup>[19]</sup>, 每年早春先花后叶, 花色淡雅, 树形优美, 极具观赏价值, 又兼具优良的抗涝特性, 具有较高的开发利用前景。然而根据多年野外观察, 浙闽樱桃野生居群呈现零星分布, 在亚热带森林群落中常处于受排挤的边缘地位, 面临生境破碎化的威胁, 有关其生物地理学方面的研究鲜有报道。那么限制浙闽樱桃地理分布的主导气候因子是什么? 全球气候变化情境下以其为代表的狭域分布种的分布格局将会如何改变? 这些问题制约着樱属种质资源认识、保护、开发等工作的开展。

气候变化已对物种的分布和丰富度产生了较大影响, 在温室气体排放持续增加、全球气候变暖的大背景下<sup>[20]</sup>, 许多植物的适宜分布范围将缩小<sup>[21]</sup>, 而传统的生物调查方法已经不能满足相关的研究。因此, 基于 DIVA-GIS 平台有效地获取实际地理分布点的气候资料, 并利用 BIOCLIM 物种分布模型预测其适生区范围, 分析其地理分布格局与生物气候因子之间的关系, 并预测未来气候变化对该植物潜在分布区的影响变化, 为今后该植物的种质资源保护评价以及引种栽培提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 物种分布数据收集

通过查阅标本记录、植物志、已发表文献资料和实地调查, 确定浙闽樱桃的分布点。标本凭证信息主要通过国家标本资源共享平台内共建的中国数字植物标本馆(CVH; <http://www.cvh.org.cn/>)、中国自然标本馆(CFH; <http://www.cfh.ac.cn/>)、中国植物图像库(PPBC; <http://www.plantphoto.cn/>)查询。将每份标本的地理位置信息尽可能落实到乡镇行政单位, 删除模糊及重复记录, 并参考《Flora of China》<sup>[19]</sup>等各地方植物志, 排除人工引种地标本记录(如陕西的 2 个标本凭证经查证为森林公园引种), 利用 Google Earth 软件获取每个分布点的经纬度, 最终获得 32 个精确分布点的信息(表 1)。

### 1.2 气候数据获取

当前和未来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气象观测记录, 采用空间插值法生成全球气候数据(空间分辨率为 2.5'); 未来气候采用美国国家大气研究中心(NCAR)研发的全球大气环流谱模式 CCM3 模型<sup>[23]</sup>, 在 CO<sub>2</sub> 倍增情境下模拟的 2100 年气候数据(空间分辨率为 2.5')。将气候数据导入 DIVA-GIS 软件, 获取 19 个生物气候因子作为环境变量, 包括年均温(bio1)、平均日温差(bio2)、等温性(bio3)、温度季节变化方差(bio4)、极端最高温(bio5)、极端最低温(bio6)、温度年较差(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)、年降雨量(bio12)、最湿月降雨量(bio13)、最干月降雨量(bio14)、季节降雨量变异系数(bio15)、最湿季降水量(bio16)、最干季降水量(bio17)、最暖季降雨量(bio18)和最冷季降雨量(bio19)。

### 1.3 地理分布图绘制

基于 DIVA-GIS (Version 7.5)软件包(<http://www.diva-gis.org/>), 以为中国省级行政区划矢量地图(地图比例尺为 1:4000000, 下载自国家基础地理信息

