北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于MaxEnt模型的不同气候情景下假俭草中国适生区预测

徐京亚 刘恬 臧国长 郑轶琦

Prediction of suitable areas of *Eremochloa ophiuroides* in China under different climate scenarios based on MaxEnt model

Xu Jingya, Liu Tian, Zang Guozhang, Zheng Yiqi

引用本文:
徐京亚, 刘恬, 臧国长, 郑轶琦. 基于MaxEnt模型的不同气候情景下假俭草中国适生区预测[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3):91–102. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230022
Xu Jingya, Liu Tian, Zang Guozhang, Zheng Yiqi. Prediction of suitable areas of *Eremochloa ophiuroides* in China under different climate scenarios based on MaxEnt model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3):91–102. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230022

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230022

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于MaxEnt模型的紫椿适生区预测
Distributional change in suitable areas for *Toona sureni* based on MaxEnt model
北京林业大学学报, 2017, 39(8): 33–41. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170002

基于MaxEnt模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析
Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 59–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200416

气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测
Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33–43. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200254

基于MaxEnt模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析
Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200103

基于MaxEnt对桉树枝瘿姬小蜂在中国发生趋势的预测
Predicting occurrence tendency of *Leptocybe invasa* in China based on MaxEnt
北京林业大学学报, 2020, 42(11): 64–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190053

辣木全球潜在适生区与生态特征
Global potential suitable area and ecological characteristics of *Moringa oleifera*
北京林业大学学报, 2020, 42(10): 45–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190375

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230022

基于 MaxEnt 模型的不同气候情景下假俭草中国适生区预测

徐京亚　刘　恬　臧国长　郑轶琦
（河南科技大学园艺与植物保护学院，河南 洛阳 471000）

摘要:【目的】本研究通过生态位模型分析评价假俭草在中国的分布情况及制约其当代分布的主要因子，为草坪建植管理和引种栽培提供理论依据。**【方法】**基于 262 个假俭草的地理分布记录和 19 个生物气候因子，利用最大熵 (MaxEnt) 模型和地理信息系统，对该物种当代和未来的适生分布区和面积进行预测，并通过受试者工作特征曲线对模型精度进行验证。**【结果】**影响假俭草适生区分布的主要因子是最干季度降水量(bio17)，次要因子是平均日较差(bio2)、温度季节性变化标准差(bio4)和年降水量(bio12)；在当代气候条件下，假俭草总适生区面积约为 183.55×10^4 km^2，主要集中在我国东南部亚热带地区；在未来气候情景下，假俭草的总适生区面积相较于当代有不同程度的增加，但低、高适生区相较于当代总体而言呈现下降的趋势；通过空间格局变化得出，假俭草适生区保留率为 90.14%～94.21%，另外，假俭草质心均位于湖南省湘潭市，推测该地区可能是假俭草的多样性分布中心。**【结论】**本研究得出降水是影响假俭草分布的主要因素，在今后引种栽培以及草坪建植管理时应予以重视。

关键词：假俭草；MaxEnt 模型；适生区；生物气候因子
中图分类号：S688.4；Q948.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000−1522(2024)03−0091−12
引文格式：徐京亚，刘恬，臧国长，等. 基于 MaxEnt 模型的不同气候情景下假俭草中国适生区预测［J］. 北京林业大学学报，2024，46(3)：91−102. Xu Jingya, Liu Tian, Zang Guozhang, et al. Prediction of suitable areas of *Eremochloa ophiuroides* in China under different climate scenarios based on MaxEnt model［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 91−102.

Prediction of suitable areas of *Eremochloa ophiuroides* in China under different climate scenarios based on MaxEnt model

Xu Jingya　Liu Tian　Zang Guozhang　Zheng Yiqi
(College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract:［**Objective**］In this study, the ecological model was used to analyze and evaluate the distribution of *Eremochloa ophiuroides* in China and the main factors restricting its modern distribution, so as to provide theoretical basis for turf establishment, management, introduction and cultivation.［**Method**］Based on the geographical distribution records of 262 *E. ophiuroides* and 19 environmental factors, the maximum entropy (MaxEnt) model and geographic information system were used to predict the current and future suitable distribution area and area of the species, and the accuracy of the model was verified by the receiver operating characteristic curve.［**Result**］The main factor affecting the distribution of suitable area of *E. ophiuroides* was precipitation of the driest quarter (bio17), and the secondary factors were the mean diurnal range (bio2), the standard deviation of seasonal temperature seasonality (bio4) and the annual precipitation (bio12). Under

收稿日期: 2023−02−01　**修回日期:** 2023−05−24
基金项目: 河南省自然科学基金项目(18230041001)。
第一作者: 徐京亚。主要研究方向：风景园林植物与应用研究。Email: 1690432794@qq.com　地址：471000 河南省洛阳市洛龙区开元大道 263 号河南科技大学园艺与植物保护学院。
责任作者: 郑轶琦，博士，教授。主要研究方向：观赏植物遗传育种。Email: yiqi214@163.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

current climatic conditions, the total suitable area of *E. ophiuroides* was about 1.835 5 million km^2, mainly concentrated in the subtropical region of southeast China. Under the future climate scenario, the total suitable area of *E. ophiuroides* will increase to varying degrees compared with the modern, but the low and high suitable areas will show a downward trend compared with the modern. According to the change of spatial pattern, the retention rate of the suitable area of *E. ophiuroides* was 90.14%−94.21%. In addition, the centroid of *E. ophiuroides* was located in Xiangtan City, Hunan Province of central China, suggesting that this area may be the diversity distribution center of *E. ophiuroides*. [**Conclusion**] It is concluded that precipitation is the main factor affecting the distribution of *E. ophiuroides*, which should be paid attention to in the future introduction and cultivation, and turf establishment and management.

Key words: *Eremochloa ophiuroides*; MaxEnt model; suitable area; bioclimatic factor

气候是影响物种分布和生态系统过程的主要控制因素[1]，由于人类活动的干扰，气候变化对全球范围内的生态系统和无数生物物种造成了不利影响[2]。许多常见物种，包括草本植物、杂交种和灌木等，对气候变化高度敏感[3]，这可能导致物种的地理分布随气候变化而变化，甚至物种灭绝[4]。因此，研究气候变化对物种分布格局的影响，有利于了解物种的气候需求与地理分布的关系，可以为生物多样性保护和引种栽培提供科学依据。近年来，通过建立物种发生与环境因素之间的关系，物种分布模型(species distribution models，SDMs)已被用于模拟预测物种分布[5]。物种分布模型主要包括规则集遗传算法模型[6]、最大熵(maximum entropy，MaxEnt)模型[7]、生态因子分析模型[8]等。大多数研究表明，与其他模型相比，MaxEnt 模型表现的更好，因为它只需要基于有限的物种存在数据和整个研究区域的环境信息，就能够来模拟物种的潜在地理分布[9]。目前，MaxEnt 模型已经在入侵生物学、保护生物学以及全球气候变化对物种分布的影响等方面得到了应用[10]。

假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)是原产于中国的一种暖季型草，是禾本科(Poaceae)蜈蚣草属(*Eremochloa*)中唯一可用作草坪草的多年生草本[11]。目前广泛分布于美国南部和东部、东南亚、热带北部、澳大利亚东部及我国长江流域及其以南地区的江苏、安徽、福建、台湾、广东、广西、海南、湖南、湖北、重庆、四川、贵州、云南等地[12]。与其他草坪草相比，由于对管理和施肥要求较低，在草坪业中具有很大的应用潜力[13]。目前，国内外对假俭草的研究主要集中在抗逆性[14]、形态学[15]、遗传多样性[16]和坪用价值[17]等方面，而对于假俭草潜在适宜栖息地、限制因素以及对中国未来气候变化的可能响应尚未报道。因此，本研究利用 MaxEnt 模型和地理信息系统(ArcGIS)模拟预测假俭草在我国不同时期的栖息地分布，探明空间变化格局以及影响地理分布的主要生物气候因子，以期为草坪建植管理及种质资源保护和利用提供理论指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 数据收集

