

DOI: 10.20103/j.stxb.202210212992

张彦静, 斯琴, 胡洁, 陈菁, 王晨彬, 谢锐, 马方舟. 气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布预测. 生态学报, 2023, 43(21): 8852-8864.

Zhang Y J, Si Q, Hu J, Chen J, Wang C B, Xie R, Ma F Z. Prediction of the potential geographical distribution of the invasive plant *Gymnocoronis spilanthoides* in China under climate change. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8852-8864.

气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布预测

张彦静¹, 斯琴¹, 胡洁¹, 陈菁¹, 王晨彬¹, 谢锐², 马方舟^{1,*}

¹ 生态环境部南京环境科学研究所国家环境保护生物安全重点实验室, 南京 210042

² 华南农业大学植物保护学院, 广州 510642

摘要:外来入侵植物裸冠菊(*Gymnocoronis spilanthoides*)具有较强的入侵适应性能快速繁殖扩散,会对本土物种的生长繁殖及本地生态安全、景观格局等产生不良影响。基于 265 个有效分布点和 7 个环境变量,调整优化预测模型的调控倍频和特征组合参数,应用 MaxEnt、ArcGIS、R 软件预测当前和未来(2050s, 2070s)不同气候情景(SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)下裸冠菊在中国的潜在地理分布,定量分析其适生区的空间变化及质心移动轨迹,最后采用受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)和测试遗漏率评估模型的精确性。未来气候模式选择中国国家气候中心开发的 CMIP6 中 BCC-CSM2-MR。结果表明:(1)模型预测结果极准确,各组模型的 AUC 值均高于 0.97;(2)最干季降水量(bio17)、最冷季度平均温(bio11)、温度季节性变化(bio4)和最暖季度平均降雨量(bio18)是影响裸冠菊地理分布的主导气候因子;(3)当前气候条件下,裸冠菊的总适生区面积达到 $191.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占国土总面积的 19.9%,其中高适生区主要分布于我国湖南西北部、浙江东北角、台湾、广东和广西零星区域等;(4)未来气候变化情境下,裸冠菊的总适生面积和低适生面积均比当前气候条件下预测的面积大,且呈现沿低适生区边缘向北扩散的趋势,其中 2050s 的 SSP245 情境下总适生区面积增加的最多,达到 $216.64 \times 10^4 \text{ km}^2$;(5)未来气候变化情境下,裸冠菊适生区扩增或收缩的变动区域主要集中于四川东北部和南部、陕西南部、河南南部、湖北北部、安徽北部、江苏北部。总体上看,裸冠菊在中国的潜在分布未达到饱和,呈现以长江以南为中心,向北辐射扩散趋势。从当前到未来(2050s, 2070s),裸冠菊适生区的分布质心变化大体方向是先向东北迁移,再向西南迁移。对裸冠菊在中国的潜在分布格局及对气候变化的响应研究,将有助于对其进行早期防控减少入侵所带来的危害。

关键词:裸冠菊;MaxEnt;地理分布预测;全球气候变化

Prediction of the potential geographical distribution of the invasive plant *Gymnocoronis spilanthoides* in China under climate change

ZHANG Yanjing¹, SI Qin¹, HU Jie¹, CHEN Jing¹, WANG Chenbin¹, XIE Rui², MA Fangzhou^{1,*}

¹ Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecological Environment, Nanjing 210042, China

² College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: *Gymnocoronis spilanthoides*, an invasive alien plant, has strongly invasive adaptability and rapid propagation and spread, which will adversely affect the growth and reproduction of native species, local ecological security, landscape pattern, etc. Based on 265 effective distribution points and 7 environmental variables of *Gymnocoronis spilanthoides*, MaxEnt, ArcGIS and R software were used to construct predictive models of suitable habitats for *Gymnocoronis spilanthoides* in China under current climate and 4 climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) for two future time periods (2050s, 2070s), while the regularization multiplier (RM) and feature combination (FC) of MaxEnt predictive model are

基金项目:重点研发计划项目号(2021YFC2600400);生态环境部生物多样性保护专项;海南省重要外来入侵物种对生物多样性的风险评估项目(HX-QT-202111-0605)

收稿日期:2022-10-21; **网络出版日期:**2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangzhouma@163.com

adjusted and optimized. The ultimate aim was to quantitatively demonstrate the potentially geographical distribution change of *Gymnocoronis spilanthoides* in China, variations in the area of suitable habitat and the movement path of the center of distribution. The BCC-CSM2-MR model developed by the National Climate Center of China in CMIP6 was used as a model for predicting future climate conditions. The results showed that: (1) the prediction accuracy of the MaxEnt model was extremely high, and area under the curve (AUC) of the test subject working characteristic (ROC) of each group of the MaxEnt models was higher than 0.97. (2) Precipitation of the driest quarter (bio17), mean temperature of the coldest quarter (bio11), temperature seasonality (bio4), and precipitation of the warmest quarter (bio18) were the dominant climatic factor influencing the geographical distribution of *Gymnocoronis spilanthoides*. (3) Under the current climatic conditions, the total suitable area of the potentially geographical distribution of *Gymnocoronis spilanthoides* would be $191.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for about 19.9% of the national land area, and highly suitable habitats mainly distributed in the northwest of Hunan, the northeast corner of Zhejiang, Taiwan, Guangdong and Guangxi sporadic areas. (4) Under the future climate change scenario, the total suitable area and the low suitable area for *Gymnocoronis spilanthoides* growth would be greater than the total suitable area under the current climate conditions, and the spread trend of suitable area would be shown along the edge of the low suitable area to the north. In the 2050s, the total suitable area for *Gymnocoronis spilanthoides* would increase mostly, reaching $216.64 \times 10^4 \text{ km}^2$. (5) Under the future climate change situation, the change areas of the expansion or reduction of suitable habitats would be mainly concentrated in northeast and south Sichuan, southern Shaanxi, southern Henan, northern Hubei, northern Anhui, and northern Jiangsu. In general, the distribution of *Gymnocoronis spilanthoides* in China had not reached saturation, showing radiation diffusion centered on the south of the Yangtze River and radiating to north. The distribution center of *Gymnocoronis spilanthoides* from the current to the future (2050s, 2070s) the general direction of change was found to migrate first to the northeast and then to the southwest. Researching the potentially geographical distribution patterns and responses to climate change of invasive plant *Gymnocoronis spilanthoides* on a regional scale is great significance for the prevention and control of it, thereby can also reduce the harm caused by it.

Key Words: *Gymnocoronis spilanthoides*; MaxEnt; prediction of geographical distribution; global climate change

入侵生物是导致生物多样性丧失的重要因素之一,对生态系统和经济发展产生了不可预估的影响。然而由于全球气候变暖,中国近地面温度呈显著上升趋势,陆地区域平均气温上升了 0.9—1.5℃,高于全球的平均水平,这将可能引起中国外来植物的加速入侵、定殖、建群和扩散^[1-2],进而影响物种分布、繁殖发育、生物多样性和栖息地生境等^[3-5]。因此研究物种对气候变化的响应以及预测气候变化情景下物种的潜在地理分布变化和质心迁移,是制定入侵种防控策略以阻断入侵种群蔓延的重要途径^[6]。

生态位模型(ecological niche models, ENMs)基本原理是利用外来入侵物种已知分布数据和气候因子的关系,模拟该物种在原产地生长所需的生态环境要求,进而投影至不同空间或时间中预测物种的潜在分布。该方法常用于预测非本土生物的潜在适生区分布^[7-8],可识别入侵种的高风险区,并可作为管理生物入侵的一种有效方法^[9-10],如塞依丁·海米提等^[11]基于生态位模型对入侵植物刺苍耳(*Xanthium spinosum*)在新疆的潜在分布格局进行研究,识别出苍耳在新疆的极高入侵风险区,并针对苍耳的适生区提出建立 2 条隔离监测带,预防其向新疆东北部和南部扩散的建议。Maxent 生态位模型是一种基于最大熵原理的机器学习软件^[12],可以根据环境约束条件,估计物种发生的分布概率,与其他生态位模型相比,能够较好地处理预测变量之间复杂的交互作用,在预测精准度和稳定性等方面更具有优越性,因而被广泛应用于动物栖息地预测^[13-15]、濒危物种预测与保护^[16-19]、病虫害防治等研究领域^[20-21]。Maxent 生态位模型也多次应用于入侵植物的适宜区分布及质心变化^[22-24],说明其适合对入侵物种潜在适生区进行预测。

