

聂焱晗, 程健平, 付欣悦, 等. 气候变化下鬼针草属入侵植物在中国潜在适生区预测. 应用生态学报, 2025, 36(10): 3115–3125

Nie YH, Cheng JP, Fu XY, et al. Predicting the potential suitable habitats of invasive species in the *Bidens* genus in China under climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(10): 3115–3125

气候变化下鬼针草属入侵植物 在中国潜在适生区预测

聂焱晗¹ 程健平¹ 付欣悦¹ 轩宇航¹ 万安^{1,2*} 赵晖²

(¹安庆师范大学资源环境学院, 安徽安庆 246133; ²南京大学常熟生态研究院, 南大(常熟)研究院有限公司, 江苏苏州 215500)

摘要 气候变化背景下入侵种的分布格局是近年来生态学关注的一个重点。鬼针草属具有较强的入侵能力, 本研究利用最大熵(MaxEnt)模型预测并对比了鬼针草属 6 种被中国外来入侵物种信息系统列为入侵种名录的植物(大狼把草、白花鬼针草、鬼针草、多苞狼把草、婆婆针和南美鬼针草)在当前和未来 4 种不同气候条件下适生区的范围。结果表明: MaxEnt 模型可以较好地预测 6 个物种的适生区范围, 当前气候下 6 种植物的受试者工作特征曲线下的面积值分别为 0.929、0.976、0.921、0.977、0.903、0.980, 这些物种具有不同的适生环境; 6 种植物在未来 4 种排放路径下的适生区面积整体上较当前均有所增加, 但也有物种出现适生区面积下降的波动趋势。在全球气候变化的背景下, 鬼针草属 6 种入侵植物的适生区范围基本呈现增加的趋势, 为防控入侵种, 还需进一步加强对不同物种生理习性和对气候变化响应的研究。

关键词 入侵物种; 物种分布; 适生区预测; MaxEnt 模型

Predicting the potential suitable habitats of invasive species in the *Bidens* genus in China under climate change. NIE Yanhan¹, CHENG Jianping¹, FU Xinyue¹, XUAN Yuhang¹, WAN An^{1,2*}, ZHAO Hui² (¹College of Resources and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246133, Anhui, China; ²Nanjing University (in Changshu City) Research Institute Co., Ltd., Ecological Research Institute of Changshu, Nanjing University, Suzhou 215500, Jiangsu, China).

Abstract The distribution patterns of invasive species under climate change have become a key focus in ecology. In view of the strong invasive potential of the genus *Bidens*, we used the maximum entropy (MaxEnt) model to compare the range of suitable habitats for six *Bidens* species listed in the Chinese Invasive Species Information System (namely *Bidens frondosa*, *B. alba*, *B. pilosa*, *B. vulgata*, *B. bipinnata* and *B. subalternans*) under current and four different future climatic conditions. Results showed that the MaxEnt model could effectively predict the range of the suitable habitats of all the six species. Under current climate condition, the values of the area under the receiver operating characteristic curve of the six *Bidens* species are 0.929, 0.976, 0.921, 0.977, 0.903, and 0.980, respectively, indicating that these species have different suitable habitats. Under the four future emission pathways, although the overall area of suitable habitats for these six species generally will increase compared to the current scenario, some species exhibit fluctuating trends with the decreases in the area of suitable habitats. In summary, under global climate change, the suitable habitat ranges of these six invasive species of the genus *Bidens* generally will show an increasing trend. To effectively control those invasive species, further research should focus on the physiological traits of different species and their response to climate change.

Keywords invasive species; species distribution; habitat prediction; MaxEnt model

生物入侵(biological invasion)是全球变化的重要组成部分。特别是在全球气候变暖的背景下, 某

些地区环境变得更适于入侵种的生存^[1], 而氮沉降和二氧化碳浓度的升高, 也会让入侵植物对除草剂产生更强的耐受性。可见, 气候变化可以影响到生物防治剂的效果, 使得入侵种更适应农业环境, 农业生态系统更易受到入侵植物的危害^[2-3]。

本文由安庆师范大学人才引进基金项目(044-160002009)和安庆师范大学创新训练项目(X202310372069)资助。

2025-02-24 收稿, 2025-08-12 接受。

* 通信作者 E-mail: wanahanu@126.com

鬼针草属(*Bidens*)植物是目前世界公认的恶性农业杂草^[4-5]。有研究发现,鬼针草(*Bidens pilosa*)的籽粒在扩散至新环境之后,不仅能在黑暗条件、高盐环境下正常发芽,还可通过自身的化感物质抑制其他作物生长而占据该生境^[6]。特别是六叶期后,目前没有商用除草剂可以对鬼针草达到90%以上的去除率,因此,无论是传统的掩埋还是除草剂,均不能阻止鬼针草向未入侵的田地,甚至是盐碱地的扩散^[5]。而且随着环境温度升高,鬼针草生长显著加快,对农作物的化感抑制作用增强,可见,温度升高亦是鬼针草入侵的重要生态环境驱动因子^[7]。此外,其变种*Bidens pilosa* var. *pilosa*在环境温度升高后,发芽时间提前,生长速度加快,大大提高了该种的扩散能力^[8]。同属植物往往具有相似的生活史,且具有相互杂交的潜力^[9],因此,推测在全球气候变暖的大环境下,鬼针草属植物扩散能力也将更强^[10]。除了土壤、水文、地形、人口、交通、植被覆盖度、土地利用类型等影响因子外,气候因子也是影响入侵植物分布的重要因子^[11-12]。考虑目前气候迅速变暖的趋势^[13],入侵植物的分布格局也应有相应改变,因此,预测鬼针草属植物分布时,需要考虑不同温室气体排放路径的气候因素。

目前,国内外有关生物入侵的研究越来越重视气候变化与多元驱动下的入侵过程^[14],而利用物种分布模型(species distribution models, SDMs)一般只预测当前气候模式和未来不同温室气体排放路径下^[15],以及某单一物种的可能分布范围^[16-19],并较少考虑未来不同时期不同排放路径下的气候变化。另外,具有亲缘关系的同属物种的生活需求基本相同,同属之间也能相互杂交,这种杂交可能会导致新的基因组合,从而影响物种的入侵潜力^[20],故如该属中已有物种具有入侵记录,那么同属物种的入侵潜力不容忽视。因此,本研究利用MaxEnt模型,预测已在我国有分布记录的鬼针草属植物在当前气候

条件以及未来不同温室气体排放路径下在我国的分布区,研究结果可以协助农业部门制定针对性的管理策略,对于我国提前防控鬼针草属植物入侵具有重要意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 分布样点数据来源

在中国外来入侵物种信息系统(<https://www.iplant.cn/ias/>)筛选出目前已在中国有分布的鬼针草属植物,再在全球生物多样性信息网(<https://www.gbif.org/>)、植物智(<https://www.iplant.cn>)和中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)^[21]中检索鬼针草属植物的分布数据。

经检索后,发现目前已在中国有分布的鬼针草属植物共有6种(表1)。其中,1级恶意入侵等级有3种,有大狼把草(*Bidens frondosa*)、白花鬼针草(*Bidens alba*)和鬼针草;3级局部入侵植物为婆婆针(*Bidens bipinnata*);有待观察的有2种,为多苞狼把草(*Bidens vulgata*)和南美鬼针草(*Bidens subalternans*);另有芳香鬼针草(*Bidens odorata*)与白花鬼针草为同物异名,故不予考虑。获得大狼把草、白花鬼针草、鬼针草、多苞狼把草、婆婆针、南美鬼针草的有效分布位点分别为205、443、802、29、265和24个。

大狼把草广布于温带至亚热带气候区域,目前在我国有大量分布;白花鬼针草为鬼针草的一个变种,广布于亚洲和美洲的热带、亚热带地区;鬼针草广布于温带至热带气候区域,是世界性农业有害杂草;多苞狼把草广布于亚洲、欧洲北部、非洲北部以及大洋洲东南部;婆婆针广布于美洲、亚洲、欧洲以及非洲东部;南美鬼针草广布于南美洲,近年来已扩散至欧洲和亚洲,我国有少量分布。

1.2 气候数据来源

本研究中当前气候因子数据取自全球气候数据库网站(<https://worldclim.org/data/worldclim21>).

