

基于MaxEnt模型预测中国水晶兰潜在适生区

刘春静

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2026年2月20日; 录用日期: 2026年3月14日; 发布日期: 2026年3月23日

摘要

水晶兰(*Monotropa uniflora* L.)作为一种特殊的菌异养植物, 对生境变化极为敏感, 且难以人工迁地保护。在全球气候变暖背景下, 明确其在中国的潜在地理分布及其对未来气候变化的响应特征, 对于该物种的野生资源保护与生境管理具有重要意义。本研究利用最大熵模型(MaxEnt)和ArcGIS, 预测当前气候条件下水晶兰在中国的潜在适生区, 并预测了未来(2021~2080年)在SSP126、SSP245和SSP585三种气候情景下的适生区时空演变格局及质心迁移路径。结果表明: 影响水晶兰分布的主导环境因子为气候因子, 其中降水是影响其分布最显著的因素; 当前水晶兰主要集中在秦岭-淮河一线以南的地区; 在未来三种气候情景中, 水晶兰适生区整体呈扩张趋势, 质心整体向高纬度和高海拔方向迁移。同时, 水晶兰的分布除受气候主导外, 还受到其菌异养生态机制的严格限制。研究结果为该物种的保护规划提供了理论指导, 并为未来结合生物互作的精准预测指明方向。

关键词

水晶兰, MaxEnt模型, 适生区变化

Predicting the Potential Suitable Habitat of *Monotropa uniflora* L. in China Based on the MaxEnt Model

Chunjing Liu

School of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: February 20, 2026; accepted: March 14, 2026; published: March 23, 2026

Abstract

Monotropa uniflora L., as a unique myco-heterotrophic plant, is extremely sensitive to habitat changes and difficult to conserve through *ex-situ* cultivation. In the context of global warming, clarifying its

potential geographic distribution in China and its response characteristics to future climate change is of great significance for the conservation of its wild resources and habitat management. This study used the MaxEnt model and ArcGIS to predict the potential suitable habitat of *Monotropa uniflora* L. in China under current climatic conditions, and projected the spatiotemporal evolutionary patterns and centroid migration paths of its suitable habitat under three future climate scenarios (SSP126, SSP245, and SSP585) from 2021 to 2080. The results showed that climatic factors were the dominant environmental factors affecting the distribution of *Monotropa uniflora* L., among which precipitation was the most significant factor. Currently, *Monotropa uniflora* L. is mainly concentrated in the regions south of the Qinling-Huaihe Line in China. Under the three future climate scenarios, the suitable habitat of *Monotropa uniflora* L. showed an overall expansion trend, and the distribution centroid shifted towards higher latitudes and elevations as a whole. This study provides theoretical guidance and data support for the conservation and management of *Monotropa uniflora* L. Meanwhile, the distribution of *Monotropa uniflora* L. is not only dominated by climate but also strictly constrained by its mycoheterotrophic ecological mechanism. The findings provide theoretical guidance for the conservation planning of this species and point the way for future precise predictions incorporating biological interactions.

Keywords

Monotropa uniflora L., MaxEnt Model, Changes in Suitable Habitats

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

物种的地理分布和环境紧密相关, 环境因子常常制约着物种的生存及分布[1]。气候变化是影响物种适生区分布的重要因素之一[2]。特别是在全球变暖的背景下, 气候变化引起的极端天气, 叠加人类活动等多种因素, 导致物种分布范围呈现向两极或更高海拔迁移的趋势, 物种的空间分布格局发生剧烈变化, 同时生境破碎化加剧, 严重影响了生物多样性[3]-[6]。

水晶兰(*Monotropa uniflora* L.), 杜鹃花科水晶兰属, 是一种多年生草本腐生植物, 又称梦兰花、水兰草、银锁匙, 广泛分布于中国(青海、浙江、安徽等省区)、俄罗斯、日本、印度、东南亚以及北美地区[7]。水晶兰具有重要的药用价值, 性平和, 味微咸, 全草及根均可入药。临床主要用于补虚止咳, 治疗肺虚咳嗽[8]。然而, 由于过度采挖及生境破坏, 水晶兰的野生种群受到严重威胁, 2013年水晶兰在中国被列入国家近危(NT)珍稀植物名录[9]。作为一种珍稀的腐生草本植物, 水晶兰对生境要求严格且特殊, 大多生长在海拔 800 米至 3200 米的黑暗潮湿的混交林或落叶阔叶林里, 依赖特定的真菌共生体系生存[10]。这种对环境的高度敏感性, 使其极易受到外界环境波动的影响。然而, 目前水晶兰已有的研究主要集中在其生态特征、药用价值等方面, 而针对其地理分布格局及其对环境变化响应的研究则较为有限。

物种分布模型(SDMs)是通过分析物种分布数据和相关环境因素, 预测物种适宜栖息地分布的数学模型。这些模型通过分析从物种分布点收集的环境信息, 评估物种的生存需求, 并将这些数据投影到选定的研究区域[11]-[13]。目前, 物种分布模型主要包括生物气候分析系统模型(BIOCLIM) [14]、生态位因子分析模型(ENFA) [15]、广义线性模型(GLM)和最大熵模型(MaxEnt) [16]等。与其他模型相比, MaxEnt 模型不仅具有良好的预测性和稳定性, 而且具有简单、易于操作和样本量小的优点, 与 ArcGIS 空间分析相结合后, 广泛应用于分析物种的潜在适生区[17]-[19]。目前, MaxEnt 模型已经成为生态学领域中应用最