裸冠菊(*Gymnocoronis spilanthoides*)隶属于菊科裸冠菊属,是入侵河流湿地的多年生草本植物。原产于南

美洲热带和亚热带地区^[25],目前已入侵至匈牙利^[26-28]、意大利^[29]、荷兰^[30]、中国^[31-32]、日本^[33-34]、澳大利亚^[35]、印度^[35-36]、新西兰^[37-38]等地区。2007a,高天刚在我国广西阳朔首次发现裸冠菊^[31],目前已入侵至我国云南^[39]、台湾^[31]、浙江^[32]、广东^[40]、四川^[41-42]等地。裸冠菊入侵性的主要表现:繁殖速度快。扩散能力强。裸冠菊可进行营养繁殖,掉落的茎叶,甚至是叶片碎片都可以繁殖为新植株^[29],主要通过水流扩散,其种子主要通过水和粘在动物或机械上的泥土扩散^[35,43];生长速度快,成年个体在最佳条件下的生长速度可达到每周约 15cm,可短时间严密覆盖其生存的周边水域^[29];种子存活时间久,发芽温度范围广^[29]。当种子半埋或位于土壤表面时可存活约 3a,完全埋在土壤中可存活 16a^[35,43],而且可在冬季低温下存活并发芽^[29,43];耐寒性强能抵抗霜冻,可以在冬季低温下生存,还可能在低温水下存活^[29,42-43]。裸冠菊大量发生会产生以下危害:限制水下植物和其他挺水植物的生长,减少风引起的水柱,导致溶解氧减少,甚至是缺氧,对鱼类和无脊椎动物造成严重影响^[29];植株死亡后腐烂,影响水质,郁闭河道,阻碍水流,导致河流泄洪能力和通航能力减弱^[30];在湿地生境中生长繁殖迅速,排挤其他种群,导致湿地生态景观单一^[35,44]。鉴于裸冠菊的种子存活时间久,繁殖速度快,扩散能力强,致使清除该物种难度大,成本高^[30],因此 EPPO 将其列入有害生物预警名单进行管理^[45]、新西兰《1993 年生物安全法案》宣布其为有害生物^[44]、澳大利亚将其列入联邦环境杂草警报名单^[36]、日本的《外来入侵物种法》将其指定为外来入侵物种^[46]。目前,我国关于裸冠菊的研究主要集中在新归化物的发现^[31-32,39-42]、基因组序列^[47]等方面,对于裸冠菊基于生态位模型在气候变化下潜在适生区分布预测方面还未有研究。因此本文基于 Maxent 模型预测裸冠菊在当前和未来(2050s、2070s)4 个不同气候情景(SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)下的潜在适生区变化及质心迁移情况,同时鉴别出需重点布控的高适生区,明确裸冠菊在我国的潜在分布状况,为其在我国预防和控制提供有效的理论依据。

1 材料和方法

1.1 裸冠菊分布数据筛选

裸冠菊的地理分布点数据来源于文献查阅和共享数据(<http://www.GBIF.org>),共收集到 648 条分布点信息。为降低采样偏差,利用 ArcGIS 对收集的物种分布点进行筛选,先删除不在陆地上的分布点;再删除分辨率为 2.5min 栅格内重复的分布点,以便确保每个栅格中只保留一个分布点;最后删除经纬度信息有误的分布点。最终筛选得到 265 个有效分布点(图 1),中国地理地图来源于自然资源部标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),审图号:GS(2022)1873。



图 1 裸冠菊的全球筛选点位分布图

Fig.1 Screened geographical distribution points of *Gymnocoronis spilanthoides* in the global

1.2 裸冠菊环境变量筛选

本研究所用的当前气候数据 (1970—2000a) 以及未来气候数据 (2050s, 2070s) 均下载于 (<http://www.worldclim.org>), 包括 19 个有关温度和降水的气候变量, 分辨率均为 2.5min。未来气候数据模式选择第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 中国 (北京) 气候中心中等分辨率气候系统模式 (BCC-CSM2-MR), 未来气候变化情景包括四种共享社会经济路径情景 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585。SSP126 情景代表低脆弱性、低减缓压力和低辐射强迫的综合影响; SSP245 情景代表代表了中等社会脆弱性与中等辐射强迫的组合; SSP370 情景代表高社会脆弱性与相对高的人为辐射强迫的组合; SSP585 情景代表高强度情景^[48]。

过多的环境变量容易增加生态空间的维度, 不利于模型预测, 因此本研究对环境变量进行了科学筛选。首先利用 ArcGIS 中的多值提取模块, 将 19 个气候因子提取至样点, 再调用 R 软件包中的 ENMTools 工具进行相关性分析 (图 2), 结合 Jackknife 刀切法重要性值, 去除相关系数 $|r| \geq 0.80$ 且对模型的贡献率较小的气候变量, 最终筛选出 7 个气候变量 (表 1): 平均气温日较差 (bio2)、温度季节性变化 (bio4)、最暖月最高温度 (bio5)、最冷季度平均温度 (bio11)、年均降水量 (bio12)、最干季度降水量 (bio17)、最暖季度降水量 (bio18)。

