

基于 MaxEnt 模型模拟未来气候变化下金露梅在中国的潜在适生区变化^{*}

李思睿, 刘一瑶, 黄永梅[†]

(北京师范大学中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京)

摘要 金露梅(*Dasiphora fruticosa*)是高寒落叶灌丛中常见且具有代表性的灌木物种,广泛分布于北半球高山和高纬度地区,在水土保持和高寒生态屏障维持方面发挥重要作用。研究金露梅在气候变化背景下的潜在适生区变化,有助于了解未来气候变化下高寒灌丛的响应特征。本研究以金露梅为研究对象,选择19个气候变量、3个地形变量与3个土壤变量作为环境变量,利用金露梅现代(1961—2020年)分布点建立MaxEnt模型,分析影响金露梅分布的主要环境因子,同时模拟不同共享社会经济路径(SSPs)下未来(2081—2100年)金露梅的物种分布情况。研究结果表明:1)模型的AUC值为0.901,模拟效果较好;2)影响金露梅分布的主要环境因子为最暖季度平均温度、年降水量和土壤养分;3)不同共享社会经济路径下,2081—2100年金露梅的适生区均呈显著减少趋势,东部地区适生区几乎消失,适生区向西部高海拔地区迁移,将集中在青藏高原及周边地区。本研究可为金露梅的优先保护区规划和气候变化适应性管理提供科学依据。

关键词 金露梅;气候变化;MaxEnt模型;物种分布

中图分类号 Q948.2

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2026016

0 引言

蔷薇科金露梅属金露梅(*Dasiphora fruticosa*)是高寒落叶灌丛中常见且具有代表性的灌木物种^[1-3],广泛分布于北半球寒温带至亚寒带及亚高山和高山地区,在亚洲、欧洲及美洲均有分布^[4]。金露梅在中国主要分布在四川、西藏、青海、甘肃、内蒙古、云南、黑龙江等省(自治区)^[4-5],多分布于中高海拔的山地和河谷生境^[4,6]。金露梅植株高大、根系发达,具有重要的水土保持功能,对高寒区生态系统的生态功能维持具有重要的作用^[3,6]。

在气候变化的背景下,金露梅的分布可能发生扩张,从而影响高寒区生态系统的生产力和生态功能^[7]。已有研究分别就青藏高原、祁连山、贺兰山等局部区域的金露梅分布点模拟分析了其现有分布格局^[7-11],但存在使用的分布数据较少、分布范围不全面等局限性,可能低估金露梅的实际分布范围。同时,已有研究缺乏对金露梅未来分布的模拟,对金露梅这一高寒灌丛的代表性物种在气候变化背景下分布范围的变化趋势尚不明确。因此,在全国尺度上,金露梅的

分布受到哪些环境因子的影响、在未来不同排放情景下将如何变化仍有待探讨。

物种分布模型(species distribution model, SDM)是使用物种的分布数据和环境变量数据,通过特定的算法得到物种和环境变量的关系,并将这种关系投影到研究区域上,估计物种的分布区域与概率的模型^[12-13]。SDM广泛应用于全球变化对物种分布及生态系统功能的影响^[14-15]、入侵物种的管理^[16]、濒危物种的保护^[17-18]、自然保护区的规划设计、生态恢复物种的选择、物种迁地保护生境的筛选等方面的研究^[12-13,19-21]。MaxEnt模型是其中一种SDM,由于它操作简单,适用性强,精度较高,在物种分布数量和环境数据不充分时仍有良好的预测结果,因此得到了广泛的应用^[13,22-23]。

本研究以中国为研究区域,收集全国金露梅分布点数据,开展金露梅的分布区模拟和未来分布预测研究,拟探求金露梅物种分布的主要环境影响因子以及其不同气候变化情景下的未来分布格局,为合理利用和保护金露梅资源、保护金露梅分布区的生态系统提供理论依据与参考。

^{*} 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0306)

[†] 通信作者:黄永梅,女,教授。研究方向:植物地理学和生态水文学。E-mail: ymhuang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-21

1 材料与方法

1.1 数据来源与预处理

1.1.1 物种分布数据

金露梅高 0.5~2.0 m, 多分枝, 小枝红褐色; 羽状复叶, 常有小叶片 5 枚(2 对), 稀有 3 小叶, 叶柄被绢毛或疏柔毛, 小叶长圆形、倒卵长圆形或卵状披针形, 长 0.7~2.0 cm, 宽 0.4~1.0 cm, 边缘平坦, 疏被绢毛或柔毛或脱落近于无毛; 单花或数朵生于枝顶, 花梗密被长柔毛或绢毛; 花直径 2.2~3.0 cm, 花瓣黄色, 宽倒卵形, 顶端圆钝; 萼片卵圆形, 副萼片披针形至倒卵状披针形, 外面疏被绢毛; 瘦果近卵形, 褐棕色, 长 1.5 mm, 外被长柔毛^[24]。在《中国植物志》中, 金露梅被划归于蔷薇科(Rosaceae)委陵菜属(*Potentilla*), 学名为 *Potentilla fruticosa*, 并包含白毛金露梅(*P. fruticosa* var. *albicans*)、伏毛金露梅(*P. fruticosa* var. *arbuscula*)、垫状金露梅(*P. fruticosa* var. *pumila*) 3 个变种^[24]。而在《2024 年中国生物物种名录》中, 金露梅被重新划归于蔷薇科金露梅属(*Dasiphora*), 学名为 *Dasiphora fruticosa*, 之前的 3 个变种被调整至金露梅属下其他物种。本研究收集了采集时间在 1961—2020 年、学名为 *D. fruticosa* 和 *P. fruticosa* 的标本数据(不包括变种), 记录其采样年份、采样地点及经纬度, 数据来自中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/index.php>)。对于没有经纬度、但采样地点地理范围较小(县级以下行政单位和小型山体、河流、沟谷、林场等)的标本, 通过百度地图坐标拾取器(<https://lbs.baidu.com/maptool/getpoint>)确定其采样地点的经纬度。剔除采样地点范围过大、采样地点不在中国境内、人工栽培标本及重复标本的分布数据, 最终得到 566 个现代分布点(图 1)。

1.1.2 环境变量数据

环境数据包括 19 个气候变量、3 个地形变量和 3 个土壤变量(表 1), 所有环境数据的分辨率均为 1 km。

过去(1901—1960 年)和现代(1961—2020 年) 2 个时期的 19 个气候变量使用 R 语言“dismo”包中的“biovars”函数计算得到^[25], 其中 1901—2020 年中国 1 km 逐月降水、最高温、最低温数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)^[26]。未来气候数据(2081—2100 年)来自 WorldClim(<https://worldclim.org>), 分辨率为 1 km。本研究选择 CMIP6 中 BCC-CSM2-MR 预测的 SSP126、SSP245、SSP370、SSP585 情景下的 19 个气候变量, 该模式对中国的气候模拟较为可靠, 在关于中国气候变化的相关研究中被广泛使用^[27-30]。

