

垂珠花的分布特征分析及潜在适生区预测

童丽丽^{1,2}, 田露¹, 王洪超¹, 许晓岗^{1,*}, 程瑶¹, 夏重立²

(1 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; 2 金陵科技学院园艺园林学院, 南京 210038)

摘要: 为探索垂珠花分布特性及潜在适生区, 基于 145 条现代分布记录及 18 个气候环境因子, 利用刀切法, 标准差椭圆计算及多元相似度面和最不相似变量分析后发现, 其适生区空间分布格局向“正北-正南”方向扩张, 质心有由中亚热带往北亚热带迁移的趋势, 未来气候条件下温度与降水共同制约垂珠花的分布, 温度因子是驱动其适生区迁移的关键因素, 但降水因子与垂珠花的潜在分布关联性更强。垂珠花的现代中高度适生区主要集中在我国江苏、安徽、江西、浙江、湖南的大部分地区; 未来两种气候情景对垂珠花生存有正向影响, 中高度适宜区面积存在增加现象。

关键词: 垂珠花; 分布特性; 潜在适生区; 最大熵; 安息香科

中图分类号: Q948.2

文献标志码:

文章编号:

Analysis of distribution characteristics and prediction of prospective suitable areas of *Styrax dasyanthus*

TONG Lili^{1,2}, TIAN Lu¹, WANG Hongchao¹, XU Xiaogang^{1,*}, CHENG Yao¹, XIA Chongli²

1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China/ College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, China 210037

2. School of Horticulture & Landscape Architecture, Jinling Institute of Technology, Nanjing, China 210038

Abstract: Based on 145 records of modern distribution and 18 climatic and environmental factors, the method of knife-cutting was used for studying the distribution features and prospective adaptive area of *Styrax dasyanthus* Perk., and Standard Deviation Ellipse Calculation, Multivariate Similarity Surface, Least Similarity Variable analysis as well, the results show that the spatial distribution pattern of the adaptive habitat expands to “North-South” direction, and the centroid has a move trend from the Mid subtropics to the North subtropics. Under the future climatic conditions, temperature and precipitation will jointly restrict the distribution of *S. dasyanthus*, and temperature is the key factor to drive the migration of the adaptive area. The modern medium and high adaptive zones of *S. dasyanthus* are mainly cover the most regions of Jiangsu, Anhui, Jiangxi, Zhejiang and Hunan in China, and the 2 prospective climate scenarios have positive impacts on the survival of *S. dasyanthus*. The area of medium and high suitable area may expand.

Keywords: *Styrax dasyanthus* Perk.; distribution characteristics; prospective adaptive zone; maximum entropy; Styracaceae

1 引言

垂珠花 (*Styrax dasyanthus* Perk.) 为安息香科 (Styracaceae) 安息香属 (Styrax L.) 乔木^[1], 具有很高药用经济价值, 叶可入药, 其味甘、苦, 性微寒, 主治咳嗽, 肺燥, 可止咳润肺^[2]; 作为江苏地区本土珍贵植物, 也是民歌《好一朵茉莉花》的植物载体^[3]; 其树形优美, 花繁叶茂且芬芳, 于初夏盛开, 适宜做康养疗愈植物栽培^[4], 具有很高的生态价值。垂珠花主要分布于丘陵、山地、溪边杂木林中^[5], 在我国多地均有其野外分布记录。然而, 针对我国垂珠花的资源调查研究报道不多, 对其资源分布特征, 未来适生区变化及可引种驯化区域研究尚未见报道。

本文应用 Maxent 模型模拟预测垂珠花的潜在适生区, 结合 ArcGIS 系统进行可视化处理^[6,7], 旨在深入

探究垂珠花的分布特征，预测不同气候情景下的潜在适生区，进而有效地为其野生资源保护和引种驯化提供理论依据。

2 研究方法

2.1 分布数据采集

垂珠花的分布点（图 1）主要通过中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn>)、全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org>)以及课题组收集的垂珠花地理信息数据，参考王璐等^[8]的数据处理方法，最终得到地理信息 145 条。