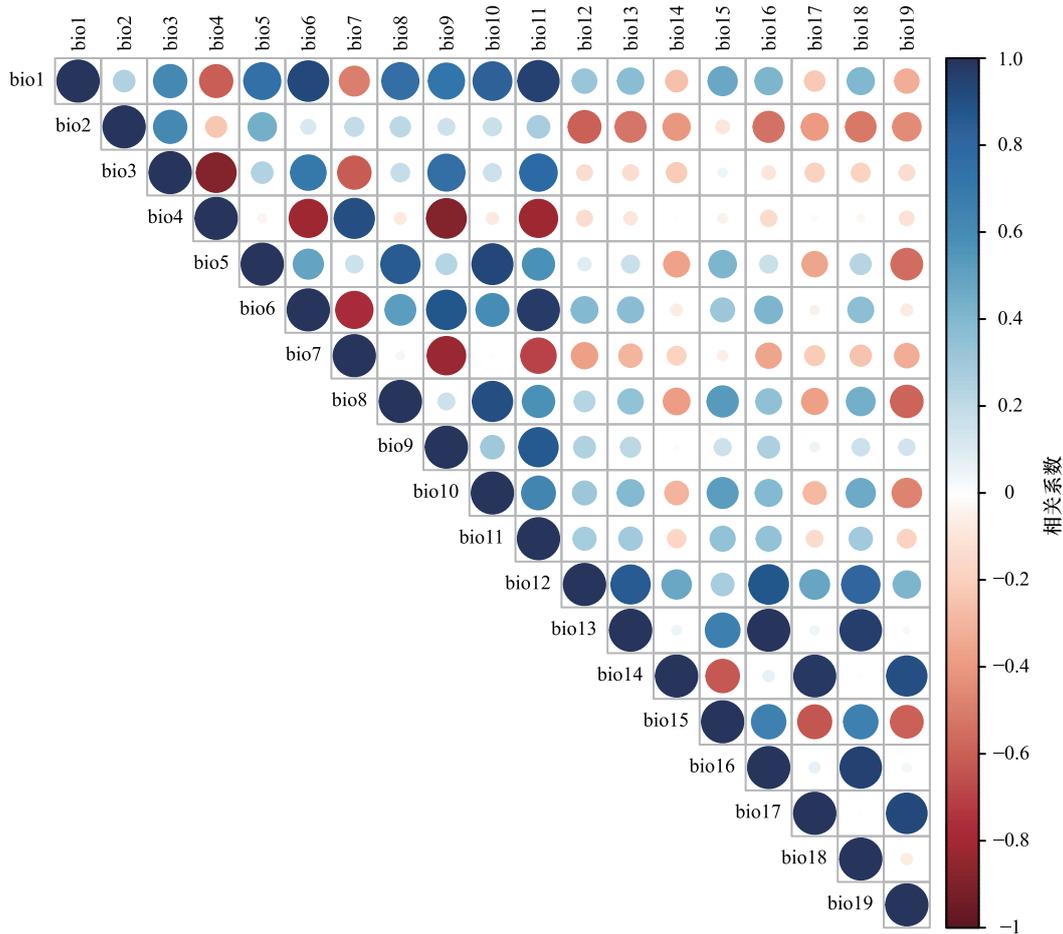


图 2 19 个气候变量的相关性分析
 Fig.2 Correlation analysis of 19 bio-climatic variables

1.3 模型优化和运行

MaxEnt 模型对采样偏差敏感且易产生过度拟合, 直接运行 MaxEnt 模型的默认参数预测结果不可靠^[12]。调控倍率 (regularization multiplier, RM) 和特征组合 (feature combination, FC) 是影响 MaxEnt 模型复杂度的重要因素。本研究以每次 0.5 的间隔设置调控倍频, 范围从 0.5 到 4, 并采用 L、LQ、LQH、LQHP、LQHPT、QHP、

QHPT、HPT 这 8 个特征组合,将这 64 种参数组合对 MaxEnt 模型进行优化,结果采用最小信息准则 AICc 值 (the minimum formation criterion AICc value, deltaAICc) 和训练 AUC 和测试 AUC 值之差 (Difference between the AUC values, avg.AUCDIFF) 来检验 MaxEnt 模型的拟合度与复杂度^[49]。

表 1 筛选的影响裸冠菊分布的气候变量

Table 1 Screened climatic variables affecting the distribution of *G. spilanthoides*

代码 Code	描述 Description	单位 Unit	是否用于裸冠菊建模 Weather to use <i>G. spilanthoides</i> for Modeling	代码 Code	描述 Description	单位 Unit	是否用于裸冠菊建模 Weather to use <i>G. spilanthoides</i> for Modeling
bio1	年平均气温	℃	否	bio11	最冷季度平均温度	℃	是
bio2	平均气温日较差	℃	是	bio12	年均降水量	mm	是
bio3	等温性	℃	否	bio13	最湿月降水量	mm	否
bio4	温度季节性变化	/	是	bio14	最干月降水量	mm	否
bio5	最暖月最高温度	/	是	bio15	降水量季节性变化	/	否
bio6	最冷月最低温度	℃	否	bio16	最湿季降水量	mm	否
bio7	年均温度变化范围	℃	否	bio17	最干季降水量	mm	是
bio8	最湿季度平均温度	℃	否	bio18	最暖季度降水量	mm	是
bio9	最干季度平均温度	℃	否	bio19	最冷季度降水量	mm	否
bio10	最暖季度平均温度	℃	否				

运行 MaxEnt 模型时,调控倍率和特征组合采用优化后的参数,选择 25% 的已知分布点作为随机检验数据集,并设置输出格式为“Cloglog”^[50],重复运行 10 次,重复迭代方式“Subsample”,最大迭代次数 5000,并勾选刀切法 (Jackknife)、响应曲线 (response curve) 和输出格式“asc”,其余参数选择默认。

1.4 模型的评估和输出

MaxEnt 模型预测结果采用遗漏率和 ROC 曲线的线下面积 AUC 值进行准确性检验。如果测试遗漏率与理论遗漏率越接近,则表明构建的模型精度越高^[51]。AUC 值取值范围为 0—1,通常 AUC 值 ≤ 0.6 ,认为预测结果失败; $0.6 < \text{AUC 值} \leq 0.7$ 时,认为预测结果为较差;当 $0.7 < \text{AUC 值} \leq 0.8$ 时,认为预测结果一般; $0.8 < \text{AUC} \leq 0.9$ 时,认为预测结果为准确;当 $0.9 < \text{AUC} \leq 1.0$ 时,认为预测结果极准确^[51]。

MaxEnt 模型自动输出 10 次模拟结果的平均值,输出结果为 0—1 的适生逻辑指数,值越高代表裸冠菊的适生适宜指数越高。选用 minimum training presence cloglog threshold 作为最低存在阈值 (the lowest presence threshold, LPT) 来定义适生区类型^[12],将裸冠菊适生区划分为 4 类:非适生区 (0.0—LPT)、低适生区 (LPT—0.4)、中适生区 (0.4—0.6) 和高适生区^[50,52]。

为更直观地显示在不同气候情景下裸冠菊在中国的潜在适生区变化,用 ArcGIS 软件中的栅格图层属性表计算不同适生区的占比和面积,用 SDMTools 工具分析裸冠菊适生区的稳定、扩张、收缩区域及适生区质心变化情况,最后绘制出裸冠菊潜在适生区变化图和质心迁移路线图。

2 结果

2.1 模型优化及准确性评价

模型优化结果表明,当调控倍频 (RM) 为 0.5,特征组合 (FC) 为 QHPT 时,deltaAICc 值为 0,且优化后的最小信息准则和训练集 AUC 与测试集 AUC 差值 (avg.AUCDIFF) 均低于默认值 (图 3),说明优化后的参数有

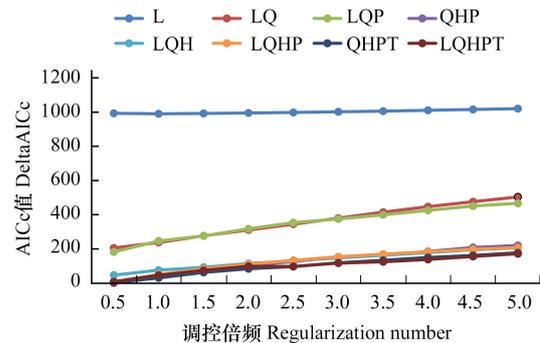


图 3 R 包 ENMeval 结果

Fig.3 Results of ENMeval of R package

利于降低模型的拟合度和复杂度。优化参数条件下的 MaxEnt 模型预测遗漏率与测试样本基本吻合(图 4)。当前气候条件下 MaxEnt 模型预测的 AUC 值为 0.973,未来不同气候情景下 MaxEnt 模型预测的 AUC 值均大于 0.975(表 2),预测结果均达到“极准确”(0.9<AUC≤1.0)的标准。

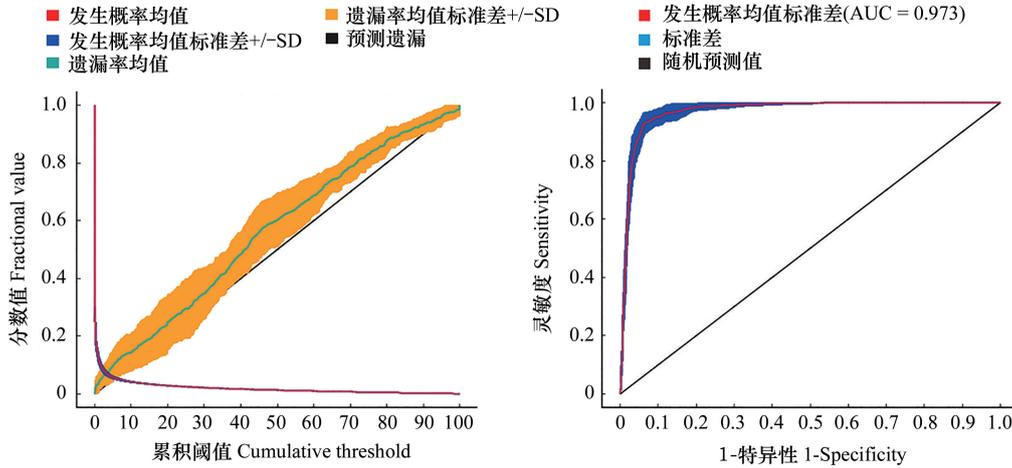


图 4 裸冠菊的遗漏率和 ROC 曲线

Fig.4 The omission rate and ROC of *G. spilanthoides*

ROC: 受试者工作特征曲线 The working characteristic curve of the subjects

表 2 未来气候情景的裸冠菊 AUC 值

Table 2 AUC values of *G. spilanthoides* under the future climatic scenarios

气候变化情景 Climate change scenario	年份 Year	AUC 值 AUC value	气候变化情景 Climate change scenario	年份 Year	AUC 值 AUC value
低强迫情景 SSP126 Low compulsion scenario SSP126	2041—2060 2061—2080	0.978 0.978	中等至高等强迫情景 SSP370 Moderate compulsive scenario SSP370	2041—2060 2061—2080	0.980 0.976
中等强迫情景 SSP245 Moderate compulsive scenario SSP245	2041—2060 2061—2080	0.975 0.978	高等强迫情景 SSP585 High compulsion scenario SSP585	2041—2060 2061—2080	0.978 0.976