1.1.1 分布数据的获取与处理

依据全球物种多样性信息库(https://www.gbif.org/)、中国植物图像库(http://ppbc.iplant.cn/)、中国数字植物标本馆(http://www.cvh.org.cn/cms/)，分别获得假俭草原始分布点 71 个、37 个、109 个；通过查阅文献记载[18−20]和野外实地调查分别获得 101 个和 8 个原始分布点，合计获得 326 个假俭草原始分布数据点。参考朱颖墨等[21]的方法：利用 ArcGIS 领域分析与叠加分析对获取的数据进行筛选，最终共确定 262 个有效分布点(图 1)。

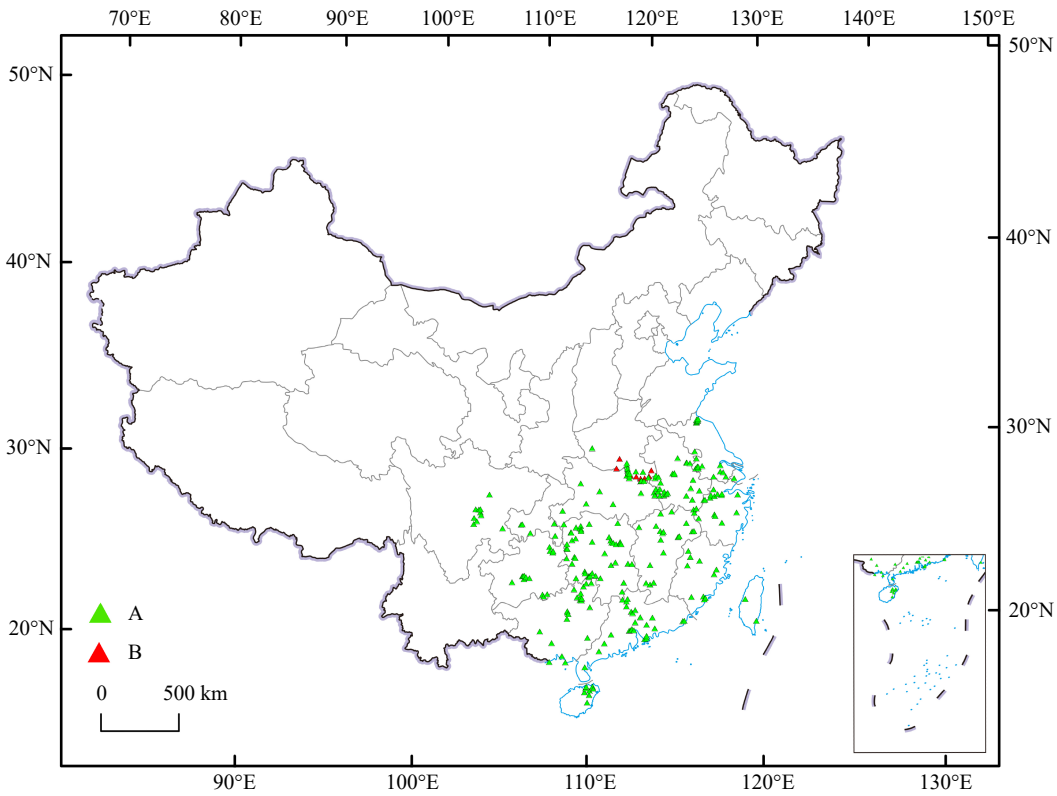
1.1.2 环境数据

从世界气候数据库(https://www.worldclim.org/)下载当代(Current，1950—2000)和未来两个时期(2050s, 2070s)的气候数据(分辨率为 2.5′)，包括与降水、气温等相关的 19 个生物气候因子变量，编号依次为 bio1 ~ bio19[22]。其中，未来气候数据基于中国国家气象中心开发的 BCC-CSM2-MR 模式[23]，气候情景则选取低强迫情景(SSPs126)、中等强迫情景(SSPs245)和高强迫情景(SSPs585)。

1.2 研究方法

1.2.1 生物气候因子相关性分析和生物气候因子筛选

为防止生物气候因子之间的过拟合，增加模拟预测结果的准确性。先利用 19 个生物气候因子通过 MaxEnt 模型 3.4.0 对假俭草进行预模拟，并剔除贡献率为 0 的生物气候因子[24]；然后通过 ArcGIS 10.2 提取假俭草有效分布点的剩余生物气候因子的值，将提取的值利用 SPSS Statistics 23 软件进行 Pearson 相关性分析，当两个变量的相关系数绝对值 $|r| < 0.8$ 时，所有相关变量都被保留，当两个参数的 $|r| > 0.8$ 时，根据其对模型的贡献率和排列重要性进行选择[25]，将最终得到的生物气候因子用于假俭草



A 代表全球物种多样性信息库、中国植物图像库、中国数字植物标本馆和文献记载分布点，B 代表野外实地调查分布点。A represents the distribution points of Global Biodiversity Information Facility, Plant Photo Bank of China, Chinese Virtual Herbarium and literature, and B represents the distribution points of field investigation.

图 1　假俭草有效分布点

Fig. 1　Effective distribution points of *Eremochloa ophsuroides*

当代和未来在中国的分布状况研究。

1.2.2　物种分布模型及参数设置

使用 MaxEnt 模型 3.4.0 绘制假俭草的潜在分布区。在模型中，75% 的分布点用作训练数据，而剩余的 25% 作为测试数据，其他值为默认值[26]。MaxEnt 模型包含一种分析环境变量贡献率和重要性的刀切法（Jackknife）检验，它使用受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic curve，ROC）下面积值（area under curve，AUC）来估计模型精度[27]。AUC 值的范围是 0～1，当 AUC 值超过 0.8 时被认为模型准确度极好[28]。

1.2.3　适生区预测与划分

将 MaxEnt 模型运行结果中的 asc 格式文件导入 ArcGIS 软件。参考 Li 等[29]提出的分类，将适生区划分为 4 个类别，即非适生区（$P \leqslant 0.2$）、低适生区（$0.2 < P \leqslant 0.4$）、中适生区（$0.4 < P \leqslant 0.6$）和高适生区（$P > 0.6$），通过 ArcGIS 软件转栅格、重分类后以中国地图为底图，绘制出假俭草在我国当代、2050s 以及 2070s 潜在分布区预测图，利用空间分析模块工具计算各时期潜在适生区的面积。

1.2.4　适生区空间格局变化和质心迁移

设定物种存在概率值 > 0.4 作为假俭草潜在适生区，参考张殷波等[30]的方法，对模型运算得到的结果利用 ArcGIS 进行重分类，进而实现假俭草适生区空间格局变化的可视化表达。参考 Yue 等[31]的方法，计算分布在不同时期的质心位置和假俭草分布区的整体变化趋势。