地形变量选取了坡度、坡向和地形粗糙度 3 个。

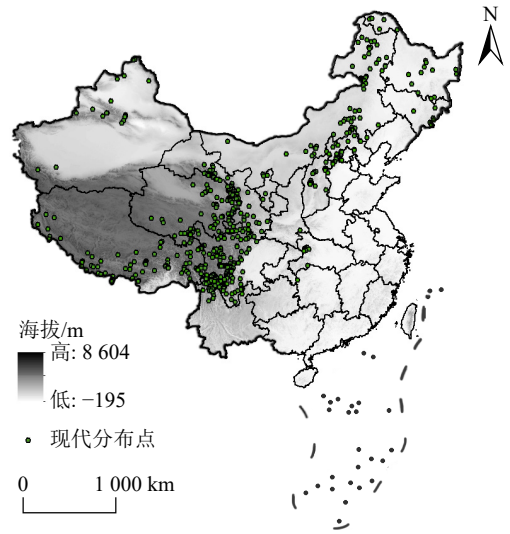


图 1 金露梅现代(1961—2020 年)分布点

表 1 金露梅 MaxEnt 模型环境变量筛选与使用情况

变量类型	编号	变量名称	单位	是否纳入模型
气候	BIO1	年均温	℃	
	BIO2	平均气温日较差	℃	
	BIO3	等温性		√
	BIO4	气温季节性变动系数		√
	BIO5	最热月份最高温度	℃	
	BIO6	最冷月份最低温度	℃	√
	BIO7	气温年较差	℃	
	BIO8	最湿季度平均温度	℃	
	BIO9	最干季度平均温度	℃	
	BIO10	最暖季度平均温度	℃	√
	BIO11	最冷季度平均温度	℃	
	BIO12	年降水量	mm	√
	BIO13	最湿月份降水量	mm	
	BIO14	最干月份降水量	mm	
	BIO15	降水量季节性变化		√
	BIO16	最干季度降水量	mm	
	BIO17	最湿季度降水量	mm	
	BIO18	最暖季度降水量	mm	
	BIO19	最冷季度降水量	mm	
地形	Slope	坡度	°	√
	Aspect	坡向	°	√
	TRI	地形粗糙度		√
土壤	SN	土壤养分		√
	ST	土壤质地		√
	pH	土壤酸碱度		

坡度和坡向数据由重采样至 1 km 后的 DEM 数据在 ArcGIS 10.6 中计算得到, DEM 数据使用来自 USGS

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)的 30 m 分辨率的 SRTM DEM. 地形粗糙度指数(terrain ruggedness index, TRI)来源于 Geomorpho 90 m 数据库中的 TRI 变量, 并重采样至 1 km 分辨率^[31]. 该变量基于 90 m 分辨率的 MERIT DEM 数据计算得到, 即

$$I_{TR} = \sum_{i=1}^8 |e - e_i| / 8,$$

式中: e 为中心栅格的高程; e_i 是周围 8 个栅格的高程.

土壤变量数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)的中国高分辨率国家土壤信息网络基本属性数据集(2010—2018), 使用 1 km 分辨率的 0~5、>5~15、>15~30 cm 3 个深度的土壤数据加权平均, 得到 0~30 cm 的土壤数据^[32-33]. 土壤养分由土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP) z -score 标准化后按照 1/3、1/3、1/3 的权重计算得到, >0 代表土壤养分水平较好, 0 代表土壤养分水平中等, <0 代表土壤养分水平较差. 土壤质地由黏粒质量分数和粉粒质量分数计算得到, 其值可表征土壤的保水能力^[34].

$$S_T = -3.140 - 0.0022w_{clay}^2 - 3.484 \times 10^{-5}w_{sand}^2w_{clay},$$

式中: S_T 代表土壤质地; w_{clay} 代表黏粒质量分数; w_{sand} 代表砂粒质量分数. S_T 越小, 表明土壤保水能力越差, 更易失水.

提取所有数据的重合部分作为掩膜, 并使用 SDM Toolbox 2.6 中的“Extract by Mask (Folder)”工具将所有 TIFF 格式的环境变量数据提取至相同范围, 并转换为 MaxEnt 模型需要的 ASCII 格式的数据^[35].

1.2 MaxEnt 模型建立与验证

1.2.1 环境变量筛选

将现代的所有环境变量与金露梅的现代分布数据导入 MaxEnt 模型(MaxEnt 3.4.4, https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)中运算^[36], 剔除贡献率为 0 的变量. 使用 R 语言中“cor”函数计算各环境变量之间的斯皮尔曼相关系数, 剔除具有强相关性(相关系数>0.8)的 2 个环境变量中贡献率较低的环境变量^[37], 最终得到用于建立金露梅分布模型的环境变量(表 1).

1.2.2 模型设置与精度评价

将金露梅现代分布数据与筛选后的环境变量导入 MaxEnt 模型, 结果输出形式(Output format)选择“Logistic”, 该输出形式下输出的结果值在(0, 1)的区间内, 可解释为物种的适生程度或分布概率^[38-39]. 随机测试百分比设置为 25%, 模型将随机选择 25% 的分布点作为测试集, 其余 75% 的分布点作为训练集^[40].

重复运行类型(replicated run type)设置为“Bootstrap”, 重复次数(replicates)设置为 10 次, 最大迭代次数(maximum iterations)设置为 5 000, 其余采用模型默认设置. 受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积值(area under curve, AUC)表示随机选取的存在点的值高于随机选取的不存在点的值的概率, 可作为模型模拟精度的评价指标^[41]. 对于 MaxEnt 模型, $0.5 \leq AUC < 0.6$ 为模型失败, $0.6 \leq AUC < 0.7$ 为较差, $0.7 \leq AUC < 0.8$ 为一般, $0.8 \leq AUC < 0.9$ 为好, $0.9 \leq AUC < 1$ 为极好^[42-43].

1.2.3 MaxEnt 模型模拟与结果可视化

使用金露梅现代分布数据与现代环境变量数据建立金露梅 MaxEnt 模型后, 使用该模型与过去、现在及未来不同情景的环境变量数据分别模拟金露梅在不同时期及情景的物种分布. 在 ArcGIS 10.6 中将模型模拟结果转换为 TIFF 格式, 根据自然间断点分级法对结果 P 进行重分类, 分为 4 个适生等级: 非适生区($P < 0.1$), 低度适生区($0.1 \leq P < 0.3$), 中度适生区($0.3 \leq P < 0.5$), 高度适生区($P \geq 0.5$), 并统计各个适生等级所占的面积^[44]. 将低度适生区、中度适生区和高度适生区统一作为适生区, 计算过去到现代、现代到未来 4 种情景适生区的稳定、扩张和收缩的区域, 并根据分布概率值计算不同时期和情景下分布区的重心, 绘制不同时期之间金露梅分布重心的迁移路线^[45].