AUC: 受试者工作特征曲线下面积 The area under the subject curve

2.2 影响裸冠菊分布的主导气候因子

对裸冠菊分布影响较大的 7 个气候因子进行刀切法重要度比较(表 3),贡献率排名前 3 的气候因子依次为:最干季降水量(bio17, 27.4%)、最冷季度平均温(bio11, 23.5%)、温度季节变化(bio4, 17.2%),累计贡献率为 68.1%;置换重要值排前三位的气候因子变量为:最干季度降水量(bio17, 35%)、温度季节性变化(bio4, 24)、最暖季度平均降雨量(bio18, 15),累计值为 74%;不同气候因子刀切法的正规化训练增益(图 5),排名前 3 的气候因子依次为年降雨量 bio12、温度季节变化 bio4、最干季度降雨量 bio17。综上所述,最干季降水量(bio17)、最冷季度平均温(bio11)、温度季节性变化(bio4)、最暖季度平均降雨量(bio18)这四个气候因子是影响裸冠菊地理分布的主导气候因子。一般认为,当分布概率大于 0.5 时,其对应的生态因子值适宜物种的生长^[21],bio17 适宜范围 160—400mm,bio11 适宜范围为 5—20℃,bio4 适宜范围 300—500,bio18 适宜范围为 260—1800mm。

2.3 当前气候条件下裸冠菊在中国的潜在适生区分布

当前气候条件下,裸冠菊在中国的潜在适生区主要分布于华南及华中和西南的部分区域(经度 92°E—123°E、纬度 19°N—33°N)(图 6),总适生区面积达到 191.18×10⁴km²,约占国土总面积的 19.9%。其中高适生区面积 7.62×10⁴km²,约占国土总面积的 0.8%,主要分布于我国湖南西北部、浙江东北角、台湾、广东和广西的零星区域;中适生区面积 47.76×10⁴km²,约占国土总面积的 5%,主要分布于广西中东部、广东、湖南南部、江

西南部、福建中西部、浙江南部、海南零星区域等；低适生区面积 $135.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占国土总面积的 14.1%，主要分布于云南、四川东南部、重庆、贵州、广西西部、广东零星区域、海南中西部、湖南东部、湖北中南部、江西西部、安徽、福建东部、浙江中东部、江苏南部等；其余区域为非适生区。

表 3 裸冠菊筛选的气候因子及其贡献率和置换重要值

Table 3 The percent contribution and permutation importance of the selected climate factors of *G. spilanthoides*

变量 Variable	贡献率 Percent contribution	置换重要值 Permutation importance
最干季度降水量 Precipitation of driest quarter (bio17)	27.4	35
最冷季度平均温 Mean temperature of coldest quarter (bio11)	23.5	13
温度季节性变化 Temperature seasonality (bio4)	17.2	24
年均降水量 Annual precipitation (bio12)	15.1	4.5
最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter (bio18)	12.6	15
最暖月最高温度 Maximum temperature of warmest month (bio5)	2.3	6.2
平均气温日较差 Mean diurnal range (bio2)	1.9	2.4

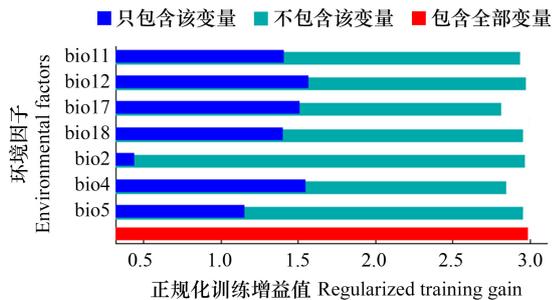


图 5 筛选的气候因子对裸冠菊潜在分布预测模型的 Jackknife 检验得分

Fig.5 Jackknife test scores for selected climate factors on the model of potential distribution of plants *G. spilanthoides*

bio11, 最冷季度平均温度; bio12, 年均降水量; bio17, 最干季度降水量; bio18, 最暖季度降水量; bio2, 平均气温日较差; bio4 温度季节性变化; bio5, 最暖月最高温度

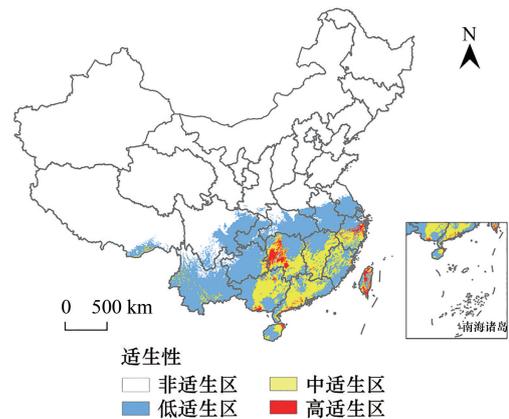


图 6 当前气候条件下裸冠菊在中国的潜在适生区分布

Fig.6 Potential distribution of *G. spilanthoides* in China under the current climate condition

2.4 未来气候情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布

与当前气候条件预测结果相比,未来气候情景下裸冠菊潜在总适生面积均在增大,低适生面积也均在增大(图 7,表 4)。2050s 的 SSP245 情景下,总适生面积增加的最多,增多量达 $25.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2070s 的 SSP370 情景下,低适生面积增加最多,增多量达 $47.93 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。当前预测的裸冠菊中—高适生区面积为 $55.36 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占国土面积的 5.8%。未来不同气候情景下,预测的中—高适生区面积均在不断减少。2070s 的 SSP370 情景下中—高适生区面积减少最多,减少量达 $44.03 \times 10^4 \text{ km}^2$,除了 SSP126 情景下中—高适生区面积外,其余 3 种情景 2050s 的中—高适生区面积均大于 2070s。

未来不同气候情景下,裸冠菊的潜在适生区变化情况不一致,但 2050s 的 4 种不同路径情景下的预测结果均表明我国海南东北部、台湾、浙江东部沿海、湖南西南部、贵州东部、广东西南部等区域是裸冠菊的高适生区;2070s 的 SSP126 和 SSP245 情景下的高适生区分布情况与 2050s 基本一致,而 SSP370 和 SSP585 两种情景下的高适生区分布面积缩减明显。