表1 鬼针草属6种入侵植物的生活型和原产地^[22-24]
Table 1 Life-type and origin of six invasive *Bidens* plants^[22-24]

物种 Species	生活型 Life form	原产地 Origin	入侵等级 Intrusion level	分布记录数 Number of distribution records
大狼把草 <i>Bidens frondosa</i>	1年生草本	北美洲	恶意入侵	205
白花鬼针草 <i>Bidens alba</i>	1年生或多年生草本	热带美洲	恶意入侵	443
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	1年生草本	热带美洲	恶意入侵	802
多苞狼把草 <i>Bidens vulgata</i>	1年生草本	北美洲	有待观察	29
婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i>	1年生草本	北美洲	局部入侵	265
南美鬼针草 <i>Bidens subalternans</i>	1年生或多年生草本	南美洲	有待观察	24

html) 1970—2000 年的全球 bioclimatic variables 数据, 未来气候因子也来源于该网站, 涉及的时间段包括 2021—2040、2041—2060、2061—2080、2081—2100 年。被采用的温室气体排放路径共有 4 种类型: 可持续发展路径(SSP126)、中间路径(SSP245)、区域竞争路径(SSP370) 和以传统化石燃料为主的路径(SSP585), 以上空间分辨率均为 $2.5\text{ m}^{[25]}$ 。本研究涉及 19 个生物气候变量, 主要涉及温度、降水等因素^[21]。

1.3 模型建构与评估

全球气候数据下载完成后在 ArcGIS 中裁剪出中国区域的气象数据, 利用 SDM Toolbox v2.6 中的 Raster to ASCII 把下载的气候栅格数据批量转成 ASC 格式用于 MaxEnt 模型的运行。以上数据均保存为 ASC 格式, 导入 ArcGIS 10.8 中, 运用 SDM Toolbox (v2.6) 中的 Spatially Rarefy Occurrence Data for SDMs 去除位点的自相关性, 设置 Resolution to Rarefy Data 为 10 km、Equidistance Projection 为 World: Azimuthal Equidistant。

随后将经过 ArcGIS 处理过的物种分布数据(CSV 格式) 和气候数据(ASC 格式) 导入至 MaxEnt 工具进行模拟, 随机挑选 75% 的分布记录用作训练数据集, 余下的 25% 用作测试数据集, 重复 10 次, 根据平均值绘制响应曲线^[26]。受试者工作特征曲线下的面积(AUC) 值在 0~1, 数值越高, 预测效果越佳, 评估标准为: $0.60 \leq \text{AUC} < 0.70$, 表示效果欠佳; $0.70 \leq \text{AUC} < 0.80$, 表示效果一般; $0.80 \leq \text{AUC} < 0.90$, 表示效果良好; $\text{AUC} \geq 0.90$ 表示效果极佳^[25]。

1.4 适宜度等级划分

将大狼把草、白花鬼针草、鬼针草、多苞狼把草、婆婆针和南美鬼针草在 MaxEnt 模型运行后的模拟结果平均值导入 ArcGIS 10.8 中, 运用重分类将结果划分为 4 个等级, 适生区的划分依靠分布概率(P), 从低到高依次为: 非适生区($0 \leq P < 0.2$)、低适生区($0.2 \leq P < 0.4$)、中适生区($0.4 \leq P < 0.6$) 和高适生区($0.6 \leq P \leq 1$)^[27], 并计算出各等级适生区的面积。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测精度评估

根据受试者特征曲线分析发现: 当前气候的 10 次模拟平均 AUC 值均大于 0.9 ($\text{AUC} = 0.903 \sim 0.980$), 未来 4 个时期、4 种排放路径的 AUC 值均大于 0.7 ($\text{AUC} = 0.789 \sim 0.959$, 图 1), 表明模型预测结果可信。

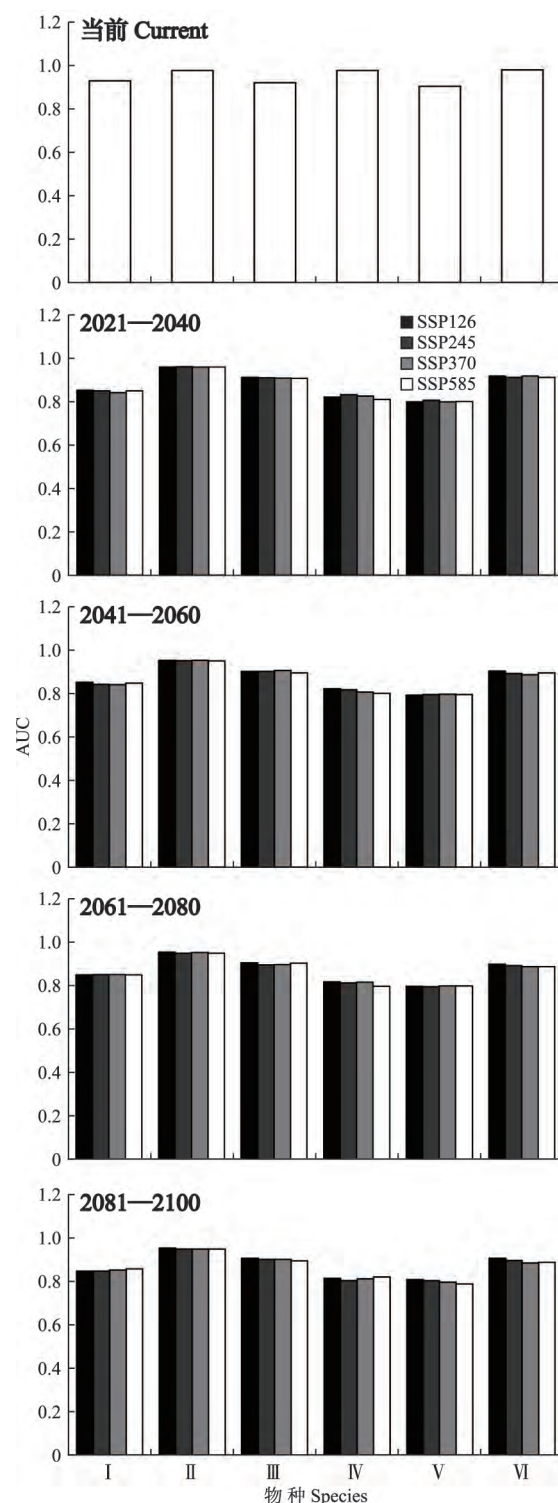


图 1 各入侵种在不同时期不同排放路径下的 AUC 平均值
Fig.1 Mean values of AUC for each invasive species under different emission pathways in different periods.

AUC: 受试者工作特征曲线下的面积 Area under the receiver operating characteristic curve. I: 大狼把草 *Bidens frondosa*; II: 白花鬼针草 *Bidens alba*; III: 鬼针草 *Bidens pilosa*; IV: 多苞狼把草 *Bidens vulgata*; V: 婆婆针 *Bidens bipinnata*; VI: 南美鬼针草 *Bidens subalternans*. 下同 The same below.