1.2.4 环境变量分析

植物分布主要受到能量、水分和养分的限制. 主要的能量限制因子有年均温、最冷月份最低温度、最热月份最高温度等^[46-48], 水分限制因子有干旱指数等^[49], 养分限制因子有土壤全氮、土壤全磷、土壤有机碳、土壤碳氮质量比、土壤氮磷质量比等^[50-54]. 对金露梅现代的非适生区、低度适生区、中度适生区和高度适生区, 分别提取以上限制因子与模型中起主要作用的环境因子并绘制箱型图. 干旱指数(aridity index, AI)的计算公式为

$$I_A = P/E_p,$$

式中: P 为年平均降水量, 即 BIO12; E_p 为年平均潜在蒸散发, 使用来自国家地球系统科学数据中心的 中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集计算得到^[26]. I_A 值越大, 说明水分条件越充足, 气候越湿润, 反之则表示环境趋于干旱.

2 结果

2.1 模型精度与环境变量分析

金露梅的训练数据集的 AUC 值为 0.901, 测试数

据集的 AUC 值为 0.884, 表明模型模拟精度较好。在构建金露梅物种分布模型时选取的 11 个环境变量中, 贡献率较大的有最暖季度平均温度(41.8%)、土壤养分(19.9%)和年降水量(14.8%), 置换重要性较大的有最暖季度平均温度(38.8%)、土壤养分(15.7%)、年降水量(11.4%)和最冷月份最低温度(11.1%)(表 2)。

表 2 金露梅 MaxEnt 模型中环境变量的贡献率与置换重要性

环境因子	含义	贡献率/%	置换重要性/%
BIO10	最暖季度平均温度	41.8	38.8
SN	土壤养分	19.9	15.7
BIO12	年降水量	14.8	11.4
BIO6	最冷月份最低温度	5.5	11.1
BIO3	等温性	3.7	1.2
Slope	坡度	3.6	4.5
ST	土壤质地	3.3	4.4
BIO4	气温季节性变动系数	2.6	5.1
BIO15	降水量季节性变化	1.7	3.5
TRI	地形粗糙度	1.6	3.1
Aspect	坡向	1.3	1.4

刀切法检验图(图 2)显示, 仅使用 1 个环境变量时, 最暖季度平均温度、土壤养分和年降水量对模型性能的独立贡献最大, 去除 1 个环境变量时, 模型性能下降最大的是最暖季度平均温度、年降水量和土壤养分。

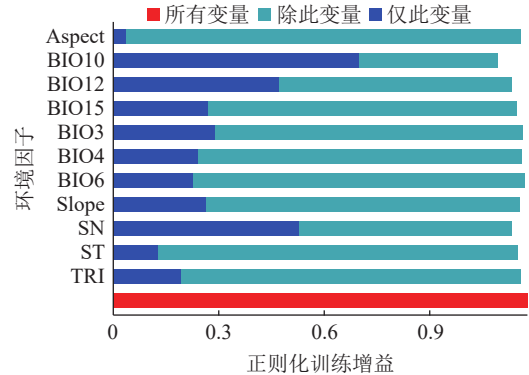


图 2 金露梅 MaxEnt 模型刀切法检验

由综合贡献率、置换重要性和刀切法检验图可知, 最暖季度平均温度、年降水量和土壤养分是金露梅物种分布的主要影响因素。响应曲线显示了当控制其他变量为平均值时, 单独改变某个变量时模型预测的物种存在概率的变化情况, 其中存在概率 > 0.5 的范围为物种在该环境因子下的最适生存范围。金露梅的存在概率随着最暖季度平均温度的增加先增加后降低, 当最暖季度平均温度为 11.5 °C 时, 金露梅的存在概率达到峰值(0.64), 适合金露梅生存的最暖季度平均温度区间为 6.8~17.4 °C(图 3-a)。金露梅的存在概率随着年降水量的增加先增加后降低, 当年降水量为 460 mm 时, 金露梅的存在概率达到峰值(0.64), 且适合金露梅生存的年降水量区间为 270~1 060 mm(图 3-b)。金露梅的存在概率随着土壤养分指数的增加先增加后降低, 当土壤养分指数为 8.3 时, 金露梅的存在概率达到峰值(0.69), 适合金露梅生存的土壤养分指数区间为 -0.2~12.6(图 3-c)。