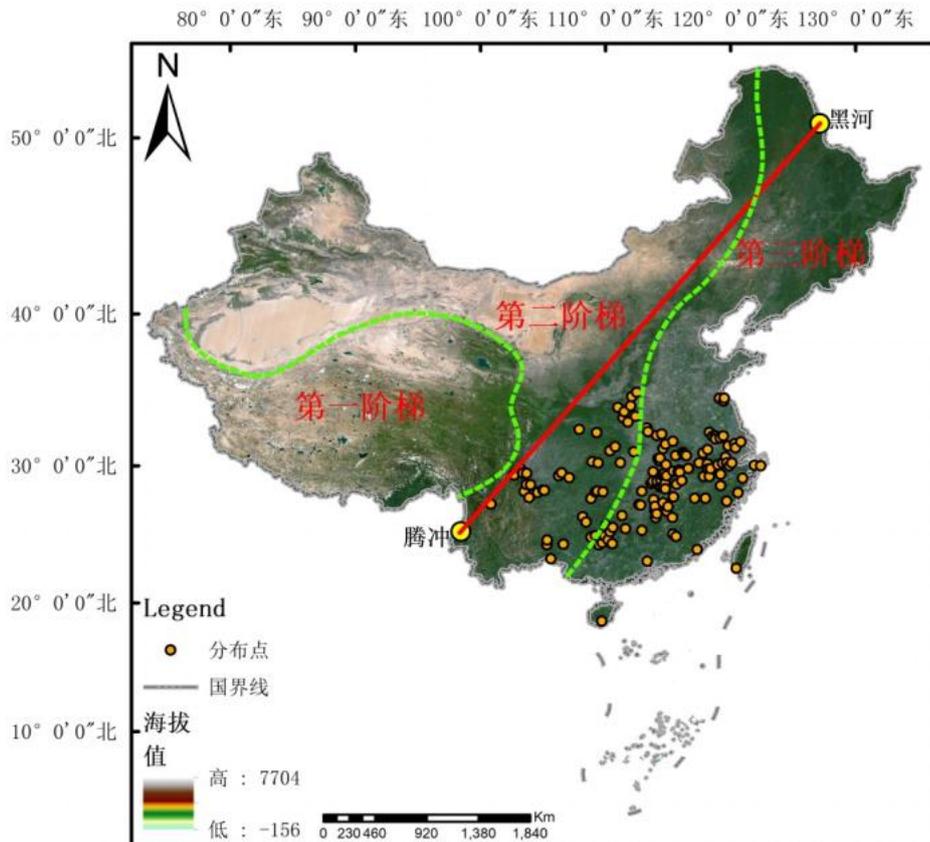


图 1 垂珠花分布点

2.2 研究方法

2.2.1 环境变量的筛选与处理

本文使用了 36 个生态因子，其中地形因子从 DEM 数字高程数据 (<http://www.gscloud.cn/>) 提取得来。土壤数据来自世界粮农组织土壤图和世界土壤数据库 V1.2 (<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-database/harmonized->

[world-soil-database-V12-en](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-database/harmonized-world-soil-database-V12-en)) (HWSD)。生物气候变量 (*bio1-bio19*) 来源于世界气候数据库 Worldclim (<https://www.worldclim.org/>)，选择空间分辨率为 2.5-minutes，其中未来气候数据为 CMIP6 的 BCC-CSM2-MR 模式^[9]下共享社会经济路径 (Socio-economic Pathways, SSPs)^[10]中的 SSP126 及 SSP585，将其转化为 ASCII 格式用于后期研究^[11]。

为减少环境因子对模型预测精度的影响，需要进行相关性分析。参考郭晓旭等^[12]的方法，最终用于建模的变量有年平均温 (*bio1*)、月平均昼夜温差 (*bio2*)、温度季节性变动系数 (*bio4*) 等共 18 个变量 (表 1)。

表 1 用于模型构建的环境变量

类型	因子	描述	单位	
生物气候因子	<i>Bio1</i>	年均温	□	
	<i>Bio2</i>	月平均昼夜温差	□	
	<i>Bio4</i>	温度季节性变动系数	1	
	<i>Bio6</i>	最冷月最低气温	□	
	<i>Bio8</i>	最湿季度平均气温	□	
	<i>Bio9</i>	最干季度平均气温	□	
	<i>Bio10</i>	最暖季度平均气温	□	
	<i>Bio11</i>	最冷季度平均气温	□	
	<i>Bio12</i>	年降水量	mm	
	<i>Bio13</i>	最湿月降水量	mm	
	<i>Bio14</i>	最干月降水量	mm	
	<i>Bio17</i>	最干季度降水量	mm	
	<i>Bio18</i>	最暖季度降水量	mm	
	<i>Bio19</i>	最冷季度降水量	mm	
	土壤因子	<i>T_SAND</i>	表层沙含量	% wt.
		<i>T_CLAY</i>	表层粘土含量	% wt.
		<i>T_USDA_TEX_CLASS</i>	USDA 土壤质地分类	name
	地形因子	<i>ELEV</i>	海拔	m

2.2.2 Maxent 预测结果可视化

参考张晨星等^[13]的模型设置及等级划分方法，结合对物种分布点发生程度的描述，将垂珠花潜在适生区按生境适应指数划分为 5 个等级：非适生区[0, 0.20)、低度适生区[0.20, 0.40)、一般适生区[0.40, 0.60)、中度适生区[0.60, 0.80)以及高度适生区[0.80, 1]。