2.2 鬼针草属入侵植物的适生特征

在仅采用单一环境因子的情况下, 筛选出鬼针

草属 6 种入侵植物对正规化训练增益贡献排名前 3 的环境因子(图 2),以及贡献率前 3 的环境因子。MaxEnt 模型输出的结果中,当环境因子的存在概率超过 0.5,认为该变量的取值处于物种适宜生长的区间;而存在概率达到最高点时对应的环境因子值,则被视为物种生长的最适值。

模型运行结果显示,鬼针草属 6 种植物正规化训练增益贡献排名前 3 的环境因子,以及贡献率前 3 的环境因子并不一致(表 2)。

大狼把草对正规化训练增益前 3 的环境因子依次为最干月降水量、最干季度降水量、平均温度日较差,贡献率居前 3 的依次为最干月降水量、年平均降

水量、等温性。最干月降水量 109.07 mm 为最适值,最干季度降水量 243.17 mm 为最适值,年平均降水量 697.02 mm 为最适值,平均温度日较差 6.57 °C 为最适值,等温性 8.26 为最适值(图 3)。

白花鬼针草对正规化训练增益前 3 的环境因子依次为最冷月最低温、温度年较差、最冷季度平均温,贡献率居前 3 的依次为最冷月最低温、最冷季度降水量、温度年较差。最冷月最低温 16.89 °C 为最适值,温度年较差 15.03 °C 为最适值,最冷季度降水量 782.35 mm 为最适值,最冷季度平均温 21.51 °C 为最适值(图 4)。

鬼针草对正规化训练增益前 3 的环境因子依次

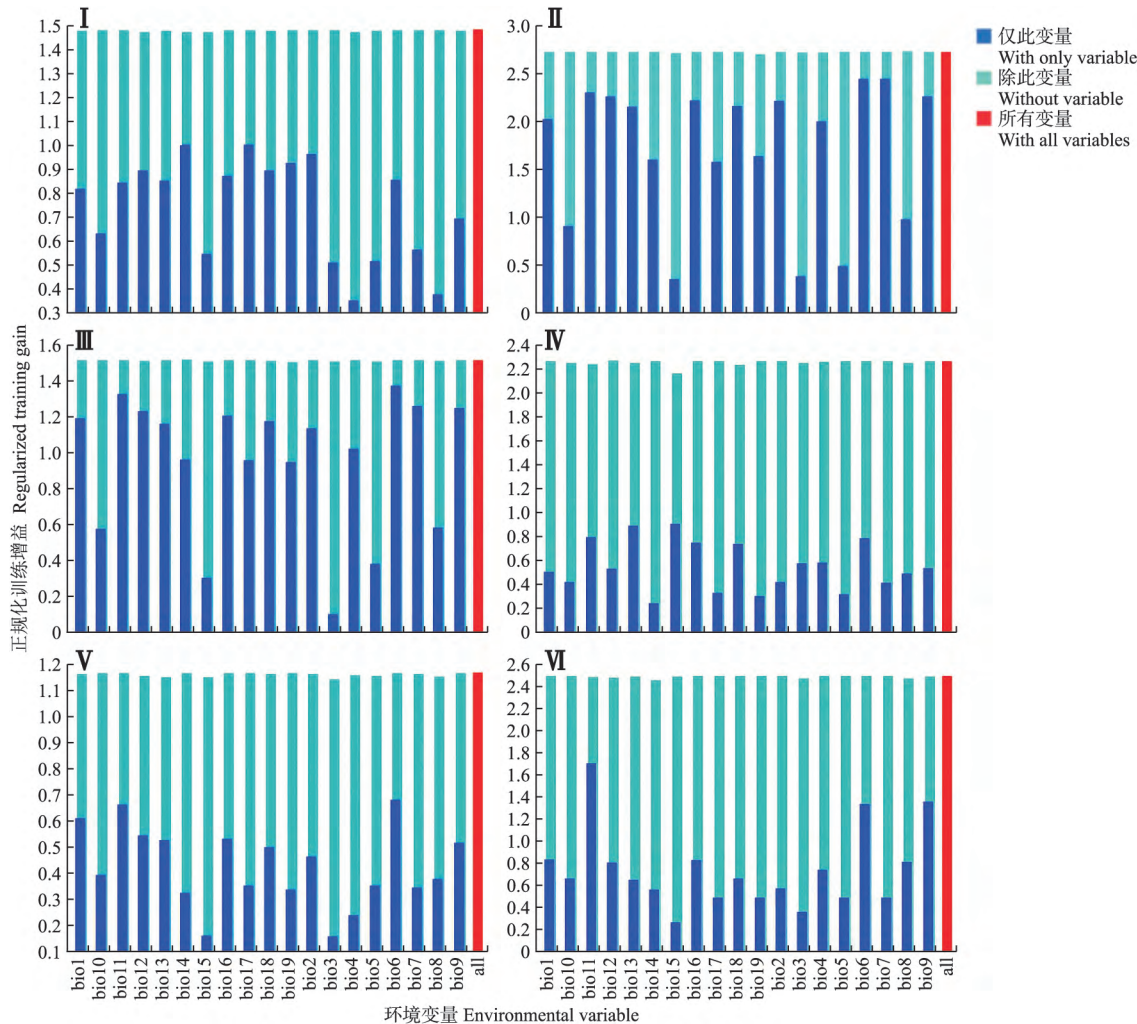


图 2 鬼针草属 6 种入侵植物刀切法检验的训练增益结果

Fig.2 Jackknife of regularized training gain for six invasive *Bidens* species.

bio1: 年均温 Annual mean temperature; bio2: 平均温度日较差 Mean diurnal temperature range; bio3: 等温性 Isothermality; bio4: 温度季节性变化 Temperature seasonality; bio5: 最暖月最高温 Maximum temperature of warmest month; bio6: 最冷月最低温 Minimum temperature of coldest month; bio7: 温度年较差 Temperature annual range; bio8: 最湿季度平均温 Mean temperature of wettest quarter; bio9: 最干季度平均温 Mean temperature of driest quarter; bio10: 最暖季度平均温 Mean temperature of warmest quarter; bio11: 最冷季度平均温 Mean temperature of coldest quarter; bio12: 年平均降水量 Annual precipitation; bio13: 最湿月降水量 Precipitation of wettest month; bio14: 最干月降水量 Precipitation of driest month; bio15: 降水量季节性变化 Precipitation seasonality; bio16: 最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter; bio17: 最干季度降水量 Precipitation of driest quarter; bio18: 最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter; bio19: 最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter. 下同 The same below.

表 2 鬼针草属 6 种入侵植物相关环境因子
Table 2 Environmental factors associated with six invasive *Bidens* species

物种 Species	贡献百分比 前 3 的因子 Top three factors in contribution percentage	正规化训练增益 前 3 的因子 Top three factors in regular training gain
大狼把草 <i>Bidens frondosa</i>	bio14(42.4%) bio12(19.4%) bio3(8.7%)	bio14 bio17 bio2
白花鬼针草 <i>Bidens alba</i>	bio6(28.5%) bio19(19.7%) bio7(13.5%)	bio6 bio7 bio11
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	bio6(26.7%) bio14(14.7%) bio12(11.4%)	bio6 bio11 bio7
多苞狼把草 <i>Bidens vulgata</i>	bio15(35.7%) bio3(29.3%) bio6(10.0%)	bio15 bio13 bio11
婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i>	bio11(17.1%) bio12(13.6%) bio6(13.6%)	bio6 bio11 bio1
南美鬼针草 <i>Bidens subalternans</i>	bio11(24.6%) bio15(14.3%) bio9(13.6%)	bio11 bio6 bio9

括号内数值为贡献百分比 The values in parentheses represented the contribution percentage.