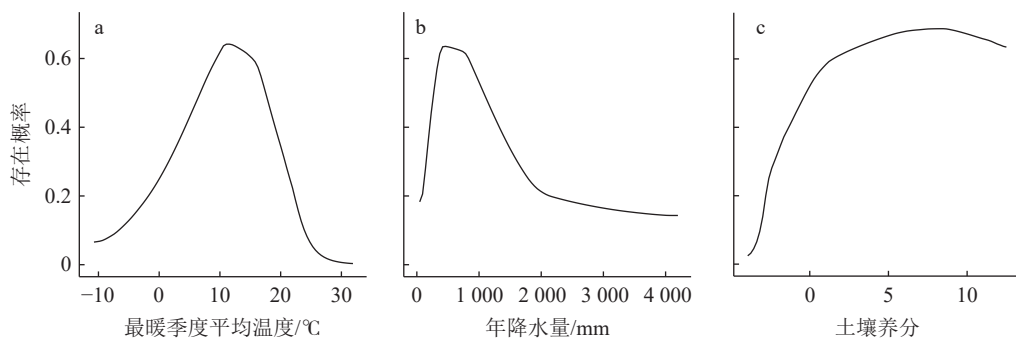


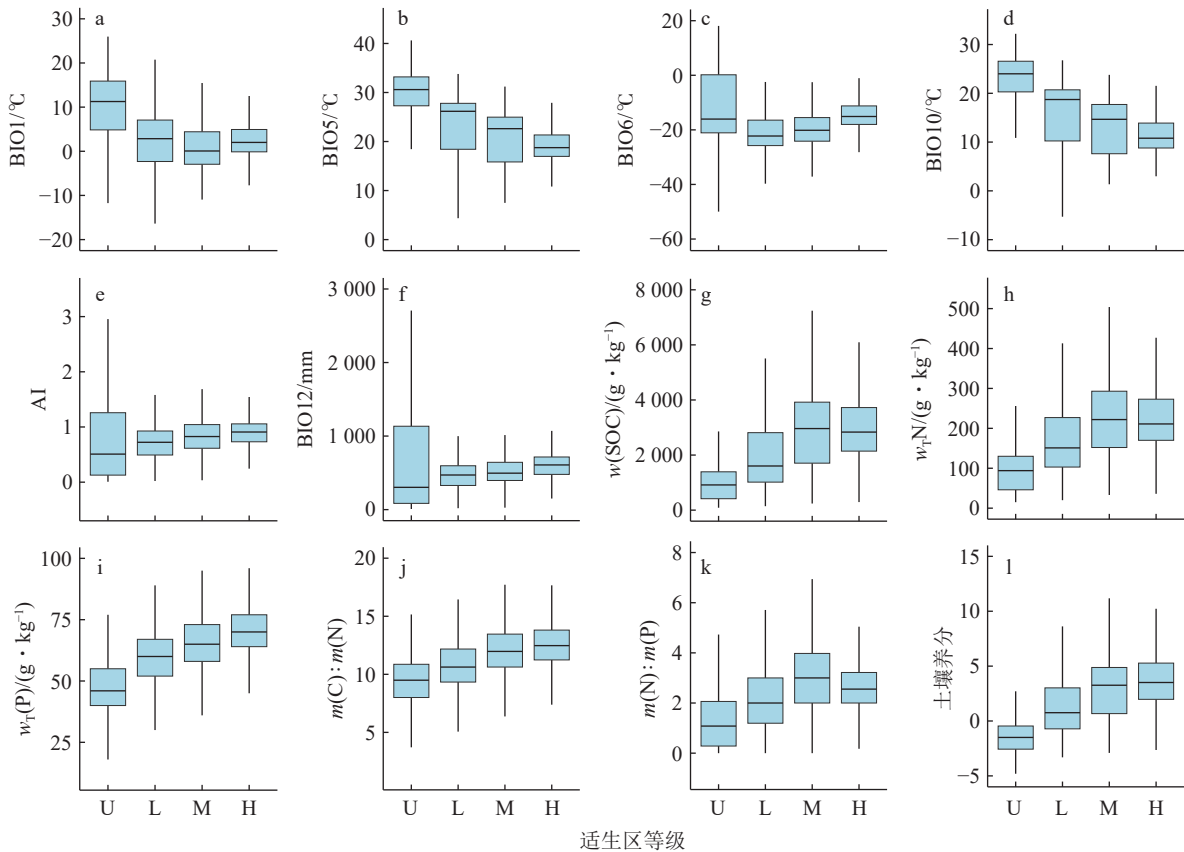
图 3 金露梅 MaxEnt 模型中主要环境因子的响应曲线

对于能量限制因子, 金露梅不同适生等级分布区的年均温表现为非适生区 > 低度适生区 > 高度适生区 > 中度适生区(图 4-a), 最热月份最高温度表现为非适生区 > 低度适生区 > 中度适生区 > 高度适生区(图 4-b), 最冷月份最低温度表现为非适生区 > 高度适生区 > 中度适生区 > 低度适生区(图 4-c), 最暖季度平均温

度表现为非适生区 > 低度适生区 > 中度适生区 > 高度适生区(图 4-d)。

对于水分限制因子, 金露梅不同适生等级分布区的干旱指数和年降水量均表现为高度适生区 > 中度适生区 > 低度适生区 > 非适生区的趋势(图 4-e、f)。

对于养分限制因子, 金露梅不同适生等级分布区



注：适生区等级中，U 为非适生区，L 为低度适生区，M 为中度适生区，H 为高度适生区。

图 4 不同适生等级下金露梅能量、水分、养分限制因子的箱线图

的土壤有机碳质量分数、土壤全氮质量分数和土壤氮磷质量比均表现为中度、高度适生区>低度适生区>非适生区的趋势(图 4-g、h、k)，且各个等级的下边界差别较小。金露梅不同适生等级分布区的土壤全磷质量分数、土壤碳氮质量比和土壤养分均表现为高度适生区>中度适生区>低度适生区>非适生区的趋势(图 4-i、j、l)。

2.2 金露梅潜在分布格局及其变化趋势

1901—1960 年间金露梅主要分布于东北(大兴安岭、小兴安岭、长白山)、华北(燕山、太行山脉)、黄土高原、胶东半岛、新疆(阿尔泰山、天山山脉)、喜马拉雅山脉和青藏高原东部，其中高度适生区主要分布于青藏高原东部、太行山脉和黑龙江省的漠河市，中度适生区主要分布于大兴安岭、秦岭、天山山脉和吉林省的珲春市，低度适生区主要分布于小兴安岭、长白山、燕山、黄土高原及中高度适生区周围(图 5-a)。1961—2020 年金露梅分布与 1901—1960 年接近，但天山山脉、秦岭和大兴安岭的高度适生区面积都有一定程度的增加，黑龙江省漠河市的高度适生区几乎都转变为中度适生区，吉林省珲春市的中度适生区面积增加(图 5-b)。

SSP126 情景下金露梅的分布均与现代分布相似，

但小兴安岭、长白山、太行山脉和黄土高原的适生区面积减少，秦岭仅剩少部分低度适生区，胶东半岛的适生区几乎消失，而昆仑山脉出现了较大面积的低度适生区，喜马拉雅山脉高度适生区面积增加。SSP245 情景下金露梅在东北的分布进一步减少，仅在大兴安岭和吉林省珲春市有低度适生区分布，华北地区也几乎只有低度适生区的分布，黄土高原的适生区消失，但天山山脉和阿尔泰山脉的高度适生区面积增加。SSP370 和 SSP585 情景下，金露梅在东北仅在大兴安岭有少量分布，在太行山脉、秦岭的适生区几乎消失，但在青藏高原地区的分布区向东明显扩张，且高度适生区的面积也显著增加(图 5-c-f)。

从 1901—1960 到 1961—2020 年，金露梅的总适生区面积增加，其中低度适生区和中度适生区面积有小幅度的增加，而高度适生区几乎没有变化。从 1961—2020 到 2081—2100 年，4 种情景下金露梅的总适生面积都明显减小，且排放越大，总适生区面积减少越多，低度适生区和中度适生区减少越多，而高度适生区增加越多(图 6)。