2.5 气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区变化

气候变化情景下,裸冠菊在中国的潜在适生区主要集中在海南、广东、广西、云南、贵州、四川东部、重庆、

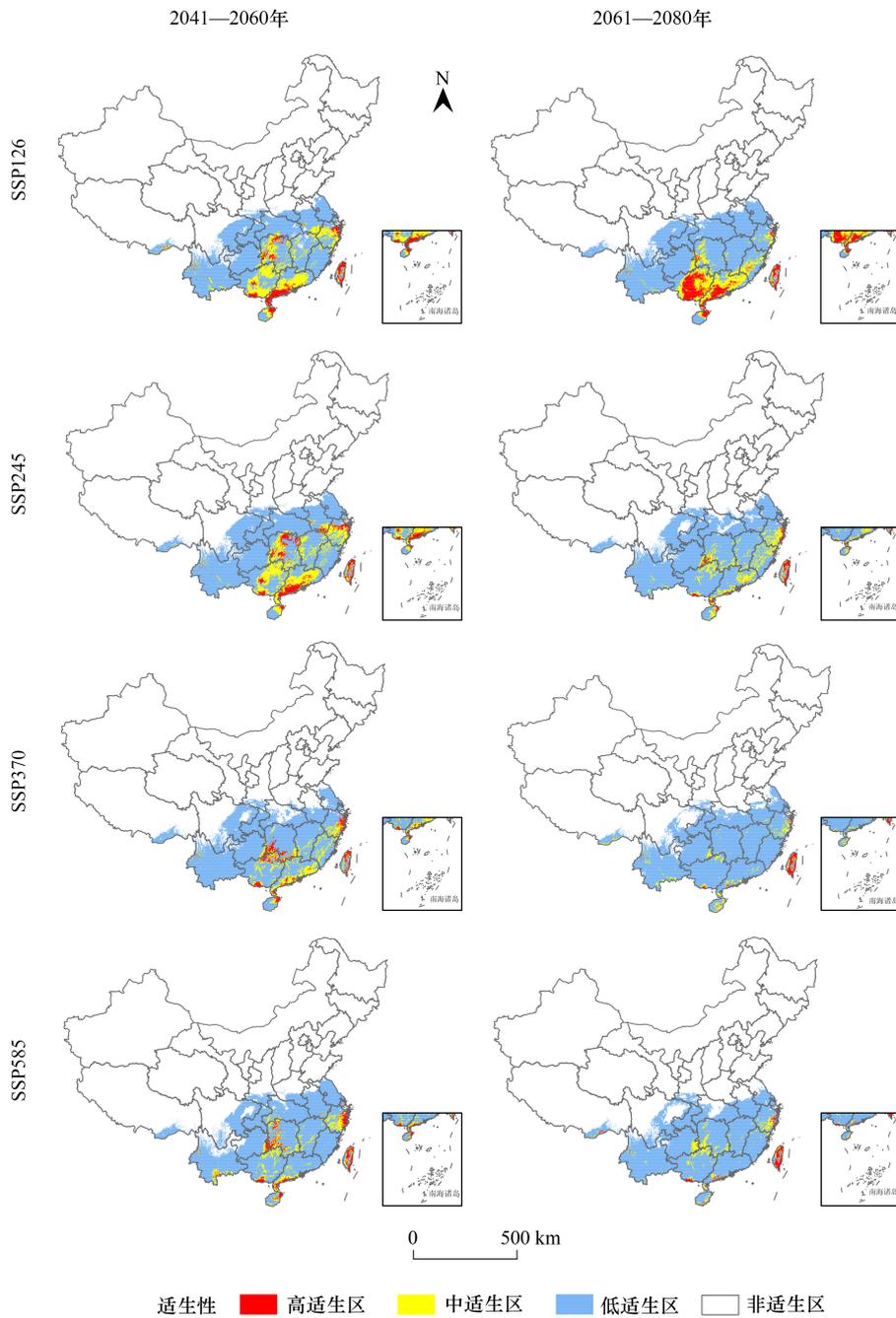


图 7 未来气候情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布范围

Fig.7 Potential distribution of *G. spilanthoides* in China under future climate scenarios

湖南、湖北、江西、福建、浙江、江苏、安徽等(图 8,表 4)。与当前相比,裸冠菊的总适生区面积相对稳定,适生区边缘地带微小变化。

SSP126 情景下,与当前相比,2050s 的扩增明显,扩增区域主要分布在湖北、安徽与江西交界地带;与 2050s 相比,2070s 扩增区域主要分布于四川东南角、江西与安徽和湖北的交界区、安徽东北部,收缩地区主要分布于陕西南部、江苏北部等;SSP245 情景下,与当前相比,2050s 的扩增明显,扩增区域主要分布在四川东部、陕西南部、河南南部、安徽北部及江苏北部等;与 2050s 相比,2070s 收缩明显,缩减区域主要分布于河南南部、安徽西北部、湖北中东部、四川东北角;SSP370 情景下,与当前相比,2050s 扩增的区域主要分布在四川南部和

东北部、陕西南部、江苏北部等,收缩的区域主要分布在湖北中部、安徽中北部;与 2050s 相比,2070s 收缩较明显,收缩区域主要分布于四川东北部、河南西南角、江苏西北部等;SSP585 情景下,与当前相比,2050s 扩增较明显,扩增区域主要分布在四川东北部、陕西南部、河南南部、安徽北部、江苏北部等;与 2050s 相比,2070s 收缩较明显,收缩区域主要分布于陕西南部、河南南部、四川东北部、河南南部、安徽中北部、江苏北部等。

表 4 不同时期裸冠菊各等级适生区面积/($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 4 Suitable areas for *G. spilanthis* under different climate change scenarios

适生区 Suitable habitats	对比指标 Comparison indicator	当前 Current	SSP126		SSP245		SSP370		SSP585	
			2041—2060	2061—2080	2041—2060	2061—2080	2041—2060	2061—2080	2041—2060	2061—2080
高适生区 High-suitable habitats	面积/ km^2	7.62	11.06	15.6	11.73	3.78	7.91	2.75	8.02	4
	增加面积		3.44	7.98	4.11	-3.84	0.29	-4.87	0.4	-3.62
	占比/%	0.80	1.15	1.63	1.2	0.4	0.8	0.3	0.83	0.4
中适生区 Middle-suitable habitats	面积/ km^2	47.76	36.76	29.87	37.98	22.32	20.86	8.60	19.6	12.31
	增加面积		-11	-17.89	-9.78	-25.44	-26.9	-39.16	-28.16	-35.45
	占比/%	5.0%	3.83	3.1	3.9	2.3	2.2	0.9	2.04	1.3
低适生区 Low-suitable habitats	面积/ km^2	135.80	160.44	167.55	166.92	179.23	170.48	183.73	181.7	180.86
	增加面积		24.64	31.75	31.12	43.43	34.68	47.93	45.90	45.06
	占比/%	14.10%	16.7	17.5	17.4	18.7	17.8	19.1	18.9	18.8
非适生区 Non-suitable habitats	面积/ km^2	768.82	751.74	764.98	743.36	754.67	760.75	764.92	750.7	762.82
	增加面积		-17.08	-3.84	-25.46	-14.15	-8.07	-3.9	-18.12	-6
	占比/%	80.1	78.3	77.8	77.4	78.6	79.2	79.7	78.2	79.5
总适生区 Total-suitable habitats	面积/ km^2	191.18	208.26	213.02	216.64	205.32	199.23	195.08	209.3	197.18
	增加面积		17.08	21.84	25.46	14.14	8.05	3.9	18.12	6
	占比/%	19.9	21.7	22.2	22.57	21.39	20.8	20.3	21.8	20.5

“-”,表示与当前气候条件下相比减少的面积,占比指各类适生区占总面积的比例;SSP:共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathways

综上所述,四川东北部和南部、陕西南部、河南南部、湖北北部、安徽北部、江苏北部是裸冠菊潜在适生区的主要变动区。

2.6 气候变化情境下裸冠菊在中国的潜在适生区质心迁移

气候变化情境下,裸冠菊潜在适生区的质心定量描述了其适生区的变化情况(图 9)。MaxEnt 模型模拟表明,裸冠菊从当前到未来质心的变化方向大体是先向东北迁移,再向西南迁移。裸冠菊当前的适生区质心位于湖南省($110.70^\circ\text{N}, 26.89^\circ\text{E}$),未来气候情境下,适生区质心变化幅度不大,均在湖南省内,其中 SSP126 情景下,2050s 适生区质心位于北纬 27.27° ,东经 110.61° ,2070s 适生区质心($110.53^\circ\text{N}, 27.30^\circ\text{E}$)向西北方向迁移;SSP245 情景下,2050s 适生区质心位于北纬 27.39° ,东经 110.53° ,2070s 适生区质心($110.41^\circ\text{N}, 27.14^\circ\text{E}$)向西南方向迁移;SSP370 情景下,2050s 适生区质心位于北纬 26.92° ,东经 110.17° ,2070s 适生区质心($110.46^\circ\text{N}, 26.86^\circ\text{E}$)向西南方向迁移;SSP585 情景下,2050s 适生区质心位于北纬 27.42° ,东经 110.84° ,2070s 适生区质心($110.21^\circ\text{N}, 26.86^\circ\text{E}$)向东南方向迁移。

