

DOI: 10.5846/stxb201712182271

梁红艳, 姜效雷, 孔玉华, 杨喜田. 气候变暖背景下春兰和蕙兰的适生区分布预测. 生态学报, 2018, 38(23): - .

Liang H Y, Jiang X L, Kong Y H, Yang X T. Prediction of the potential geographical distribution of *Cymbidium goeringii* and *C. faberi* under the background of global warming. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

气候变暖背景下春兰和蕙兰的适生区分布预测

梁红艳^{1,2}, 姜效雷², 孔玉华¹, 杨喜田^{1,*}

1 河南农业大学林学院, 郑州 450002

2 三门峡职业技术学院, 三门峡 472000

摘要:为了阐明气候变暖背景下春兰(*Cymbidium goeringii*)和蕙兰(*C. faberi*)在我国的适生区分布变化情况,根据 157 条分布记录和 19 个生物气候变量,应用最大熵物种分布模型,对 2070 年 4 种温室气体排放情景下春兰和蕙兰在我国的适生区分布进行预测,并筛选影响其地理分布的主要气候因子。结果表明:(1)2070 年春兰和蕙兰分布点的年均温(bio1)、最冷月最低温度(bio6)和最冷季平均温度(bio11)等均升高,气候有变暖趋势;(2)受试者工作特征曲线下面积(AUC)值在 0.9—1.0 之间,模型预测结果可信度较高;(3)影响春兰、蕙兰当前和 2070 年地理分布的限制性气候因子主要有最冷月最低温度(bio6)、最冷季平均温度(bio11)、年均降水量(bio12)和最干月份降水量(bio14);(4)气候变暖将会对春兰和蕙兰的适宜生境范围和面积产生影响。预测 2070 年春兰的适宜生境面积将会有所减小,而蕙兰的适宜生境面积将会增加,且整体有向北迁移的趋势。研究结果为野生春兰和蕙兰的生态风险评价和引种提供了重要依据。

关键词:春兰;蕙兰;气候变暖;地理分布;预测

Prediction of the potential geographical distribution of *Cymbidium goeringii* and *C. faberi* under the background of global warming

LIANG Hongyan^{1,2}, JIANG Xiaolei², KONG Yuhua¹, YANG Xitian^{1,*}

1 College of Forestry, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China

2 Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, China

Abstract: To evaluate how climate change may influence species distribution, we simulated the potential geographical distribution of *Cymbidium goeringii* and *C. faberi* under current and 2070 climate conditions based on 157 species presence data sets and 19 bioclimatic variables using MaxEnt software. The climate change model showed increases in the annual mean temperature, minimum temperature of the coldest month, and mean temperature of the coldest quarter. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC) values for these factors varied from 0.9 to 1.0, which indicated that the prediction had high reliability. Four bioclimatic factors, minimum temperature of the coldest month, mean temperature of the coldest quarter, annual precipitation, and precipitation of the driest month, were the main bioclimatic factors affecting the geographical distributions of *C. goeringii* and *C. faberi*. With global warming, the area of suitable habitat for *C. goeringii* will shrink, whereas the area for *C. faberi* will expand and is projected to migrate northward. Our results provide scientific references for ecological risk assessment and introduction of *C. goeringii* and *C. faberi*.

Key Words: *Cymbidium goeringii*; *C. faberi*; climate warming; geographical distribution; prediction

基金项目:国家自然科学基金项目(31570613,41501331)

收稿日期:2017-12-18; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xitianyang@henau.edu.cn

多种观测数据表明,近百年来全球气候在显著变暖^[1-2]。这种持续变暖的气候将会或正在对物种的分布产生重要影响。研究显示,全球气候变暖正在驱使植物和动物远离赤道地区向高海拔及两极地区高纬度迁移^[3-5]。在近30年我国中东部地区所统计的119个植物物种中,有80%在水平地带发生北移^[6]。我国东北主要地带性植被类型的地理中心,在1961—2013年间也发生了不同程度的移动,特别是南部地区的亚高山矮曲林,向东北方向移动了135.44 km^[7]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五份评估报告显示,未来CO₂等温室气体排放量的持续增加将使平均气温进一步升高,这将会对我国物种的地理分布产生很大影响。

春兰(*Cymbidium goeringii*)和蕙兰(*C. faberi* Rolfe)属兰科(Orchiidaceae)兰属(*Cymbidium*)植物,被纳入联合国《濒危野生动植物种国际贸易公约》的保护范围。野生种分布于河南南部^[8]、陕西、安徽、江苏、浙江、江西、福建、四川、云南和贵州等地^[9]。普遍认为,秦岭是我国春兰和蕙兰自然分布的最北端^[10-11],野生春兰和蕙兰多生长在25°—34°N之间的山区^[12-13],近年来有报道称在35°12′—35°40′N之间的山西阳城县太行山区也分布有野生蕙兰^[14-15]。兰科植物被认为是与环境高度适应的物种^[16-17],对气候变化具有敏感性,气候的持续变暖将会对我国春兰和蕙兰的地理分布产生影响,预测其适生区分布范围,对该物种的生态风险评价、保护策略制定和引种驯化等具有重要意义。此外,由于春兰和蕙兰香气浓郁、叶形优美,其野生资源正受到严重的采挖和破坏,在人工繁育和栽培工作中,明确影响其自然地理分布的限制性气候因子也是非常必要的。