1901—1960 至 1961—2020 年金露梅适生区范围变化较小，在东北、新疆、横断山脉南侧、青藏高原的适生区边缘有轻微的扩张，在胶东半岛和内蒙古的

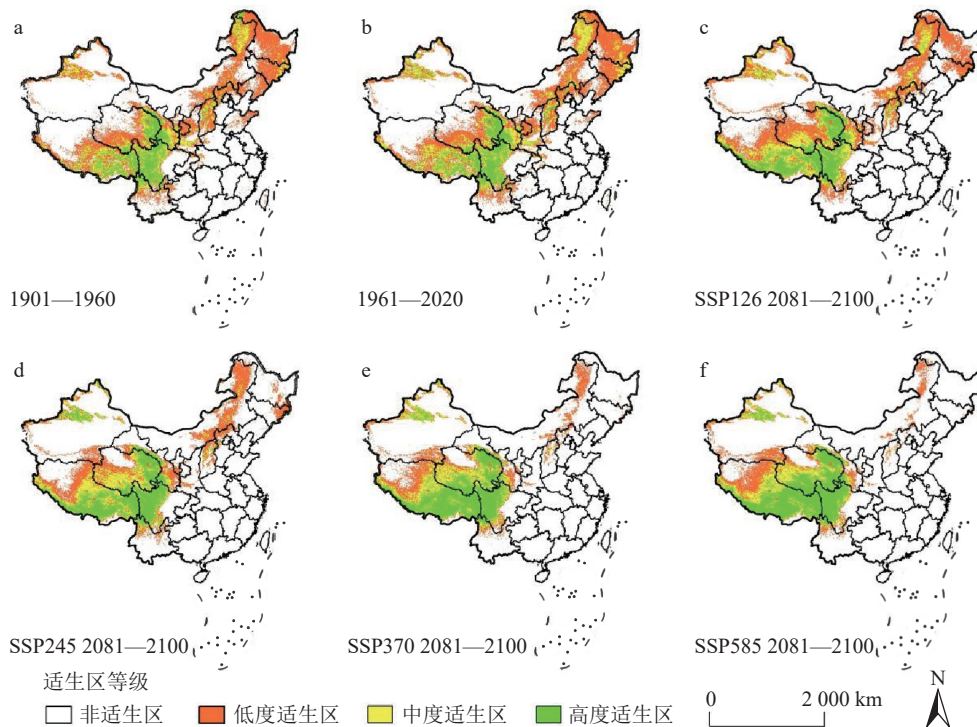


图5 金露梅不同时期/情景的适生区分布

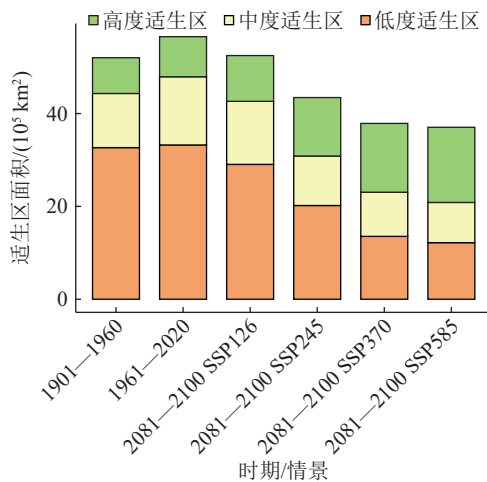


图6 金露梅不同时期/情景各等级适生区面积

陈巴尔虎旗有轻微的收缩(图7-a)。与1961—2020年相比,2081—2100年的4种情景金露梅的适生区北侧均存在大面积的收缩,收缩地区主要存在于东北、华北、黄土高原、秦岭、天山山脉东侧和横断山脉南侧,且排放越高的情景收缩面积越大。与此同时,2081—2100年的4种情景适生区也存在大面积的扩张,扩张地区主要位于青藏高原适生区的东北侧,且排放越高的情景扩张面积也越大(图7-b~e)。

1901—1960年金露梅分布重心位于甘肃省东部,1961—2020年金露梅分布重心位于宁夏回族自治区西部,与1901—1960年相比,1961—2020年重心向东北方向移动了35.08 km。2081—2100年的4种情景分布重心均向西南大幅迁移且均位于青海省,其中

SSP126的重心移动了394.84 km, SSP245的重心移动了637.56 km,移动方向较SSP126更偏南, SSP370的重心移动了860.65 km, SSP585的重心移动了930.40 km, SSP245、SSP370和SSP585的重心移动方向几乎一致(图8)。

3 讨论

3.1 影响金露梅分布的主要环境因子

根据MaxEnt模型的结果可知,对金露梅的分布起主要作用的环境因子是最暖季度平均温度、年降水量和土壤养分。这3个环境因子分别代表了植物分布中的能量、水分和养分限制因子,它们通过影响金露梅的代谢活动、水分平衡及养分获取等关键生理过程,共同塑造金露梅的适生区分布格局。

能量限制因子中,金露梅的存在概率和最暖季度平均温度呈现单峰模式,适宜生存的范围为6.8~17.4℃,表明金露梅更适宜生存在夏季较为凉爽的地区,高温胁迫会限制金露梅的分布。最暖季度平均温度主要通过影响金露梅的光合作用、呼吸作用、生长季温度、生长季长度等影响金露梅的生长与繁殖能力,进而影响金露梅的分布。最暖季度平均温度还可能影响土壤微生物的活性与土壤养分循环,进而影响金露梅的养分获取情况^[55]。最暖季度平均温度的变化还可能改变植物的物候,例如导致花期、果期的延迟或提前,影响植物的繁殖^[56–57]。除最暖季度平均温度外,其他温度因子也显示出高温和极端低温均可能对