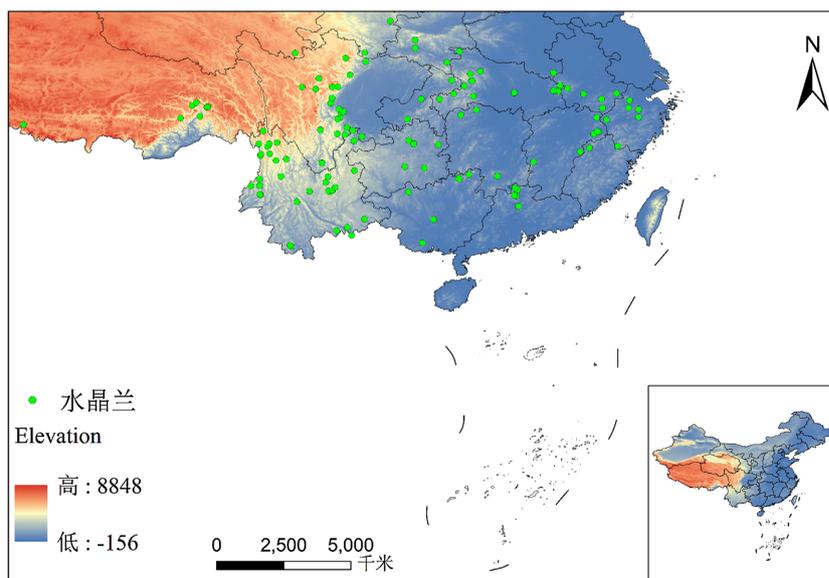
广泛、效果最好的物种分布模型之一。例如益争祝玛等人利用 MaxEnt 模型预测乌桕在中国的潜在分布[20],唐燕等人利用 MaxEnt 模型对中华枸杞在全国的适宜性分布概率进行预测[21],陈旭等人利用 MaxEnt 模型预测气候变化对小花老鼠簕潜在适生区的影响[22]。然而,这些研究在环境因素选择上多局限于气候因素,本研究在此基础上,综合考虑气候、土壤、地形、人类活动等多重因素,通过 MaxEnt 模型对水晶兰的潜在适生区进行更为全面、准确的预测。但是,水晶兰的分布必然受到其共生真菌(如红菇科真菌)及这些真菌的宿主树种(如壳斗科、松科等植物)分布的限制,故后续还需结合共生真菌和宿主树种等因素进行更为精确的预测。

2. 材料和方法

2.1. 数据获取与筛选

2.1.1. 物种分布数据

水晶兰的物种分布数据来自于全球生物多样性信息网络平台(GBIF, <https://www.gbif.org>)、中国植物标本馆数字化平台(CVH, <http://www.cvh.ac.cn>),整合后共获取水晶兰分布数据坐标 300 个。在消除错误和重复的记录后,我们在 SDMtoolbox 中使用“Spatially-Rarefy-Occurrence-Data”工具,以确保每个 1×1 公里的网格仅包含一条出现记录,这种方法最大限度地减少现有空间自相关的出现记录数量并防止过拟合。最后,我们获取了 131 条水晶兰记录,并将它们保存在“.csv”文件中进行建模,如图 1。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Distribution points of *Monotropa uniflora* L.

图 1. 中国水晶兰分布点

2.1.2. 环境因子数据

本研究从气候、地形、土壤及人类活动四个维度出发,初步选取了包括 19 个生物气候变量、3 个地形变量、10 个土壤变量及 1 个人类活动数据在内的 33 个环境变量,作为模型构建的初始变量集。其中,气候数据来自世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>),包括当前和未来(2021~2040 年、2041~2060 年和 2061~2080 年)19 个生物气候因子,未来气候数据采用 CMIP6 的 BCC-CSM2-MR 气候模式,选取三种共享社会经济路径(SSP)情景:SSP126(低排放情景)、SSP245(中排放情景)、SSP585(高排放情景),空间

分辨率均为 30"; 地形数据获取自世界气候数据库 2.1 版本(<https://worldclim.org>); 土壤数据由 10 种土壤特性组成, 来自全球 SoilGrids 2.0 版数据库(<https://soilgrids.org>); 人类影响指数(Human Influence Index, HII)来自 NASA 社会经济数据与应用中心(<https://www.earthdata.nasa.gov>)。考虑到地形和土壤变量在短时间内相对稳定, 本研究假设其在未来气候下保持不变。

所有环境数据均利用 ArcGIS 10.8.1 进行空间一致性处理, 统一坐标系、空间分辨率与空间范围。为消除多重共线性对模型精度的影响, 对环境变量进行筛选。首先, 将所有环境变量带入 MaxEnt 模型预运行, 去除贡献度为 0 的变量; 其次, 将环境变量导入 SPSS 中进行 Pearson 相关性分析, 当环境变量的相关系数大于 0.8 时, 选择 MaxEnt 模型试运行结果中贡献率较高的一个[23]。最后得到 5 个气候变量, 2 个地形变量, 4 个土壤变量, 1 个人类活动数据共 12 个环境变量用于后续建模, 如表 1。

Table 1. Environment variables used by the model

表 1. 模型使用的环境变量

变量	环境因子	贡献率/%	置换重要性/%
bio14	最干月降水量	28.5	3.4
bio6	最冷月最低温	18.6	60.5
bio18	最暖季降水量	13.8	6.4
bio4	温度季节性	13	2.5
Elev	海拔	8.2	10.9
pH.H2O	土壤 pH	7.2	0.8
Slope	坡度	3.4	2.4
SOC	土壤有机碳含量	2.3	5.5
CLAY	粘粒	1.8	5.5
HII	人类影响指数	1.5	2.8
SILT	粉粒	1.1	2
bio15	降水季节性	0.5	0.9

2.2. MaxEnt 模型的构建

将水晶兰的分布点数据与筛选出的环境因子导入 MaxEnt 模型, 以模拟预测中国水晶兰的潜在适生区。在模型训练中, 采用 25% 的分布点作为测试集, 75% 的分布点作为训练集, 并进行 10 次重复运行。在每次重复运行中, 使用不同的随机数据划分方式, 以减少单次划分带来的误差, 最后对 10 次重复运行测试集的 AUC 值进行均值化处理。模型输出格式设置为 Logistic。使用刀切法构建响应曲线, 并通过受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线验证模型精度。AUC 值(即 ROC 曲线下面积)作为衡量模型预测准确度的重要指标, 不受阈值影响。一般来说, AUC 值在 0.5~0.6 时, 预测结果较差; 0.6~0.7 时, 预测结果较差; 0.7~0.8 时, 预测结果一般; 0.8~0.9 时, 预测结果较好; 0.9~1.0 时, 预测结果非常好。

2.3. 适生区划分与面积计算

将 MaxEnt 模型输出的结果导入 ArcGIS 10.8.1 平台, 采用重分类(Reclassify)工具对其进行等级划分。将生境划分为 4 个等级: 非适生区($0 < X < 0.2$)、低适生区($0.2 < X < 0.4$)、中适生区($0.4 < X < 0.6$)、高适

生区($0.6 < X < 1$) 4类生境。随后,通过 GIS 工具统计各适生等级的栅格数量并换算为面积(km^2),以量化不同等级适生区的空间占比。

2.4. 适生区动态变化与质心迁移计算

本研究基于 ArcGIS 的 SDMTtoolbox 工具,对水晶兰潜在适生区的变化进行了系统评估。首先,依据最大检验灵敏度与特异性逻辑阈值(设定临界阈值为 0.2),将 MaxEnt 模型生成的生境适宜度指数进行二值化处理,得到各时期的潜在适生区分布图:适宜度指数高于阈值的区域划为适宜区,低于阈值的区域则为非适宜区。随后,对不同时期的二值分布图进行叠加分析,依据像元变化将适生区动态划分为三类:稳定区、收缩区与扩张区,从而系统量化了研究时段内适生区面积的时空变化特征[24][25]。此外,我们还计算了各时期水晶兰适生区的质心,并根据质心的经纬度坐标计算其迁移距离。最后,利用合并工具和数据管理工具将质心点数据转换为线要素,形成质心迁移轨迹,直观展示质心的时空迁移路径。该分析结果将与适生区变化分析相结合进行解释,以全面了解适生区动态的幅度和空间格局[26]。