最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)物种分布模型是近年来在物种分布预测和生境适宜性评价中应用较多的一种模型^[18],由于其具有较好的性能表现^[19],已广泛应用于*Tricholoma matsutake*^[20]、红花龙胆^[21]、红松^[22]、藓类^[23]、野生果树^[24]和单叶蔓荆^[25]等物种的潜在分布区预测中。本研究采用MaxEnt物种分布模型,结合ArcGIS地理信息系统,探讨春兰和蕙兰在气候变暖条件下适宜生境范围的变化,并明确影响春兰和蕙兰分布的主要气候因子,旨在为我国野生兰科植物资源的保护和引种等提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 春兰和蕙兰地理分布数据提取

通过查阅《中国植物志》和各地方植物志、国内多家标本馆的记录及近年来发表的文献资料^[26-29],从中获取可信度较高的春兰分布记录82条和蕙兰分布记录75条,利用在线地图经纬度网站查询获得相应经纬度地理坐标(图1)。

1.2 气候数据来源

所有19个生物气候因子均下载自全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)。bio1:年均温;bio2:气温日较差;bio3:等温;bio4:温度季节性变化;bio5:最热月最高温;bio6:最冷月最低温;bio7:年均温度变化范围;bio8:最湿季度均温;bio9:最干季度均温;bio10:最暖季度均温;bio11:最冷季度均温;bio12:年均降水量;bio13:最湿月份降水量;bio14:最干月份降水量;bio15:季节性降水;bio16:最湿季度降水量;bio17:最干季度降水量;bio18:最暖季度降水量;bio19:最冷季降水量。当前气候数据为1960—1990年全球气象站点的记录,2070s气候数据为IPCC第五份评估报告公布的4个温室气体浓度情景(Representative Concentration Pathways, RCPs)数据,从低到高依次排列为RCP2.6(低)、RCP4.5(中低)、RCP6.0(中高)和RCP8.5(高),数据精度2.5 arc minutes。

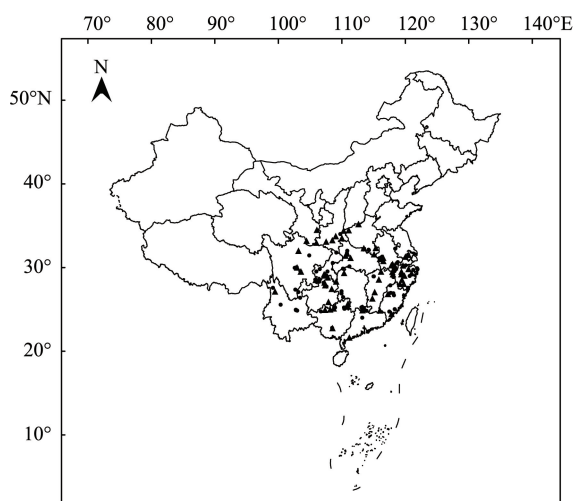


图1 春兰和蕙兰的地理分布点

Fig.1 Geographic locations of *Cymbidium goeringii* and *C. faberi*
实心圆代表春兰,三角代表蕙兰

1.3 物种分布模型预测

利用 MaxEnt Version 3.3.3k 物种分布模型,对当前时期和 2070 年 4 个温室气体浓度情景下春兰和蕙兰的潜在分布区进行预测。随机抽取 25% 样点记录作为检验集^[30],以便模型对数据进行简单的统计分析,获得检验数据 AUC 值的标准误差,AUC 为受试者工作特征曲线下面积(The area under the receiver operating characteristic curve)。选中“create response curves”并在 Advanced 菜单中选中“write plot data”,即可获得主要气候因子响应曲线和气候因子贡献率,其他参数均为默认选项。建模后,利用“ROCR”包对数据进行 ROC 分析,生成 ROC 曲线。根据 AUC 评价模型的拟合效果,0—1 范围内,AUC 数值越高,表明模型预测效果越好。

1.4 春兰和蕙兰的适生区划分

通过 ArcGIS 9.3 地理信息系统,对物种分布适宜区进行等级划分,划分等级设为 5 级^[31],分别为非适生区($P < 0.05$)、低适生区($0.05 < P < 0.18$)、中适生区($0.18 < P < 0.34$)、高适生区($0.34 < P < 0.54$)和最适生区($0.54 < P < 1$),并统计各等级分布面积。

2 结果及分析

2.1 当前和 2070 年气候数据比较

对提取的当前和 2070 年 RCP 2.6 情景下部分温度气候因子和降水因子进行比较,数值为 82 个春兰分布点的均值和 75 个蕙兰分布点的均值,结果如图 2 所示。