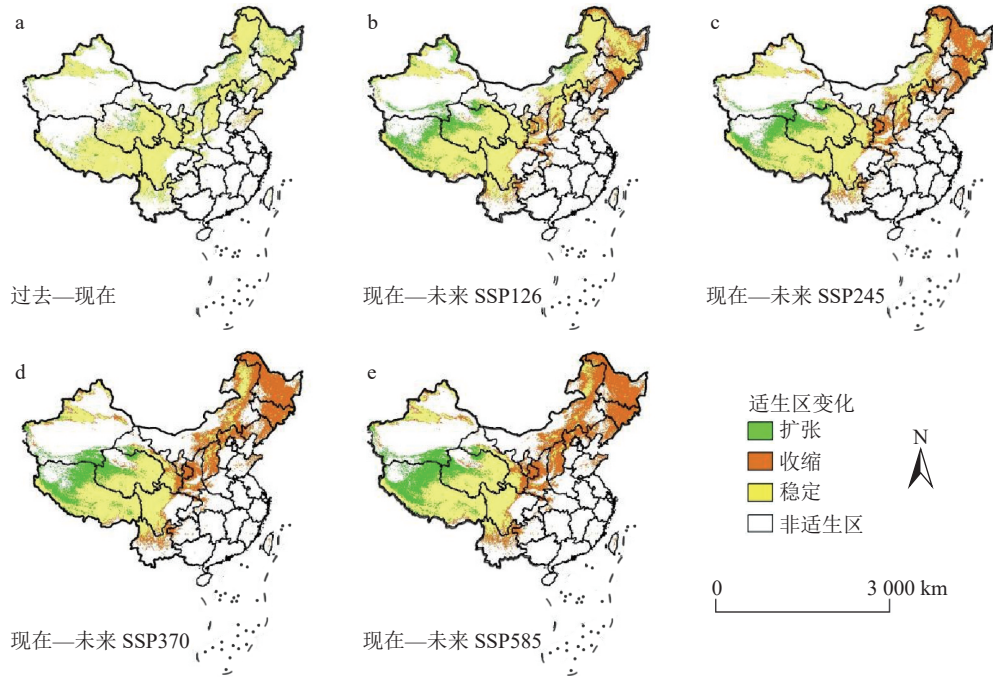


图 7 金露梅适生区的空间变化

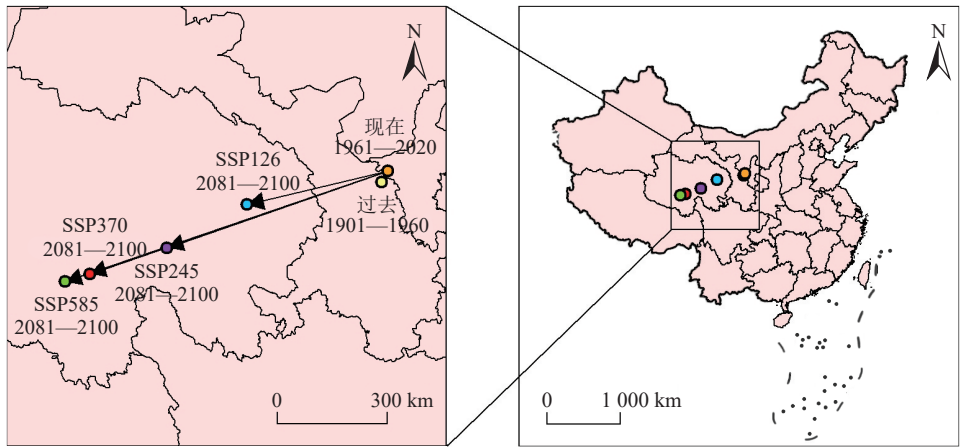


图 8 金露梅分布重心迁移

金露梅的分布产生限制作用. 中度适生区具有最低的年均温, 表明过低的年均温会在一定程度上降低金露梅的存在概率. 适生等级越高, 最热月份最高温度越低, 说明高温胁迫可能限制了金露梅的分布. 有研究表明, 在 42 ℃ 的高温胁迫下, 金露梅的叶绿体和细胞膜的结构会被破坏, 进而影响金露梅的光合作用等代谢活动^[58-59]. 适生等级越高, 最冷月份最低温度也越高, 说明极端低温也会限制金露梅的生存.

水分限制因子中, 金露梅的存在概率和年降水量呈现单峰模式, 适宜生存的范围为 270~1 060 mm, 且干旱指数和年降水量这 2 个水分限制因子, 均呈现高度适生区>中度适生区>低度适生区>非适生区的趋势, 这表明水分条件是影响金露梅分布的重要环境因子, 金露梅更适宜生存在水分条件较好的地区. 当年降水

量过低时, 植物的生长受到水分限制甚至死亡^[60]. 年降水量还可能通过影响土壤含水量影响金露梅的分布^[55]. 金露梅的叶片水势和光合作用受到土壤含水量的显著影响, 过高或过低的水分条件都会抑制其生理活动^[61].

养分限制因子均呈现中度、高度适生区>低度适生区>非适生区的趋势, 表明金露梅适宜生存在养分条件较好的地区, 但不同养分因子的限制作用存在一定差异. 对于土壤有机碳质量分数、全氮质量分数和土壤氮磷质量比, 各适生等级箱型图的下边界差异较小且均接近 0, 表明金露梅在较低的水平下仍可出现, 这些养分因子对金露梅分布的影响可能有限. 而对于土壤全磷, 随着金露梅适生等级的升高, 其箱型图的下边界也呈现增加趋势, 表明较高的适生等级需要

较高的土壤磷水平,高适生等级对磷存在一定的阈值要求,土壤全磷可能对金露梅的分布具有一定的约束作用.有研究发现土壤的有机碳、全氮、全磷质量分数与金露梅的功能性状及叶片和花化学计量相关^[62],其中金露梅生长的主要限制因素为磷^[62].此外,金露梅适生等级越高,土壤碳氮质量比值越大.高碳氮质量比通常表示氮相对不足,但金露梅主要分布的东北地区和青藏高原东部都有较高的土壤有机碳和土壤全氮含量,说明这些地区金露梅存在概率高是因为养分条件整体较好,并没有受到氮的限制.

3.2 不同气候变化情景下金露梅的分布格局变化

当前金露梅在我国的分布范围较广,在东北、华北、青藏高原等地区都有大面积分布. MaxEnt 模型模拟的结果显示,在不同的 SSP 情景下 2081—2100 年金露梅的高度适生区的面积增大,中度和低度适生区的面积减少,总适生区的面积减少.高度适生区面积的增大表明,在未来气候条件下金露梅核心适生区域的生存条件可能得到一定程度的改善,有利于种群的维持和扩展.总体适生区面积的缩小反映出其潜在分布空间受到压缩,中度和低度适生区面积的缩小可能表明物种对环境变化的缓冲空间减小.若未来气候变化持续加剧,边缘适生区可能更易受到影响.

从适生区扩张与收缩的空间分布来看,金露梅的分布表现出向西、向高海拔地区迁移的趋势,这一变化与其对温度和水分条件的敏感性密切相关.未来气候情景下,东部地区升温幅度较大,可能导致原本位于适生区边缘的中低适生区因温度过高或水分条件改变而逐渐丧失适宜性,从而导致适生区的收缩.而青藏高原及其周边地区在升温背景下热量条件得到改善,部分原本受低温限制的区域逐渐突破温度的限制,为金露梅提供了新的潜在适生空间,从而导致适生区的扩张.此外,随着排放的增加,适生区扩张与收缩的变化幅度均增大,这可能是因为高排放背景下温度和降水条件的变化幅度更大,使更多原有适生区转变为非适生区,同时也促使更多原本受低温限制的高海拔区域获得适宜的热量条件,转变为适生区.在 2081—2100 年 SSP585 的情景下,金露梅在东部地区的适生区几乎消失,分布区集中到了青藏高原及其周边地区,可见金露梅的潜在分布在高排放情景下受到了巨大的影响.

金露梅的分布重心大幅度向西迁移,与适生区扩张方向一致,这与大量已有的关于气候变化背景下未来物种分布变化趋势的研究结论一致^[63-66].冷蒿在未来情景下主要在青藏高原地区扩张并在东北地区小面积扩张,重心向西南青藏高原地区迁移^[67].沙蓬属

在未来情景下表现出向高纬度和高海拔地区扩张的趋势^[68].天麻、秃杉、猬实、星叶草和延龄草的分布区在未来情景下均向高海拔地区扩展,但扩展方向不同^[69].综上可知,金露梅的分布对未来气候变化的响应较大,当前金露梅在东部地区适生区的生态环境可能在未来发生较大的变化.东部地区的高寒灌丛可能被其他植被类型替代,生态系统结构和功能可能发生较大的改变,应该及早制订适应策略,应对气候变化的影响.