3. 结果与分析

3.1. 模型预测结果

MaxEnt 模型在当前气候条件下对水晶兰分布的预测结果显示,AUC 值为 0.905,如图 2。可见 MaxEnt 模型在预测水晶兰潜在适生区方面有较高的准确性和可靠性。

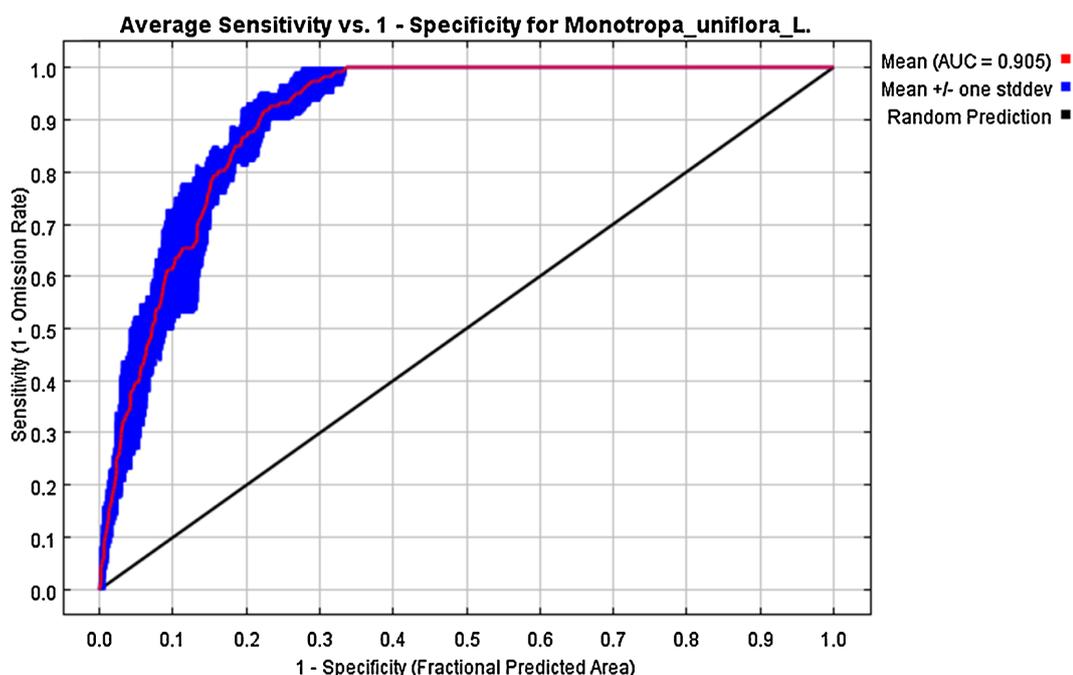


Figure 2. ROC curve of MaxEnt results

图 2. MaxEnt 结果 ROC 曲线

3.2. 影响水晶兰分布的主导因子分析

基于 MaxEnt 模型运行自动生成的贡献率和刀切法检验结果,对影响水晶兰分布的主导环境因子进行综合评价[27]。由表 1 可知,贡献率最大的前 6 个环境变量为最干月降水量(bio14)、最冷月最低温(bio6)、最暖季降水量(bio18)、温度季节性(bio4)、海拔(Elev)、土壤 pH (pH.H₂O),贡献率分别为 28.5%、18.6%、

13.8%、13%、8.2%、7.2%，累计贡献率为 89.3%。刀切法检验结果如图 3 显示，对水晶兰分布影响较大的前 6 个环境因子依次为冷月最低温(bio6)、温度季节性(bio4)、土壤 pH (pH.H₂O)、最暖季降水量(bio18)、最干月降水量(bio14)、降水季节性(bio15)，训练增益分别为 1.0、0.86、0.79、0.78、0.72、0.51。两者相差不大。综上，可得气候是主导变量，总贡献率为 74.4%，其中降水总量占 42.8%，对水晶兰分布的影响大于温度(31.6%)。

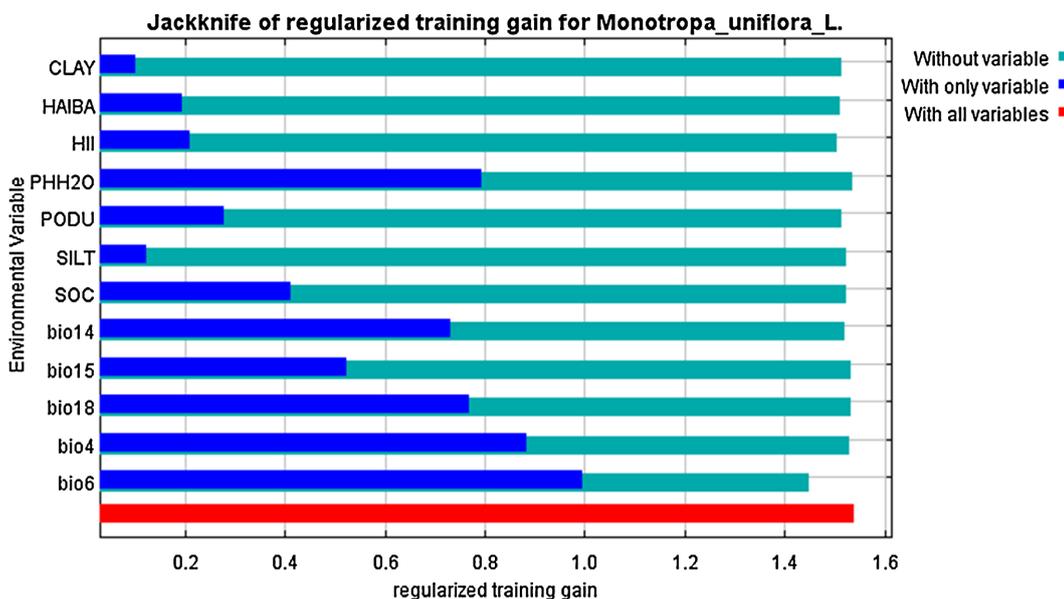


Figure 3. Jackknife method to test the impact of environmental variables

图 3. 刀切法检验环境变量的影响

通过响应曲线分析影响水晶兰分布的环境变量的阈值，设置存在概率阈值为 0.5，当其分布概率大于 0.5 时，则对应的气候因子值为适宜水晶兰生长[28]。如图 4 可得适合水晶兰生长的环境变量范围为：最干月降水量(bio14)为 10.0~55.4 mm、最冷月最低温(bio6)为-5.8℃~5.5℃、最暖季降水量(bio18)为 456~1530 mm、温度季节性(bio4)≤703、海拔(Elev)为 1167~3663 m、土壤 pH (pH.H₂O)为 5.0~6.1。得出结论：水晶兰偏好分布在中高海拔、全年温度稳定且土壤呈酸性的森林生态系统中，这为其潜在适生区划分和野外保护提供了关键的环境参数依据。