2.2.3 模型准确度分析

采用刀切法(Jackknife)对估值样本精度进行比较^[14]，使用受试者工作特征曲线(ROC)曲线^[15]对 Maxent 模型预测结果精度检验，AUC 值表示模拟精度：AUC<0.6 时(失败)；0.6≤AUC<0.7 时(较差)；0.7≤AUC<0.8 时(一般)；0.8≤AUC<0.9 时(好)；0.9≤AUC<1 时(非常好)^[16]。

2.2.4 空间格局变化及时空演变分析

用(0,1)矩阵表达垂珠花不同社会经济路径的空间格局变化，重新定义 4 种适生区类型：非适生区、保留适生区、新增适生区、丧失适生区。

利用“SDM toolbox v2.5”工具^[17]将垂珠花适生区浓缩成一个矢量点来反映出迁移趋势，利用“Spatial statistics tools”来分析地理要素空间分布特征^[18]，二者可视化可反映出该物种时空演变过程。

2.2.5 多元环境相似度面和最不相似变量分析

采用多元环境相似度面(MESS)判断适生区环境变化的程度，相对于每个变量相似度最小值即为最不相似变量。该操作在命令窗口运行 density.tools.Novel 工具实现^[19]。

3 结果与分析

3.1 模型预测结果精度检验

利用 ROC 曲线分析法对垂珠花地理分布的 Maxent 模型预测结果进行精度检验，数值为 10 次重复建模的均值。

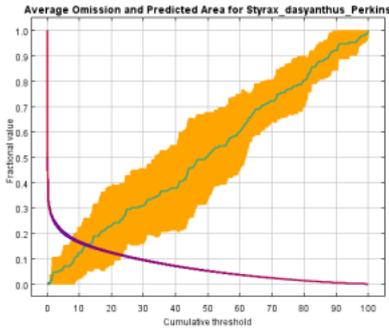


图 2 Maxent 模型预测遗漏率

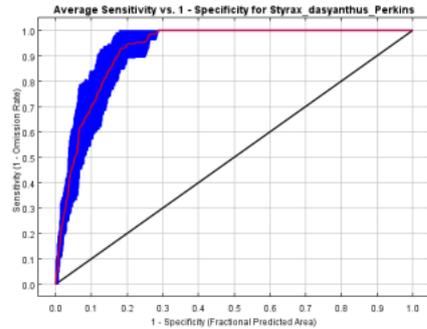


图 3 Maxent 模型 ROC 曲线

测试样本遗漏率和预测遗漏率基本吻合（图 2），这表明模型构建的效果很好，数据之间不存在空间自相关^[20]。数据集的 ROC 曲线远离随机预测模型曲线（图 3），且多次重复运行的平均 AUC 值为 0.925 ± 0.016，明显高于随机预测模型的 AUC 值(0.5)，表明本次预测结果的准确性很高，能较好预测垂珠花在中国的潜在分布。

3.2 影响垂珠花分布的主要环境变量

预测结果显示（图 4），最冷季度平均气温（*bio11*; Mean Temperature of Coldest Quarter）、最干月降水量（*bio14*; Precipitation of Driest Month）、最干季度降水量（*bio17*; Precipitation of Driest Quarter）及最冷月最低气温（*bio6*; Min Temperature of Coldest Month）对于预测垂珠花的地理分布有着重要影响，正规化训练增益值大于 1.3，这四个变量的累积贡献率达 80.6%（表 2）；而表层含沙量（*t_sand*; Topsoil Sand Fraction）影响较小，正规化训练增益值不超过 0.2。综上所述，最冷月最低气温（*bio6*）、最冷季度平均气温（*bio11*）、最干季度降水量（*bio17*）、最干月降水量（*bio14*）是影响垂珠花分布的主导环境变量。