3 讨论

3.1 模型预测结果可靠性分析及气候限制因子分析

本研究对裸冠菊的分布点和环境变量进行了科学筛选,并对 MaxEnt 模型的调控倍频和特征组合进行了参数优化,模型检验结果显示裸冠菊的测试遗漏率与理论遗漏率基本吻合,各组模型预测的 ROC 曲线均说明本研究的预测结果准确可靠,可用于分析裸冠菊在中国潜在适生区分布变化状况。

裸冠菊耐寒性强能抵抗霜冻,可以在冬季低温下生存,也可以在低温水下存活,如入侵荷兰的裸冠菊的花可以一直开到初霜^[29,43]。目前已记录的裸冠菊种群最南端位于新西兰,西北端位于意大利,这些区域的种群

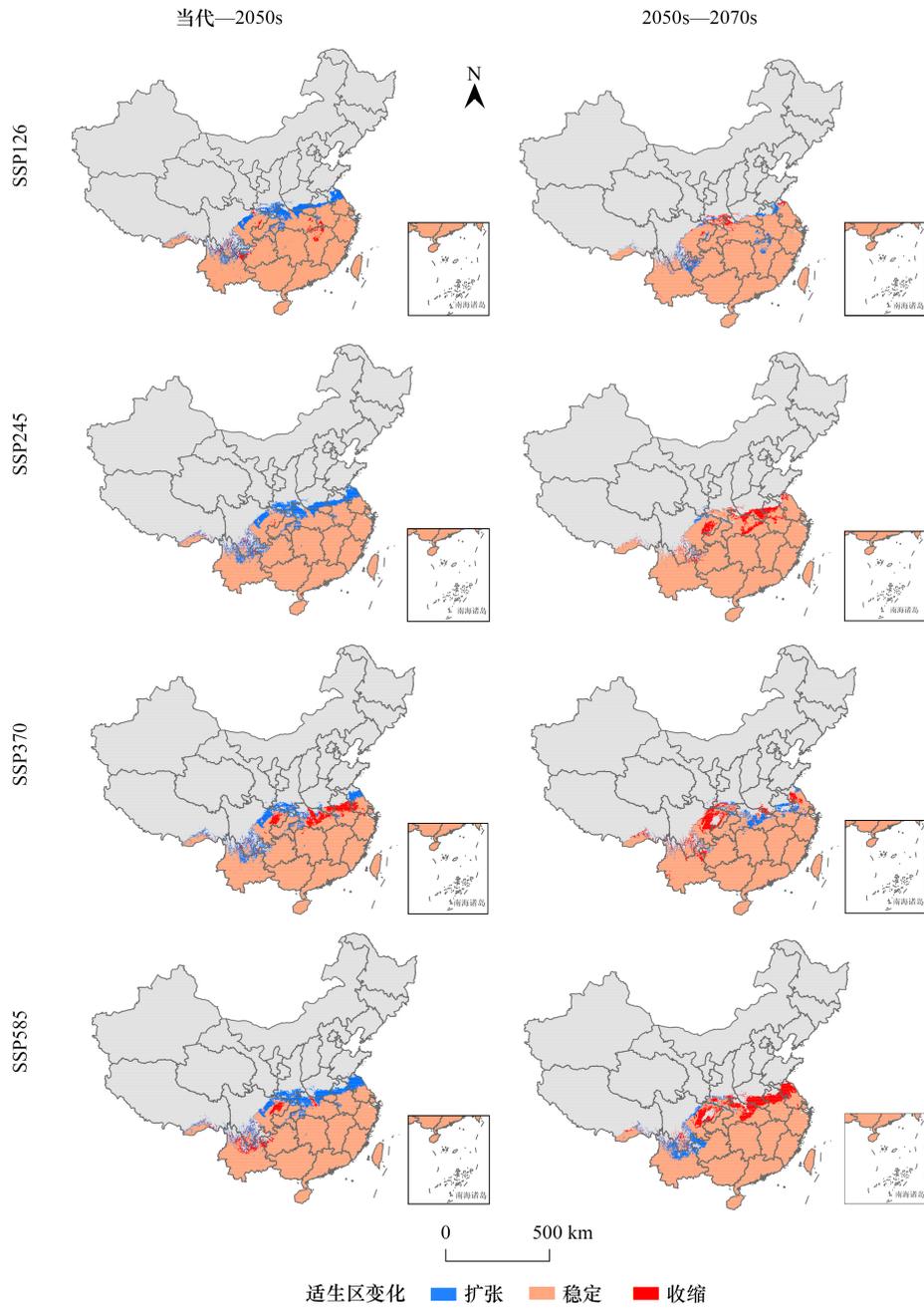


图 8 气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布变化

Fig.8 Potential distribution for *G. spilanthoides* under climate change scenarios

可以经历炎热的夏季(夏季月平均温度约 30℃)和相对寒冷的冬季(1 月平均温度 ≤ 1℃)^[44]。最冷季度平均温、温度季节性变化、最暖月最高温度和平均气温日较差是本研究影响裸冠菊分布的温度限制因子,耐受温度范围宽,符合裸冠菊耐热耐寒抗霜冻的特性。

3.2 当前气候条件下裸冠菊潜在适生区分布状况分析

当前气候条件下,裸冠菊在中国的潜在适生区主要分布于我国湖南、广西、广东、江西、福建、浙江、台湾、海南及云南零星区域,这与高天刚等^[31]和赵浩宇等^[41]研究一致,且这些分布区包含裸冠菊在我国的所有有效分布点(图 6)。裸冠菊在全球的潜在适生区主要分布于阿根廷北部、玻利维亚、巴拉圭、乌拉圭、巴西南部、匈牙利、意大利、荷兰、中国南部、日本、印度、澳大利亚、新西兰等地区(图 10),这与 Ardenghi 等^[29]与

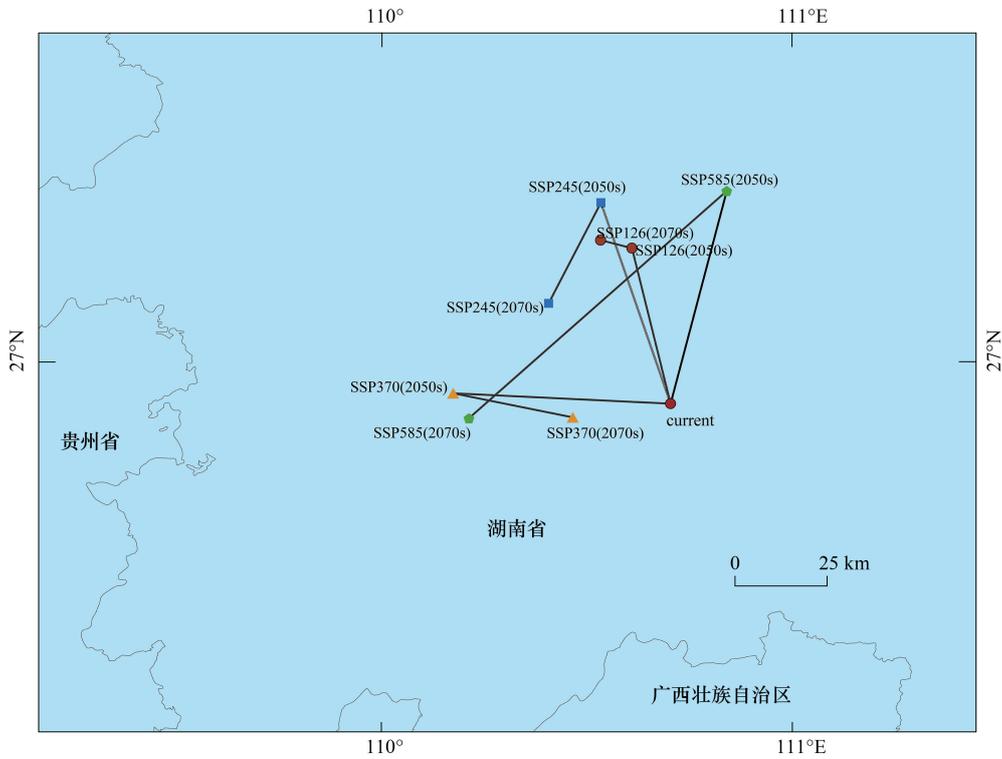


图 9 气候变化情景下裸冠菊适生区质心的变化

Fig.9 The core distributional shifts of *G. spilanthoides* under climate change scenarios

