

中国人参属植物生境适宜性研究

孙小茜 周天华 屈奕洁

(陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘要: 利用优化后的 MaxEnt 模型 (基于 R 语言 Kuenm 包) 分析人参属植物的生境适应性, 可了解气候变化对人参属植物分布和物种分化的影响, 对探究人参属植物的物种形成及制定保护策略具有重要意义。结果显示: 模型参数的最优组合为 RM=1.5, FC=LP, AUC 值为 0.953, 此时 Maxent 模型的复杂度和过拟合都最低, 模型预测精度最高; 影响人参属植物地理分布的主要环境因子有 9 个, 其中 7 个与温度相关, 2 个与降水量有关, 且 1 个变种受降水量影响最大, 其余种均受温度影响最大, 表明温度是影响人参属植物分布的最重要环境因子; 在气候变化下各个时期中西南地区均为人参属植物分布的集中区, 且大多人参属植物潜在适生区随时间变化总体呈现向西南地区收缩趋势。

关键词: 气候变化; 生境适应性; 人参属; 最大熵值法
中图分类号: S-3 文献标志码: A

DOI: 10.19754/j.nyyjs.20240930003

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告 (AR6) 指出, 20 世纪, 整个亚洲的地表温度上升, 导致生长季节延长^[1]。过去、现在和未来下自然和人为温室气体排放反映了人类经济发展模式。在可持续发展目标中, 气候行动被明确列为实现可持续发展的必要目标之一^[2]。全球变暖将会对生态系统和人类社会产生一系列不可逆转的影响, 其中造成栖息地破坏将成为生物多样性的最大威胁^[3]。气候变化对植物的分布具有驱动作用, 适生区将发生范围转移, 药用植物的栖息地将显著减少或严重迁移^[4], 对药用植物的可持续利用构成严重威胁。因此, 研究植物对气候变化的响应对保护植物具有重要意义^[5]。

据中国植物志分类, 目前分布于我国的人参属植物有 7 种, 分别为竹节参 (*Panax japonicus* (T. Nees) C. A. Meyer)、屏边三七 (*Panax stipuleanatus* C. T. Tsai & K. M. Feng)、姜状三七 (*Panax zingiberensis* C. Y. Wu & K. M. Feng)、三七 (*Panax notoginseng* (Burkill) F. H. Chen ex C. H. Chow & W. G. Huang)、人参 (*Panax ginseng* C. A. Mey.)、假人参 (*Panax pseudoginseng* Wallich)、西洋参 (*Panax quinquefolius* L.) (引种栽培), 竹节参除原变种外还有 3 个变种: 珠子参 (*Panax japonicus* C. A. Mey. var. Major (Burkill) C. Y. Wu & K. M. Feng)、疙瘩七 (*Panax japonicus* var. *Bipinnatifidus* (Seemann) C. Y. Wu & K. M. Feng)、狭叶竹节参 (*Panax bipinnat-*

ifidus var. *angustifolius* (Burkill) J. Wen)^[6]。人参属地理分布范围较广, 为典型东亚-北美分布类型^[7]。西洋参仅分布于北美洲, 其他物种主要分布于我国, 其中竹节参分布最广泛, 分布于西藏、云南、贵州、四川、甘肃、陕西、山西、河南、安徽、广西、湖南、湖北、江西、福建、浙江 15 个省份; 珠子参分布于甘肃、贵州、河南、湖北、陕西、四川、西藏、云南 8 省; 疙瘩七分布于甘肃、湖北、陕西、四川、西藏、云南 6 省^[6, 8]。

人参属植物是名贵药用植物。市场需求大而人工种植少, 因此野生资源被过度采集, 造成了种类和种群的减少, 加上近年来生态环境日益恶化, 而部分人参属植物对环境的要求非常严格, 环境条件的破坏加速了它们的灭绝^[9]。我国产的 7 种人参属植物中除假人参外, 均受到生存威胁; 其中, 三七已经野外灭绝 (EW), 珠子参、屏边三七、姜状三七濒危 (EN), 人参为极危 (CR)^[10]。因此人参植物亟需保护^[11]。