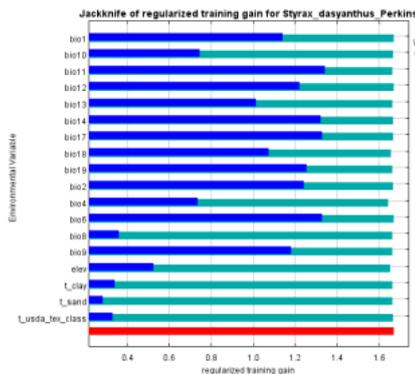


图 4 环境变量重要性刀切法检验

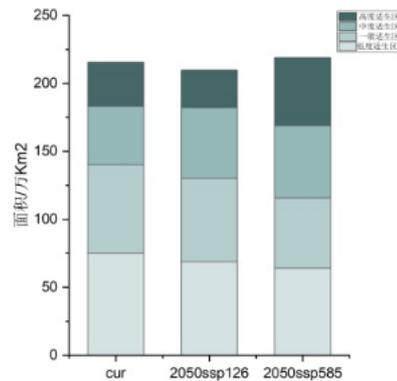


图 8 不同时期垂珠花不同等级适宜分布区面积比较

表 2 影响垂珠花潜在分布的环境变量贡献率

变量	贡献百分比/%
<i>Bio14</i>	70.8
<i>Bio4</i>	8.4
<i>Bio6</i>	6.3
<i>Bio11</i>	2.5
<i>Bio9</i>	2.2
<i>Bio19</i>	1.4
<i>ELEV</i>	1.1
<i>Bio2</i>	1.1
<i>Bio18</i>	1
<i>Bio17</i>	1
<i>Bio12</i>	0.9
<i>Bio1</i>	0.7
<i>Bio13</i>	0.6
<i>T_USDA_TEX_CLASS</i>	0.5
<i>Bio8</i>	0.4
<i>Bio10</i>	0.4
<i>T_SAND</i>	0.4
<i>T_CLAY</i>	0.3

3.3 垂珠花在中国当前适生分布区

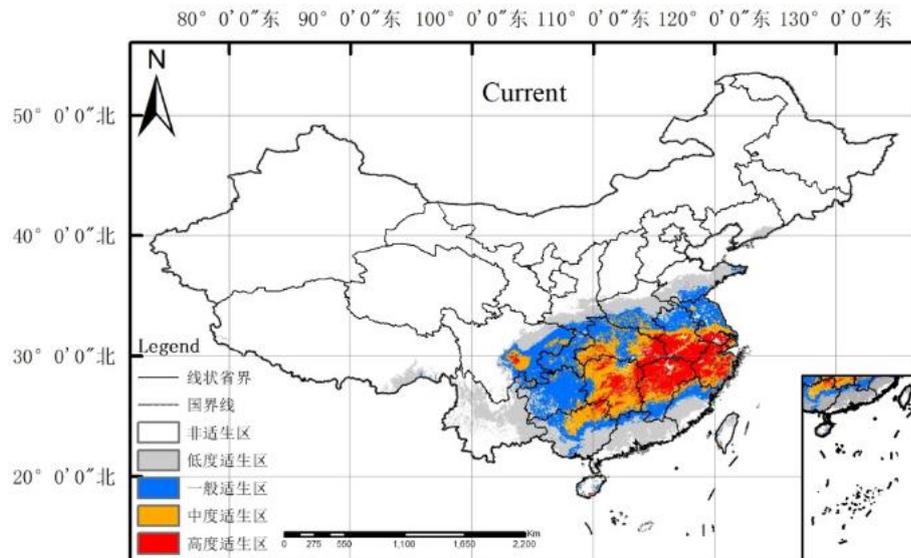


图 5 垂珠花在中国当前适生分布区

从图 5 分析可得，垂珠花在全国适生区总面积达到了 215.50 万 km²，占国土总面积 22.45%。其中，高度适生区面积为 32.26 万 km²，主要分布于江西、浙江的大部分地区以及江苏、安徽、湖北的部分地区；中度适生区面积为 43.10 万 km²，主要分布于湖南省大部分地区；一般适生区面积为 65.22 万 km²，

沿着中高适生区向周围扩展，主要分布于贵州、重庆、湖北、河南、江苏等省的大部分地区；低度适生区的面积为 74.93 万 km²，主要分布于云南、广东、福建等省大部分地区，河南中部，山东南部，陕西南部，四川东北部等地区。

结合图 1 可发现，依据海拔高度，垂珠花主要分布在我国南岭以北的第一阶梯及第二阶梯边缘，即：100-1700m 之间；在气候上，垂珠花主要分布在 400mm 降水量线以南，东南部降水量充沛^[21]，适合其生存，而适生区与垂珠花的实际分布区高度重合，这表明本预测结果较可靠。