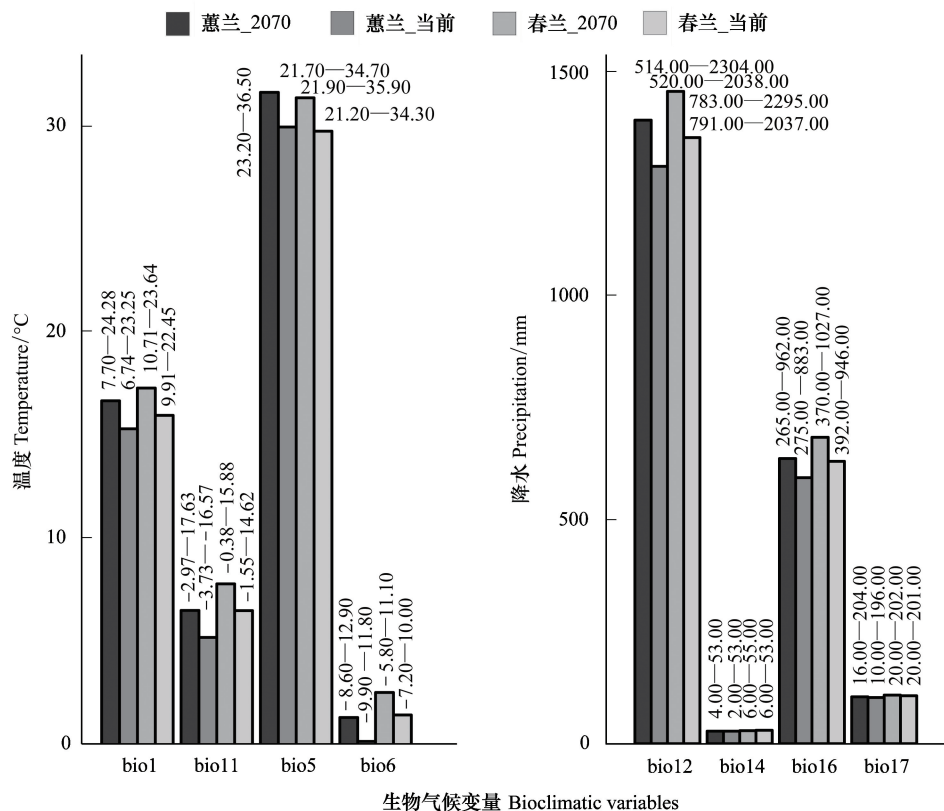


图 2 当前和 2070 年 (RCP2.6 情景) 部分气候变量的比较

Fig.2 Comparison of bioclimatic variables in current and 2070 (RCP 2.6 scenario)

图中数值为分布点的气候数据区间;bio1: 年均温 Annual mean temperature; bio11: 最冷季度均温 Mean temperature of coldest quarter; bio5: 最热月最高温 Maximum temperature of warmest month; bio6: 最冷月最低温 Minimum temperature of coldest month; bio12: 年均降水量 Annual precipitation; bio14: 最干月份降水量 Precipitation of driest month; bio16: 最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter; bio17: 最干季度降水量 Precipitation of driest quarter

由图可知,预测到 2070 年,所有分布点的 bio1、bio5、bio6 和 bio11 数值均增加,即气温与当前气温相比有明显升高,春兰和蕙兰分布点的 bio12 和 bio16 也明显增加。

2.2 模型预测效果评价

模型预测结果显示,AUC 值在 0.9—1.0 之间,表明 MaxEnt 模型对春兰和蕙兰适生区分布预测结果可信度较高,图 3 为建模后所得到的 ROC 曲线。

2.3 影响春兰和蕙兰分布的主要气候因子

影响春兰和蕙兰当前及 2070 年分布主要气候因子的贡献率如图 4 所示。由图可知,影响春兰当前分布的限制性气候因子为最冷季平均温度(bio11)和年均降水量(bio12),分别占到了 62.3% 和 22.4% 的比例;影响蕙兰当前分布的主要气候因子为最冷季平均温度(bio11) (48.9%)。预测到 2070 年,年均降水量(bio12)将成为影响春兰分布的主要气候因子,而最干月份降水量(bio14)、最冷月最低温度(bio6)和年均降水量(bio12)将成为影响蕙兰分布的主要气候因子。

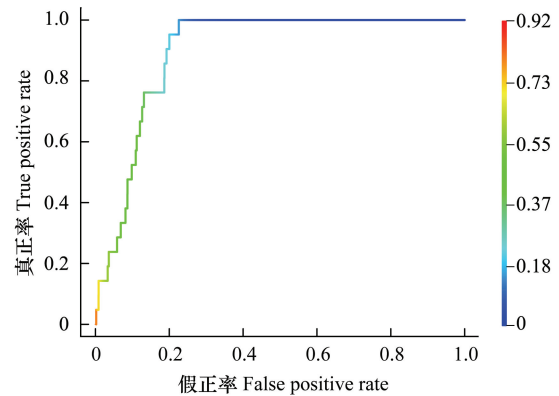


图 3 “ROCR”包生成的受试者工作特征曲线

Fig. 3 Receiver operating characteristic curve generated by “ROCR”