3.3. 当前气候条件下水晶兰潜在分布

当前气候条件下，水晶兰的总适生区面积为 $201.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，主要以低适生区为主，面积达 $103.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占总适生区面积的 51.51%。中适生区与高适生区面积分别为 $69.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 与 $27.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占比分别为 34.62% 与 13.87%。从地理空间上看(图 5)，水晶兰的适生区分布在 $90^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ 、 $20^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$ 。其中，高适生区集中于云南北部、四川西南部及西藏东南部的山区原始森林中；中适生区主要环绕高适生区，并向东延伸至贵州西部、湖南西部、广西西北部以及福建的中高海拔山区；低适生区分布最为广泛，分布在大部分南方省份。

3.4. 未来不同气候条件下水晶兰潜在适生区预测

在未来不同气候情景(SSP126、SSP245、SSP585)下，水晶兰的潜在适生区面积与空间格局均发生显著变化。在面积变化方面，与当前气候条件相比，水晶兰的适生区面积在未来各时期与情景下整体均呈

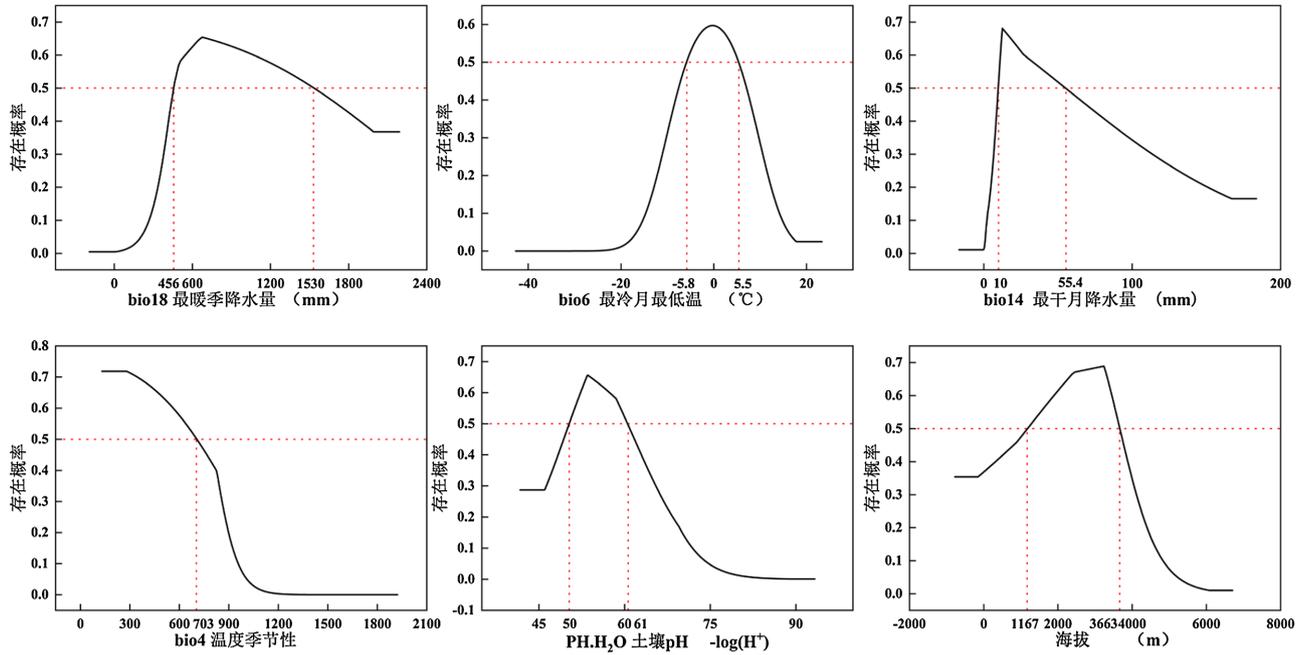
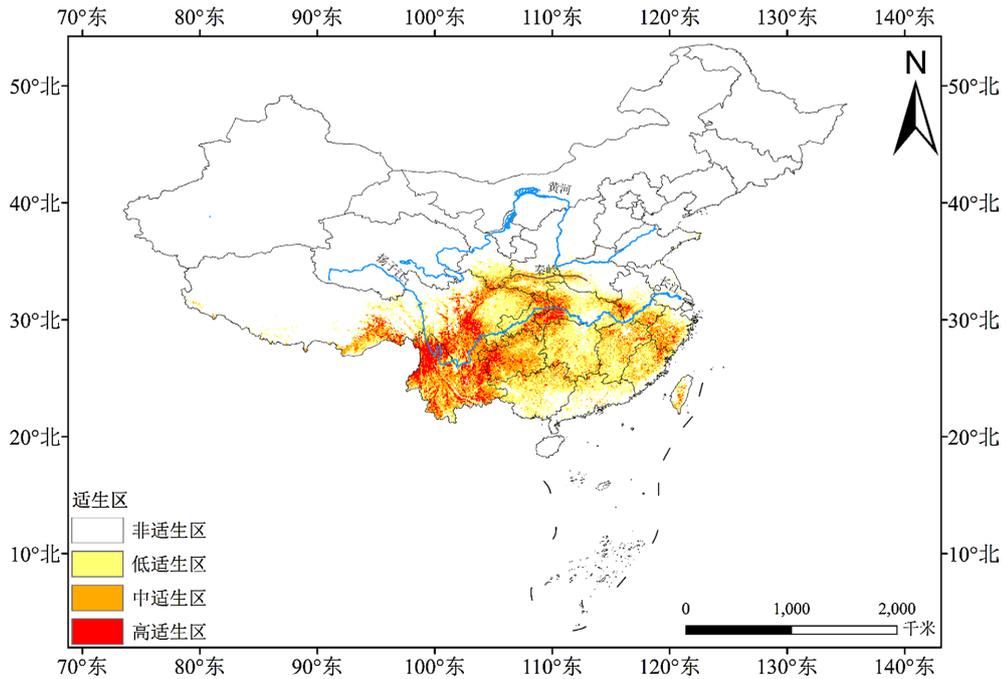