Chapman 等^[24]研究一致,这些分布区包含所有裸冠菊在全球的有效分布点。由此表明在当前气候情景下模拟得到的裸冠菊潜在地理分布区与其实际分布范围非常吻合。

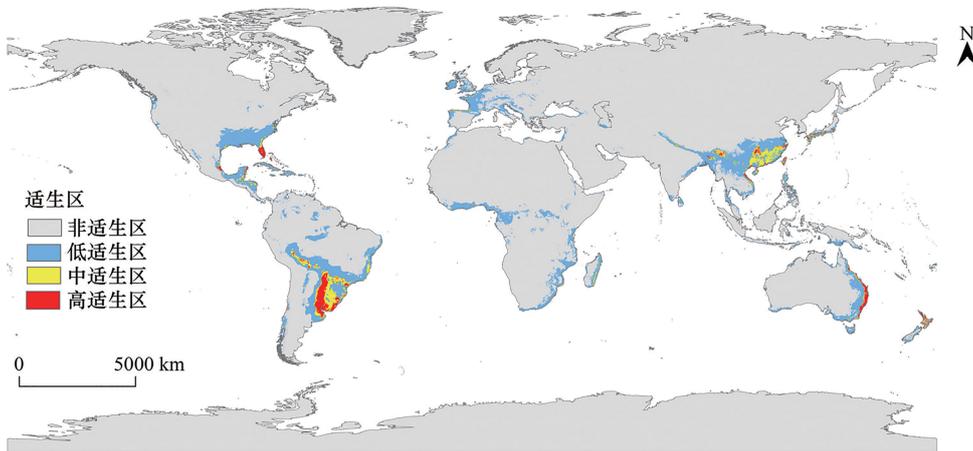


图 10 当前气候条件下裸冠菊在全球的潜在适生区分布

Fig.10 Potential distribution of *G. spilanthoides* in the world under the current climate condition

3.3 气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区状况分析

在气候变暖影响下,有研究发现大狼把草 (*Bidens frondosa*)^[23]、刺苍耳 (*Xanthium spinosum*)^[11]、三裂叶豚草 (*Ambrosia trifida*)^[24] 的潜在适生区均有向高纬度扩散的趋势,且 Chen 等^[53] 发现气候变暖使得目前物种分布每 10a 以 11m 的中位速率移动到更高海拔,每 10a 以 16.9 km 速度移动到更高纬度,这些与本研究发现的

裸冠菊潜在适生区在未来将向北迁移这个结论一致。此外,有研究采用高于或低于环境温度 2℃、4℃或 6℃处理裸冠菊植株,发现其生长参数(茎数、株高、盖度、生物量)均随温度升高而增加^[44],这一定程度反应气候变暖会促使入侵植物的竞争力和适应性增强,扩张速度变快,入侵成功几率增高^[54]。

本研究发现裸冠菊在中国的潜在适生区分布还未达到饱和,未来适生区面积还会扩增,尤其是 2050s 的 SSP245 情景下,适生区面积将会扩增到 $216.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。裸冠菊的中高适生区主要集中在我国广东、广西、福建、浙江、江西、湖南、云南局部、海南、台湾等区域,这些区域目前除了福建省还未有裸冠菊野生种群分布报道外,其他均已入侵^[32]。裸冠菊的高适生区与当前气候相比变化比较大,尤其是 2070s 的 SSP370 和 SSP585 两种气候模拟情景下的高适生区面积缩减明显,这可能是由于受全球气候变暖的影响,近年来极端气候事件日益严重和频繁,气候变化、荒漠化和土地退化加剧,这些因素对未来裸冠菊的潜在适生区分布可能将产生影响。

综上所述,现阶段相关部门应加强中高风险区裸冠菊的重点监测,尤其是预测结果显示有分部但还未有裸冠菊野生种群报道的福建省。对于预测的裸冠菊高适生区,除了做好野外调查监测外,对已发生且产生不良影响的区域应进行打捞清除,遏制其大量发生。对于未来裸冠菊将要发生的区域,应采取适当措施开展检验检疫,从源头上控制其入侵及扩散。总之,相关部门应做好原有中高适生区及未来新增适生区裸冠菊的预防控制工作。

4 结论

当前气候条件下,裸冠菊高适生区主要分布于我国湖南西北部、浙江东北角、台湾、广东和广西零星区域等。未来气候情境下,总适生区面积和低适生区面积均比当前预测的面积大,且呈现沿着低适生区边缘向北的扩散趋势。扩增或收缩的变动区域主要集中四川东北部和南部、陕西南部、河南南部、湖北北部、安徽北部、江苏北部。裸冠菊在中国的分布未达到饱和,呈现以长江以南为中心,向北辐射扩散,分布质心从当前到 2050 和 2070s 变化大体方向是先向东北迁移,再向西南迁移。

参考文献 (References):

- [1] Li X P, Liu X, Kraus F, Tingley R, Li Y. Risk of biological invasions is concentrated in biodiversity hotspots. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(8): 411-417.
- [2] 吴绍洪, 赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(06): 1-9.
- [3] 刘勤, 王玉宽, 彭培好, 逯亚峰, 陈颖锋, 王珊. 气候变化下四川省物种的分布规律及迁移特征. *山地学报*, 2016, 34(06): 716-723.
- [4] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [5] 李海东, 高吉喜. 生物多样性保护适应气候变化的管理策略. *生态学报*, 2020, 40(11): 3844-3850.
- [6] Uden D R, Allen C R, Angeler D G, Corral L, Fricke K. A. Adaptive invasive species distribution models: a framework for modeling incipient invasions. *Biological Invasions*, 2015, 17(10): 2831-2850.
- [7] Gillard M, Thiébaud G, Deleu C, Leroy B. Present and future distribution of three aquatic plants taxa across the world: decrease in native and increase in invasive ranges. *Biological Invasions*, 2017, 19(7): 2159-2170.
- [8] Rodríguez-Merino A, Fernández-Zamudio R, García-Murillo P. An invasion risk map for non-native aquatic macrophytes of the Iberian Peninsula. *Anales Del Jardín Botánico De Madrid*, 2017, 74(1): e055.
- [9] Broennimann O, Treier U A, Müller-Schärer H, Thuiller W, Peterson A T, Guisan A. Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters*, 2007, 10(08): 701-709.
- [10] Guisan A, Tingley R, Baumgartner J B, Naujokaitis-Lewis I, Sutcliffe P R, Tulloch A I T, Regan T J, Brotons L, McDonald-Madden E, Mantyka-Pringle C, Martin T G, Rhodes J R, Maggini R, Setterfield S A, Elith J, Schwartz M W, Wintle B A, Broennimann O, Austin M, Ferrier S, Kearney M R, Possingham H P, Buckley Y M. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 2013, 16(12): 1424-1435.
- [11] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 迈迪娜·吐尔逊, 阿尔曼·解思斯, 阿腾古丽. 外来入侵植物意大利苍耳在新疆的潜在分布及扩散趋势. *江苏农业科学*, 2019, 47(13): 126-130.
- [12] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [13] 乔雪丽, 林峻, 吴建国, 赵雪迷, 巨喜锋, 郑江华. 气候变化情景下大沙鼠潜在地理分布. *生态学报*, 2021, 41(17): 6904-6912.
- [14] 汪沐阳, 张楚婕, 宓春荣, 韩雷, 李美玲, 徐文轩, 杨维康. 气候变化对中国马可波罗盘羊适宜生境的潜在影响. *应用生态学报*, 2021, 32(09): 3127-3135.
- [15] 袁玉洁, 邹曦, 史方, 高翔, 胡莲, 张志永. 气候变化情景下洞庭湖流域鸟类栖息地适宜性分布研究. *水生态学杂志*, 2022, 43(04): 56-62.