为最冷月最低温、最冷季度平均温、温度年较差,贡献率居前 3 的依次为最冷月最低温、最干月降水量、年平均降水量。最冷月最低温 17.86 °C 为最适值,

最干月降水量 1.62 mm 为最适值,最冷季度平均温 17.71 °C 为最适值,温度年较差 12.53 °C 为最适值,年平均降水量 661.09 mm 为最适值(图 5)。

多苞狼把草对正规化训练增益前 3 的环境因子依次为降水量季节性变化、最湿月降水量、最冷季度平均温,贡献率居前 3 的依次为降水量季节性变化、等温性、最冷月最低温。降水量季节性变化 134.99 mm 为最适值,最湿月降水量 189.20 mm 为最适值,等温性 17.94 为最适值,最冷季度平均温 -0.32 °C 为最适值,最冷月最低温 -13.44 °C 为最适值(图 6)。

婆婆针对正规化训练增益前 3 的环境因子依次为最冷月最低温、最冷季度平均温、年均温,贡献率居前 3 的依次为最冷季度平均温、年平均降水量、最冷月最低温。最冷月最低温 6.04 °C 为最适值,最冷季度平均温 9.76 °C 为最适值,年平均降水量 716.17 mm 为最适值,年均温 25.72 °C 为最适值(图 7)。

南美鬼针草对正规化训练增益前 3 的环境因子依次为最冷季度平均温、最干季度平均温、最冷月最低温,贡献率居前 3 的依次为最冷季度平均温、降水量季节性变化、最干季度平均温。最冷季度平均温 -0.02 °C 为最适值,最干季度平均温 -3.92 °C 为最适值,降水量季节性变化 125.99 mm 为最适值,最冷月

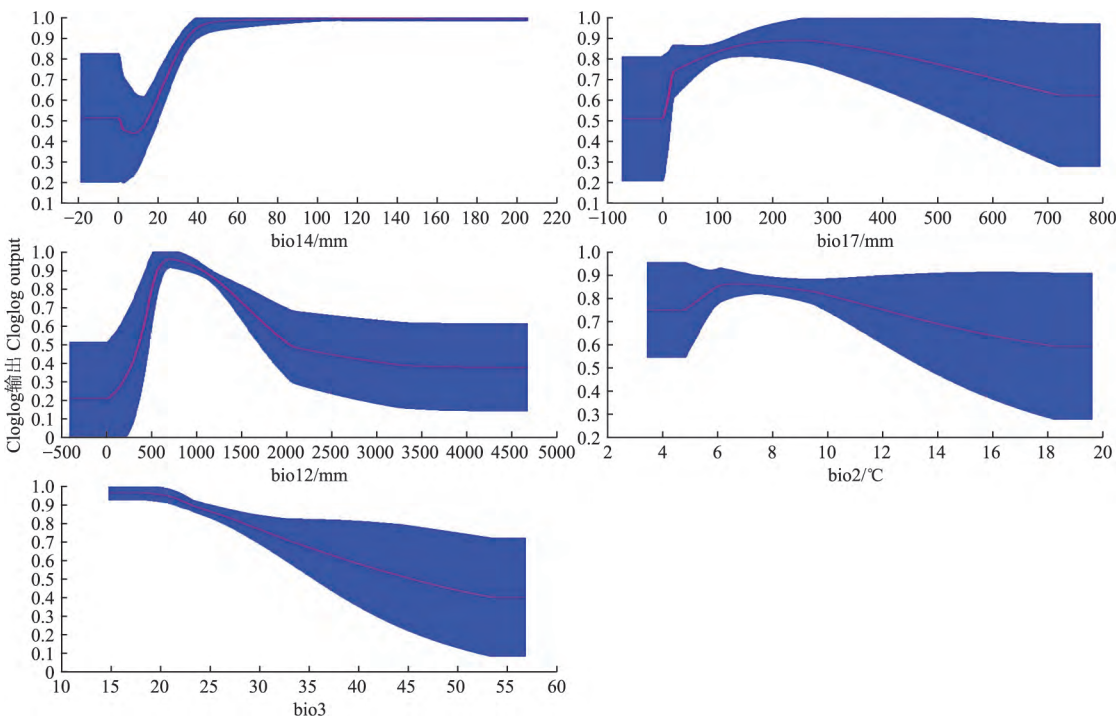


图 3 大狼把草适生区分布的主要环境因子响应曲线
Fig.3 Response curves of the main climatic factors affecting the distribution of *Bidens frondosa*.

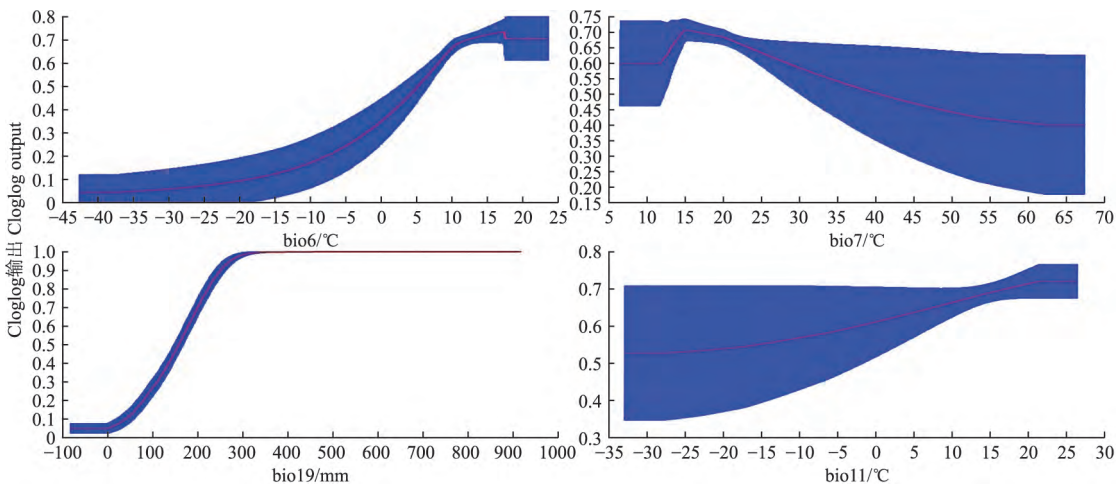


图 4 白花鬼针草适生区分布的主要环境因子响应曲线
Fig.4 Response curves of the main climatic factors affecting the distribution of *Bidens alba*.