表1 浙闽樱桃分布点记录

Table 1 Distribution records of *Cerasus schneideriana*

序号 No.	省份 Province	居群位置 Population location	经度 (°) Longitude	纬度 (°) Latitude	来源 Resource
1	浙江 Zhejiang	遂昌龙门岭 Longmenglin, Suichang	119.23	30.29	CVH, NAS00357091
2	浙江 Zhejiang	龙泉昂山 Anshan, Longquan	119.56	29.79	CVH, PE 00798305
3	浙江 Zhejiang	庆元隆宫山 Nonggongshan, Qingyuan	118.95	27.49	CVH, HHBG HZ016950
4	浙江 Zhejiang	乐清雁荡山 Yandangshan, Yueqing	121.09	28.36	CVH, HHBG HZ016949
5	浙江 Zhejiang	龙泉凤阳山 Fengyangshan, Longquan	119.21	27.94	CVH, HHBG HZ016952
6	浙江 Zhejiang	临安龙塘山 Longtangshan, Lin'an	118.88	30.11	实际调查 Field investigation
7	浙江 Zhejiang	松阳箬寮 Ruoliao, Songyang	119.27	28.30	实际调查 Field investigation
8	浙江 Zhejiang	遂昌南尖岩 Nanjianyan, Suichang	119.24	28.51	[22]
9	浙江 Zhejiang	松阳龙亭 Longting, Songyang	119.21	28.37	[22]
10	浙江 Zhejiang	开化古田山 Gutianshan, Kaihua	118.15	29.26	实际调查 Field investigation
11	浙江 Zhejiang	泰顺乌岩岭 Wuyanlin, Taishun	119.66	27.70	实际调查 Field investigation
12	浙江 Zhejiang	文成铜铃山 Tonglingshan, Wencheng	119.84	27.82	PPBC, 2039158
13	浙江 Zhejiang	仙居括苍山 Kuocangshan, Xianju	120.56	28.56	实际调查 Field investigation
14	浙江 Zhejiang	临安清凉峰 Qingliangfeng, Lin'an	118.87	30.11	PPBC, 255021
15	福建 Fujian	屏南白水洋 Baishuiyang, Pingnan	119.04	27.07	CFH, CSH15063
16	福建 Fujian	屏南鸳鸯溪 Yuanyangxi, Pingnan	119.11	27.06	[22]
17	福建 Fujian	南平先锋岭 Xianfenglin, Nanping	117.66	27.71	[22]
18	福建 Fujian	南平茫荡山 Mangdangshan, Nanping	118.12	26.60	CVH, PE 00798322
19	福建 Fujian	南平3800坎 Sanqianbabaikan, Nanping	118.11	26.75	CVH, PE 00798330
20	福建 Fujian	永安香炉山 Xianglushan, Yongan	117.81	27.82	CVH, PE 00798297
21	福建 Fujian	南平武夷山 Wuyishan, Nanping	118.00	27.75	实际调查 Field investigation
22	福建 Fujian	南平回龙乡 Huilongxiang, Nanping	118.37	27.48	[22]
23	福建 Fujian	泉州华山村 Huashancun, Quanzhou	117.72	25.65	[22]
24	福建 Fujian	南安星村公 Xingcungong, Nan'an	117.92	27.64	[22]
25	江西 Jiangxi	靖安北港 Beigang, Jingan	115.10	28.94	CVH, PE 00798313
26	江西 Jiangxi	分宜大岗山 Dagangshan, Fenyi	114.52	27.60	CVH, PE 00798309
27	江西 Jiangxi	武宁九一四 Jiuyisi, Wuning	115.33	29.12	CVH, PE 00798310
28	广西 Guangxi	柳州大地乡 Dadixiang, Liuzhou	110.09	25.83	CVH, IBK 00060320
29	广西 Guangxi	灵川七分山 Qifengshan, Lingchuan	110.60	25.09	[22]
30	广西 Guangxi	永福金钟山 Jinzhongshan, Yongfu	110.14	24.97	CVH, IBK 00060319
31	安徽 Anhui	黄山市黄山 Huangshan, Huangshan City	118.16	30.13	实际调查 Field investigation
32	湖南 Hunan	宜章莽山 Mangshan, Yizhang	112.88	24.99	CVH, PE 00798316

CVH: 中国数字植物标本馆和标本的馆藏条码; CFH: 中国自然标本馆和图片编号; PPBC: 中国植物图像库和图片编号。

CVH: Chinese Virtual Herbarium and the specimen bar code in the herbarium; PPBC: Plant Photo Bank of China and the photo ID; CFH: Chinese field herbarium.