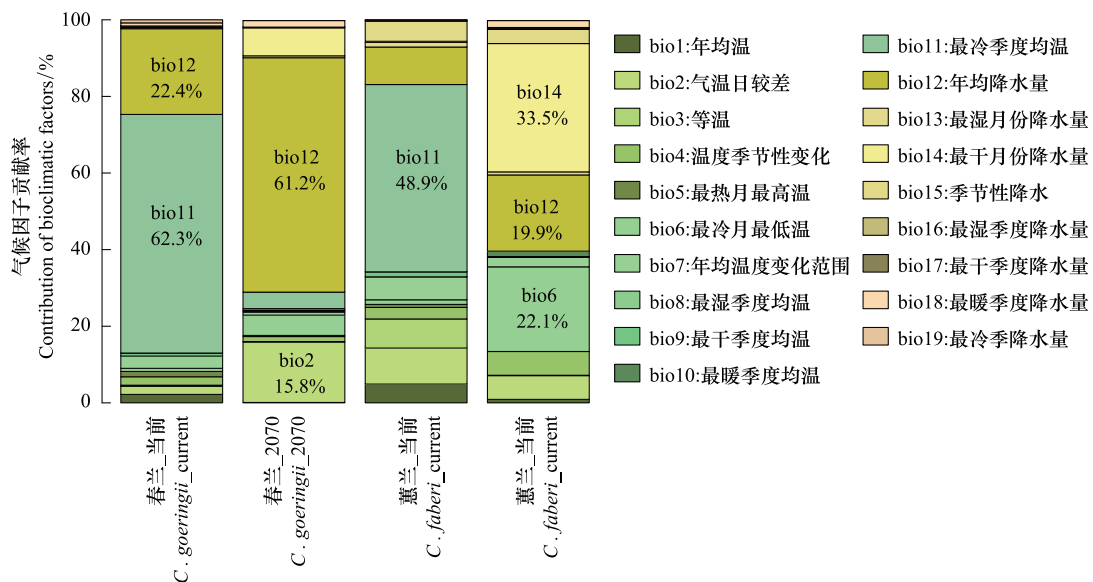


图 4 影响春兰和蕙兰分布的 19 个气候因子贡献率(RCP2.6 情景)

Fig. 4 The contribution of 19 bioclimatic factors affecting the distribution of *C. goeringii* and *C. faberi* (RCP2.6)

主要气候因子响应曲线(图 5)表明:预测到 2070 年(RCP2.6 情景),当年均降水量(bio12)在 1392 mm 左右时,该区域成为春兰适生区的概率最大;当最冷月最低温度(bio6)在 30℃ 左右、年均降水量(bio12)在 1439 mm 左右、最干月份降水量(bio14)大于 37 mm 时,该区域成为蕙兰适生区的概率最大。

2.4 春兰、蕙兰当前和 2070 年适生区预测

当前,春兰和蕙兰的分布地域相近,主要分布在我国的西南和东南地区。预测到 2070 年,春兰在全国的适生区分布范围总体将会有所减小(表 1,图 6),推测与春兰性喜凉爽、湿润的环境有关。在低温温室气体排放情景下(RCP2.6),部分省份如陕西和河南等地的适生区范围将会减小($P>0.05$),但也有省份如湖北和台湾等地区 $P>0.54$ 的适生区分布范围将会有所增加(表 2)。预测蕙兰的适生区分布范围总体将会有所增加,但在温室气体排放高的情景(RCP8.5)下,适生区分布范围又会略有减小(表 1,图 7)。预测陕西、山西、河南和

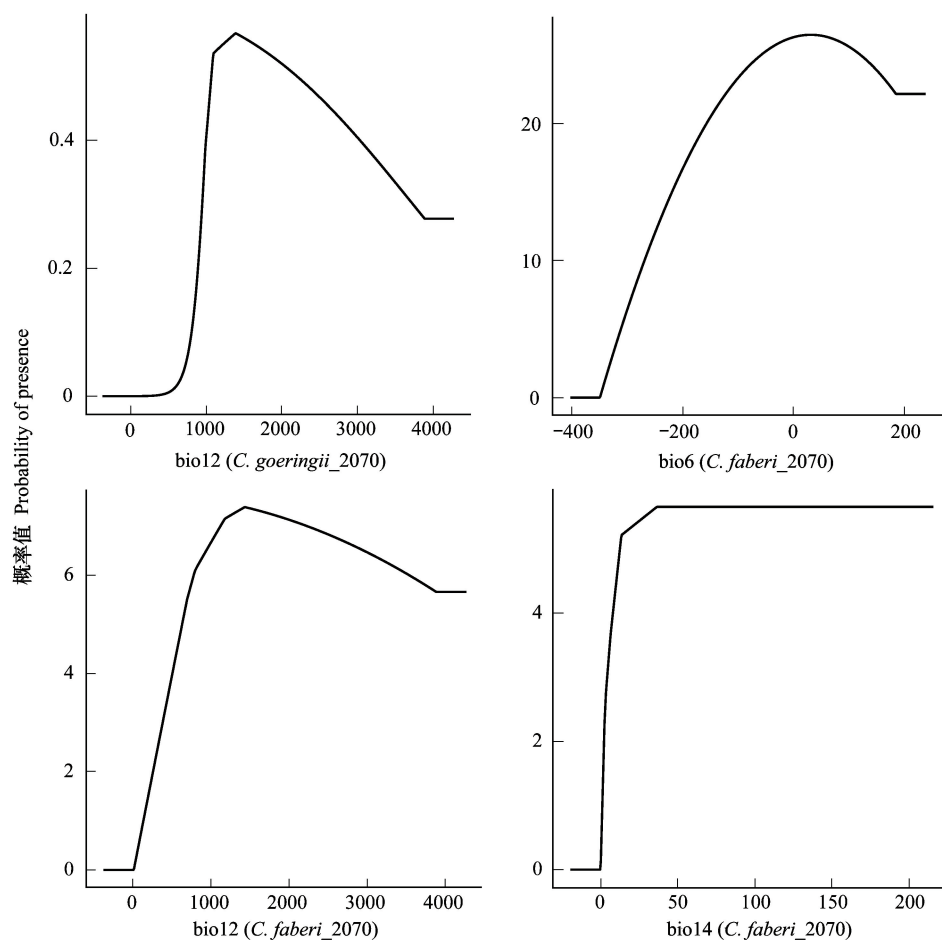


图 5 主要气候因子响应曲线

Fig.5 Response curves of major bioclimatic factors

表 1 我国春兰和蕙兰在不同温室气体浓度情景下的适生区面积预测 ($\times 10^4 \text{km}^2$)Table 1 Prediction of suitable area of *C. goeringii* and *C. faberi* under different RCP scenarios