2　结果与分析

2.1　模拟结果可靠性分析

MaxEnt 模型预测结果显示训练集与测试集 AUC 均为 0.935（图 2），说明模型预测准确度很高。

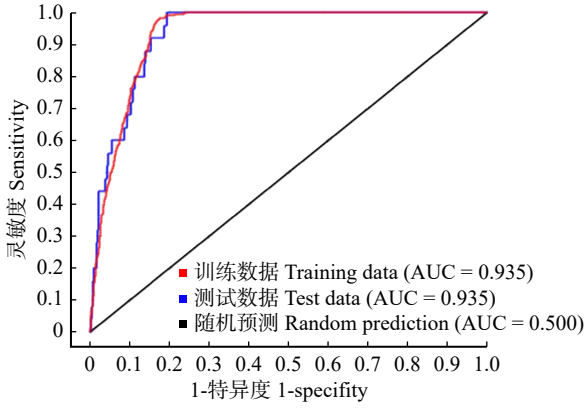


图 2　MaxEnt 模型 ROC 曲线预测结果

Fig. 2　ROC curve prediction results of MaxEnt model

因此应用 MaxEnt 模型预测假俭草在当代及未来气候情景下的潜在分布具有较高的意义。

2.2 影响假俭草分布的主要生物气候因子

生物气候因子预模拟的贡献率结果见表 1，其中 8 个生物气候因子(bio1、bio5、bio7、bio9、bio15、bio16、bio18、bio19)的预模拟贡献率为 0，将这些因子予以剔除。剩余的 11 个生物气候因子进行 Pearson 相关性分析(表 2)，$|r| > 0.8$ 的生物气候因子共有 6 对，即 bio4 和 bio6、bio6 和 bio11、bio11 和 bio12、bio4 和 bio11、bio6 和 bio12 及 bio14 和 bio17，结合表 1 中各生物气候因子的贡献率和排列重要性，剔除高度相关的 3 个因子，即 bio6、bio11 和 bio14，最终筛选出 8 个主要生物气候因子。8 个生物气候因子基于 MaxEnt 模型对假俭草当代时期预测的贡献率结果见表 3，其中贡献率最高的是最干季度降水量(bio17)，占总贡献率的 84.2%，远高于其他生物气候因子；其次是年降水量(bio12)、温度季节性变化标准差(bio4)、等温性(bio3)和平均日较差(bio2)，贡献率分别是 4.6%、4.2%、2.1% 和 1.4%；最湿季度平均温度(bio8)和最暖季度平均温度(bio10)贡献率较低，均为 1.2%；最湿月降水量(bio13)的贡献率最低，为 1.1%。上述结果表明，与降水有关的生物气候因子的总贡献率为 89.9%，与温度有关的生物气候因子总贡献率为 10.1%，说明影响假俭草分布的环境因素主要是降水，其次是温度。

刀切法检验结果(图 3)表明：仅使用单独生物气候因子变量时，对假俭草影响最大的 3 个生物气候

表 1 生物气候因子预模拟贡献率和排列重要性

Tab. 1 Pre-simulation contribution rate and importance of bioclimatic factors

变量编号 Variable No.	生物气候因子变量 Bioclimatic factor variable	贡献率 Contribution rate/%	排列重要性 Permutation importance
bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	78.9	12.6
bio4	温度季节性变化标准差 Standard deviation of the seasonal temperature change	6.6	0.0
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	4.1	14.6
bio3	等温性 Isothermality	3.0	24.2
bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	2.5	0.0
bio12	年降水量 Annual precipitation	1.9	18.4
bio2	平均日较差 Mean diurnal range	1.3	4.0
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	0.7	1.9
bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	0.4	11.6
bio6	最冷月最低温度 Min. temperature of the coldest month	0.4	2.0
bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	0.2	6.8
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter	0.0	2.1
bio1	年平均气温 Annual mean temperature	0.0	0.9
bio5	最暖月最高温度 Max. temperature of the warmest month	0.0	0.8
bio15	降水量变异系数 Coefficient of variation of precipitation	0.0	0.0
bio16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	0.0	0.0
bio18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter	0.0	0.0
bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	0.0	0.0
bio7	年均温变化范围 Variation range of annual average temperature	0.0	0.0

表 2 生物气候因子相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of bioclimatic variables

变量编号 Variable No.	bio2	bio3	bio4	bio6	bio8	bio10	bio11	bio12	bio13	bio14	bio17
bio2	1.00										
bio3	0.13	1.00									
bio4	0.57**	–0.72**	1.00								
bio6	–0.65**	0.51**	–0.87**	1.00							
bio8	0.40**	0.14	0.23	–0.08	1.00						
bio10	–0.09	–0.11	0.04	0.43**	0.37**	1.00					
bio11	–0.55**	0.59**	–0.86**	0.99**	–0.01	0.47**	1.00				
bio12	–0.50**	0.40**	–0.69**	0.81**	–0.28*	0.39**	0.81**	1.00			
bio13	–0.26*	0.60**	–0.67**	0.67**	–0.13	0.21	0.70**	0.79**	1.00		
bio14	–0.45**	–0.25*	–0.12	0.43**	–0.37**	0.56**	0.40**	0.63**	0.23	1.00	
bio17	–0.35**	–0.33**	0.014	0.32**	–0.35**	0.60**	0.30*	0.58**	0.16	0.96**	1.00

注：*表示在0.05水平上差异显著；**在0.01水平上差异显著。Notes: * means significant difference at the 0.05 level; **means significant difference at 0.01 level.

表 3　生物气候因子基于 MaxEnt 模型对假俭草当代时期预测的贡献率

Tab. 3　Contribution rates of bioclimatic factor based on MaxEnt model to the current period prediction of *E. ophsuroides*

变量编号 Variable No.	贡献率 Contribution rate/%	排列重要性 Permutation importance
bio2	1.4	15.9
bio3	2.1	6.7
bio4	4.2	9.6
bio8	1.2	7.3
bio10	1.2	3.6
bio12	4.6	21.7
bio13	1.1	15.0
bio17	84.2	20.2

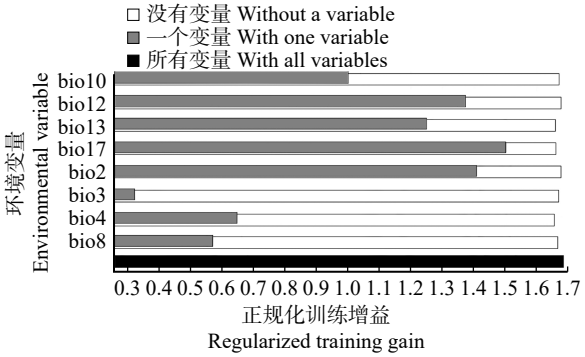


图 3　假俭草生物气候因子刀切法检验结果

Fig. 3　Bioclimatic factor test results of *E. ophsuroides* by Jackknife method

因子分别是最干季度降水量(bio17)、平均日较差(bio2)和年降水量(bio12)。使用除此以外的其他生物气候因子变量时，对假俭草影响最大的是温度季节性变化标准差(bio4)，综上所述影响假俭草当代地理分布的主要生物气候因子为最干季度降水量、年降水量、平均日较差和温度季节性变化标准差。

假俭草的存在概率总体上随生物气候因子的增加呈现先增后减的趋势(图 4)，若以存在概率大于 0.5 为标准，则最干季度降水量适宜值范围为 80 ~ 480 mm，在 95 mm 时存在概率达到其最高值(约 0.56)；年降水量适宜值范围为 1 130 ~ 2 230 mm，在 1 780 mm 时达到峰值(约 0.57)；温度季节性变化标准差适宜值范围为 700 ~ 900，在 870 时达到峰值(约 0.58)；平均日较差高适宜值范围为 6.8 ~ 9.0 ℃，在 8.9 ℃ 时达到峰值(约 0.54)。

2.3　不同时期假俭草分布区预测

2.3.1　当代潜在分布区预测

图 5 显示了 MaxEnt 模型预测的当代气候条件下假俭草的地理分布，结果表明，假俭草的生态适生区主要分布在我国华中地区的河南东南部、湖北、湖南及西南地区的四川东南部、重庆、贵州等地区；华东地区的安徽、江苏、浙江、江西、福建；华南地区的广东、广西、海南以及我国的台湾省等地区。预测潜在分布区的范围大于假俭草实际发生的数据，如辽宁东南部等，说明在当代气候条件下，这些区域适宜假俭草生存，假若引种到当地进行栽培，存活概率较高。比较假俭草的有效分布点(图 1)和当代潜在分布区(图 5)，可以发现假俭草有效分布点大部分位于