生态位模拟是通过建立各类环境因子与物种适宜生存空间的相关性, 从而预测物种在一定的环境气候条件下地理分布范围的生态学模拟方法, 又称物种分布模拟、生物气候、栖息地模拟。常见的生态位模拟模型有遗传算法生成规则集 (GRAP)、生物气候分析系统 (BIOLIM)、生态位因素分析 (ENFA) 和最大熵模型 (MaxEnt)^[12]。这些模型中, 最大熵模型的建

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 秦巴生物资源与生态环境省部共建国家重点实验室“市校共建”科研专项 (项目编号: SXJ-2303); 陕西省科技厅科研专项 (项目编号: 2022NY-163, 2022XYKJ-07)

作者简介: 孙小茜 (1999-), 女, 硕士在读。研究方向: 植物生态学研究; 通讯作者周天华 (1976-), 男, 副教授, 硕士生导师。

模精度较高^[13]。即使在没有明确物种分布坐标的情况下,基于位点经纬度估算也能获得较好的预测结果^[14],被认为是最有效的预测方法之一。MaxEnt 利用物种分布位置和环境变量信息,将概率分布拟合为最大熵值,从而分析和预测物种可能的地理分布模式。它被广泛用于预测物种的潜在分布和研究其生态特征。空间和时间条件对建模的影响很小,可以模拟和预测目标物种在不同情况(过去、现在和未来)下的适生区分布;在数据样本较少的情况下,少量物种分布点数据也可以达到很好的预测效果。

为探索不同时期人参属物种分布格局,本研究运用最大熵模型对末次盛冰期、中全新世、当代和 2 种温室气体排放场景下的未来 4 个时期,共 7 个时期的环境数据对人参属植物潜在适生区进行模拟,并分析了不同时期 2 种温室气体排放机制下潜在适生区的变化。分析影响人参属的主要环境因子,评估人参属对未来气候变化的响应,科学计算人参属适宜生境面积,预测气候变化对人参属分布范围的影响对其保护和资源可持续利用具有重要意义,为人参属的保护和科学管理提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 人参属地理分布数据采集与处理

分布位点数据源自中国植物图像库 (<https://ppbc.iplant.cn/>)、中国国家标本资源平台 (<http://www.nsii.org.cn/2017/home.php>)、iPlant 植物智—植物物种信息系统 (<https://www.iplant.cn>) 和中国数字植物标本馆 (<https://www.cvh.ac.cn/index.php>)。结合中国植物智人参属物种分布资料,初步筛选并记录明确的 184 份分布位点。通过使用 ENMTools1.4 软件对人参属的地理位点进行冗余筛选来消除重复和不确定数据,最终在分布区的 2.5' 分辨率的栅格中仅选取离中心点最近的 1 个标本记录数据。

1.2 环境数据获取、异常值处理及筛选

本研究获取的分辨率均为 2.5' 的 19 个环境数据均下载于世界气候 WORLD CLIM 网站 (<https://www.worldclim.org>),使用的生物气候数据包括末次盛冰期 (Last glacial maximum, LGM)、中全新世 (Mid-Holocene, MH)、当代 (Current) 及未来,其中 LGM 与 MH 数据选自 IPCC 第五次耦合模型比较项目 (Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5) 中模拟中国气候较好的 CCSM4 大气环流模型所构建的在 World Clim1.4 (<https://worldclim.org/data/index.html>) 上的数据,未来时期的气候数据选取了全球气候模型 (GCMs) 数据块中国家 (北京) 气候中心 (The Beijing Climate Center, BCC) 的中等分辨率气候系统模式 BCC-CSM2-MR 以及 MIROC-ES2L2 套大气环流模型,选择 2 种共享社会经济路径

模式来表示 2 种温室气体排放场景,即中等温室气体排放场景 (SSP245) 和最高温室气体排放场景 (SSP585) 下的 4 个时期 (2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年、2081—2100 年)。