3.3 MaxEnt 模型的不确定性

本研究采用的 MaxEnt 模型在样本量较少条件下仍具有较高预测精度,且已被广泛应用于物种分布预测研究,但其结果仍可能受到物种分布数据、环境变量选择等的影响.物种分布数据是模型模拟预测的重要基础.虽然分布点数量对 MaxEnt 模型的预测精度影响相对有限,但会影响模型的稳定性^[70].同时,分布点重复或过于集中会导致群集效应^[70].本研究的分布数据充足,且剔除了重复和冗余的分布点,一定程度上保证了模型的稳定性.本研究主要基于物种分布点与环境变量之间的统计关系进行模拟,但并未考虑物种间相互作用、物种本身扩散能力、人类活动等因素,因此,在未来气候情景下物种的实际分布与预测结果可能存在一定偏差.同时,本研究为降低多重共线性的影响对环境变量进行了筛选,但变量筛选方式也可能对模型输出产生一定影响.尽管存在上述不确定性,本研究模型的 AUC 值达到 0.901,表明预测性能较好,本研究结果仍能较为可靠地反映金露梅在不同气候变化背景下的潜在分布变化趋势.未来研究可结合多种模型开展综合分析,以进一步提高预测结果的稳健性与可靠性.

4 结论

本研究使用 MaxEnt 模型模拟金露梅过去(1901—1960 年)、现代(1961—2020 年)与未来(2081—2100 年)的 4 种 SSP 情景下的适生区分布,结果显示:1)模型 AUC 值为 0.901,模型的模拟效果较好;2)影响金露梅分布的主要环境因子为最暖季度平均温度(适宜范围 6.8~17.4 ℃)、年降水量(适宜范围 270~1 060 mm)和土壤养分,主要受到高温和水分条件的限制,冬季的极端低温和土壤全磷的质量分数也会在一定程度上限制其分布;3)2081—2100 年间金露梅的适生区将大面积减少,东部地区适生区几乎消失,分布区将向西部高海拔地区迁移,适生区集中在青藏高原及其周边地区.

金露梅作为高寒灌丛的代表性物种,其潜在分布

对气候变化表现出较高敏感性,尤其在排放情景下适生区变化幅度显著增强,表明气候变化强度将直接影响其空间格局的变化程度,并进一步推动其适生区向高海拔地区迁移.该趋势与当前全球变暖背景下山地物种分布上移的普遍规律一致.若未来气候变化持续加剧,东部地区金露梅的适生区将显著缩减,从而对当地高寒灌丛生态系统的稳定性和生态功能产生一定影响.本研究结果揭示了金露梅在不同气候情景下的响应差异,可为高寒灌丛生态系统的保护和适应性管理提供科学参考.

5 参考文献

- [1] 周华坤,周立,赵新全,等.金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究[J].草业学报,2002,11(2): 59
- [2] 王启基,周兴民,张堰青,等.青藏高原金露梅灌丛的结构特征及其生物量[J].西北植物学报,1991,11(4): 333
- [3] 苏爱玲,徐广平,段吉闯,等.祁连山金露梅灌丛草甸群落结构及主要种群的点格局分析[J].西北植物学报,2010,30(6): 1231
- [4] 苏培玺,陈怀顺,周紫鹃,等.金露梅与格桑花[J].植物科学学报,2020,38(6): 844
- [5] 内蒙古植物志编委会.内蒙古植物志:第三卷[M].2版.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1989
- [6] 张勇,王一峰.国产委陵菜属植物资源[J].西北师范大学学报(自然科学版),1998,34(1): 59
- [7] 安栩立,张振华,杨建平.青藏高原高寒灌木金露梅扩张态势分析[J].草业科学,2024,41(12): 2823
- [8] 苏强,鲁娅娜,刘矜杰.内蒙古贺兰山不同生境下小叶金露梅种群特征与空间格局研究[J].内蒙古林业,2021(12): 35
- [9] 吴国有.祁连山金露梅野生资源分布与人工引种栽培[J].西北园艺,2024(6): 29
- [10] 刘旻霞,李文,连依明.基于Ripley $K(r)$ 函数的金露梅与蒲公英种群空间分布格局及其关联性[J].生态学报,2018,37(7): 1925
- [11] 刘旻霞.亚高寒草甸不同坡向金露梅种群的空间分布格局及空间关联[J].应用生态学报,2017,28(6): 1817
- [12] Duan R Y, Kong X Q, Huang M Y, et al. The predictive performance and stability of six species distribution models[J]. PLoS One, 2014, 9(11): e112764
- [13] 许仲林,彭焕华,彭守璋.物种分布模型的发展及评价方法[J].生态学报,2015,35(2): 557
- [14] Anderson R P. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2013, 1297(1): 8
- [15] Dyderski M K, Paž S, Frelich L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions?[J]. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1150
- [16] Mainali K P, Warren D L, Dhileepan K, et al. Projecting future expansion of invasive species: comparing and improving methodologies for species distribution modeling[J]. Global Change Biology, 2015, 21(12): 4464
- [17] Guo Y L, Li X, Zhao Z F, et al. Prediction of the potential geographic distribution of the ectomycorrhizal mushroom *Tricholoma matsutake* under multiple climate change scenarios[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46221
- [18] Mccune J L. Species distribution models predict rare species occurrences despite significant effects of landscape context[J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(6): 1871
- [19] 李国庆,刘长成,刘玉国,等.物种分布模型理论研究进展[J].生态学报,2013,33(16): 4827
- [20] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models[J]. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993
- [21] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40: 677
- [22] Kelly A E, Goulden M L. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(33): 11823
- [23] 郭彦龙,赵泽芳,乔慧捷,等.物种分布模型面临的挑战与发展趋势[J].地球科学进展,2020,35(12): 1292
- [24] 中国植物志编委会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1985
- [25] Hijmans R J, Phillips S, Leathwick J, et al. Package 'dismo' [J]. Circles, 2017, 9(1): 1
- [26] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931
- [27] Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al. The Beijing climate center climate system model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6[J]. Geoscientific Model Development, 2019, 12(4): 1573
- [28] 周秀华,何莉阳,何洁琳,等.基于BCC-CSM2-MR模式的广西未来气候变化预估[J].气象研究与应用,2024,45(4): 75
- [29] 李淑萍,全文杰,王正,等. BCC-CSM2-MR 全球气候模式对东亚地区降水和气温的模拟评估[J].干旱气象,2023,41(6): 984
- [30] 辛晓歌,吴统文,张洁. BCC 气候系统模式开展的CMIP5 试验介绍[J].气候变化研究进展,2012,8(5): 378
- [31] Amatulli G, Mcinerney D, Sethi T, et al. Geomorpho90m, empirical evaluation and accuracy assessment of global high-resolution geomorphometric layers[J]. Scientific Data, 2020, 7: 162
- [32] 刘峰,张甘霖.中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集(2010—2018) [DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心(2021-11-30)[2025-12-29]. <https://www.tpdc.ac.cn/zh->