系统网站 <http://nfgis.nsd.gov.cn/>为底图, 导入浙闽樱桃地理分布数据, 绘制实际分布点。采用 DIVA-GIS 耦合的 BIOCLIM 模型, 完成浙闽樱桃当前多度分析和适生区模拟分布预测, 以及未来的潜在地理分布预测。

#### 1.4 主导气候因子分析

从 DIVA-GIS 中提取实际有效分布点所对应的气候变量数据, 利用 PAST3 (Version 3.14)软件包 (<http://folk.uio.no/ohammer/past/>)对获取的 19 个生物气候因子进行 PCA 主成分分析, 进而得出决定浙闽樱桃当下地理分布的限制气候因子, 并用 EXCEL

绘制频率分布直方图, 将累积频率大于 90% 的连续高频率区间作为其适宜生长范围<sup>[9]</sup>。

#### 1.5 模型精度检验

BIOCLIM 模型的预测效果使用 DIVA-GIS 软件中的受试者工作特征曲线(ROC, Receiver operation characteristic)实现。具体方法为, 将全部分布信息中分为 2 个子集: 随机选取 75% 物种存在点作为训练子集(Sample size training data)和剩余 25% 存在点作为评估子集(Sample size testing data)进行模型预测, 重复 3 次。该曲线以假阳性即 1-特异度为横坐标, 真阳性即灵敏度为纵坐标, 曲线下的面积为