针对 1970—2000 年和未来气候情景的 19 个生物气候变量用 BIO01~BIO19 表示。环境变量数据是构建生态位模型的重要参数,但使用过多构建模型会增强变量之间的空间相关性,造成过度拟合降低模型可传递性^[13]。相反,选择适度合理的环境变量可以显著提高模型的预测能力。生物气候因子间存在已知相关性,因此在构建生态位模型前,需计算环境变量的相关性并排除高相关性的环境变量,对 19 个生物气候因子进行 Pearson 相关系数矩阵 (将 19 个生物气候因子导入 ENMTools1.4) 和建模前筛选工作。预建模的生物气候因子是用分析刀切法选出的,以 $|r| \geq 0.8$ 作为阈值来选择构建模型的生物气候因子。得出用于建立人参属 MaxEnt 模型的 9 个生物气候因子如下: BIO03 (昼夜温差与年温差比值)、BIO04 (温度季节性变化方差)、BIO05 (最暖月最高温度)、BIO06 (最冷月最低温度)、BIO07 (年温变化范围)、BIO09 (最干季度平均温度)、BIO11 (最冷季度平均温度)、BIO12 (年降水量)、BIO15 (降水量季节性变化方差)。以上数据均采用 2.5' 分辨率,本研究中使用的地图资料均来自从 DIVA-GIS 网站 (<http://www.Diva-gis.org/>) 和国家核心地理信息系统 (<http://nf-gis.nsd.gov.cn/>) 下载的全球地理信息。

1.3 模型优化、构建及精度评估

将筛选过的 154 个人参属物种地理分布位置按照物种名、经度、纬度分别输入 Excel 表格中,将 .xls 文件转换为 .csv 格式;将人参属物种地理分布数据和生物气候因子在 MaxEnt3.4.1 软件中进行加载;软件参数设置:输出方式 (Output format) 选择为 Logistic,勾选随机基数 (Random seed),最大重复次数 (Maximum iterations) 设置为 5000,采用不重置抽样 (subsample) 方法进行抽样,模型重复运行 (Replicates) 10 次,随机选取 30% 样本数据作为测试数据 (Random test percentage),70% 为训练数据 (Training data),为避免过度拟合对模型迁移能力的影响,本文运用 R3.6.2 中的 “Kuenm” 包^[15]对模型的 RM (0~4) 从 0 开始每 0.1 向上递增至 4 与 FC (LQPH) 分别进行交叉组合验证 (Hinge features 引入时间晚于 Threshold features,明显应该视为后者的替代而非补充),故使用 4 种要素类型^[16],最终选择具有显著性,数据遗漏率 (Omission rates) < 5%,且 delta AICc 值较小的组合作为最优参数组合来运行最终的模型运算,除一些影响模型运行效率的选项被取消外,其余均选择默认设置。

用 DIVA-GIS7.5 将 MaxEnt 模型输出的结果划分为非适生区 (0~0.0274)、低度适生区 (0.0274~0.3516)、中度适生区 (0.3516~0.6758)、高度适生区 (0.6758~1)，采用受试者工作曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 中的 AUC 值验证模型的精度，AUC 数值在 0~1，且数值越大模型可信性越高^[17]。AUC 值在 0.5~0.6，表明模型预测失败 (Fail)；0.6~0.7，表明模型的预测能力较差 (Poor)；0.7~0.8，表明模型预测能力一般 (Fair)，0.8~0.9，表明模型的预测能力良好 (Good)，0.9~1，表明模型的预测能力极好 (Excellent)^[18]。

2 结果

2.1 人参属地理分布数据结果

通过对人参属的地理位点进行冗余筛选来消除重复和不确定数据，最终在分布区的 2.5' 分辨率的栅格中仅选取离中心点最近的 1 个标本记录数据以减少聚类效应导致的误差，共得到 154 个有效样本。竹节参、珠子参、疙瘩七、人参、假人参、三七、屏边三七、狭叶竹节参、姜状三七的分布点分别为 39 个、29 个、26 个、15 个、14 个、9 个、9 个、7 个、6 个。