- hans/data/e1ccd22c-348f-41a2-ab46-dd1a8ac0c955/
- [33] Liu F, Zhang G L, Song X D, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114061
- [34] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(4): 1031
- [35] Brown J L, Bennett J R, French C M. SDMtoolbox 2.0: the next generation Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e4095
- [36] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. Maxent software for modeling species niches and distributions: V3.4. 1 [P/OL]. 2025-12-30. http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
- [37] 刘佳敏, 杜珍珠, 王玉霞, 等. 基于 Maxent 模型的小叶桦中国潜在适生区预测研究 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2025, 43(1): 102
- [38] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43
- [39] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161
- [40] Fielding A H, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models[J]. *Environmental Conservation*, 1997, 24(1): 38
- [41] Merow C, Smith M J, Silander J A Jr. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter[J]. *Ecography*, 2013, 36(10): 1058
- [42] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 等. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区 [J]. *植物保护学报*, 2016, 43(6): 1041
- [43] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. *Science*, 1988, 240(4857): 1285
- [44] Cao C C, Su F L, Song F, et al. Distribution and disturbance dynamics of habitats suitable for *Suaeda salsa*[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108984
- [45] 李康杰, 邓海燕, 邹文涛. 气候变化情景下枫香在中国的潜在地理分布 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, 45(4): 128
- [46] Vasseur D A, Delong J P, Gilbert B, et al. Increased temperature variation poses a greater risk to species than climate warming[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2014, 281(1779): 20132612
- [47] Körner C, Larcher W. Plant life in cold climates[C]//Long S P, Woodward F I. *Plants and Temperature*. Cambridge: The Company of Biologists Limited, 1988: 25
- [48] Häkkinen H, Hodgson D, Early R. Plant naturalizations are constrained by temperature but released by precipitation[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2022, 31(3): 501
- [49] Svoboda M D, Fuchs B A. Handbook of drought indicators and indices [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2016
- [50] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(9): 852
- [51] Yang G H, Zhang M M, Jin G Z. Effects of nitrogen addition on species composition and diversity of early spring herbs in a Korean pine plantation[J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(9): e10498
- [52] Zhao Z Y, Dong P, Fu B, et al. Soil organic carbon distribution and factors affecting carbon accumulation in natural and plantation forests in tropical China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110127
- [53] John R, Dalling J W, Harms K E, et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(3): 864
- [54] Condit R, Engelbrecht B M J, Pino D, et al. Species distributions in response to individual soil nutrients and seasonal drought across a community of tropical trees[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(13): 5064
- [55] Liu M X, Li B W, Xu L, et al. Characteristics of culturable microbial community in rhizosphere/non-rhizosphere soil of *Potentilla fruticosa* population in alpine meadow elevation gradient[J]. *Frontiers in Soil Science*, 2021, 1: 741012
- [56] Sherry R A, Zhou X H, Gu S L, et al. Divergence of reproductive phenology under climate warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(1): 198
- [57] Mazer S J, Travers S E, Cook B I, et al. Flowering date of taxonomic families predicts phenological sensitivity to temperature: implications for forecasting the effects of climate change on unstudied taxa[J]. *American Journal of Botany*, 2013, 100(7): 1381
- [58] 邓东周, 贺丽, 鄢武先, 等. 温度和干旱胁迫对川西北高寒沙区 3 种优势植物种子萌发的影响 [J]. *种子*, 2019, 38(3): 15
- [59] Guo Y T, Wang Z, Guan X L, et al. Proteomic analysis of *Potentilla fruticosa* L. leaves by iTRAQ reveals responses to heat stress[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0182917
- [60] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management[M]//Sustainable Agriculture. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 153
- [61] 刘颖, 贺康宁, 徐特, 等. 水分胁迫对金露梅叶片水势、光合特性和水分利用效率的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 106
- [62] Qin Y Y, Liu W, Zhang X F, et al. Leaf stoichiometry of

- Potentilla fruticosa* across elevations in China's Qilian Mountains[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 814059
- [63] Shao G F, Shugart H H, Smith T M. A role-type model (rope) and its application in assessing climate change impacts on forest landscapes[J]. *Vegetatio*, 1995, 121(1): 135
- [64] Song M H, Zhou C P, Ouyang H. Distributions of dominant tree species on the Tibetan (Qinghai-Xizang) Plateau under current and future climate scenarios[J]. *Mountain Research and Development*, 2004, 24(2): 166
- [65] Gottfried M, Pauli H, Reiter K, et al. A fine-scaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climate warming[J]. *Diversity and Distributions*, 1999, 5(6): 241
- [66] Fosaa A M, Sykes M T, Lawesson J E, et al. Potential effects of climate change on plant species in the Faroe Islands[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, 13(5): 427
- [67] 杜毅倩, 余国杰, 殷晓洁, 等. 气候变化对冷蒿在我国潜在地理分布的影响 [J]. *生态学报*, 2025, 45(4): 1950
- [68] 孙红, 段霁芸, 刘雨洁, 等. 气候变化背景下沙蓬属 (*Agriophyllum*) 物种潜在地理分布 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2): 255
- [69] 吴建国. 气候变化对我国 7 种植物潜在分布的影响 [J]. *广西植物*, 2011, 31(5): 595
- [70] 杨佳悦, 丁国玉, 田秀君. 最大熵模型在物种生境预测中的应用研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2025, 36(2): 614

Simulating potential suitable habitat of *Dasiphora fruticosa* in China under future climate change with MaxEnt

Li Sirui, Liu Yiyao, Huang Yongmei

(Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing, China)

Abstract *Dasiphora fruticosa* is a typical alpine deciduous shrub species widely distributed across high mountains and high-latitude regions in the Northern Hemisphere; it plays a crucial role in soil and water conservation and in maintaining alpine ecological stability. Studying potential changes in suitable habitat of *D. fruticosa* under climate change conditions will help characterize alpine shrubland responses to future climatic conditions. A total of 19 climatic variables, 3 topographic variables, and 3 soil variables were selected as environmental predictors. A MaxEnt model was constructed using current (1961-2020) distribution points of *D. fruticosa* to identify the main environmental factors influencing its distribution. Potential future (during 2081-2100) distribution of *D. fruticosa* under different Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) was simulated. This model achieved an AUC value of 0.901, indicating high predictive accuracy. The mean-temperature of warmest quarter, annual precipitation, and soil nutrient were found to be the main environmental factors influencing distribution of *D. fruticosa*. Suitable habitat of *D. fruticosa* is projected to decrease significantly during 2081-2100, with suitable habitat in the eastern regions nearly disappearing and distribution shifting westward to higher elevations, mainly concentrated on the Qinghai-Xizang Plateau and surrounding regions. This study clarifies the dominant environmental mechanisms governing distribution of *D. fruticosa* and warns of contraction of its distribution under future climate change; this will provide some scientific basis for priority conservation area planning and climate-adaptive management of *D. fruticosa*.

Keywords *Dasiphora fruticosa*; climate change; MaxEnt model; species distribution

【责任编辑: 范 林】