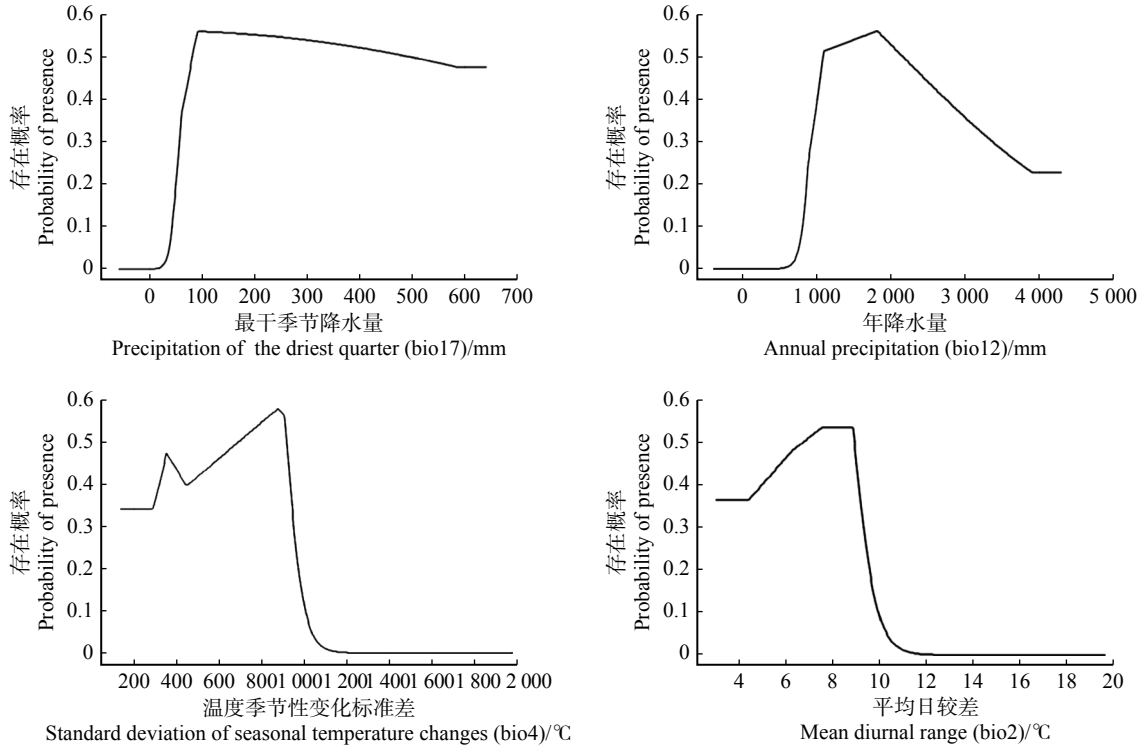


图 4　主要生物气候因子的响应曲线

Fig. 4　Response curves of main bioclimatic factors

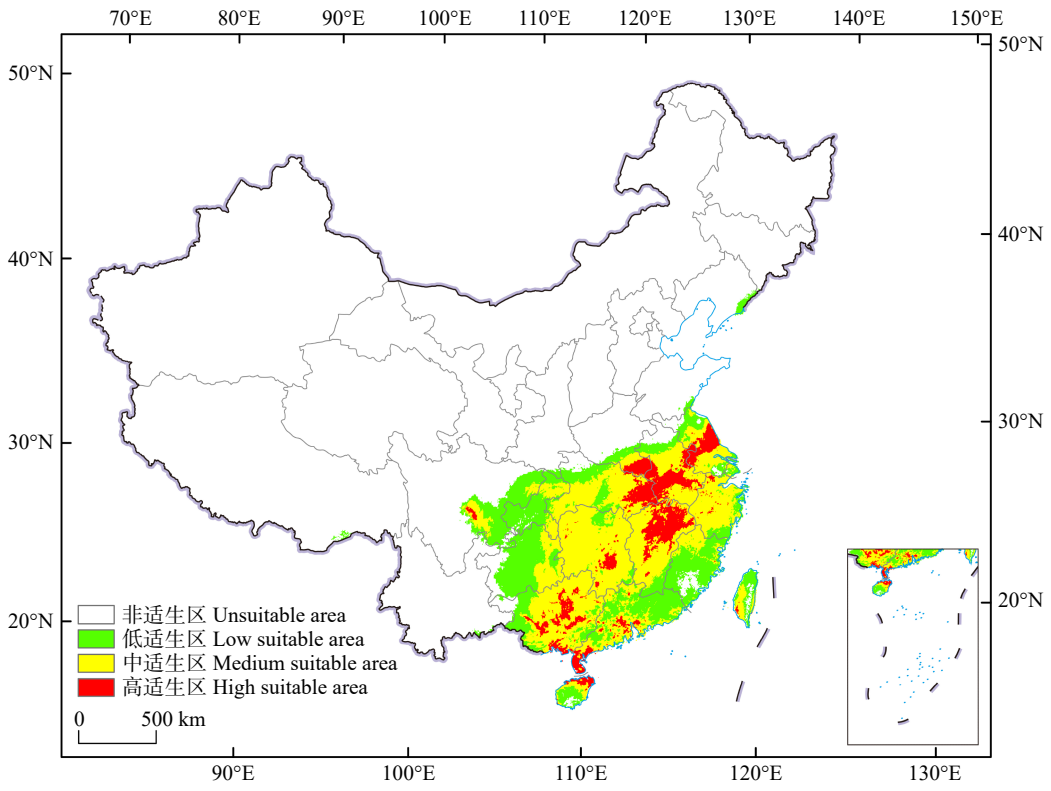


图 5 假俭草当代潜在分布区

Fig. 5 Current potential distribution area of *E. ophsuroides*

中、高适生区内，进一步说明模拟的结果较为准确。

2.3.2 未来潜在分布区预测

假俭草当代适生区总面积为 183.55 × 10^4 km^2，其中高、中、低适生区分别为 26.07 × 10^4、92.63 × 10^4、64.85 × 10^4 km^2。在未来气候情景下，假俭草的总适生区面积相较于当代有不同程度的增加，在 2050s，假俭草的总适生区面积在 SSPs126、SSPs245 和 SSPs585 这 3 种气候情景下分别增加了 5.20 × 10^4、5.17 × 10^4 和 5.37 × 10^4 km^2，其中在 SSPs585 气候情景下增加幅度最大；到 2070s，假俭草的总适生区面积在 SSPs126、SSPs245 和 SSPs585 这 3 种气候情景下分别增加了 5.81 × 10^4、5.90 × 10^4 和 3.74 × 10^4 km^2，其中在 SSPs245 气候情景下增幅最大。另外，假俭草低、高适生区相较于当代总体而言呈现下降的趋势，而中适生区则呈相反的趋势(表 4)。对比 2050s 和 2070s 的预测结果可知，假俭草的总适生区面积在 SSPs126 和 SSPs245 下呈现增加的趋势，而在 SSPs585 下则出现下降的趋势。由图 6 可以看出，假俭草在几个时期中的中、高适生区主要集中在江苏、安徽、湖北、湖南、广西、广东、江西、浙江等地，低适生区则主要由中、高适生区的范围向西北方向延伸。

2.4 不同情境下假俭草空间格局变化

通过未来不同气候情景下假俭草适生区的空间格局变化(表 5、图 7)，可以看出，假俭草当代适生区的大部分仍为保留适生区，保留率为 90.14% ~ 94.21%，主要集中在江苏、浙江、安徽、湖北、江西、湖南、广西以及河南东南部和广东西南部等地区；时期相同，气候情景也相同时，假俭草适生区新增率均大于丧失率，新增率为 17.88% ~ 24.84%，丧失率为 3.00% ~ 7.19%；其中在 2050s 的 SSPs245 情境下增加面积最大，约为 29.48 × 10^4 km^2，达到了 24.84%，新增面积主要分布在重庆、贵州、海南、广东、台湾、福建、浙江等地，同时，丧失面积最小为 4.07 × 10^4 km^2，

表 4 不同时期潜在适生分布区预测面积

Tab. 4 Prediction area of potential suitable distribution area in different periods 10^4 km^2

时期 Period	当代 Current	2050s			2070s		
		SSPs126	SSPs245	SSPs585	SSPs126	SSPs245	SSPs585
低适生区 Low suitable area	64.85	54.05	42.88	43.66	49.47	49.11	51.44
中适生区 Medium suitable area	92.63	108.89	126.24	122.25	112.14	114.45	110.69
高适生区 High suitable area	26.07	25.81	19.60	23.01	27.74	25.90	25.16
总适生区 Total suitable area	183.55	188.75	188.72	188.92	189.36	189.45	187.29
相比当代增加 Compare with the current increase		5.20	5.17	5.37	5.81	5.90	3.74