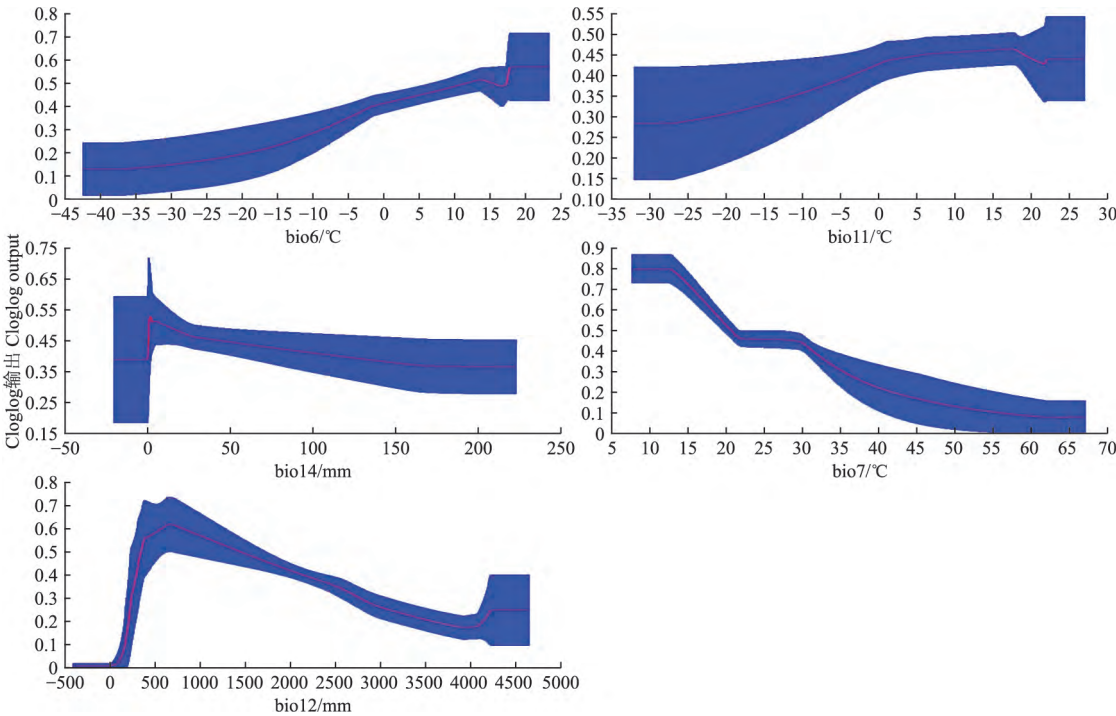


图 5 鬼针草适生区分布的主要环境因子响应曲线
Fig.5 Response curves of the main climatic factors affecting the distribution of *Bidens pilosa*.

最低温 0.06℃ 为最适值(图 8)。

2.3 当前气候条件下鬼针草属入侵植物的潜在分布区

模型预测在当前气候条件下,大狼把草的适生区在我国主要集中于东部沿海地区及长江流域一带。高适生区较为密集,主要分布于浙江省、江苏省、上海市、江西省、安徽省南部、山东省东北部、台湾省北部、湖南省、湖北省东南部、广西壮族自治区东北部、辽宁省南部、贵州省东南部分地区等(图 9)。总适生面积约为 $22.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ (表 3)。

白花鬼针草的适生区域在我国相对较少,主要局限于广东省、广西壮族自治区、海南省、香港特别行政区、澳门特别行政区及福建省南部的一小部分地区。值得注意的是,白花鬼针草的高适生区位于台湾省。其总适生面积约为 $2.61 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

鬼针草的适生区在我国主要集中在中东部地区,其中,高适生区主要位于台湾省、福建省南部、海南省、广东省局部、广西壮族自治区局部。中低适生区覆盖面积较广,主要包括浙江省、上海市、江西省、安徽省、福建省北部、江苏省南部、湖南省、湖北省、

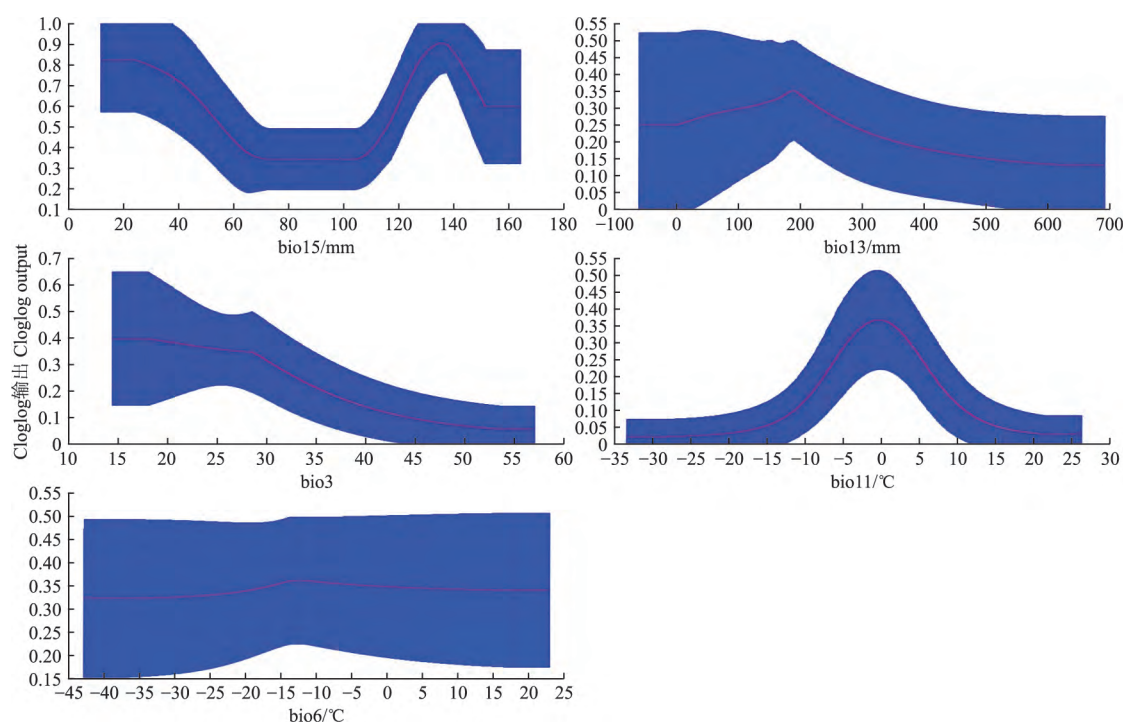


图 6 多苞狼把草适生区分布的主要环境因子响应曲线

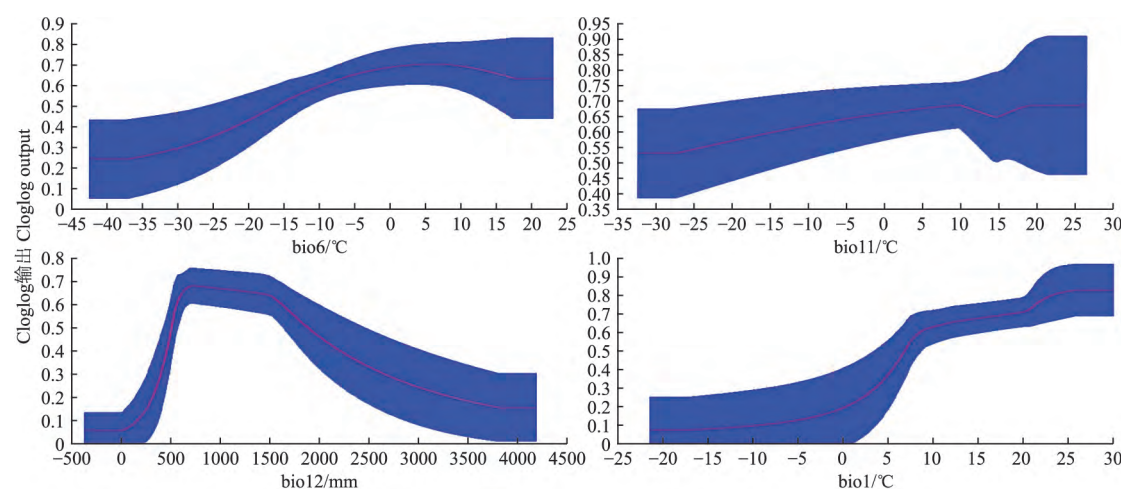
Fig.6 Response curves of the main climatic factors affecting the distribution of *Bidens vulgata*.

图 7 婆婆针适生区分布的主要环境因子响应曲线

Fig.7 Response curves of the main climatic factors affecting the distribution of *Bidens bipinnata*.