Figure 4. Response curves of dominant environmental variables
图 4. 主导环境因子响应曲线



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 5. Current distribution of suitable areas for *Monotropa uniflora* L.
图 5. 水晶兰当前适生区分布情况

扩张趋势(表 2)。其中, 2061~2080 年 SSP585 情景下的扩张最为显著, 总面积增长率达 35.68%; 2061~2080 年 SSP126 与 2041~2060 年 SSP245 情景次之, 增长率分别为 34.12% 与 31.39%。在各级适生区中, 高适生区面积的扩张最为突出, 尤其是在 2021~2040 年 SSP126 路径下, 高适生区面积激增至 110.24×10^4

km², 增长率高达 294.84%, 显著高于当前水平。在空间分布方面, 水晶兰呈现出以秦岭—淮河以南为核心、向北向西扩张的地理格局, 整体上, 未来气候条件将促使水晶兰的分布范围从传统的南方湿润山区向更高纬度和海拔的边缘地区扩散, 形成更广泛的连续分布带。如图 6 所示。

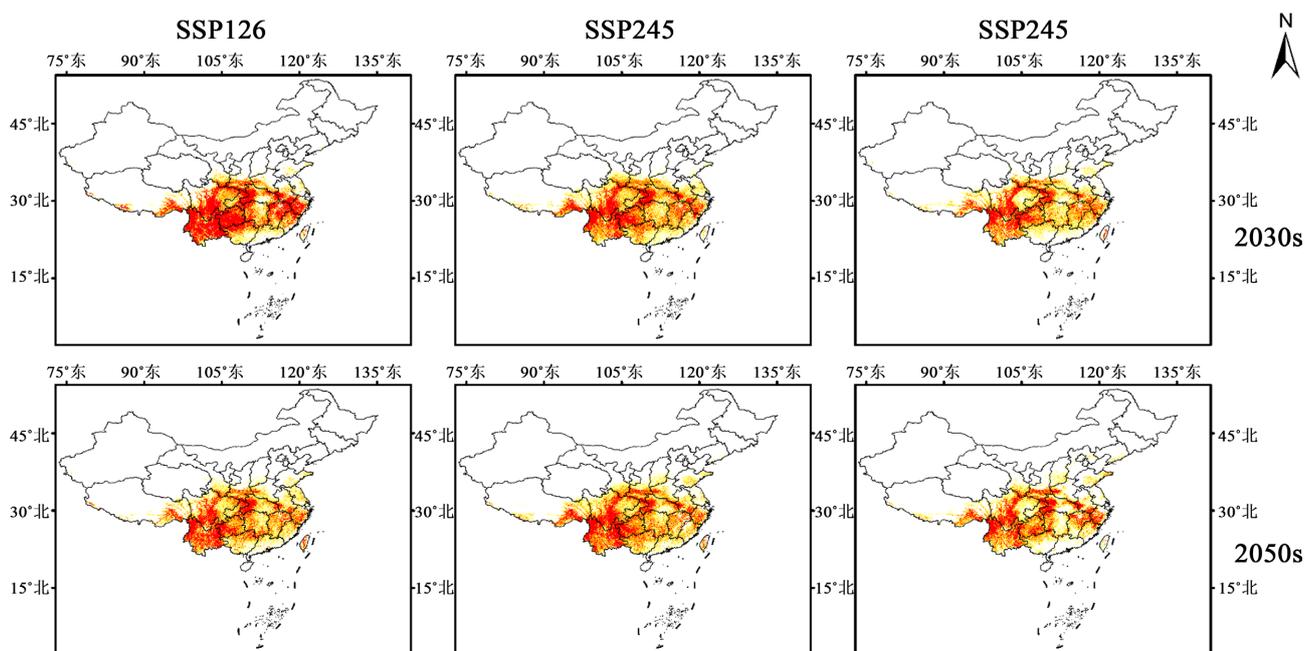
3.5. 未来不同气候条件下水晶兰潜在适生区分布格局变化

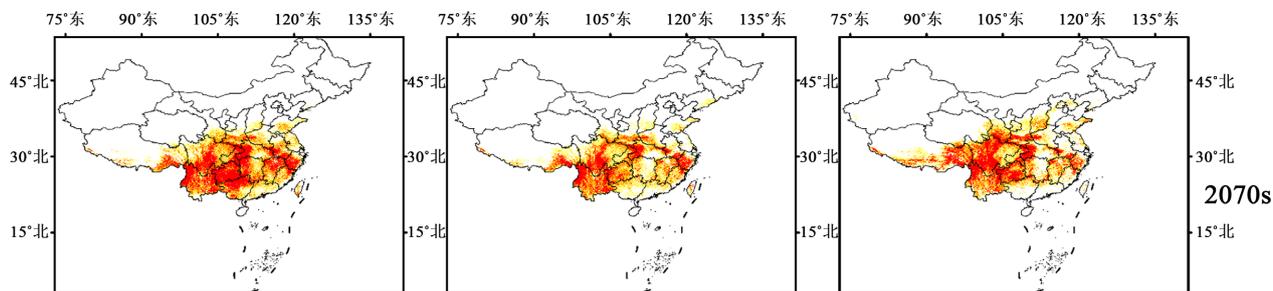
未来不同时期不同气候情景下, 水晶兰的适生区整体呈稳定状态。从空间分布来看(图 7), 原有核心适生区得到高度保留, 扩张区主要出现在当前适生区的北部(如秦岭一带)和西部(向青藏高原边缘或更高海拔地区延伸), 收缩区主要集中在当前适生区的东南沿海和南部边缘(如广东、广西南部), 生境变迁

Table 2. Potential suitable area distribution of *Monotropa uniflora* L. under different future climate scenarios

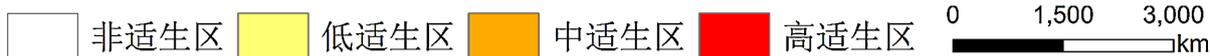
表 2. 未来不同气候情景下水晶兰潜在适生区分布面积

气候情景	面积($\times 10^4$ km ²)					
	低适生区	中适生区	高适生区	总适生区	增长率	
当前	103.67	69.67	27.92	201.26	/	
2021~2040	SSP126	62.84	59.37	110.24	232.45	15.49%
	SSP245	87.93	94.35	69.85	252.12	25.27%
	SSP585	98.19	75.66	53.23	227.08	12.83%
2041~2060	SSP126	99.38	82.75	64.71	246.84	22.65%
	SSP245	100.19	95.17	69.08	264.44	31.39%
	SSP585	92.47	71.22	57.51	221.19	9.90%
2061~2080	SSP126	82.28	85.55	102.10	269.94	34.12%
	SSP245	98.34	77.44	61.58	237.37	17.94%
	SSP585	103.51	79.78	89.78	273.08	35.68%