物种 Species	情景 Scenarios	适生等级 Suitable level				
		1	2	3	4	5
春兰 <i>C. goeringii</i>	当前	58.175	95.748	64.160	43.811	699.948
	2070 RCP2.6	50.917	93.229	57.316	53.497	706.688
	2070 RCP4.5	56.979	88.927	60.569	51.519	703.651
	2070 RCP6.0	51.189	92.465	57.892	53.796	706.302
	2070 RCP8.5	53.751	90.614	56.189	49.685	711.404
蕙兰 <i>C. faberi</i>	当前	51.262	111.819	47.149	72.526	679.085
	2070 RCP2.6	52.599	103.491	60.260	75.144	670.151
	2070 RCP4.5	61.434	92.923	58.211	77.001	672.074
	2070 RCP6.0	53.895	101.557	59.222	73.460	673.510
	2070 RCP8.5	56.100	95.791	62.699	67.621	679.432

适生等级 1: $0.54 < P < 1$; 2: $0.34 < P < 0.54$; 3: $0.18 < P < 0.34$; 4: $0.05 < P < 0.18$; 5: $P < 0.05$

山东等地 $P > 0.18$ 的适生区将增加,而广西和广东的高适生区范围明显减小 ($P > 0.34$),整体呈现向北迁移的趋势(表 2)。此外,从图 7 还可以看出,当前气候条件下,山西阳城县蕙兰的适生等级为 $0.05 < P < 0.18$,预测到 2070 年,该区蕙兰的适生等级将为 $0.18 < P < 0.34$ 。

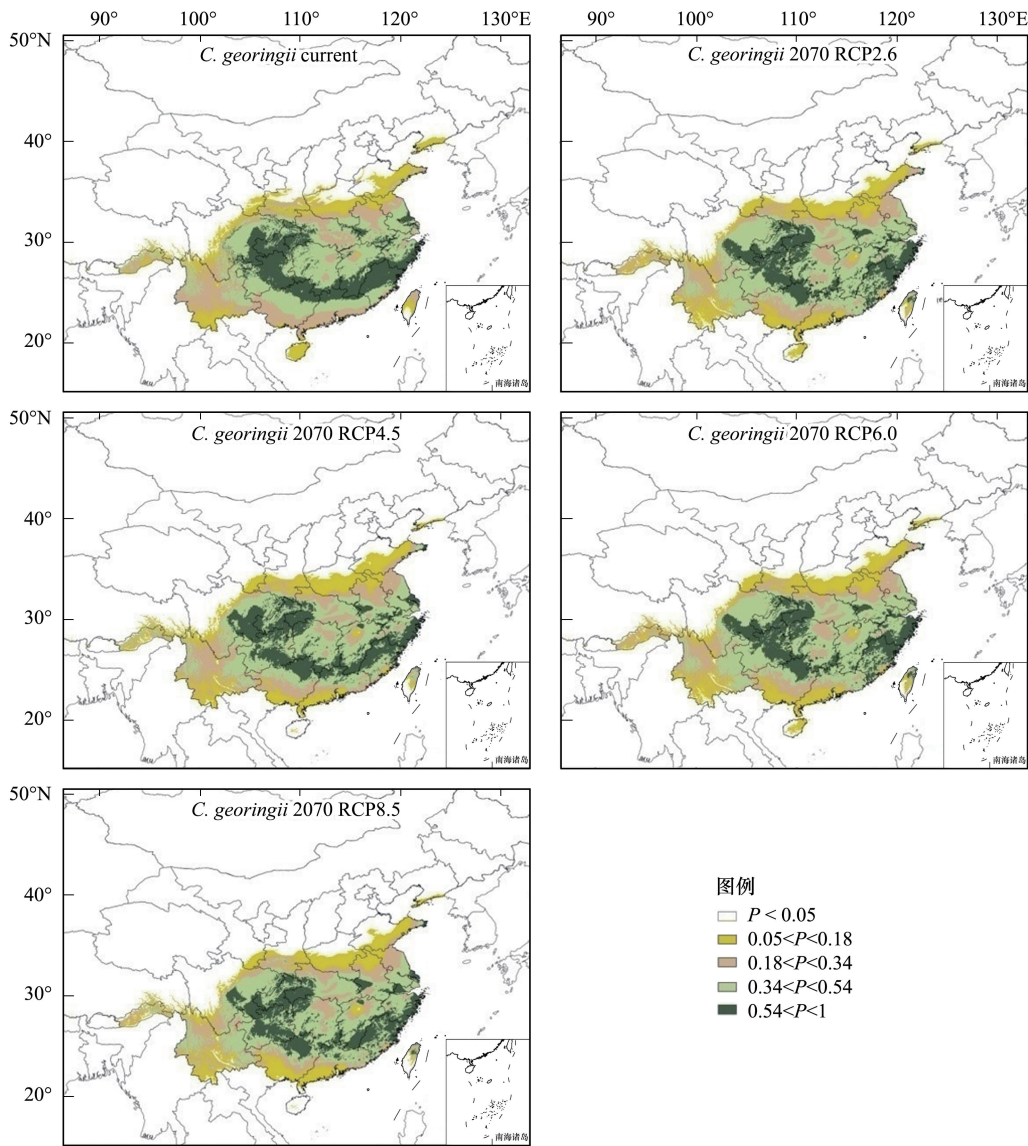


图 6 春兰当前及 2070 年不同温室气体浓度情景下分布范围预测
Fig.6 Distribution prediction of *C. goeringii* in current and 2070