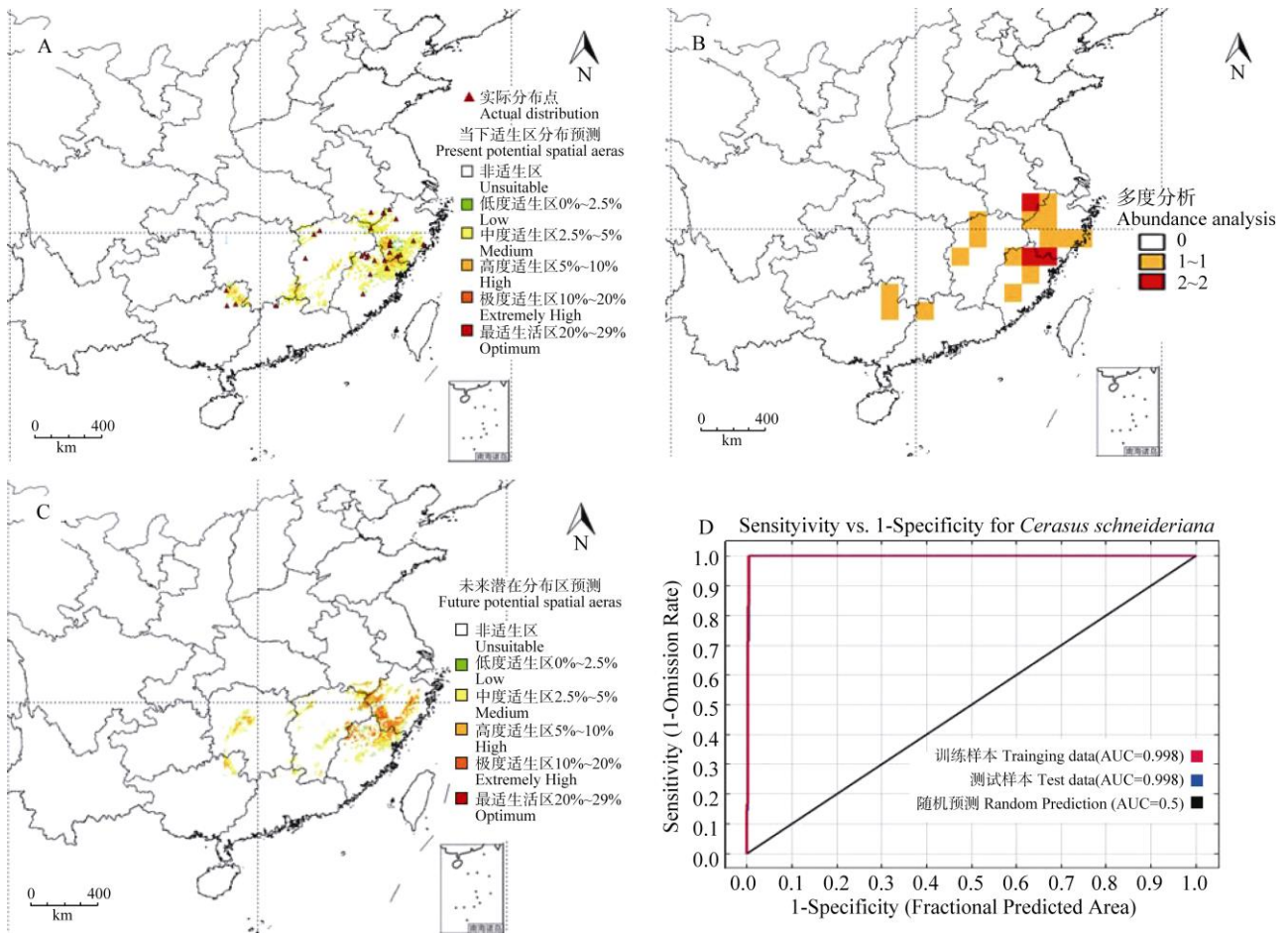


图 1 浙闽樱桃地理分布格局及 ROC 曲线检验。A: 实际分布点和当下适生区分布预测; B: 当下多度分析; C: 未来潜在分布区预测; D: 基于 AUC 面积的 ROC 曲线检验。

Fig. 1 Geographical distribution pattern of *Cerasus schneideriana* and its ROC curve test. A: Actual distributions and present potential spatial areas; B: Current abundance analysis; C: Future potential spatial areas; D: ROC curve test based on the AUC area.

AUC 值, 其取值范围为[0~1], 值越大表示模型预测效果越好。

## 2 结果和分析

### 2.1 地理分布格局

相较于植物志描述, 浙闽樱桃实际分布点更广, 覆盖我国东部、中部和西部的浙江、福建、安徽、江西、广西及湖南 6 省; 将 BIOCLIM 模型潜在分布区预测的结果划分为 6 个等级(颜色越深分布概率越大), 分别为: 白色-非适生区(0), 绿色-低度适生区(0~2.5%), 黄色-中度适生区(2.5%~5%), 深黄-高度适生区(5%~10%), 橙黄-极度适生区(10%~20%)和红色-最适生区(20%~29%)。多度分析以分布地点为参数, 每个地点代表 1 个植物群落

的存在, 在 1°×1° 的网格内统计的变种丰富度, 将其结果划分为 3 个等级, 分别为: 白色、橙黄和红色, 以便进一步观察浙闽樱桃的集中分布地点。当下适生区预测(图 1: A)与多度分析(图 1: B)均表明, 浙闽交界的山区是浙闽樱桃分布点最集中的地方, 其次为浙皖交界(有效标本信息主要源自浙江古田山和安徽黄山), 该区域也是浙闽樱桃自然分布的北界。

未来情境下, 比较当下适生区与未来潜在分布预测图, 可以清楚看出: 首先, 前后浙闽樱桃的整体分布格局基本一致, 而适生区概率颜色的由浅入深, 预测了由中度适生为主到高度适生区为主的转变趋势; 其次, 在湖南中部地区、浙江中东部可能新增较大面积的浙闽樱桃潜在分布区, 与之相反, 在广西北部, 湖南、江西交界的南部地区, 其原有

的适生范围可能大幅缩小。

### 2.2 适生区与主导气候因子分析

主成分分析结果表明, 19 个主成分中的前 2 个主成分方差贡献率分别为 82.05% 和 8.40%, 累计贡献率达 90.45%, 能够代表 19 个生物气候变量的绝大部分信息量(表 1)。在第 1 主成分中年降水量(bio12)、最湿季降雨量(bio16)、最暖季降雨量(bio18)得分系数最高, 分别为 0.826、0.424 和 0.287, 主要反映了“水分因子”; 在第 2 主成分中温度季节变

化方差(bio4)的得分最高为 0.595, 主要反映了“热量的变异幅度”(表 2)。

表 2 前 4 个主成分方差贡献

Table 2 Contribution of variance of first four principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 (%) Variance contribution	累计贡献率 (%) Accumulative contribution rate
PC 1	4167.20	82.05	82.05
PC 2	4258.68	8.40	90.45
PC 3	3423.67	6.75	97.20
PC 4	1253.18	2.47	99.67

表 3 前 2 个主成分相对于 19 个环境因子的得分系数

Table 3 Coefficient of former 2 principle components relative to 19 Environmental factors