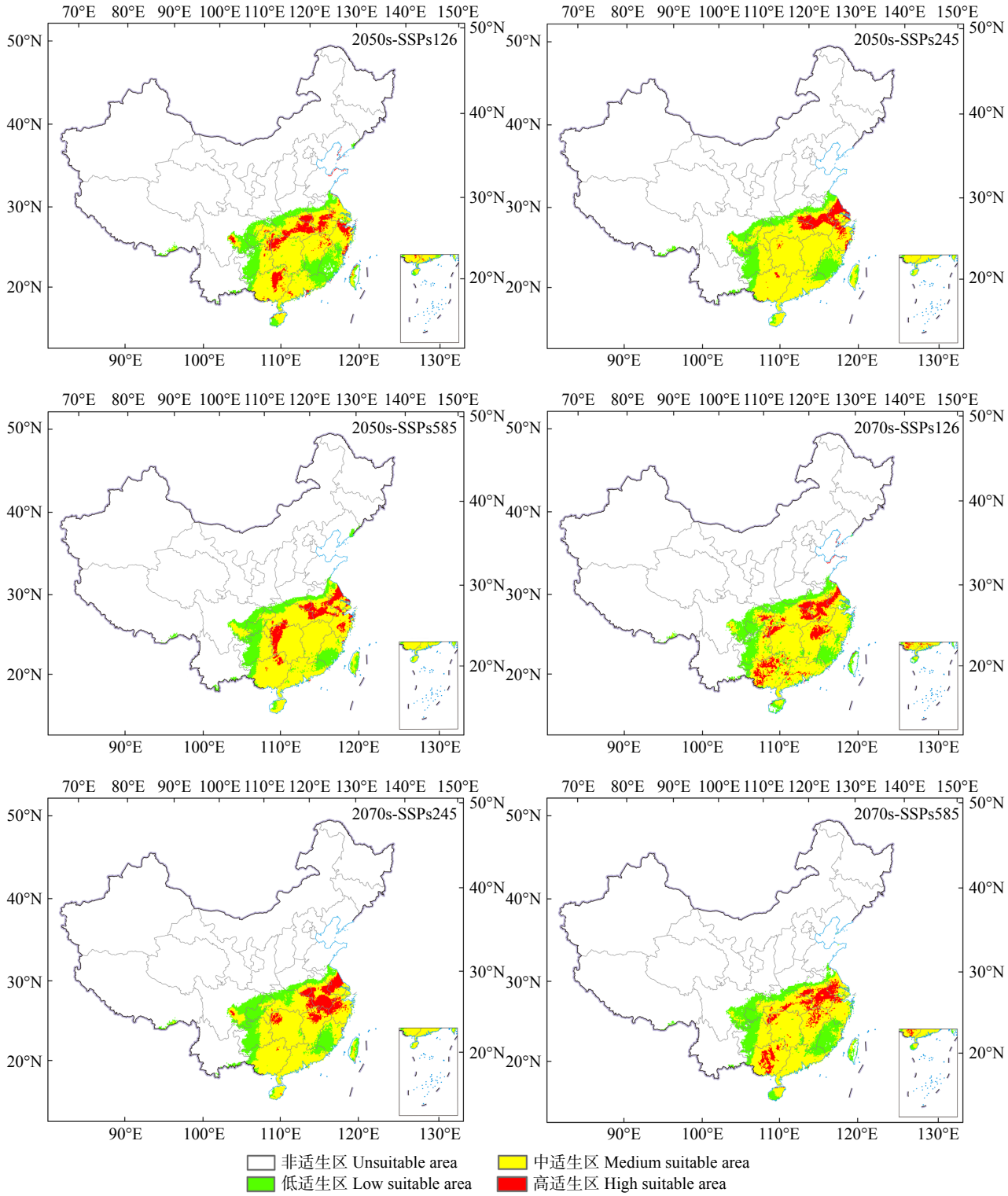


图 6　未来不同气候情景下假俭草在中国的适生分布区

Fig. 6　Suitable distribution areas of *E. ophsuroides* in China under future climate scenarios

达到了 3.43%，主要发生适生区的边缘地区。

通过比较未来 2050s 和 2070s 假俭草适生区的增加率、丧失率和保留率，得出 2050s 假俭草适生区空间格局在 SSPs126 气候情境下增加率和保留率均小于 2070s，即在 SSPs126 情景下假俭草适生区面积呈现增加的趋势，而在 SSPs245 和 SSPs585 气候情境下则呈现下降的趋势，说明一定程度的气候变暖对假俭草的生存有利，可以为假俭草提供更多合适的生境条件。

2.5　不同情境下假俭草质心的迁移趋势

图 8 显示了假俭草在不同气候情景下质心的迁移趋势，在当代气候条件下，假俭草的质心在湖南省湘潭市湘潭县（113°00′34″E，27°45′22″N）。在 SSPs126 气候情境下，假俭草质心在 2050s 位于湖南

表 5 不同时期假俭草适生区空间变化

Tab. 5 Spatial variation of suitable area of *E. ophsuroides* in different periods

时期-气候情景 Period-climate scenario	面积 Area / 10^4 km^2			变化 Change/%		
	增加 Increase	保留 Reserve	丧失 Lost	增加率 Increase rate	保留率 Reserved rate	丧失率 Lost rate
2050s-SSPs126	22.98	106.99	8.54	19.36	90.14	7.19
2050s-SSPs245	29.48	111.32	4.07	24.84	93.78	3.43
2050s-SSPs585	28.38	111.83	3.56	23.91	94.21	3.00
2070s-SSPs126	26.62	108.54	6.94	22.43	91.44	5.84
2070s-SSPs245	26.49	108.85	6.55	22.31	91.70	5.52
2070s-SSPs585	21.22	107.51	7.97	17.88	90.58	6.72