表 2 春兰和蕙兰 RCP2.6 和 8.5 情景下部分省、自治区的适生区面积预测(×10⁴km²)

Table 2 Prediction of suitable area in several provinces and autonomous regions under RCP2.6 and 8.5 scenarios													
物种 Species	情景 Scenarios	省份 Province	适生等级 Suitable level					省份 Province	适生等级 Suitable level				
			1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
<i>C. goeringii</i>	当前	陕西	0.23	1.30	3.46	3.81	11.57	河南	0.09	1.73	2.59	5.85	5.84
	RCP2.6		0.22	0.90	3.35	3.77	12.11		0.02	1.21	1.36	6.89	6.63
	RCP8.5		0.24	1.33	3.72	2.95	12.11		0.10	1.18	1.74	6.55	6.52
	当前	湖北	3.75	6.90	6.29	0.60	0	台湾	0	0.01	1.02	1.29	0.85
	RCP2.6		4.57	7.28	4.92	0.76	0		0.39	0.41	0.49	0.82	1.05
	RCP8.5		4.18	7.79	5.23	0.34	0		0.21	0.36	0.49	0.41	1.69
<i>C. faberi</i>	当前	陕西	4.58	4.61	2.71	3.43	5.03	山西	0.04	0.16	0.88	4.61	10.25
	RCP2.6		2.07	7.03	3.83	2.44	4.99		0	0.03	1.84	3.75	10.31
	RCP8.5		4.79	4.36	3.75	2.87	4.58		0	0.03	1.44	4.09	10.38

续表														
物种 Species	情景 Scenarios	省份 Province	适生等级 Suitable level					省份 Province	适生等级 Suitable level					
			1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
	当前	河南	0.85	4.45	4.94	3.83	2.05	山东	0.32	0.91	1.01	7.69	5.44	
	RCP2.6		0.09	6.45	6.03	2.06	1.48		0.04	0.27	1.23	8.93	4.89	
	RCP8.5		0.26	4.08	7.67	2.40	1.69		0.03	0.39	1.77	8.37	4.81	
	当前	广西	1.77	9.33	8.62	1.22	0	广东	0.98	8.37	5.87	0.36	0	
	RCP2.6		2.56	5.75	10.30	2.32	0		0.39	3.48	8.53	3.18	0	
	RCP8.5		0.77	6.80	11.11	2.26	0		0.73	3.29	10.35	1.21	0	

由于小数点只取两位数,表中数据均为近似值。适生等级 1:0.54<P<1; 2:0.34<P<0.54; 3:0.18<P<0.34;4:0.05<P<0.18; 5:P<0.05