环境因子 Environment factor	主成分 Principal component		环境因子 Environment factor	主成分 Principal component	
	PC1	PC2		PC1	PC2
bio1	-0.000	-0.022	bio11	0.001	-0.028
bio2	-0.000	-0.006	bio12	0.826	0.336
bio3	0.004	-0.032	bio13	0.152	-0.140
bio4	-0.157	0.595	bio14	0.006	0.004
bio5	-0.004	-0.014	bio15	0.009	-0.073
bio6	0.000	-0.026	bio16	0.424	-0.612
bio7	-0.005	0.012	bio17	0.027	0.156
bio8	-0.003	-0.002	bio18	0.287	0.323
bio9	0.001	-0.031	bio19	0.082	0.004
bio10	-0.003	-0.013			

对浙闽樱桃分布的限制环境因子的频率直方图进行分析, 结果表明, 降水量的适宜范围为 1503~2003 mm, 最湿季降雨量的适宜范围为 604~951 mm, 最暖季降雨量的适宜范围为 528~791 mm, 温度季节方差的适宜范围为 601~872 (标准差\*100)(图 2)。

### 2.3 模型检验

ROC 曲线对浙闽樱桃分布预测的评估结果很好, AUC 值高达 0.998, 显著高于随机测试 AUC (0.5), 结合实际分布点大部分落在当下适生区分布内(图 1: A), 也说明 BIOCLIM 模型的模拟精度高, 可以准确的预测浙闽樱桃的分布(图 1: D)。

## 3 讨论

物种分布模型的预测效果好坏取决于很多因素, 因模型本身不同的构建原理所导致差异是其中重要的原因<sup>[2]</sup>。这就需要研究者在了解研究对象基本的生物学特性基础上选择合适且易于操作的最

佳模型。BIOCLIM 模型基于生态位理论, 最主要一个假设就是生物能够生存、定殖于那些气候与它目前的分布区的气候相匹配的地方, 由于它原理简单, 便于生态学解释, 相比其他统计模型, 更能有效地处理“存在”数据<sup>[24]</sup>。邵慧等<sup>[18]</sup>对 12 个中国特有的落叶栎树种的分布进行预测, 认为在应用 BIOCLIM 模型时, 只需要 25 个以县为单元的样本容量即可使预测效果达到较准确水平, 此外, 生态幅窄和环境特化物种比生态幅宽和对环境耐受性强的物种更容易获得较高的准确度。姜建福等<sup>[8]</sup>利用 ArcGIS 和 BIOCLIM 模型, 仅以较少的地理信息点分别模拟 3 种濒危野葡萄地理分布, 结果 3 种葡萄当前的潜在分布区与实际分布区有很好的一致性, 同样得到了的较高的准确度, 表明 BIOCLIM 模型可有效地适用于小样本数量分布预测; 因此, 在本研究中, 我们也选择浙闽樱桃这样一种具有分布狭窄、样本不大(基于 32 个有效地理分布点)的材料, ROC 曲线检验结果显示 AUC 值高达 0.998, 说明基于 BIOCLIM 模型的浙闽潜在分布预测结果是有效可信的, 浙闽樱桃较小的生态幅和居群间生境