- [16] 秦媛媛, 鲁客, 杜忠毓, 史建国, 柴乖强, 张宇, 雷凯宇, 段义忠. 气候变化情景下孑遗植物绵刺在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2022, 42(11): 4473-4484.
- [17] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [18] 刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 杨梅玲, 赵惠茹, 叶新平. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价. 生态学报, 2022, 42(10): 4181-4188.
- [19] 李龙, 王亮, 温阿敏, 闫世伟, 姚晓军. 基于 MaxEnt 模型的甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区北山羊生境评估. 生态学报, 2021, 41(24): 9932-9940.
- [20] 赵佳强, 石娟. 基于新型最大熵模型预测刺槐叶瘿蚊(双翅目: 瘿蚊科)在中国的适生区. 林业科学, 2019, 55(02): 118-127.
- [21] 王艳君, 高泰, 石娟. 基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析. 北京林业大学学报, 2021, 43(09): 59-69.
- [22] 徐文力, 李庆康, 杨潇, 王景升. 气候变化情景下西藏入侵植物印加孔雀草的潜在分布预测. 生态学报, 2022, 42(17): 7266-7277.
- [23] 杜志喧, 苏启陶, 周兵, 闫小红, 李晓红, 肖宜安. 不同气候变化情景下入侵植物大狼把草在中国的潜在分布. 生态学杂志, 2021, 40(08): 2575-2582.
- [24] 马倩倩, 刘彤, 董合干, 王寒月, 赵文轩, 王瑞丽, 刘延, 陈乐. 气候变化下三裂叶豚草在新疆的潜在地理分布. 草业学报, 2020, 29(12): 73-85.
- [25] Vivian Smith G, Hinchliffe D, Weber J. Fecundity and germination of the invasive aquatic plant, Senegal tea (*Gymnocoronis spilanthoides* (D. Don) DC.). *Plant Protection Quarterly*, 2005, 20(4): 145.
- [26] Hussner A. Alien aquatic plant species in European countries. *Weed research*, 2012, 52(4): 297-306.
- [27] Lukács B A, Mesterházy A, Vidéki R, Király G. Alien aquatic vascular plants in Hungary (Pannonian ecoregion): historical aspects, data set and trends. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing With All Aspects of Plant Biology*, 2016, 150(3): 388-395.
- [28] Tippery N P, Schilling E E, Panero J L, Les D H, Williams C S. Independent origins of aquatic Eupatorieae (Asteraceae). *Systematic Botany*, 2014, 39(4): 1217-1225.
- [29] Ardenghi N M G, Barcheri G, Ballerini C, Cauzzi P, Guzzon F. *Gymnocoronis spilanthoides* (Asteraceae, Eupatorieae), a new naturalized and potentially invasive aquatic alien in S Europe. *Willdenowia*, 2016, 46(2): 265-273.
- [30] Van Valkenburg J, Odé B. Smalle theeplant (*Gymnocoronis spilanthoides* (D. Don ex Hook. & Arn.) DC., Asteraceae), een onverwachte eerste vondst voor Nederland. *Gorteria Dutch Botanical Archives*, 2020, 42(1): 39-45.
- [31] 高天刚, 刘演. 中国菊科泽兰族的一个新归化属——裸冠菊属. 植物分类学报, 2007, (03): 329-332.
- [32] 高浩杰, 陈征海. 裸冠菊属: 华东地区一新归化属. 浙江农林大学学报, 2011, 28(06): 992-994.
- [33] Suyama C. A new naturalized plant, *Gymnocoronis spilanthoides* DC., in Japan [in Japanese]. *J. Phytogeogr. Taxon*, 2001, 49: 183-184.
- [34] Kadono, Y. Alien aquatic plants naturalized in Japan; history and present status. *Global Environmental Research*, 2004, 8(2), 163-169.
- [35] Parsons W T, Cuthbertson E G. Noxious weeds of Australia. Second Edition. Collingwood: CSIRO Publishing, 2001.
- [36] PIER (Pacific Island Ecosystems at Risk). *Gymnocoronis spilanthoides*. 2005[2006-11-16]. <http://www.hear.org/pier/index.html>.
- [37] Howell C J. Consolidated list of environmental weeds in New Zealand. Science & Technical Pub., Department of Conservation. 2008.
- [38] Boppré M, Colegate S M. Recognition of pyrrolizidine alkaloid esters in the invasive aquatic plant *Gymnocoronis spilanthoides* (Asteraceae). *Phytochemical Analysis*, 2015, 26(3): 215-225.
- [39] 王焕冲, 王玉华, 王崇云, 和兆荣. 云南种子植物中的新入侵和新分布种. 云南植物研究, 2010, 32(03), 227-229.
- [40] 李西贝阳, 王永淇, 李仕裕, 张弯弯, 王发国, 邢福武. 广东菊科一新归化属与海南旋花科一新归化种. 热带作物学报, 2016, 37(07): 1245-1248.
- [41] 赵浩宇, 朱建义, 刘胜男, 周小刚. 四川省归化植物新记录. 杂草学报, 2017, 35(04): 13-16.
- [42] 鲁昕, 阳小成, 彭书明, 高天刚, 胡国雄, 孟兴, 付志玺. 入侵性杂草——裸冠菊在中国内陆四川省的首次发现. 植物检疫, 2018, 32(03): 73-75.
- [43] Panetta F D. Seed persistence of the invasive aquatic plant, *Gymnocoronis spilanthoides* (Asteraceae). *Australian Journal of Botany*, 2010, 57(8): 670-674.
- [44] Chapman D, Petroschevsky A, Lieurance D, Champion P, Hussner A, van Valkenburg J, Tanner R. *Gymnocoronis spilanthoides*. *EPPO Bulletin*, 2017, 47(3): 544-548.
- [45] EPPO, Pest Risk Analysis *Gymnocoronis spilanthoides*. EPPO, Paris (FR). https://www.eppo.int/INVASIVE_PLANTS/ias_plants.htm [accessed on 11th November 2017]
- [46] Muranaka T, Ishii J, Miyawaki S, Washitani I. Vascular plants to be designated as Invasive Alien Species according to the Invasive Alien Species Act of Japan. *Japanese Journal of Conservation Ecology*, 2005, 10(1): 19-33.
- [47] Fu Z X, Wang X H, Ou C Z, Lu X, Hu J, He G, Tian X Y. Characterization of the complete chloroplast genome sequence of *Gymnocoronis spilanthoides* (Asteraceae, Eupatorieae) and its phylogenetic implications. *Mitochondrial DNA Part B*, 2019, 4(1): 694-695.
- [48] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525.
- [49] Muscarella R, Galante P J, Soley-Guardia M, Boria R A, Kass J M, Uriarte M, Anderson R P. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(11): 1198-1205.
- [50] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 2017, 40(7): 887-893.
- [51] Shcheglovitova M, Anderson R P. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 2013, F 269: 9-17.
- [52] Liu Y, Shi J. Predicting the potential global geographical distribution of two *Icerya* species under climate change. *Forests*, 2020, 11(6): 684.
- [53] 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.
- [54] Burnett D A, Champion P D, Clayton J S, Ogden J. A system for investigation of the temperature responses of emergent aquatic plants. *Aquatic Botany*, 2007, 86(2): 187-190.