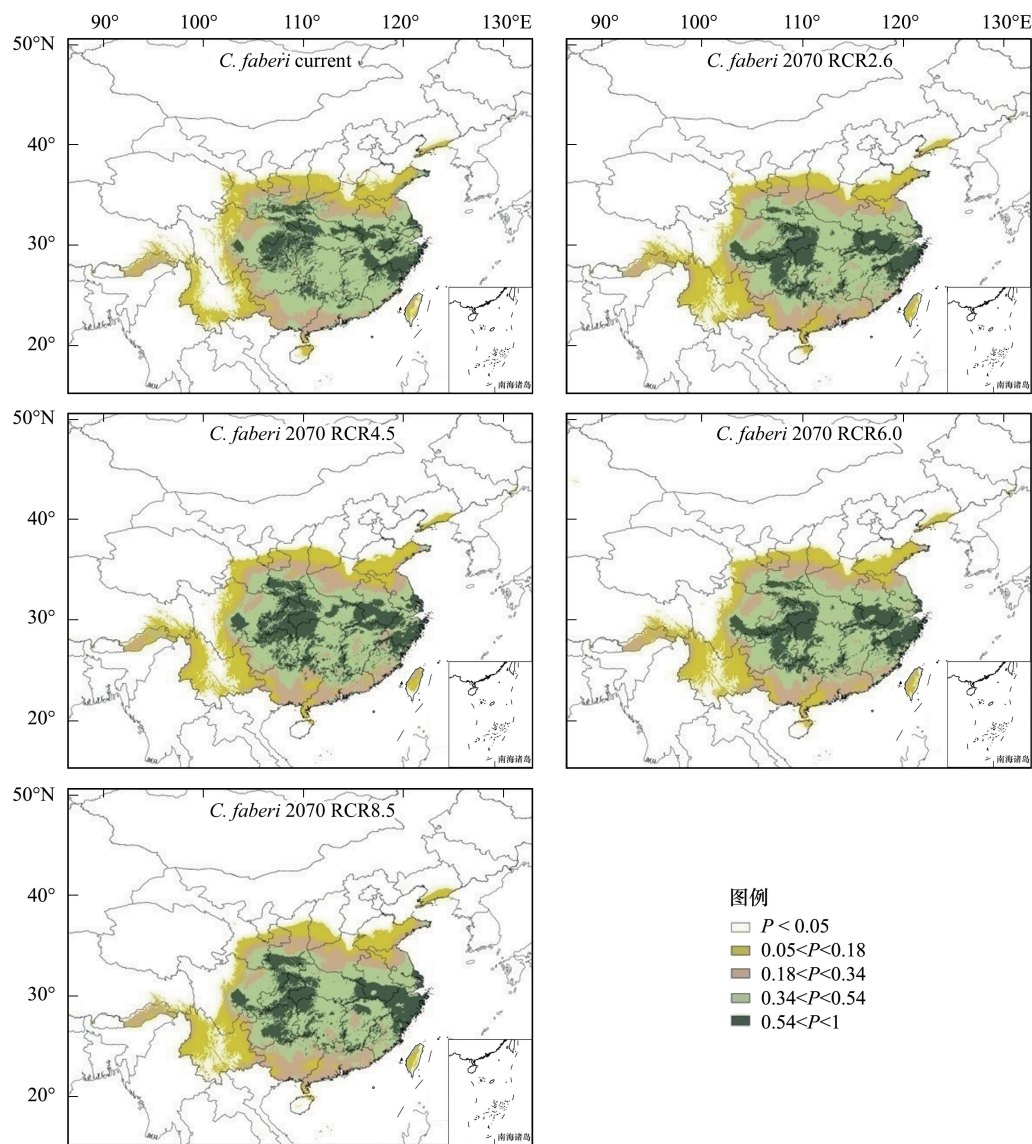


图 7 蕙兰当前及 2070 年不同温室气体浓度情景下分布范围预测
Fig.7 Distribution prediction of *C. faberi* in current and 2070

3 讨论

3.1 当前春兰和蕙兰自然分布区内的气候条件

揭示植物的地理分布格局及其成因是植物地理学研究的核心问题^[32]。气候作为影响植物生长发育的因

素之一,对植物的地理分布有着重要作用。从本次统计结果来看,极端低温和年均降水量将是影响春兰和蕙兰自然分布范围的主要气候因子。当前春兰自然分布点的最冷月最低温度为 -7.2°C (陕西商洛),最冷季平均温度最低为 -1.5°C ;蕙兰自然分布点的最冷月最低温度为 -9.9°C (四川黑水),其次为 -8.8°C (山西阳城),最冷季平均温度最低为 -3.7°C 。当前春兰自然分布区内的年均降水量范围为 791 mm(陕西商洛)至 2037 mm(江西怀玉),蕙兰自然分布区内的年均降水量范围则为 520 mm(河南灵宝)至 2038 mm(江西婺源)。

3.2 气候变暖对物种生存和分布的影响

RCP 8.5 是温室气体排放量相对较高的一种情景,在该情景下,预估未来区域平均气温将以每 10 年大约升高 0.54°C 的速率变暖^[33-35],将会使诸多迁移扩散能力弱的物种面临适宜生境丧失、数量减少甚至灭绝的威胁^[36]。有研究表明,气候变暖若按目前趋势持续下去,那么到 2100 年全球将有六分之一的物种面临灭绝风险^[37];Wiens 对 976 种植物和动物的研究表明,有 47% 的物种已经发生灭绝^[38]。但也有研究者认为,全球气候变暖不足以导致有些物种的灭绝^[39]。

从本研究结果来看,在 RCP8.5 情景下,2070 年春兰 $P>0.18$ 的适生区分布面积较当前分布面积减小了约 17.5 万 km^2 。蕙兰的预测结果显示,在温室气体排放低、中低、中高的情景下,适生区分布面积均会增加,但在 RCP8.5 情景下,适生区分布范围预测也会有所减小,且整体有向北迁移的趋势,太行山系南端未来的气候可能适宜蕙兰的生长,这种向北迁移趋势与其他物种如昆虫^[40-42]、脊椎和无脊椎动物^[43]、鸟类^[44]、美国红枫^[45]以及 *Betula populifolia* 等 16 个树种^[46]的研究结果是一致的。

参考文献 (References):

- [1] 廖宏,任小波,葛全胜,严中伟,林朝晖,周天军. 气候变暖及其对二氧化碳浓度敏感性的新认识——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之气候敏感性任务群研究进展. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 134-141.
- [2] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [3] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. Science, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [4] Kelly A E, Goulden M L. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(33): 11823-11826.
- [5] 马星霞,蒋明亮,王洁瑛. 气候变暖对中国木材腐朽及白蚁危害区域边界的影响. 林业科学, 2015, 51(11): 83-90.
- [6] 宋文静,吴绍洪,陶泽兴,戴君虎. 近 30 年中国中东部地区植物分布变化. 地理研究, 2016, 35(8): 1420-1432.
- [7] 刘丹,于成龙. 气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响. 生态学报, 2017, 37(19): 6511-6522.
- [8] 丁宝章,王遂义. 河南植物志(第四册). 郑州:河南科学技术出版社, 1998.
- [9] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第十八卷 兰科. 北京:科学出版社, 1999: 219-222.
- [10] 陈心启,吉占和. 中国兰花全书. 北京:中国林业出版社, 1998.
- [11] 宋军阳,张显,弓弼,赵明德,赵冰. 秦岭商洛地区兰属植物资源野外调查初报//中国观赏园艺研究进展. 北京:中国园艺学会, 2010: 4-4.
- [12] 吴应祥. 中国兰花(第二版). 北京:中国林业出版社, 1993.
- [13] 许东生. 中国蕙兰名品赏培. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 2009.
- [14] 刘娟. 寻觅山西野生兰的人. 山西晚报, 2005-08-20[2017-09-24]. <http://news.sohu.com/20050820/n226730769.shtml>.
- [15] 任保青. 西兰科植物新资料. 山西林业科技, 2015, 44(3): 1-3.
- [16] 刘仲健,陈利君,刘可为,李利强,张玉婷,黄来强. 气候变暖致使墨兰(*Cymbidium sinense*)野外种群趋向灭绝. 生态学报, 2009, 29(7): 3443-3455.
- [17] 张晓龙. 中国野生兰科植物地理分布格局研究[D]. 太原:山西大学, 2014.
- [18] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [19] 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.
- [20] Guo Y L, Li X, Zhao Z F, Wei H Y, Gao B, Gu W. Prediction of the potential geographic distribution of the ectomycorrhizal mushroom *Tricholoma matsutake* under multiple climate change scenarios. Scientific Reports, 2017, 7: 46221.