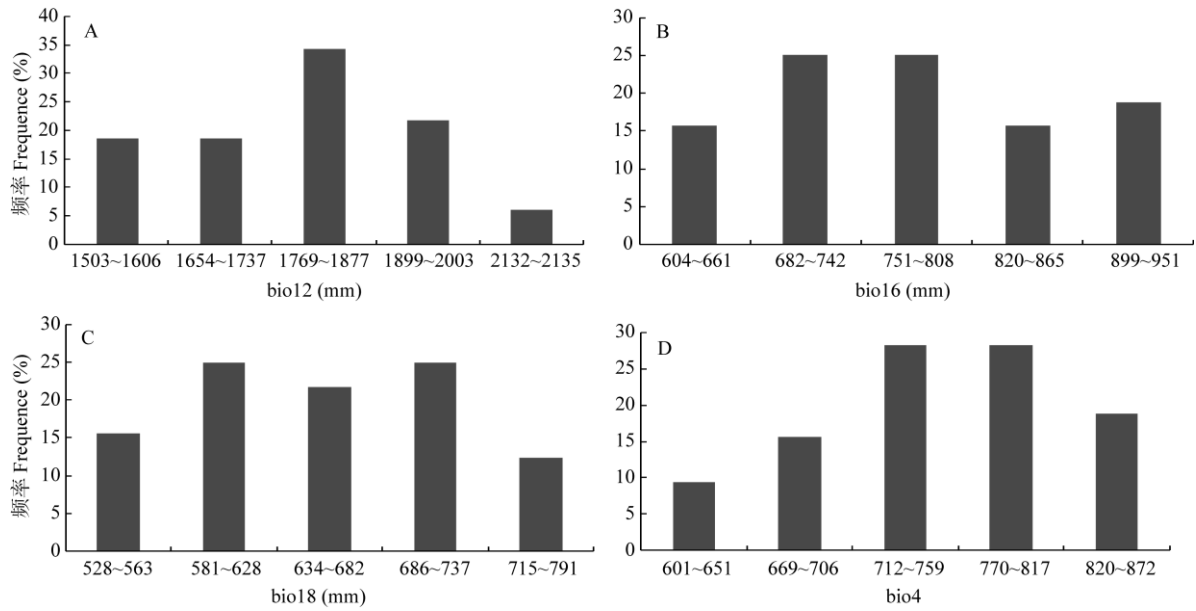


图 2 浙闽樱桃限制环境因子变量频率直方图。bio12: 年降水量; bio16: 最湿季降雨量; bio18: 最暖季降雨量; bio4: 温度季节变化方差。

Fig. 2 Frequency histogram for the limited environmental factors of *Cerasus schneideriana*. bio12: Annual precipitation; bio16: Precipitation in the wettest season; bio18: Precipitation in the warmest season; bio4: Variance of temperature seasonal change.

特征的趋同可能是造成预测准确的重要原因。

全球变暖已经成为不争的事实, 气候变化可引起物种分布范围、生物物候、生态系统等一系列变化<sup>[25-26]</sup>。目前我国对气候变化影响植物的分布模拟研究已经得到了长足的发展及广泛应用; 张雷等<sup>[27]</sup>应用多个物种分布模型预测均表明, 随着时间的推移马尾松(*Pinus massoniana*)分布区将逐渐向北迁移, 未来潜在分布区的面积将逐渐增加; 吴建国等<sup>[21]</sup>比较得出气候变化场景下我国 7 种保护植物的适宜分布范围都将减少, 其中太白红杉(*Larix chinensis*)、山白树(*Sinowilsonia henryi*)和水青树(*Tetracentron sinense*)减少幅度较大; 倪健等<sup>[28]</sup>预测了 CO<sub>2</sub> 倍增对中国亚热带常绿阔叶林植被地带及优势种和常见种分布的影响, 结果表明, 在气温分别升高 2℃ 和 4℃、降水增加 20% 的条件下, 各植被地带一般向北扩大约 2~3 个纬度, 而向东扩大约 4~6 个经度。我们比较了当下和未来浙闽樱桃的潜在分布区模拟的变化, 结果显示, 目前在处于分布区南缘的几个省份的潜在分布区面积将会缩小, 而在更高纬度的湖南中部(主要是雪峰山脉)及浙江中东部会新增分布区, 总体反映了浙闽樱桃分布区北扩的趋势, 这与全球升温下物种分布范围呈现向高纬度迁移的报道趋势相一致<sup>[20]</sup>。

在较大的时空尺度上, 气候因素往往是限制植物分布的主要原因, 其极端值和变动幅度与物种潜在在适生区的分布格局密切相关。李蒙等<sup>[29]</sup>对山樱花(*C. serrulata*)生长分布的气候因子做主成分分析, 得出温度是其主导限制因子; 刘会良等<sup>[30]</sup>研究了新疆 56 种野生果树的丰富度格局与 13 个环境因子的相关性, 表明最湿季降水、最干季降水和平均日较差气温为代表的气象因素对新疆野生果树分布产生了显著的影响; 李焱等<sup>[31]</sup>采用 Jackknife 检验法评估制约小叶栎(*Quercus chenii*)现代地理分布的主要气候因子, 表明气温和降水量为影响其地理分布的主要因子, 其中最干季平均气温可能是制约小叶栎向北分布的关键因素。本研究通过 PCA 主成分分析法, 去除因子之间的共线性影响, 在 19 个气象因子中得到限制浙闽樱桃当下地理分布的首要环境因子是由年降水量和夏季降水量驱动的水分因子, 其次为温度的季节变化驱动的热量因子。