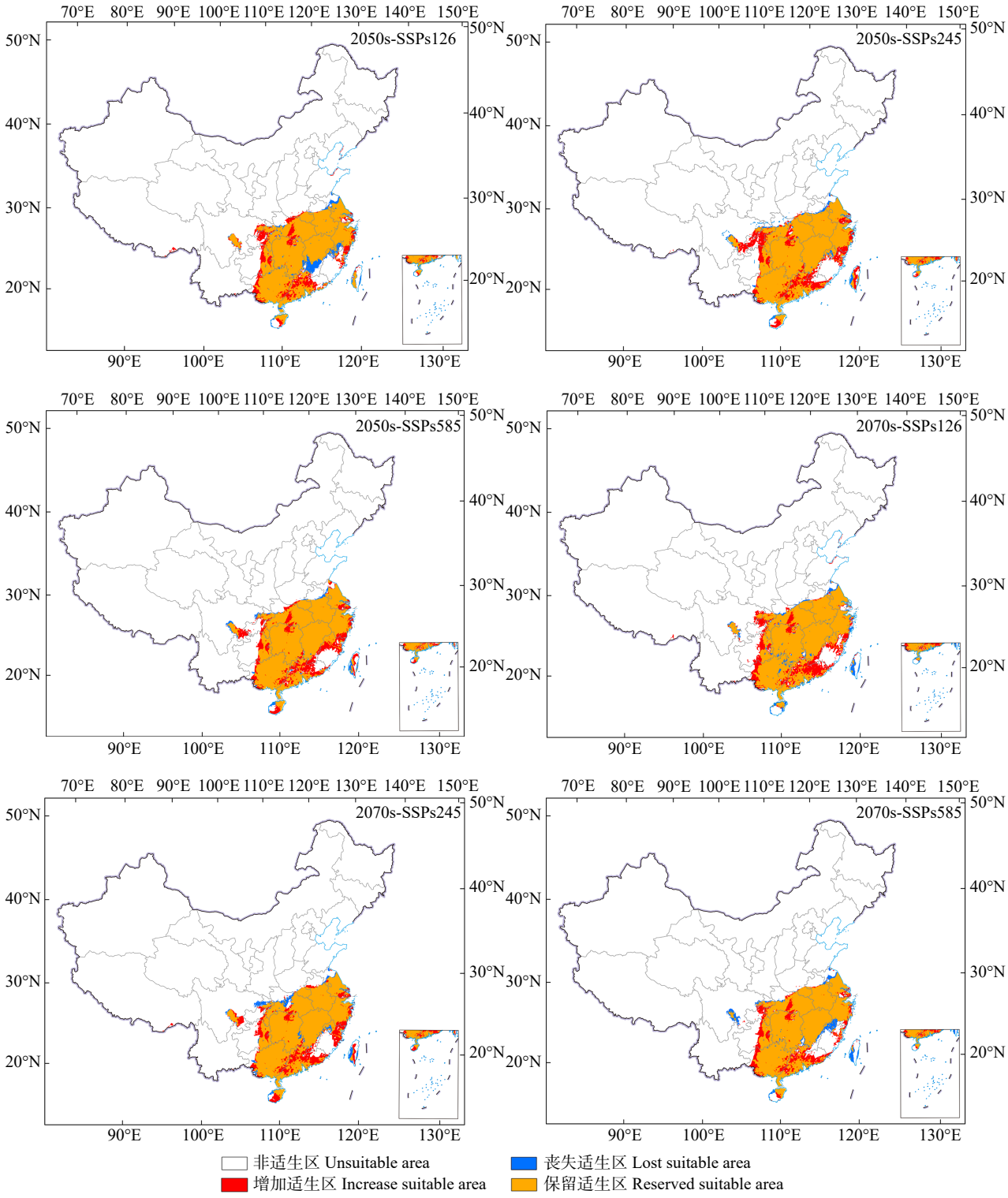


图 7 不同时期假俭草适生区空间变换格局

Fig. 7 Spatial transformation pattern of the suitable area of *E. ophsuroides* in different periods

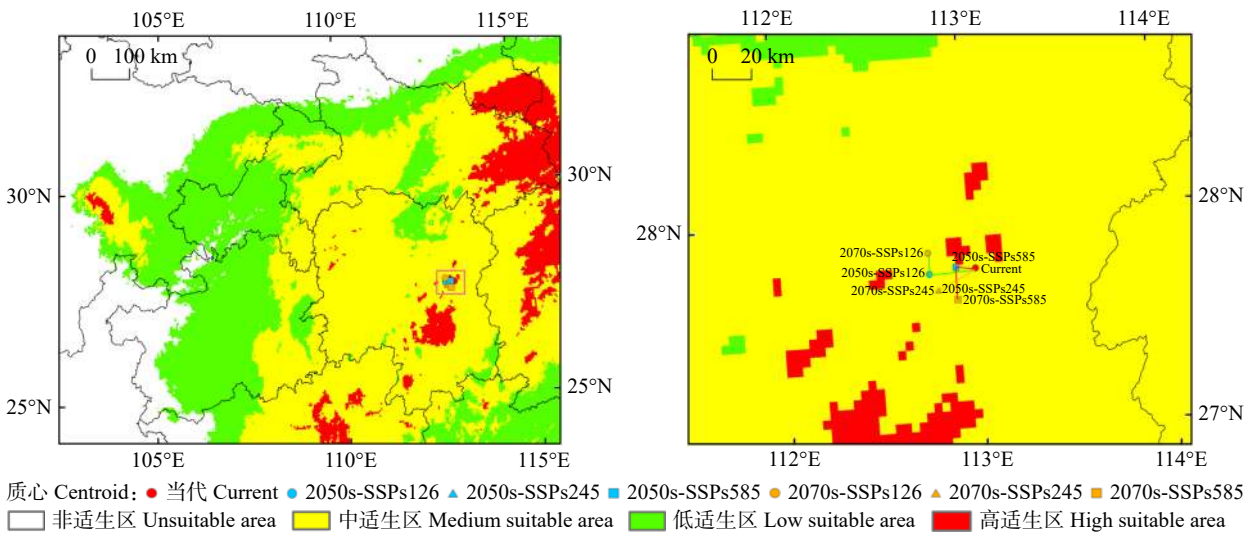


图 8　假俭草当代适生区分布及质心转移

Fig. 8　Distribution of current suitable area and centroid transfer of *E. ophsuroides*

省湘潭市湘潭县（112°45′59″E，27°44′37″N），在 2070s 位于湖南省湘潭市雨湖区（112°45′59″E，27°50′25″N），相较于当代而言，总体表现出先向西再向北迁移的趋势；在 SSPs245 气候情境下，假俭草质心在 2050s 和 2070s 均位于湖南省湘潭市湘潭县（112°48′29″E，27°39′58″N），相较于当代表现出向西南迁移的趋势；在 SSPs585 气候情境下，假俭草质心在 2050s 位于湖南省湘潭市湘潭县（112°54′27″E，27°45′57″N），在 2070s 位于湖南省湘潭市湘潭县（112°54′20″E，27°37′06″N），相较于当代而言，总体表现出先向西再向南迁移的趋势。

3　讨　　论

3.1　制约假俭草分布的主导环境变量

根据环境变量贡献率和测试增益显示，最干季度降水量的贡献率为 84.2%，是影响假俭草分布范围的主要因子；年降水量、平均日较差和温度季节性标准差的贡献率为 10.2%，是影响假俭草分布范围的次要因子。本研究预测显示，最干季度降水量的适宜值范围为 80 ~ 480 mm，年降水量为 1 130 ~ 2 230 mm，在前人的研究中曾指出假俭草适宜生长在年降水量 750 ~ 1 500 mm 的地区[32−33]，这可能是由于假俭草是一种暖季型草坪草，其根系主要在土壤深度 10 cm 以内[34]，由于其根系较浅，虽然有一定的抗旱能力，但仍需要适时适量的灌溉来满足生长的需要，否则轻则造成假俭草返青迟、叶尖干枯、叶片卷折，重则会导致植株死亡[35]；由于假俭草是宽叶型草坪草，故在冬季叶片水分容易蒸发[36]，而最干季节适当的降水量会给正在越冬的假俭草增加适当的湿度和提高温度，防止来年假俭草的返青。

除了降水之外，温度对假俭草的分布也很重要，在本次研究中发现，当温度季节性变化标准差范围在 700 ~ 900 时有利于适生区的扩张，这可能是由于季节性变化是植物生长、发育和开花中的重要因素之一[37]，大多数植物需要一个暖—冷—暖的过程来完成它们的年周期[38]。孙存华等[39]研究显示，昼夜温差对植物生长起到促进作用，而无昼夜温差则抑制植物的生长；郭岐峰等[40]指出不同的作物或同一作物不同生育时期所需求的昼夜温差是不同的，本研究结果表明适宜假俭草生长的平均日较差为 6.8 ~ 9.0 ℃，可以为今后假俭草栽培管理提供理论依据。

3.2　气候变化对假俭草适生区的影响

通过假俭草当代潜在分布区，发现其高适生区主要包括华中地区河南东南部、湖北东部，华东地区浙江中部、安徽中部和江西东南部，以及华中地区的湖南和华南地区的广西、广东等部分区域，中低适生区主要在高适生区的外围，这与陈志一等[41]指出的假俭草分布区较为一致。假俭草属于暖季型草坪草，喜光，耐阴，适合生长在降水量为 800 mm 以上的地方[11]，而我国年降水量由东南沿海到西北内陆逐渐减少[42]，使当代假俭草适生区主要集中在我国东南部亚热带地区，与其他物种研究结果类似[43−44]。本次预测适生区大于实际发生数据，如辽宁东南部丹东地区依据文献记载并无假俭草的分布区，杜海波等[45]研究发现，辽宁东南部的丹东年均温 7.23 ~ 10.15 ℃，但降水量较多，占辽宁省降水量的 70%，年平均降水量为 581.2 ~ 1 470.7 mm。尽管该地区年均温低于假俭草适宜生长年均温 10 ~ 25 ℃[46]，但降水量满足生长的要求，说明辽宁省东南部具备假俭草生长的环境，可以尝试引种栽培。

在对我国未来气候情景下假俭草的适生区进行模拟预测发现，假俭草在我国适生区面积将有所

增加，这与麻栎（*Quercus acutissima*）[47]、南酸枣（*Choerospondias axillaris*）[48]等的研究结果一致，可能的原因是：第一，气候变暖对喜温性植物的扩张有积极影响[49]；第二，降水量作为最大的影响因素，在全球变暖的背景下，我国的降水量将持续增加[50]。此外预测结果也表明，在 SSPs585 气候情景下，假俭草适生区面积有减少的趋势，在 SSPs585 气候情景下，温室气体的排放浓度随时间增加而上升[51]，若无适当措施以减缓气候变化，将不利于假俭草未来的健康生长及现有适生区的保护。