- [21] 沈涛, 张霁, 申仕康, 赵艳丽, 王元忠. 西南地区红花龙胆分布格局模拟与气候变化影响评价. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2499-2508.
- [22] 贾翔, 马芳芳, 周旺明, 周莉, 于大炮, 秦静, 代力民. 气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 464-473.
- [23] 毛俐慧, 李垚, 刘畅, 方炎明. 基于 MaxEnt 模型预测细叶小羽藓在中国的潜在分布区. 生态学杂志, 2017, 36(1): 54-60.
- [24] 刘会良, 张玲卫, 张宏祥, 布海丽且姆·阿卜杜热合曼, 张道远, 管开云. 基于物种分布模型的新疆野生果树物种丰富度分布格局. 林业科学, 2015, 51(12): 1-8.
- [25] 王亚领, 李浩, 杨旋, 郭彦龙, 李维德. 基于 MaxEnt 模型和不同气候变化情景的单叶蔓荆潜在地理分布预测. 草业学报, 2017, 26(7): 1-10.
- [26] 陈雯. 基于 ITS 分子标记的江西春兰野生居群遗传结构研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [27] 邵伟丽. 福建省野生兰科植物种质资源调查与保育策略研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [28] 费永俊, 吴广宇, 王燕, 郭永兵. 湖北兰科植物的分布及其生态适应性研究. 河南科技大学学报: 农学版, 2004, 24(3): 18-21.
- [29] 查振道, 李和平. 秦岭西段有蕙兰. 植物杂志, 1990, (5): 47-47.
- [30] Kramer-Schadt S, Niedballa J, Pilgrim J D, Schröder B, Lindenborn J, Reinfelder V, Stillfried M, Heckmann I, Scharf A K, Augeri D M, Cheyne S M, Hearn A J, Ross J, Macdonald D W, Mathai J, Eaton J, Marshall A J, Semiadi G, Rustam R, Bernard H, Alfred R, Samejima H, Duckworth J W, Breitenmoser Wuersten C, Belant J L, Hofer H, Wilting A. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. Diversity and Distributions, 2013, 19(11): 1366-1379.
- [31] 许春梅, 贺水莲, 杨扬, 邵青, 吴红芝. 深红龙胆的潜在分布区预测及适生性分级. 西部林业科学, 2015, 44(4): 63-68.
- [32] 武吉华, 张坤, 江源, 康慕谊, 邱扬. 植物地理学(第四版). 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [33] 冯婧. 多全球模式对中国区域气候的模拟评估和预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [34] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19.
- [35] 沈雨辰. CMIP5 模式对中国极端气温指数模拟的评估及其未来预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [36] Maclean I M D, Wilson R J. Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(30): 12337-12342.
- [37] Urban M C. Accelerating extinction risk from climate change. Science, 2015, 348(6234): 571-573.
- [38] Wiens J J. Climate-related local extinctions are already widespread among plant and animal species. PLoS Biology, 2016, 14(12): e2001104.
- [39] Logan M L, Huynh R K, Precious R A, Calsbeek R G. The impact of climate change measured at relevant spatial scales: new hope for tropical lizards. Global Change Biology, 2013, 19(10): 3093-3102.
- [40] Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill J K, Thomas C D, Descimon H, Huntley B, Kaila L, Kullberg J, Tammaru T, Tennent W J, Thomas J A, Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. Nature, 1999, 399(6736): 579-583.
- [41] Bebber D P, Ramotowski M A T, Gurr S J. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 985-988.
- [42] 唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 张蕾, 江幸福. 基于 Maxent 模型的不同气候变化情景下我国草地螟越冬区预测. 生态学报, 2017, 37(14): 4852-4863.
- [43] Hickling R, Roy D B, Hill J K, Fox R, Thomas C D. The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. Global Change Biology, 2006, 12(3): 450-455.
- [44] Hitch A T, Leberg P L. Breeding distributions of North American bird species moving north as a result of climate change. Conservation Biology, 2007, 21(2): 534-539.
- [45] Boisvert-Marsh L, Périé C, De Blois S. Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes. Ecosphere, 2014, 5(7): 1-33.
- [46] Sittaro F, Paquette A, Messier C, Nock C A. Tree range expansion in eastern North America fails to keep pace with climate warming at northern range limits. Global Change Biology, 2017, 23(8): 3292-3301.