本研究仅使用 WorldClim 中的生物气候变量进行预测, 尚未结合诸如土壤类型、地形地貌特征、人为干扰、物种自身扩散能力、生物间相互作用等因子对于浙闽樱桃分布格局的影响, 这些都是今后需要深入研究的。即便如此, 针对浙闽樱桃这一当下研究尚不深入的物种而言, 利用物种分布模型是

前期一种很好的尝试, 研究结果对于亚热带樱属资源的调查、保护与开发具有重要参考价值。

## 参考文献

- [1] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. *Ecol Lett*, 2012, 15(4): 365–377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x.
- [2] LI G Q, LIU C C, LIU Y G, et al. Advances in theoretical issues of species distribution models [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(16): 4827–4835. doi: 10.5846/stxb201212031735.  
李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827–4835. doi: 10.5846/stxb201212031735.
- [3] SUTHERST R W, MAYWALD G F, KRITICOS D J. CLIMEX, Version 3. CD and user's guide [CD]. Melbourne: CSIRO, 2007.
- [4] STOCKWELL D. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction [J]. *Int J Geograph Inf Sci*, 1999, 13(2): 143–158. doi: 10.1080/136588199241391.
- [5] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190(3/4): 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [6] MA S M, NIE Y B, GENG Q L, et al. Impact of climate change on suitable distribution range and spatial pattern in *Amygdalus mongolica* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38(3): 262–269. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00023.  
马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 等. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 262–269. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00023.
- [7] WANG G, MENG Y Q, SUN J, et al. Modeling the geographic distribution of *Rhododendron maculiferum* [J]. *J NE Agri For Univ (Nat Sci)*, 2013, 41(5): 173–177.  
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.
- [8] JIANG J F, FAN X C, ZHANG Y, et al. Modeling the geographic distribution of three endangered *Vitis* species in China [J]. *Chin J Ecol*, 2014, 33(6): 1615–1622.  
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.
- [9] ZHANG X W, LI Y, FANG Y M. Geographical distribution and prediction of potential ranges of *Quercus acutissimain* China [J]. *Acta Bot Boreal-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): 1685–1692. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1685.
- [10] ZHANG L Y, YE X B, LIU N, et al. Research on geographic distribution and potential distribution of *Mucuna birdwoodiana* [J]. *Guihaia*, 2012, 32(1): 27–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.01.008.  
张蓝月, 叶向斌, 刘念, 等. 白花油麻藤的地理分布及适生区预测 [J]. *广西植物*, 2012, 32(1): 27–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.01.008.
- [11] 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.
- [12] HAN Y Y, WANG Y, XIANG Y, et al. Prediction of potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in China based on Maxent ecological niche model [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2015, 39(1): 6–10. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.01.001.  
韩阳阳, 王焱, 项杨, 等. 基于 Maxent 生态位模型的松材线虫在中国的适生区预测分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(1): 6–10. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.01.001.
- [13] ZHOU W, ZHAO H, YANG X. Prediction of potential geographic distribution areas for *Rana catesbiana* and *Mikania micrantha* in China using GARP modeling system [J]. *J SW For Univ*, 2012, 32(1): 51–55. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2012.01.011.  
周伟, 赵衡, 杨熙. 利用 GARP 生态位模型预测牛蛙和薇甘菊在中国的地理分布 [J]. *西南林业大学学报*, 2012, 32(1): 51–55. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2012.01.011.
- [14] KONG L B, LIN W, LI Z H, et al. A predication of potential geographic distribution of melon fruit fly based on climex and DIVA-GIS [J]. *Acta Phytophyl Sin*, 2008, 35(2): 148–154. doi: 10.3321/j.issn:0577-7518.2008.02.011.  
孔令斌, 林伟, 李志红, 等. 基于 CLIMEX 和 DIVA-GIS 的瓜实蝇潜在地理分布预测 [J]. *植物保护学报*, 2008, 35(2): 148–154. doi: 10.3321/j.issn:0577-7518.2008.02.011.
- [15] ZHANG H T, LUO D, MU X D, et al. Predicting the potential suitable distribution area of the apple snail *Pomacea canaliculata* in China based on multiple ecological niche models [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(4): 1277–1284. doi: 10.13287/j.1001-9332.201604.027.  
张海涛, 罗渡, 牟希东, 等. 应用多个生态位模型预测福寿螺在中国的潜在适生区 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1277–1284. doi: 10.13287/j.1001-9332.201604.027.
- [16] 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 Newslett*, 2001(127): 15–19.
- [17] XIE C P. Simple biogeography distribution picture draw based on