3.4 垂珠花在中国的潜在适生区

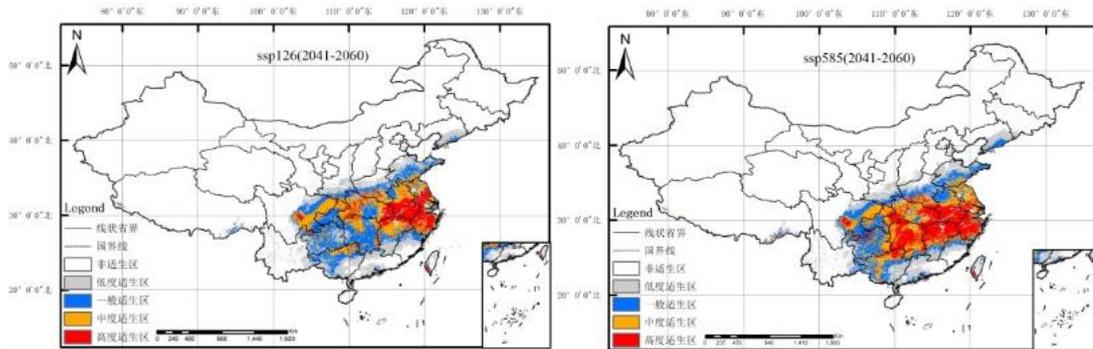


图 6、7 未来气候情景下垂珠花在中国的潜在适生区分布图

与当前气候相比，未来气候情景下垂珠花的中高度适生区域总体呈现扩展的趋势（图 6、7）。SSP126 气候（2041-2060）情景下，垂珠花潜在适生区总面积为 209.75 万 km²，占国土总面积的 21.85%，较当前减少了 2.67%，中度适生区面积有明显增加，增幅为 22.11%；高度、一般、低度适生区面积均有减少，减幅分别为 14.11%、6.01%、8.20%，但总体变化不大。SSP585 气候情景下，垂珠花潜在适生区总面积为 218.80 万 km²，占国土总面积的 22.79%，较当前增加了 1.53%，中高度适生区面积增幅为 23.43%、54.74%；低度、一般适生区面积减少幅度分别为 14.73%、20.53%（图 8）。

垂珠花作为二层林植物，基本分布于亚热带气候^[22]，而在未来分布中发现台湾也出现了高度适生区域，这可能是由于台湾是中山地貌，地形的因素造成其环境逐渐适宜其定居。综合两种不同气候情景（ssp126、ssp585）来看，在未来垂珠花的中高度适生区面积会进一步增加，而轻度、一般适生区面积将减少，SSP585 气候情景下增幅较大，这说明垂珠花对人类活动的巨大影响诸如高度工业化进程、化石燃料为基础及高等辐射强度的路径响应更加敏感^[23]。

3.5 垂珠花潜在适生区空间格局变化

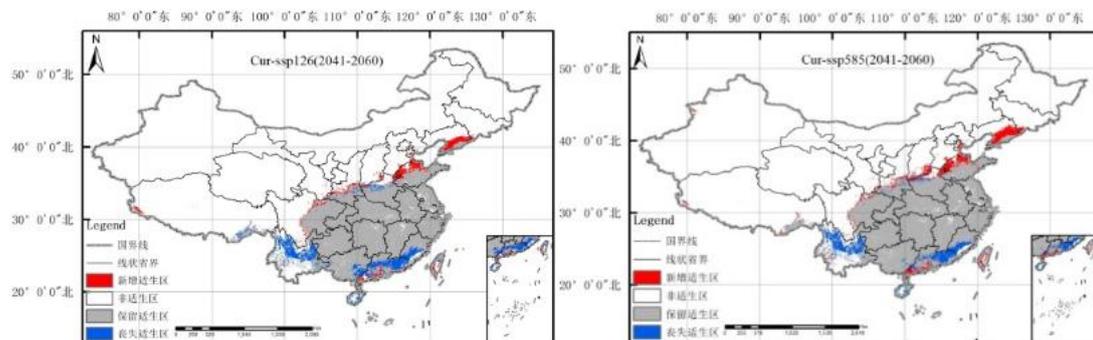


图 9、10 未来气候变化情景下垂珠花潜在适生区空间格局变化

SSP126 气候情景下,垂珠花的适生区面积向东北及南方地区扩张了 243465km²,西南及南方地区丧失了 321583km² (表 3),净收缩 78118km²,其中,辽宁、山东等区域有明显的扩张,山西、陕西、西藏、广东、台湾等区域有小幅度的扩张;而在云南、广东、福建、海南等区域出现适生区丧失的现象(图 9)。SSP585 气候情景下,垂珠花适生区面积丧失了 266192km²,扩张了 311128km²(表 3),净增加 44936km²,在辽宁、山东、山西、山西、广东、台湾、西藏、四川等区域有扩张趋势;在云南、广东、福建、海南等地的高海拔地区中适生区面积出现减少(图 10)。

由于未来水热条件变化特别是降水带北抬的趋势^[24],在西藏、新疆等高海拔地区也逐渐出现适宜的垂珠花适生环境,而云南省北部出现较为明显的收缩现象。鉴于未来全球气候变暖,原有生境不再适合垂珠花生存。

表 3 当前至(2041-2060年)两种气候模式下垂珠花适生区面积变化

时期	气候模型	面积/km ²		
		新增	保留	丧失
Cur-(2041-2060)	ssp126	243465	2607880	321583
Cur-(2041-2060)	ssp585	311128	2663270	266192