3.3 假俭草空间变换格局及质心转移分析

在未来 6 种气候情境下，假俭草的分布范围有不同程度的增加，且假俭草的潜在分布区均有迁移的趋势。在未来全球平均温度升高背景下，对于一些嗜冷物种来说是灾难，但对于嗜温性物种来说非常有利，会加快演替更新的速度，增强竞争力[52]。在 SSPs126 气候情境下，假俭草的质心先向西再向北迁移，可能由于随着温度的升高，我国北方地区降水强度增加[53]，满足了假俭草生长的条件，而南方的干旱日数略有增加[49]，导致适生区逐渐向北扩张，说明一定程度的气候变暖对假俭草的扩张有利；在 SSPs245 气候情境下未来两个时期虽然质心重合，但 2070s 适生区增加率和保留率均呈下降的趋势；在 SSPs585 气候情境下，质心先向西再向南迁移，同时适生区面积也呈下降的趋势，说明气候变暖超过一定的范围会对该物种的实际生态位造成影响。另外，假俭草当代和未来质心均位于湖南省湘潭市，说明气候情景的变化对假俭草的分布格局影响不大，同时也可以推测，该地区可能也是假俭草的多样性分布中心。

4 结 论

本研究利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件，预测了假俭草当代及未来（2050s、2070s）6 个气候情境下的适生区分布。根据假俭草的地理分布和生物气候因子之间的联系发现，限制假俭草分布的主要因子是最干季节降水量，且降水类要素的整体影响强于气温类要素。模拟结果显示当代气候条件下生态适宜区总面积为 183.55×10^4 km^2，主要集中在我国东南部亚热带地区；相较于当代，在未来气候情景下假俭草总适生区面积均有不同程度的增加，但低、高适生区总体而言呈现下降，中适生区呈上升的趋势。在未来气候情景下，当代适生区的大部分仍为保留适生区，保留率为 90.14% ~ 94.21%，在 2070s 的 SSPs126 情景下假俭草适生区面积相较于 2050s 呈现增加的趋势，而在 SSPs245 和 SSPs585 气候情境下则呈现下降的趋势；假俭草质心均表现出迁移的趋势，但仍位于湖南省湘潭市，说明该地区可能是假俭草的多样性分布中心。本研究结果对假俭草的引种栽培以及草坪建植管理具有指导意义，然而，除了生物气候因子外，其他因素（生物因素、人类活动）也会影响其分布，在今后的研究中应增加更多因素，才能进一步提高假俭草适生区预测的准确性。

审图号：GS 京（2024）0170 号

参 考 文 献

[1] Williams J W, Jackson S T, Kutzbach J E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(14): 5738−5742.

[2] Zhou Y C, Zhang Z X, Zhu B, et al. MaxEnt modeling based on CMIP6 models to project potential suitable zones for *Cunninghamia lanceolata* in China[J]. Forests, 2021, 12(6): 752.

[3] Kane K, Debinski D M, Anderson C, et al. Using regional climate projections to guide grassland community restoration in the face of climate change[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 730.

[4] Zhang K L, Yao L, Meng J, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1326−1334.

[5] Baptista-Rosas R C, Hinojosa A, Riquelme M. Ecological niche modeling of *Coccidioides* spp. in western North American deserts[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2007, 1111(1): 35−46.

[6] Stockwell D R B, Peterson A T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models[J]. Ecological Modelling, 2002, 148(1): 1−13.

[7] Merow C, Smith M J, Silander J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter[J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058−1069.

[8] Hirzel A H, Hausser J, Perrin N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data[J]. Ecology, 2002, 83(7): 2027−2036.

[9] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E, et al. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(34): 231−259.

[10] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用 [J]. 生物学通报, 2015, 50(11): 9−12.
Zhang L. The application of MAXENT maximum entropy model in predicting the potential distribution range of species[J]. Bulletin of Biology, 2015, 50(11): 9−12.

[11] 苟文龙, 白史且, 张新全, 等. 假俭草遗传多样性及应用研究进展 [J]. 中国草地, 2002(2): 49−54.
Gou W L, Bai S Q, Zhang X Q, et al. Progress of centipedegrass on genetic diversity and application[J]. Chinese Journal of Grassland, 2002(2): 49−54.

[12] Li J J, Guo H L, Zong J Q, et al. Genetic diversity in centipedegrass [*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.][J]. Horticulture Research, 2020, 7(1): 4.

[13] Wang J J, Zi H, Wang J, et al. A high-quality chromosome-scale

assembly of the centipedegrass [*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.] genome provides insights into chromosomal structural evolution and prostrate growth habit[J]. Horticulture Research, 2021, 8: 201.

[14] 刘一明, 郇恒福, 丁西朋, 等. 55 份不同生态型假俭草的耐盐性评价 [J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2261−2271.
Liu Y M, Huan H F, Ding X P, et al. Evaluation of salinity tolerance of 55 centipedegrass ecotypes[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(11): 2261−2271.

[15] 宗俊勤, 牛佳伟, 徐芳, 等. 假俭草花序发育的形态学观察及其与物候期和积温的对应关系 [J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(5): 50−57.
Zong J Q, Niu J W, Xu F, et al. Morphological observation on inflorescence development of *Eremochloa ophiuroides* and its corresponding relationships with phenophase and accumulated temperature[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2021, 30(5): 50−57.

[16] 赵琼玲, 白昌军, 梁晓玲. 中国假俭草种质资源遗传多样性的 ISSR 分析 [J]. 热带作物学报, 2011, 32(1): 110−115.
Zhao Q L, Bai C J, Liang X L. An analysis by ISSR of genetic diversity in *Eremochloa ophiuroides* in China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(1): 110−115.

[17] 霍尚峰, 白史且, 张新全, 等. 我国野生假俭草坪用价值研究 [J]. 中国草地, 2004, 26(2): 50−54.
Huo S F, Bai S Q, Zhang X Q, et al. Assessment on turf quality of centipedegrass[J]. Grassland of China, 2004, 26(2): 50−54.

[18] 刘建秀, 朱雪花, 郭爱桂, 等. 中国假俭草结实性的比较分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2003, 12(4): 21−26.
Liu J X, Zhu X H, Guo A G, et al. The analysis on the fruit characters of *Eremochloa ophiuroides* in China[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2003, 12(4): 21−26.

[19] 宗俊勤, 郭爱桂, 刘建秀. 中国假俭草种质资源物候期的变异分析 [J]. 中国草地学报, 2006, 28(6): 61−67.
Zong J Q, Guo A G, Liu J X. Study on phenological period of germplasm resource of *Eremochloa ophiuroides* (Munro.) Hack[J]. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(6): 61−67.

[20] 白史且, 苟文龙, 张新全, 等. 不同居群假俭草叶片比较解剖学的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 36−40, 98.
Bai S Q, Gou W L, Zhang X Q, et al. Comparative anatomy of leaves in different populations of centipedegrass[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(2): 36−40, 98.

[21] 朱颖墨, 窦小东, 王瑞芳, 等. 气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响 [J]. 气象学报, 2021, 79(5): 878−887.
Zhu Y M, Dou X D, Wang R F, et al. Climate change impact on the region suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan Province[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(5): 878−887.

[22] 唐燕, 赵儒楠, 任钢, 等. 基于 MaxEnt 模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23–32.
Tang Y, Zhao R N, Ren G, et al. Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 23–32.

[23] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445−456.
Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6)[J]. Advances in Climate Change Research, 2019, 15(5): 445−456.

[24] 何馨, 马文旭, 赵天田, 等. 气候变化下濒危树种华榛的潜在适生区预测 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(1): 104−114.
He X, Ma W X, Zhao T T, et al. Potential suitable area prediction of endangered tree species *Corylus chinensis* under climate change[J]. Forest Research, 2022, 35(1): 104−114.

[25] Li Y, Shao W, Jiang J. Predicting the potential global distribution of *Sapindus mukorossi* under climate change based on MaxEnt modelling[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(15): 21751−21768.

[26] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3−4): 231−259.