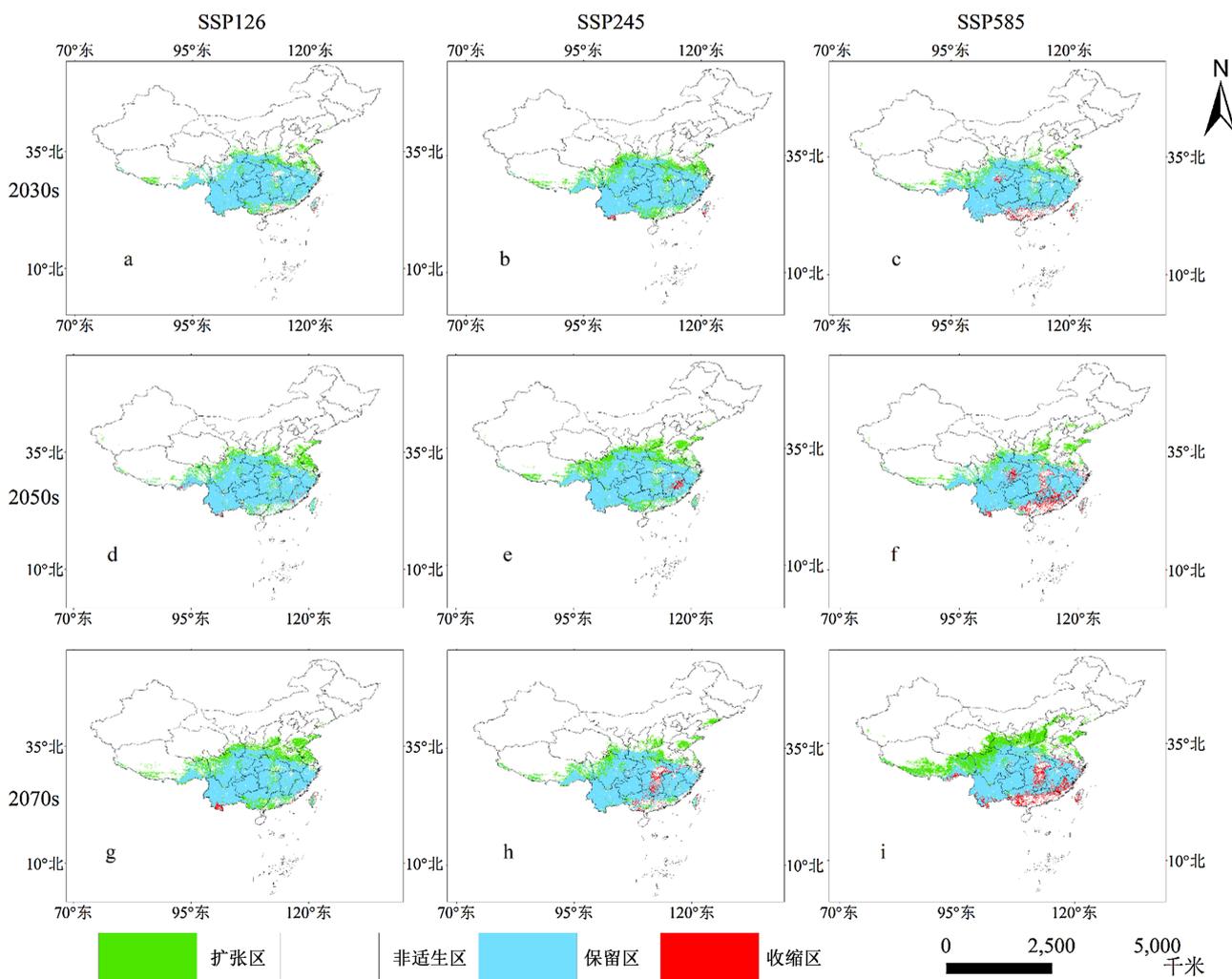
图例



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 6. Potential suitable habitat distribution of *Monotropa uniflora* L. under different future climate scenarios

图 6. 未来不同气候情景下水晶兰潜在适生区分布



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 7. Changes in the potential suitable habitat distribution of *Monotropa uniflora* L. under different future climate scenarios

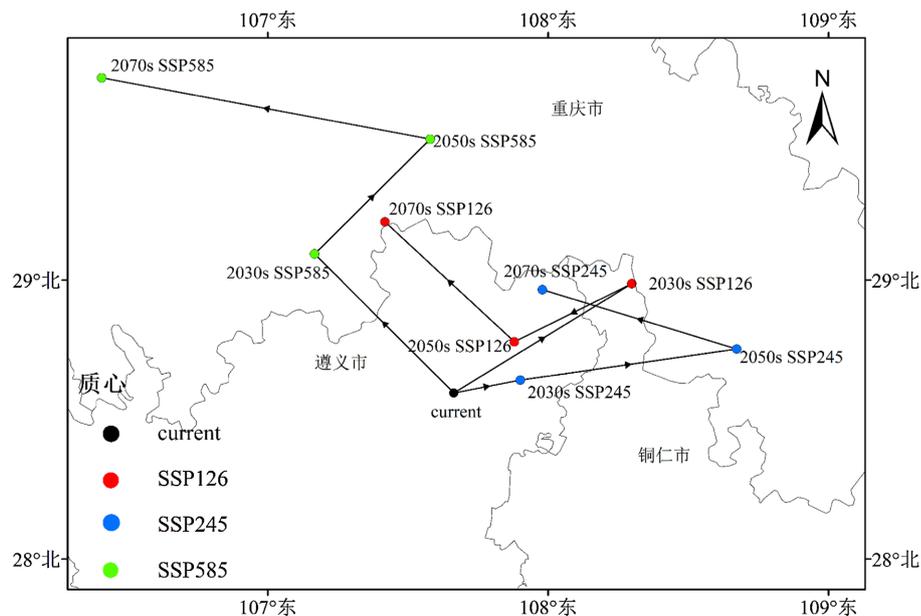
图 7. 未来不同气候情景下水晶兰潜在适生区分布格局变化

表现为“南收北扩”。在面积变化方面(表 3)，高排放情景在远期表现出最强的扩张潜力，2061~2080 年 SSP585 情景下的扩张最为显著，扩张区面积为 $96.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；2061~2080 年 SSP126 与 2041~2060 年 SSP245 情景次之，扩张区面积为 $71.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $65.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