3.6 气候变化下垂珠花适生区时空演变

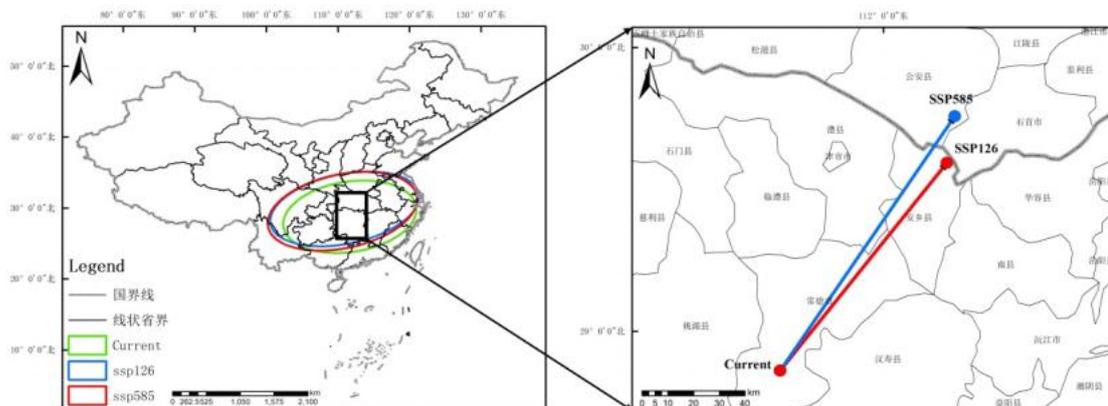


图 11 气候变化下垂珠花适生区标准差椭圆、质心迁移

表 4 两种气候模型变化下垂珠花潜在适生区质心迁移距离

时期	迁移距离/Km
Cur-ssp126(2041-2060)	99.0354
Cur-ssp585(2041-2060)	116.5954

表 5 两种气候模型变化下垂珠花潜在适生区标准差椭圆参数变化

气候环境	重心经度	重心纬度	短轴/km	长轴/km	旋转角/°
当代气候	111.63954	28.78855	495.92	938.51	81.20
SSP126	110.91764	29.89089	490.47	1057.30	78.22
SSP585	110.60375	29.56177	520.13	1061.73	77.87

根据预测结果显示,当代垂珠花适生区质心在湖南常德地区,SSP126 气候情景下迁移到湖南安乡县,SSP585 气候情景下迁移到湖北省公安县(图 11),从南岭的北坡向东北部迁移;分别迁移了 99.0354km、116.5954km(表 4),SSP585 气候情景移动距离更大,表明随着辐射强迫增强迁移距离增加^[25],物种整体

有着向高纬度水热条件较好的方向迁移的趋势^[26]。

计算标准差椭圆的参数变化(表 5)。从旋转角度及长短轴长度来看(图 11)，当代气候下适生区总体呈现出“西南→东北”分布格局，未来气候下适生区的椭圆旋转角比当代有不同程度的减小，说明其分布格局正向“正北→正南”方向偏移；长轴均呈增加趋势，表明未来垂珠花适生区沿“西南→东北”方向聚集程度增强^[27]，两种模拟算法均指向垂珠花共同迁徙趋势。

3.7 多元相似度面与最不相似变量分析

未来两种气候情景下，垂珠花 145 个现代分布点的平均多元相似度分别为 3.36、2.19，多元相似度为负值的点比例为 6.9%、7.6%，由此表明，SSP585 气候情景下气候异常程度较 SSP126 高。

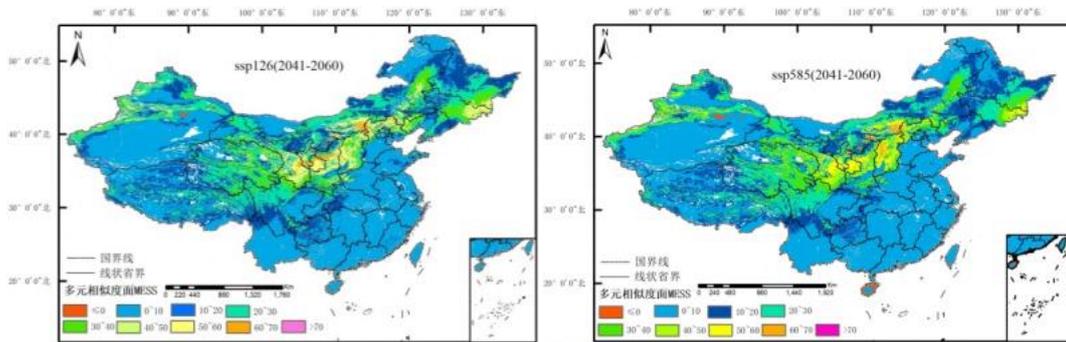


图 12、13 未来气候变化情景下垂珠花多元相似度面 (MESS)