河南省西北部、北京市、河北省与天津市交界区域、山西省西南部、香港特别行政区、澳门特别行政区、四川省东部、重庆市、云南省大部、西藏自治区东北部少量地区、陕西省南部、甘肃省东北部。总适生面积约为 $21.25 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

多苞狼把草的适生区在我国主要分布在东南部地区,高适生区位于京津冀地区、山东省和辽宁省的少部分区域。安徽省、江苏省、浙江省、江西省、台湾省局部、湖北省、湖南省、河南省、内蒙古自治区局部、重庆市、西藏自治区局部为多苞狼把草的中低适

生区。总适生面积约为 $10.49 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

婆婆针的适生区在我国分布广泛,涵盖了东北部、东部沿海地区以及西南部分地区。高适生区包括山东省、江西省、福建省、河南省、湖北省、湖南省、广东省、广西壮族自治区、北京市、天津市、河北省、山西省、四川省、云南省、陕西省等。总适生面积约为 $32.12 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

南美鬼针草的适生区在我国相对集中,主要分布在山东省、安徽省、江苏省、河南省、北京市、天津市、河北省、山西省、陕西省、辽宁省。总适生面积约

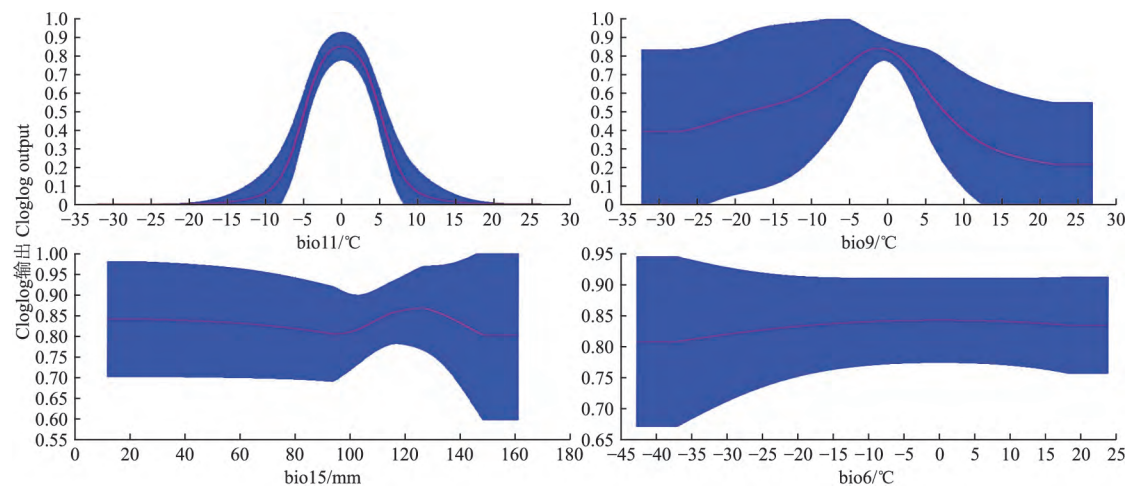


图 8 南美鬼针草适生区分布的主要环境因子响应曲线
Fig.8 Response curves of the main climatic factors affecting the distribution of *Bidens subalternans*.

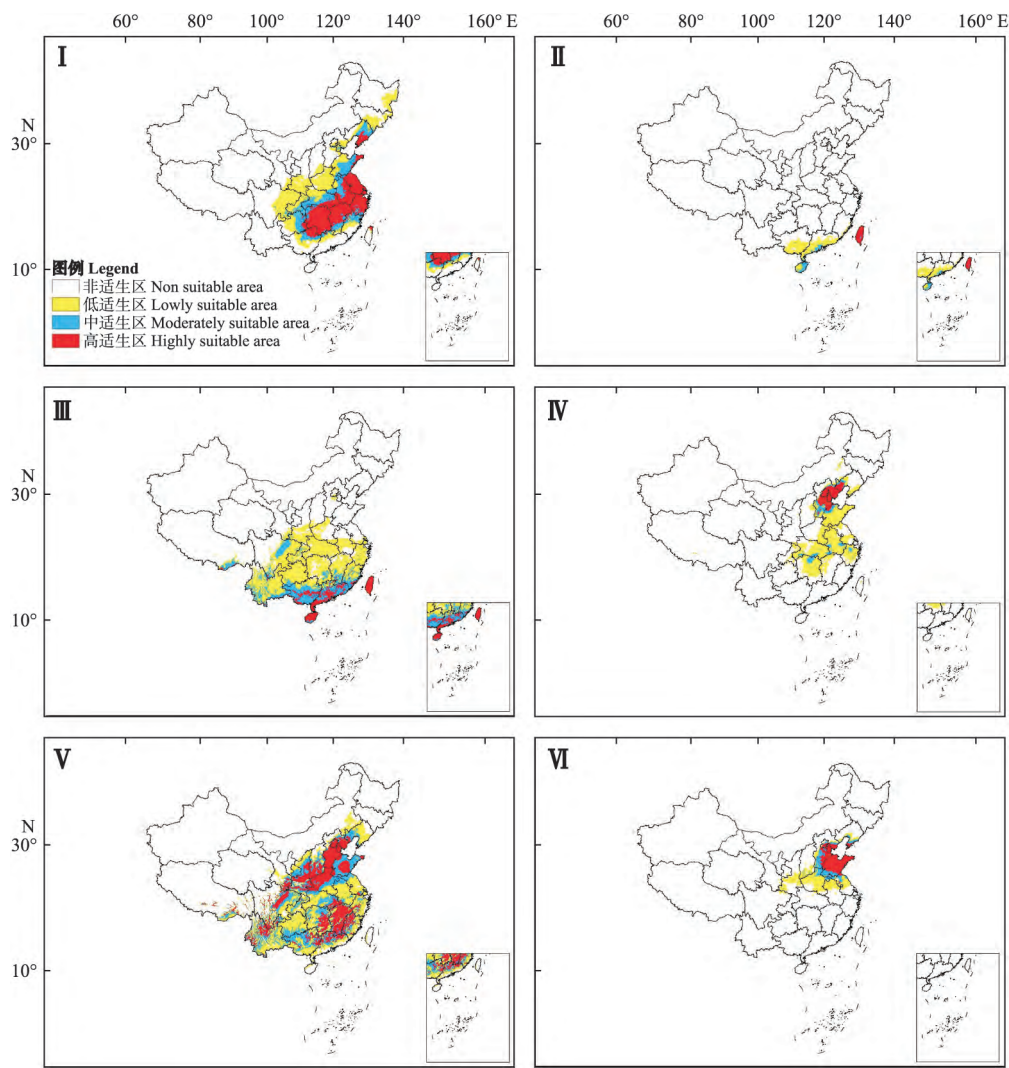


图 9 鬼针草属入侵植物在当前气候下适生区的空间分布
Fig.9 Spatial distribution of invasive *Bidens* species in the suitable region under the current climate.
该图基于审图号为 GS(2024) 0650 号的标准地图制作 底图无修改 The map was based on the standard map with the drawing review No. GS(2024) 0650 , and the base map was not modified.