[27] Zhang L, Zhu L, Li Y, et al. Maxent modelling predicts a shift in suitable habitats of a subtropical evergreen tree (*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted) under climate change scenarios in China[J]. Forests, 2022, 13(1): 126.

[28] Kumar A, Kumar A, Adhikari D, et al. Ecological niche modeling for assessing potential distribution of *Pterocarpus marsupium* Roxb. in Ranchi, eastern India[J]. Ecological Research, 2020, 35(6): 1095−1105.

[29] Li J J, Fan G, He Y. Predicting the current and future distribution of three *Coptis* herbs in China under climate change conditions, using the MaxEnt model and chemical analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 698(1): 134141.

[30] 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 496−502.
Zhang Y B, Liu Y L, Qin H, et al. Predication on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 496−502.

[31] Yue T X, Fan Z M, Chen C F, et al. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios[J]. Ecological Modelling, 2011, 22: 2342−2361.

[32] 安徽植物志协作组. 安徽植物志 [M]. 5 卷. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992: 335−336.
Anhui Flora Cooperative Group. Anhui flora [M]. Vol. 5. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1992: 335−336.

[33] 刘建秀, 贺善安. 暖季草坪草种质资源的研究与改良 [J]. 国外畜牧学 (草原与牧草), 1996(3): 12−21.
Liu J X, He S A. Research and improvement of warm season turfgrass germplasm resources[J]. Grassland and Turf, 1996(3): 12−21.

[34] Johnson B J, Carrow R N. Frequency of fertilizer applications and centipedegrass performance[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(6): 925−929.

[35] 刘金平, 毛凯, 游明鸿. 假俭草草坪管理技术研究 [J]. 四川草原, 2001(4): 37−40.
Liu J P, Mao K, You M H. The study on the management technique of centipedegrass turf[J]. Journal of Sichan Grassland, 2001(4): 37−40.

[36] 詹瑞琪, 陈碧娥, 杨亚新. 假俭草在厦门地区的种植现状及推广前景 [C]//中国草学会草坪专业委员会第六届全国会员代表大会及第九次学术研讨会论文汇编. 北京：中国草学会, 2004:

153−154.
Zhan R Q, Chen B E, Yang Y X. Planting status and promotion prospect of centipedegrass in Xiamen area[C]// Compilation of papers of the 6th national member congress and 9th Academic Seminar of Turf Professional Committee of Chinese Grassland Society. Beijing: Chinese Grassland Society, 2004: 153−154.

[37] 肖建华, 丁鑫, 蔡超男, 等. 闽楠 (*Phoebe bournei*, Lauraceae) 地理分布及随气候变化的分布格局模拟 [J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5703−5712.
Xiao J H, Ding X, Cai C N, et al. Simulation of the potential distribution of *Phoebe bournei* with climate changes using the maximum-entropy (MaxEnt) model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5703−5712.

[38] Khodorova N V, Bitel-Conti M. The role of temperature in the growth and flowering of geophytes[J]. Plants, 2013, 2(4): 699−711.

[39] 孙存华, 毛健民, 白宝璋, 等. 昼夜变温促进小麦幼苗生长的酶学研究 [J]. 吉林农业大学学报, 2000, 22(1): 30−33.
Sun C H, Mao J M, Bai B Z, et al. Studies of enzymology on diurnal change of temperature accelerating the rate of wheat seedling growth[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2000, 22(1): 30−33.

[40] 郭岐峰, 李殷洋, 卢丽群. 广西昼夜气温的分析及其在农业上的意义 [J]. 广西气象, 1992(4): 17−24.
Guo Q F, Li Y Y, Lu L Q. Analysis of day and night temperature in Guangxi and its significance in agriculture[J]. Journal of Guangxi Meteorology, 1992(4): 17−24.

[41] 陈志一. 草坪栽培管理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1993: 62−64.
Chen Z Y. Turf management[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1993: 62−64.

[42] 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]. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(7): 1−7.
Guo Y B, Mo K, Wang G R, et al. Analysis of prediction and spatial-temporal changes of suitable distribution of *Gastrodiae rhizoma* under future climate conditions[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese, 2022, 29(7): 1−7.

[43] 刘婷, 曹家豪, 齐瑞, 等. 基于 GIS 和 MaxEnt 模型分析气候变化背景下紫果云杉的潜在分布区 [J]. 西北植物学报, 2022, 42(3): 481−491.
Liu T, Cao J H, Qi R, et al. Research of potential geographical distribution of *Picea purpurea* based on GIS and MaxEnt under different climate conditions[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(3): 481−491.

[44] 刘济铭, 贾黎明, 王连春, 等. 基于 MaxEnt 的中国无患子属适生区区划及生态特征 [J]. 林业科学, 2021, 57(5): 1−12.
Liu J M, Jia L M, Wang L C, et al. Potential distribution and ecological characteristics of genus *Sapindus* in China based on MaxEnt model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5): 1−12.

[45] 杜海波, 吴正方, 张娜, 等. 近 60a 丹东极端温度和降水事件变化特征 [J]. 地理科学, 2013, 33(4): 473−480.
Du H B, Wu Z F, Zhang N, et al. Characteristics of extreme temperature and precipitation events over Dandong during the last six decades[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(4): 473−480.

[46] 刘建秀, 郭爱桂, 郭海林, 等. 中国主要暖季型草坪草种质资源研究进展 [C]//中国草学会草坪专业委员会第六届全国会员代表大会及第九次学术研讨会论文汇编. 北京: 中国草学会, 2004: 59−64.
Liu J X, Guo A G, Guo H L, et al. Research progress on germplasm resources of main warm-season turfgrasses in China[C]// Compilation of papers of the 6th National Congress and the 9th Symposium of the Turf Committee of the Chinese Society of Turf. Beijing: Chinese Grassland Society, 2004: 59−64.

[47] 关心怡, 石慰, 曹坤芳. 未来气候变化对广布种麻栎地理分布的影响和主导气候因子分析 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(6): 661−668.
Guan X Y, Shi W, Cao K F. Effect of climate change in future on geographical distribution of widespread *Quercus acutissima* and analysis of dominant climatic factors[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(6): 661−668.

[48] 叶学敏, 陈伏生, 孙荣喜, 等. 基于 MaxEnt 模型的南酸枣潜在适生区预测 [J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(3): 440−446.
Ye X M, Chen F S, Sun R X, et al. Prediction of potential suitable distribution areas for *Choerospondias axillaris* besed on MaxEnt model[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(3): 440−446.

[49] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 全球和中国降水、旱涝变化的检测评估 [J]. 科技导报, 2008(6): 28−33.
Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y, et al. Assessment and prediction of precipitation and droughts/floods changes over the world and in China[J]. Science & Technology Review, 2008(6): 28−33.

[50] 熊中人, 张晓晨, 邹旭, 等. 中国天山花楸适生区预测及其对气候变化的响应 [J]. 生态科学, 2019, 38(5): 44−51.
Xiong Z R, Zhang X C, Zou X, et al. Prediction of the suitable distribution and responses to climate change of *Sorbus tianschanica* in China[J]. Ecological Science, 2019, 38(5): 44−51.

[51] 张明珠, 叶兴状, 李佳慧, 等. 气候变化情景下长序榆在中国的潜在适生区预测 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3822−3835.
Zhang M Z, Ye X Z, Li J H, et al. Prediction of potential suitable area of *Ulmus elongata* in China under climate change scenarios[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(12): 3822−3835.

[52] 李建林, 唐旭清. 气候变化对陆地生态系统影响评估模型的研究进展 [J]. 草原与草坪, 2014(6): 86−93.
Li J L, Tang X Q. The research progress on assessment model of ecosystem under global climate change[J]. Grassland and Turf, 2014(6): 86−93.

[53] 黄晓莹, 温之平, 杜尧东, 等. 华南地区未来地面温度和降水变化的情景分析 [J]. 热带气象学报, 2008, 24(3): 254−258.
Huang X Y, Wen Z P, Du Y D, et al. Scenario analysis om the changes of future surface air temperature and precipitation in south China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 24(3): 254−258.

（责任编辑 李雅文
责任编委 董世魁）