- DIVA-GIS [J]. Hubei Agri Sci, 2011, 50(11): 2345–2348. doi: 10.3969/j.issn.0439-8114.2011.11.056.
- 谢春平. 基于 DIVA-GIS 生物地理分布图的绘制 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50(11): 2345–2348. doi: 10.3969/j.issn.0439-8114.2011.11.056.
- [18] 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.
- [19] LI C L, BARTHOLOMEW B. *Cerasus* Mill. [M]// WU C Y, RAVEN P H. Flora of China, Vol. 9. Beijing: Science Press & St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2003: 404–420.
- [20] CAO F X, XU Q J, CAO S J, et al. Advances of global warming impact on species distribution [J]. J CS Univ For Technol, 2008, 28(6): 86–89. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2008.06.019.
- 曹福祥, 徐庆军, 曹受金, 等. 全球变暖对物种分布的影响研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(6): 86–89. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2008.06.019.
- [21] WU J G. Potential effects of climate change on the distribution of seven protected plants in China [J]. J Wuhan Bot Res, 2010, 28(4): 437–452. doi: 10.3724/SP.J.1142.2010.40437.
- 吴建国. 气候变化对 7 种保护植物分布的潜在影响 [J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(4): 437–452. doi: 10.3724/SP.J.1142.2010.40437.
- [22] CHEN L N. The research of the evaluation of *Cerasus* cultivars ornamental characteristics and the suitable areas for growing wild Chinese *Cerasus* in Zhejiang [D]. Hangzhou, China: Zhejiang Sci-Tech University, 2015: 1–139.
- 陈丽娜. 樱属品种观赏性状评价及中国野生种浙江适生区研究 [D]. 浙江杭州: 浙江理工大学, 2015: 1–139.
- [23] HACK J J, KIEHL J T, HURRELL J W. The hydrologic and thermodynamic characteristics of the NCAR CCM3 [J]. J Climate, 1998, 11(6): 1179–1206. doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<1179:THATCO>2.0.CO;2.
- [24] 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.
- [25] LEI J C, XU H G, WU J, et al. Advance in predicting the suitable habitat of species under future climate change [J]. Sichuan J Zool, 2015, 35(5): 794–800. doi: 10.11984/j.issn.1000-7083.20140487.
- 雷军成, 徐海根, 吴军, 等. 气候变化情景下物种适宜生境预测研究进展 [J]. 四川动物, 2015, 35(5): 794–800. doi: 10.11984/j.issn.1000-7083.20140487.
- [26] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Finger prints of global warming on wild animals and plants [J]. Nature, 2003, 421(6981): 57–60. doi: 10.1038/nature01333.
- [27] ZHANG L, LIU S R, SUN P S, et al. Comparative evaluation of multiple models of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana* [J]. Chin J Plant Ecol, 2011, 35(11): 1091–1105. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.01091.
- 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(11): 1091–1105. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.01091.
- [28] NI J, SONG Y C. Potential changes under elevated Carbon dioxide of dominants and companions of evergreen broadleaved forest in subtropical China [J]. Acta Phytoecol Sin, 1997, 21(5): 455–467.
- 倪健, 宋永昌. CO<sub>2</sub> 倍增条件下中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种分布区的可能变迁 [J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 455–467.
- [29] 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(S): 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(S): 74–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.S1.016.
- [30] LIU H L, ZHANG L W, ZHANG H X, et al. Distribution pattern of species richness for wild fruit trees in Xinjiang based on species distribution modeling [J]. Sci Silv Sin, 2015, 51(12): 1–8. doi: 10.11707/j.1001-7488.20151201.
- 刘会良, 张玲卫, 张宏祥, 等. 基于物种分布模型的新疆野生果树物种丰富度分布格局 [J]. 林业科学, 2015, 51(12): 1–8. doi: 10.11707/j.1001-7488.20151201.
- [31] LI Y, ZHANG X W, FANG Y M. Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the Last Glacial Maximum [J]. Chin J Plant Ecol, 2016, 40(11): 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.
- 李垚, 张兴旺, 方炎明. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.