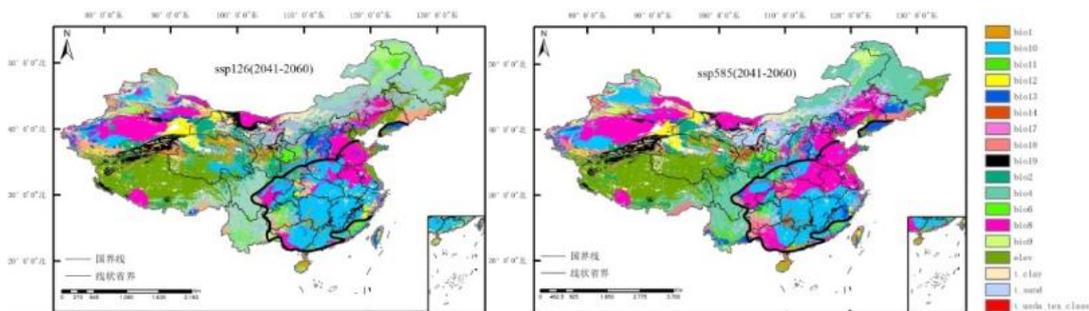


图 14、15 未来气候变化情景下垂珠花最不相似变量 (MoD)

由图 12、13 可知，自西向东从天山山脉—昆仑山脉—秦岭—太行山脉—大兴安岭—长白山脉周围区域的多元相似度值高，表明这些地区气候异常值较低^[28]；而垂珠花的中高适生区如：湖南、湖北、江西等区域多元相似度值基本在 0—10 之间，表明秦岭以南的北亚热带及中亚热带气候水热条件波动较大。

通过垂珠花最不相似变量分析表明(图 14、15)，SSP126 气候情景下，主要最不相似变量为最冷月最低气温 (*bio6*)、最湿季度平均气温 (*bio8*)、最暖季度平均气温 (*bio10*)、最湿月降水量 (*bio13*)、海拔 (*elev*)；SSP585 气候情景下，主要最不相似变量为最湿季度平均气温 (*bio8*)、最暖季度平均气温 (*bio10*)、最湿月降水量 (*bio13*)、最干月降水量 (*bio14*)、最暖季度降水量 (*bio18*)。综合分析两种气候变化情景发现，温度因素占据适生区的绝大部分面积，降水因素次之，而地形与土壤因素占比很低。由此可得温度、降水、地形等因素共同制约垂珠花地理分布范围，未来驱动垂珠花适生区迁移的关键因子可能是温度。

4 讨论与结论

4.1 主导气候因子对垂珠花分布特征影响

现代适生区预测结果与采集分布点重合度极高,符合垂珠花在我国分布现状。从结果分析看,湖南、江西、浙江、安徽、江苏等地区为垂珠花的中高度适生区域,此结果支持黄淑美^[29]提出安息香科以我国秦岭和长江以南至南岭以北种类最丰富的分布理论。

主导气候因子为最冷月最低气温 (*bio6*)、最冷季度平均气温 (*bio11*)、最干月降水量 (*bio14*)、最干季度降水量 (*bio17*)。综合来看,水热条件制约着垂珠花在中国的分布,相比较而言,降水条件对其影响更为显著。这与郭晓旭等^[11]对同属的芬芳安息香 (*S. odoratissimus* Champ.) 研究结果相一致,也说明垂珠花是喜湿润气候树种,其生长对水热要求较高,进一步证实安息香科植物是热带起源^[30],这可能与安息香科植物在天然生境下大多分布于溪流边,其果实或种子通过水力传播的特性有关。

4.2 垂珠花未来适生区预测

未来两种气候情景下,垂珠花的中高度适生区总面积存在扩张;而低度、一般适生区面积存在小幅减少现象,说明未来气候变化对垂珠花的分布区扩张有着积极的影响,低度适生区可视为垂珠花的生态敏感脆弱区,为其生存提供预警作用,同时也对安息香属其他珍稀植物栽培利用提供借鉴。观测垂珠花现代及未来气候情景下的标准差椭圆及质心后发现,其标准差椭圆分布格局向“正南→正北”方向偏移,质心存在从中亚热带往北亚热带迁移的趋势。多元相似度面与最不相似变量分析表明,温度变化是驱动垂珠花适生区未来迁移的关键因子。

可以推测,随着气候水热条件变化,未来华北地区可能逐渐演变成成为适合垂珠花的定居的生境。因而,在未来适生区域内提前对其进行引种驯化试验研究,为大规模产业化做先导准备,并将适宜度高的地区作为重点种植区。对于气候变化的敏感区域^[31],则预见其适生区的扩张与收缩,也可提前做好垂珠花种质资源的保护工作。

基于相关软件对垂珠花分布区变化分析后可看出,我国有降水线有北移的趋势,气温也逐渐升高,使得适宜垂珠花生存的区域扩大。本研究基本预测了垂珠花在我国的潜在地理分布格局,为垂珠花植物资源保护与利用提供理论基础及前期指引。