Table 3. Changes in the potential suitable habitat area of *Monotropa uniflora* L. under different future climate scenarios
表 3. 未来不同气候情景下水晶兰潜在适生区分布面积变化

气候情景		面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)		
		扩张区	稳定区	收缩区
2021~2040	SSP126	33.22	199.02	2.28
	SSP245	52.50	199.53	1.77
	SSP585	33.14	193.79	7.52
2041~2060	SSP126	48.24	198.89	2.41
	SSP245	65.66	198.16	3.14
	SSP585	38.14	182.57	18.73
2061~2080	SSP126	71.25	198.96	2.35
	SSP245	45.38	191.41	9.89
	SSP585	96.27	176.81	24.49

3.6. 质心迁移



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 8. Migration of the centroid of *Monotropa uniflora* L. under different climate scenarios
图 8. 不同气候情景下水晶兰质心迁移情况

如图 8 所示，未来情景下，SSP126 路径质心从当前(Current)向东北方向迁移 75.69 km 至 2030 s，随后在 2050 s 向西南方向折返 46.92 km，至 2070 s 又向西北方向迁移 65.58 km。SSP245 路径下 2030 s 质

心向东微移 29.34 km, 但到 2050 s, 质心大幅向东迁移了 76.32 km, 达到该情景的最东端; 随后在 2070 s, 质心又向西北方向回迁了 71.55 km。SSP585 路径下持续向西北方向移动。从当前到 2030 s 迁移了 73.58 km, 2030 s 至 2050 s 继续向北推进 60.79 km, 2050 s 至 2070 s 迁移距离激增至 115.90 km。

4. 讨论

4.1. 影响水晶兰适生区分布的环境因素

本研究表明, 水热条件是限制水晶兰在中国潜在地理分布的关键因素。对于大多数生物而言, 与温度和降水有关的环境因子往往是决定其生长发育以及物种地理分布、多样性和进化最重要的参数[29]。模型预测显示水晶兰最适生长范围: 最干月降水量(bio14)为 10.0~55.4 mm、最冷月最低温(bio6)为 -5.8°C ~ -5.5°C 、最暖季降水量(bio18)为 456~1530 mm、温度季节性(bio4) ≤ 703 、海拔(Elev)为 1167~3663 m、土壤 pH (pH.H₂O)为 5~6.1。这些环境参数与水晶兰喜阴湿、偏好酸性土壤的生境特征高度吻合。这种环境选择性可能与其特殊的营养获取方式密切相关。由于缺乏叶绿素, 水晶兰必须依赖与红菇科(Russulaceae)等真菌形成的共生体系获取碳源, 而真菌群落的组成显著受降雨量、气温和湿度等因素影响[30]。另外土壤 pH 值(5.0~6.1)也进一步证实了这点, 这一范围正是大多数森林土壤真菌的最适生长区间[31]。

4.2. 未来气候变化水晶兰适生区的影响

在未来气候变化情景下, 水晶兰的潜在适生区面积整体呈扩张趋势, 质心迁移轨迹总体向高纬度和高海拔方向移动。造成这种情况的原因可能是由于气候变暖导致植物原适生区的气温升高, 原适生区温度逐渐不适宜植物生长[32]。而随着温度的升高和降水格局的改变, 原本因寒冷而不适宜的区域也会逐渐转变为潜在的适生生境。因此, 植物开始向高海拔地区迁移, 以此寻找适宜自身生长的条件。这符合全球气候变化背景下物种分布迁移的普遍规律[33]-[36]。此外, 我们发现高适生区大幅增长, 适生区延伸至秦岭以北甚至华北部分地区。水晶兰作为菌异养植物, 依赖深厚的腐殖质层和特定的红菇科共生真菌。北方地区降水季节性强、土壤有机质积累与南方湿润山地存在明显差异, 共生真菌的迁移速度往往滞后于气候变化。因此, 模型预测的“大幅增长”更多反映了气候限制的解除, 而非物种真实生境适宜。

4.3. 影响水晶兰分布的生态因素及后期验证

尽管我们通过 MaxEnt 模型预测出了水晶兰的潜在适生区, 但实际上水晶兰的分布不仅依赖气候因素, 还受到共生真菌和宿主树种分布的限制。与水晶兰共生的真菌主要是红菇属(Russula)和乳菇属(Lactarius)的成员, 这些真菌又与壳斗科(Fagaceae)和松科(Pinaceae)等树木形成菌根共生关系[37]。而本研究预测的主要适生区如云贵高原、四川西部等地区, 正是壳斗科和松科植物的分布中心[38]。这一空间上的高度重叠, 从侧面印证了我们模型预测的合理性。

未来的研究需要从以下方面进行验证和深入探讨: 开展针对性的野外调查, 在研究预测的适生区内设置样方, 记录水晶兰的出现与否及其种群状况; 在采集的土壤样本中检测红菇科等关键共生真菌类群的存在与丰度, 整合真菌群落数据, 与水晶兰的实际分布数据相结合; 将气候、宿主植物分布和真菌群落数据结合, 构建更精准的分布模型。

4.4. 水晶兰的保护对策

基于当前与未来适生区的时空演变特征, 可以对水晶兰进行分级保护。核心区就地保护: 在这些区域依托现有体系, 维持林下枯落物层厚度, 避免清理林底腐殖质, 加强对生态系统的整体保护; 收缩区抢救性保护, 由于水晶兰难以人工栽培, 建议开展基于共生真菌分离培养的迁地保护技术研究, 或建立

模拟原生生境的保护区；扩张区长期监测：对于未来潜在扩张区，应建立长期监测样地，关注水晶兰自然种群的扩散动态。

5. 结论

本文综合考虑了气候、土壤、地形、人类活动等环境因子，评估影响水晶兰地理分布的主导环境因子，预测当前以及未来不同气候情景下水晶兰的潜在适生区。MaxEnt 模型 AUC 值达 0.905，表明模型的预测结果具有较高可靠性。通过贡献率和刀切法检验结果得出，气候是影响水晶兰分布的主导环境因子，总贡献率为 74.4%。当前气候条件下水晶兰总适生区总面积为 $201.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，主要分布在秦岭-淮河以南。未来气候变化情景下水晶兰潜在适生区总面积呈现扩张趋势，高适生区增长显著，分布格局呈现出“南收北扩”，质心迁移轨迹总体往高纬度和高海拔方向移动。虽然预测模型显示适生区显著扩张，但受限于菌异养机制中真菌与宿主的迁移滞后，实际扩张可能受阻。未来，我们将结合更多生态因子和物种间相互作用(共生真菌分布、宿主树种限制)进行分析，进一步提高模型的预测精度，为水晶兰的保护和栖息地恢复提供理论支持。