表 3 当前气候条件下鬼针草属 6 种入侵植物适生区面积
Table 3 Areas of suitable habitat for six invasive *Bidens* species under current climatic conditions/($\times 10^5 \text{ km}^2$)

物种 Species	低适生区 Lowly suitable region	中适生区 Moderately suitable region	高适生区 Highly suitable region	总适生区 Total suitable region
大狼把草 <i>Bidens frondosa</i>	10.04	5.12	7.08	22.24
白花鬼针草 <i>Bidens alba</i>	1.83	0.45	0.33	2.61
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	14.60	4.80	1.85	21.25
多苞狼把草 <i>Bidens vulgata</i>	7.99	1.13	1.37	10.49
婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i>	13.43	9.98	8.71	32.12
南美鬼针草 <i>Bidens subalternans</i>	3.39	1.36	2.10	6.85

为 $6.85 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

2.4 未来不同时期不同排放路径对鬼针草属植物扩张的影响

在当前气候模式下,6 个物种适生区的面积从大到小依次是婆婆针、大狼把草、鬼针草、多苞狼把草、南美鬼针草、白花鬼针草。在未来 4 个时期、4 种排放路径下,各物种适生区的分布面积总体均有增加,其中,多苞狼把草的增幅最大(斜率最大),由面积第 3 增为面积第 1;婆婆针从现在条件下的第 1 到未来一直稳定占据第 2 位;南美鬼针草的增幅也较大,由当前的面积第 5 增为未来的面积第 3;大

狼把草和鬼针草面积在现状下基本接近,而在未来 4 种排放路径下,大狼把草的分布面积大于鬼针草,位列第 4,鬼针草位列第 5。白花鬼针草面积的增幅最小(图 10)。

2081—2100 年,在 SSP370 路径下,大狼把草、多苞狼把草和南美鬼针草相较于当前的适生面积增加最多;在 SSP585 路径下,白花鬼针草、鬼针草和婆婆针相较于当前的适生面积增加最多。可见,对物种分布面积影响最大的未来时期是 2081—2100 年,影响最大的排放路径是 SSP370 和 SSP585(图 10),但每种排放路径下的物种并不一致。

未来 SSP370 路径时,大狼把草的总适生区域向中国南部温暖湿润地区以及新疆维吾尔自治区和内蒙古自治区扩展,其适生区域面积相较于当前增加了 $13.92 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。多苞狼把草的适生区域则扩展至中国所有省份,其中,高适生区的面积增加更为显著;具体而言,多苞狼把草的高适生区在上海市、安徽省、浙江省、江苏省、山东省、河南省、湖南省、湖北省、北京市、天津市、重庆市、贵州省实现了全面分布,同时,在福建省、江西省、台湾省、山西省、河北省、辽宁省、四川省、云南省、陕西省、新疆维吾尔自治区也呈现出大面积分布态势,其总适生区面积相较于当前增加了 $51.31 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。南美鬼针草的适生面积也显著增加,其中,高适生区主要分布在江苏省、山东省、北京市、天津市、河北省、重庆市、云南

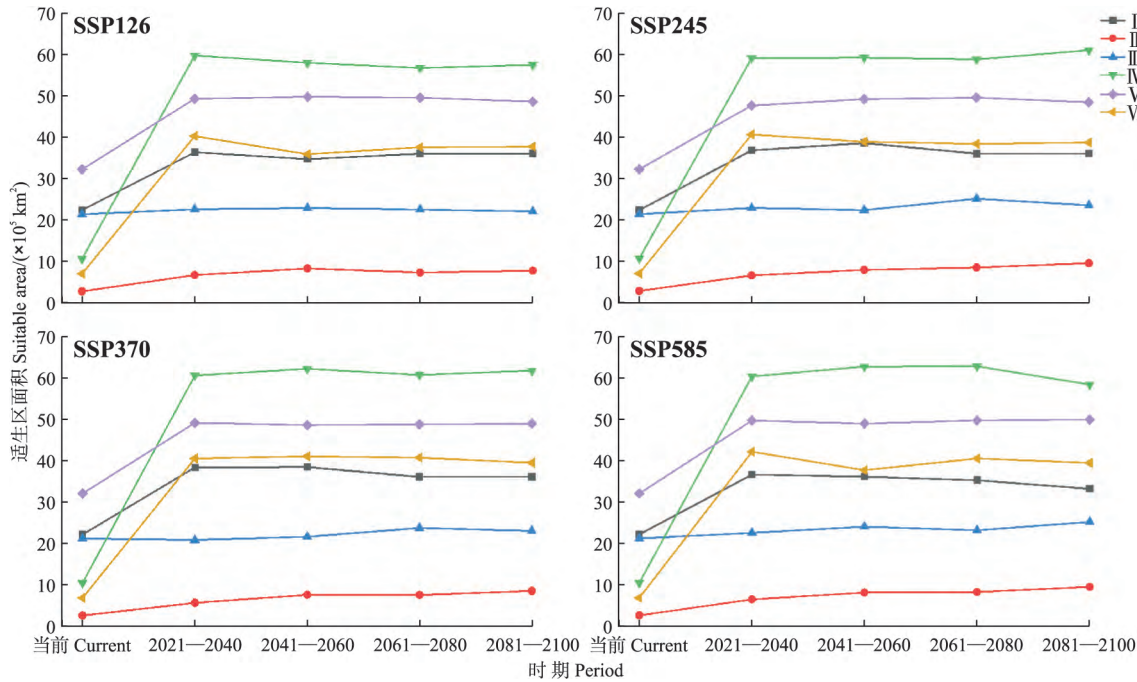


图 10 鬼针草属 6 种入侵植物在 4 种排放路径下适生区面积变化
Fig.10 Changes in the suitable habitat area of six invasive *Bidens* species under four emission pathways.

省、陕西省、新疆维吾尔自治区,总适生区面积相较于当前增加了 $32.70 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 10)。

未来 SSP585 路径时,白花鬼针草和鬼针草的部分中低适生区转变为高适生区,但其总适生区面积变化相对较小。白花鬼针草的中低适生区向湖南省、江西省、重庆市和浙江省大部分地区,以及湖北省、安徽省、四川省东部、重庆市、云南省西南部、贵州省南部和西藏自治区东南部的部分区域扩张,其总适生区面积相较于当前增加了 $6.89 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。鬼针草向山东省和新疆维吾尔自治区的部分地区扩张,其总适生区面积相较于当前增加了 $3.99 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。此外,婆婆针在我国东部沿海地区、西南部分地区以及新疆维吾尔自治区的大部分区域的适生性显著提升,转变为高适生区,其总适生区面积相较于当前增加了 $17.86 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 10)。

3 讨 论

本研究通过 MaxEnt 模型,结合气候因子分析了鬼针草属 6 种入侵植物的适生因子发现:大狼把草对最干月降水量、最干季度降水量和平均温度日较差最敏感;白花鬼针草和鬼针草则更适应温暖的气候,最冷月最低温和温度年较差对其分布影响较大;多苞狼把草则对降水量季节性变化和最湿月降水量更为敏感,表明其对水分条件有特定要求;婆婆针和南美鬼针草的分布则受最冷季度平均温和最冷月最低温的影响较大,说明低温是限制其分布的主要因素;南美鬼针草对最干季度平均温也有一定响应,表明其对干旱条件有一定适应能力。以上各物种对环境因子的响应存在显著差异,反映了入侵植物生态适应策略的差异性。

在不同温室气体排放路径 (SSP126、SSP245、SSP370、SSP585) 下,全球变暖使鬼针草属入侵植物的适生区面积均显著增加,可见,全球气温的持续上升,显著促进了鬼针草属植物的生长传播,其生物量分配模式亦随之发生变化,同时对周围受体植物的化感抑制作用有所增强^[7]。不同温室气体排放路径下,鬼针草属不同入侵植物的扩散趋势并不相同,在 2081—2100 年间,基于 SSP370 路径的模拟预测显示,大狼把草、多苞狼把草和南美鬼针草相较于当前的适生面积,其适生范围扩张幅度最大。而在 SSP585 路径下,白花鬼针草、鬼针草和婆婆针相较于当前的适生面积,适生范围增长最为显著。可见,气候因子是驱动鬼针草属植物入侵扩散的关键生态环境因子^[11]。