参考文献

- [1] 许晓岗, 吴秀萍, 丁芳芳. 垂珠花自然居群表型性状及遗传多样性分析[J]. 西北植物学报, 2017, 37(08): 1517-1524.
- [2] 谢宗万, 范催生, 朱兆仪. 《全国中草药汇编》(第2版)上[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996: 749.
- [3] 许晓岗, 蒋孝禹, 童丽丽, 等. 茉莉花文化的植物载体探讨[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(03): 233-236+255.
- [4] 刘政. 中国安息香属(安息香科)的形态分类修订[D]. 南京林业大学, 2019. DOI: 10.27242/d.cnki.gnjlu. 2019. 000265.
- [5] Huang Yelin, Fritsch P W, Shi Suhua. *Styracaceae* [M]//Wu C Y, Raven P H, Hong D Y. *Flora of China*. Beijing: Science Press; St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2003: 491-553.
- [6] Robert J H, Cathering H G. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(12): 2272-2281.
- [7] Gryzunov V V. Conceptual Model for Adaptive Control of a Geographic Information System under Conditions of Destabilization [J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2022, 55(8): 1222-1227.
- [8] 王璐, 吴秀萍, 李垚, 等. 北美银钟花在中国的适宜栽培区研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(05): 10-16.
- [9] Guo Junhong, Wang Xiuquan, Xiao Chan, et al. Evaluation of the temperature downscaling performance of PRECIS to the BCC-CSM2-MR model over China [J]. *Climate Dynamics*, 2022, 59(3-4): 1143-1159.
- [10] Wang Tingting, Sun Fubao. Global gridded GDP data set consistent with the shared socioeconomic pathways [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 221-231.
- [11] 杨冬臣, 王佳颖, 李静, 等. 基于 Maxent 生态位模型的外来入侵植物刺果瓜在我国的适生区预测[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(03): 45-50.

- [12] 郭晓旭, 王璐, 许晓岗, 等. 基于 MaxEnt 模型的芬芳安息香潜在适生区预测[J]. 生态科学, 2020, 39(04): 119-124.
- [13] 张晨星, 张炜, 徐晶晶, 等. 基于 GIS 和最大熵模型的河北省油松适宜性分布分析[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(06) : 18-25.
- [14] Oranyeh E, Ugwuowo F I. Modified jackknife Kibria–Lukman estimator for the Poisson regression model [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021, 34(6) : 1-14.
- [15] Nahmf S. Receiver operating characteristic curve: overview and practical use for clinicians [J]. Korean journal of anesthesiology, 2022, 75(1): 25-36.
- [16] Araújo M B, Pearsonr G, Thuiller W, et al. Validation of species–climate impact models under climate change [J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1504-1513.
- [17] Jason L B. SDM toolbox: a python - based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 694-700.
- [18] Yang Renfei, Luo Fang, Ren Fu, et al. Identifying Urban Wetlands through Remote Sensing Scene Classification Using Deep Learning: A Case Study of Shenzhen, China [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022, 11(2): 131-148.
- [19] 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.
- [20] Shcheglovitova M, Andersonr P. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes [J]. Ecological Modeling, 2013, 269: 9-17.
- [21] 高艳红, 许建伟, 张萌, 等. 中国 400 mm 等降水量变迁与干湿变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1101-1112.
- [22] 张程. 中国安息香科植物种质资源及研究进展[J]. 江西林业科技, 2010(06): 42-47.
- [23] 王璐, 许晓岗, 李垚. 末次盛冰期以来陀螺果潜在地理分布格局变迁预测[J].生态学杂志, 2018, 37(01): 278-286.
- [24] Wu Yanjuan, Wu Shuangye, Wen Jiahong, et al. Changing characteristics of precipitation in China during 1960–2012 [J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(3): 1387-1402.
- [25] Mao Qianjun, Wan Hui. Study on the Characteristics of Aerosol Radiative Forcing under Complex Pollution Conditions in Beijing [J]. Atmosphere, 2022, 13(3): 501-517.
- [26] 赵光华, 崔馨月, 王智, 等. 气候变化背景下我国酸枣潜在适生区预测[J]. 林业科学, 2021, 57(06): 158-168.
- [27] 魏凌, 张杨, 李强, 等. 基于标准差椭圆的我国国土生态空间分异研究[J]. 生态经济, 2020, 36(07): 176-181.
- [28] 施晨阳, 赖文峰, 文国卫, 等. 基于 Maxent 模型预测水曲柳的潜在适生区[J].西北林学院学报, 2022, 37(02): 149-156.
- [29] 黄淑美. 安息香科的系统位置及地理分布[J]. 热带亚热带植物学报, 1994, 2(4): 15-30.
- [30] 陈涛, 陈忠毅. 安息香科植物地理分布研究[J]. 植物研究, 1996, 16(01): 59-68.
- [31] 郭怡博, 莫可, 王桂荣, 等. 未来气候条件下天麻适生区预测及时空变化分析[J/OL]. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(07): 1-9.