参考文献

- [1] 何平, 李云峰, 朱文泉, 等. 气候变化下川芎生境适宜性的 MaxEnt 模型分析[J]. 时珍国医国药, 2021, 32(12): 3005-3009.
- [2] Newbold, T. (2018) Future Effects of Climate and Land-Use Change on Terrestrial Vertebrate Community Diversity under Different Scenarios. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **285**, Article ID: 20180792. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0792>
- [3] Parmesan, C. and Yohe, G. (2003) A Globally Coherent Fingerprint of Climate Change Impacts across Natural Systems. *Nature*, **421**, 37-42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- [4] 吴军, 徐海根, 陈炼. 气候变化对物种影响研究综述[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 1-6.
- [5] Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. and Courchamp, F. (2012) Impacts of Climate Change on the Future of Biodiversity. *Ecology Letters*, **15**, 365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- [6] 陈翠萍, 滕艳飞, 周朝彬, 等. 基于 MaxEnt 优化模型预估中国悬钩子属植物的潜在分布[J]. 中国农业气象, 2025, 46(10): 1438-1448.
- [7] 周以良, 周瑞昌. 中国植物志(第五十六卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [8] 蔡颖. HPLC 法测定水晶兰中水晶兰苷的含量[J]. 药学与临床研究, 2011, 19(4): 377-378.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布《中国生物多样性红色名录-高等植物卷》的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201309/t20130912_260061.htm, 2013-09-02.
- [10] 贺宸靖. 球果假水晶兰根际微生物多样性分析及其内生菌根真菌的筛选鉴定[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州师范大学, 2024.
- [11] Zhang, F., Liang, F., Wu, K., Xie, L., Zhao, G. and Wang, Y. (2024) The Potential Habitat of *Angelica dahurica* in China under Climate Change Scenario Predicted by Maxent Model. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article 1388099. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1388099>
- [12] 宋旭辉, 刘阳, 罗燕萍, 刘殊豪, 田永军. 基于物种分布模型的南极电灯鱼栖息地分布研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2025, 55(7): 28-37.
- [13] 高灿, 樊智丰, 马长乐, 杨建欣, 郭帅龙. 基于 Biomod2 组合模型对气候变化下滇山茶适生区的预测[J]. 生态学杂志, 2024, 43(11): 3526-3536.
- [14] 黄芳, 张文俊, 张建成, 等. 基于 BIOCLIM 模型的绿圆跳虫在中国的适生区分析[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(11): 2098-2103.
- [15] 沈鹏, 李功权. 基于生态位因子模型的湖北省松材线虫病风险评估[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 560-566.
- [16] 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): 614-624.
- [17] Wang, E., Lu, Z., Rohani, E.R., Ou, J., Tong, X. and Han, R. (2024) Current and Future Distribution of *Forsythia*

- suspensa* in China under Climate Change Adopting the Maxent Model. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article 1394799. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1394799>
- [18] Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. (2006) Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- [19] 张微, 律江, 王文学, 田恒玖. 基于 MaxEnt 模型的北京黑鹳潜在适生区预测[J]. 生态学报, 2025, 44(12): 4092-4099.
- [20] 益争祝玛. 基于 MaxEnt 模型的气候变化对中国乌柏潜在地理分布的影响预测[J]. 林业调查规划, 2025, 50(6): 125-132.
- [21] 唐燕, 赵儒楠, 任钢, 曹福亮, 祝遵凌. 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.
- [22] 陈旭, 程成, 张颖. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化对小花老鼠簕潜在适生区的影响[J]. 广西科学, 2025, 32(4): 667-676.
- [23] 王子文, 尹进, 王星, 陈越, 毛子昆, 藺菲, 巩宗强, 王绪高. 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[J]. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1272-1280.
- [24] 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 孟庆欣. 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.
- [25] 唐晶晶. 基于 MaxEnt 模型的高山松适生区时空分布及环境因子响应研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
- [26] Tian, Y., Song, J., Cheng, B., Wei, R., Zeng, Y., Zhang, J., et al. (2025) Modeling the Impact of Climate Change on the Distribution of *Populus adenopoda* in China Using the Maxent Model. *Forests*, **16**, Article 1662. <https://doi.org/10.3390/f16111662>
- [27] 柴思雨, 徐剑莹, 李铁华, 姜小龙, 张心艺. 基于优化 MaxEnt 模型的细叶桉潜在适生区预测[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(9): 94-105.
- [28] 黎少玮, 王珊, 胡洪江, 王彩云. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下五指毛桃潜在地理分布[J]. 温带林业研究, 2025, 8(5): 49-54.
- [29] 龚华乾, 郭旭东, 席少阳, 涂工涵, 陈飞, 晋玲. 未来气候及土地利用变化背景下中国天麻潜在适生区评价[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(14): 3887-3897.
- [30] 邢鹏杰. 蒙古栎纯林红菇科真菌群落结构及与生态因子的相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [31] 李玲. 北方主要草地类型中土壤真菌多样性及群落结构的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [32] 史柠瑞, 朱珠, 王艳莉. 基于 MaxEnt 模型对 2 种青兰属植物在未来气候变化下潜在分布的预测研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(32): 115-123.
- [33] 邓敏, 欧光龙. 树种分布及气候变化影响研究——以哀牢山国家级自然保护区为例[J]. 绿色科技, 2025, 27(4): 30-35.
- [34] 王森源, 宝秋利, 包玉英, 魏杰. 基于 MaxEnt 模型的蒙古白丽蘑适生区预测[J]. 菌物学报, 2023, 42(10): 2141-2151.
- [35] 何伟, 方强恩, 单麟茜. 气候变化背景下特有种米蒿的分布格局及其空间迁移预测[J]. 草地学报, 2026, 34(1): 217-230.
- [36] Tekin, O., Cetin, M., Varol, T., Ozel, H.B., Sevik, H. and Zeren Cetin, I. (2022) Altitudinal Migration of Species of Fir (*Abies* spp.) in Adaptation to Climate Change. *Water, Air, & Soil Pollution*, **233**, Article No. 385. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05851-y>
- [37] 林先滢. 松科植物根际真菌群落对异质磷素生态位分化及功能特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [38] 张讴凯. 中国亚热带与热带森林壳斗科植物物种多样性的空间格局[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华东师范大学, 2021.