多苞狼把草与南美鬼针草对于当前的气候及降水条件表现出较弱的适应性,其当前的适宜生存区域和分布范围相对较小,与在我国被视为“有待观察”水平的入侵植物的结论一致,但在未来 4 种不同的温室气体排放路径下,这 2 种入侵植物的适宜生存区域扩张趋势最为显著。可见,随着未来气候变暖,多苞狼把草与南美鬼针草适生面积将急剧增大,从而对相关区域的生态环境构成潜在风险。可能原因:首先,全球气候变暖导致的气温上升可能延长了这些入侵物种的生长期,而降水模式的变化则可能影响了土壤湿度和可利用的水分资源,这些都有利于它们的生长和繁殖^[28-31];其次,鬼针草属植物均具有较强的环境适应能力,能够迅速适应包括土壤类型、光照强度以及竞争压力等的新环境条件^[4]。

综上,入侵植物,无论是自然引入还是由于环境变化而引入,往往对本土生态系统构成威胁,其破坏性影响可能极为严重。特别是那些环境适应性强、繁殖能力高的外来物种,有可能破坏甚至彻底改变原有的生态系统结构和功能。可见,在全球环境变暖的背景下,生物入侵与气候暖化形成正反馈,将显著削弱生态系统的稳定性^[32]。本研究利用 MaxEnt 模型分析发现,在不同排放路径下,6 种鬼针草属入侵植物的适生区面积均将显著增加,尤其是多苞狼把草和南美鬼针草,其适生区扩张最为显著,可能对未来生态环境构成较大风险。在未来 4 种温室气体排放路径下,虽然其适生区的整体面积均有所增加,但也有物种出现了适生区面积下降的波动趋势,表明鬼针草属 6 种入侵植物之间对气候因子的响应存在显著差异,反映了其各自可能采取不同的生活史。未来需深入了解气候变化下入侵生物的生理生态特性、分布动态、生态适应机制及其对生态系统结构和功能的影响,才能制定有效和精准的生物入侵防控策略。

参考文献

- [1] Dukes M. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14: 135-139
- [2] Ravi S, Law DJ, Caplan JS, et al. Biological invasions and climate change amplify each other's effects on dryland degradation. *Global Change Biology*, 2022, 28: 285-295
- [3] Hellmann JJ, Byers JE, Bierwagen BG, et al. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*, 2008, 22: 534-543

- [4] 尚春琼, 朱珣之. 外来植物三叶鬼针草的入侵机制及其防治与利用. 草业科学, 2019, 36(1): 47-60
- [5] 王岸英, 张玉茹. 菊科 8 种鬼针草属(*Bidens* L.) 杂草种子的鉴别. 吉林农业大学学报, 2002, 24(3): 57-59
- [6] Kato-Noguchi H, Kurniadie D. The invasive mechanisms of the noxious alien plant species *Bidens pilosa*. Plants, 2024, 13: 356
- [7] 王瑞龙, 韩萌, 梁笑婷, 等. 三叶鬼针草生物量分配与化感作用对大气温度升高的响应. 生态环境学报, 2011, 20(6-7): 1026-1030
- [8] Osaki S, Wasaki J, Nakatsubo T. Phenological shifts of the invasive annual weed *Bidens pilosa* var. *pilosa* in response to warmer temperature. Plant Ecology, 2022, 223: 1155-1165
- [9] 陈婕, 罗觅, 陶敏, 等. 动物和植物远缘杂交比较研究. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(10): 1139-1161
- [10] 吴昊, 董思谨, 苏仪函, 等. 入侵植物对气候变化响应的研究新进展. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2023, 36(2): 338-344
- [11] Steen B, Adde A, Schlaepfer MA, et al. Distributions of non-native and native plants are not determined by the same environmental factors. Ecological Solutions and Evidence, 2024, 5: e12374
- [12] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity. Ecology Letters, 2012, 15: 365-377
- [13] Forster PM, Smith C, Walsh T. Indicators of global climate change 2023: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. Earth System Science Data, 2024, 16: 2625-2658
- [14] 王子文, 尹进, 王星, 等. 辽宁省入侵植物曼陀罗的生境适宜性评价: 基于 Biomod2 组合模型. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1272-1280
- [15] O'Neill BC, Tebaldi C, van Vuuren DP, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 2016, 9: 3461-3482
- [16] Zhang W, Huang Q, Kuang YZ, et al. Predicting the potential distribution of the invasive weed *Mikania micrantha* and its biological control agent *Puccinia spegazzinii* under climate change scenarios in China. Biological Control, 2025, 204: 105754
- [17] Ren WJ, Peng J, Shrestha N, et al. Potential distribution and future shifts of invasive alien plants in China under climate change. Global Ecology and Conservation, 2025, 60: e03601
- [18] 肖麒, 章梦婷, 吴翼, 等. 基于生态位模型的外来入侵种克氏原螯虾在中国的适生区预测. 应用生态学报, 2020, 31(1): 309-318
- [19] 毕晓琼, 赵斯, 王林, 等. 气候变化对牛膝菊在中国潜在适生区的影响. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(2): 70-75
- [20] 黎绍鹏, 范舒雅, 孟亚妮, 等. 外来生物入侵中的达尔文归化谜团. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(4): 723-738
- [21] 何兰君, 李林霞, 欧光龙. 基于标志种分布预测的哀牢山植被潜在分布及气候解释研究. 西南林业大学学报: 自然科学版, 2024, 44(3): 52-60
- [22] Pamplona JP, Souza MF, Sousa DMM, et al. Seed germination of *Bidens subalternans* DC. exposed to different environmental factors. PLoS One, 2020, 15(3): e0233123
- [23] Chauhan BS, Ali HH, Florentine S. Seed germination ecology of *Bidens pilosa* and its implications for weed management. Scientific Reports, 2019, 9: 16004
- [24] CABI International. *Bidens vulgata* [DB/OL]. (2022-12-21) [2025-05-19]. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.112700>
- [25] 李明, 王军邦, 张秀娟, 等. 未来气候情景下青藏高原高寒草原与高寒草甸优势种潜在适宜区分布预测. 生态学报, 2024, 44(22): 10162-10177
- [26] 徐易溱, 文威坚, 林协全, 等. MaxEnt 模型预测气候变化下野鸦椿在中国的潜在地理分布. 东北林业大学学报, 2024, 52(10): 47-51
- [27] 刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 等. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析. 生态学报, 2020, 40(16): 5674-5684
- [28] 段义忠, 王海涛, 王驰, 等. 气候变化下濒危植物半日花在中国的潜在分布. 植物资源与环境学报, 2020, 29(2): 55-68
- [29] 岑润琳, 叶童欣, 张宪春, 等. 翅柄假脉蕨分布格局对未来气候变化的响应. 生态学杂志, 2025, 44(5): 1636-1643
- [30] 杨芙蓉, 齐耀东, 刘海涛, 等. 辣木全球潜在适生区与生态特征. 北京林业大学学报, 2020, 42(10): 45-54
- [31] 刘艳杰, 黄伟, 杨强, 等. 近十年植物入侵生态学重要研究进展. 生物多样性, 2022, 30(10): 276-292
- [32] Peller T, Altermatt F. Invasive species drive cross-ecosystem effects worldwide. Nature Ecology & Evolution, 2024, 8: 1087-1097

作者简介 聂焱晗, 女, 2001 年生, 硕士研究生。主要从事群落生态学研究。E-mail: yanhannie0629@163.com

责任编辑 杨 弘