2.2 模型优化及精度评价

根据模型优化结果，FC 与 RM 交叉验证了 600 个模型参数组合，其中符合 Omission rates < 5%，且 delta AICc 较小的模型参数组合共有 3 个，选择遗漏率 < 5% 且 delta AICc 最小的模型即为最优模型，即 FC 选择 LP 和 RM=1.5，此时的 Omission rates 为 2.17% 且 delta AICc 为 0，表明此参数组合预测结果好。模型得到的平均测试 AUC 值为 0.953，表明模型预测能力极佳^[18]，见图 1。

2.3 影响人参属物种分布格局的主要环境因子

本研究通过 MaxEnt 模型的输出结果并基于 Jack-knife 刀切法的正则化训练增益贡献率 (Regularized training gain)、测试增益率 (Test gain)、置换贡献率 (Contribution rate of substitution) 以及单因子响应曲线，揭示了影响人参属植物地理分布的主导环境因子，见图 2、图 3。从表 1 的贡献率和置换贡献率可以看出，最暖月最高温度 (BIO05)、年降水量 (BIO12)、

年均温变化范围 (BIO07)、最冷季度平均温度 (BIO11)、最干季度平均温度 (BIO09)、最冷月最低温度 (BIO06)、降水量季节性变化方差 (BIO15)、温度季节性变化方差 (BIO04)、等温性 (BIO03) 的贡献率分别为 34.6%、34.4%、10.9%、10%、3.9%、2.1%、1.7%、1.6%、0.7%，累计贡献率达 99.9%；置换重要性分别为 9.7%、10.4%、8.4%、37.1%、23.1%、6.5%、1.5%、1.5%、1.8%，累计达 100%，9 个环境因子中 7 个气温变量累计贡献率为 63.8%，置换重要性高达 88.1%，2 个为降水量累计贡献率为 36.1%，置换重要性为 11.9%，由此可见，温度对人参属物种分布的影响极大。

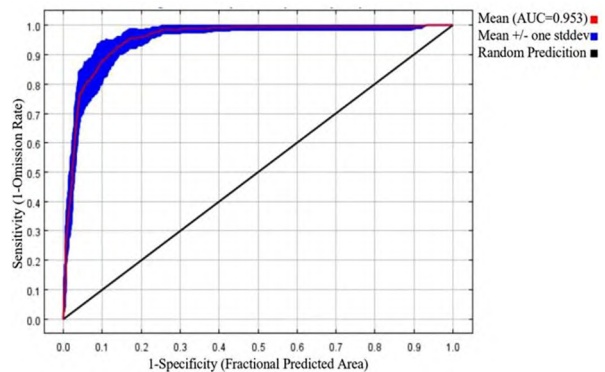


图 1 受试者工作特征 (ROC) 曲线

表 1 生物气候因子贡献率及置换重要值

序号	变量	贡献率	置换重要性
1	最暖月最高温度 (BIO05)	34.6	9.7
2	年降水量 (BIO12)	34.4	10.4
3	年均温变化范围 (BIO07)	10.9	8.4
4	最冷季度平均温度 (BIO11)	10	37.1
5	最干季度平均温度 (BIO09)	3.9	23.1
6	最冷月最低温度 (BIO06)	2.1	6.5
7	降水量季节性变化方差 (BIO15)	1.7	1.5
8	温度季节性变化方差 (BIO04)	1.6	1.5
9	等温性 (BIO03)	0.7	1.8

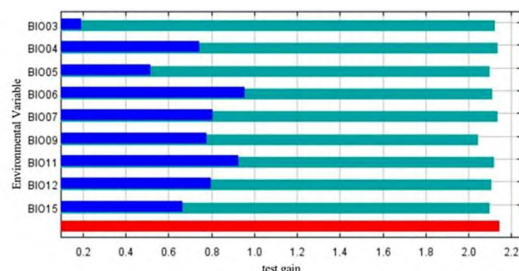
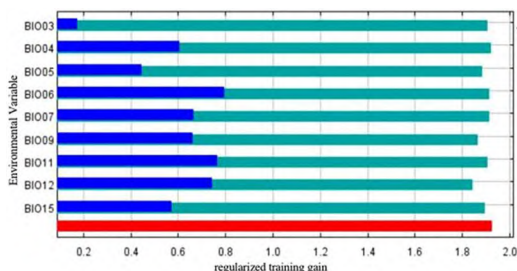
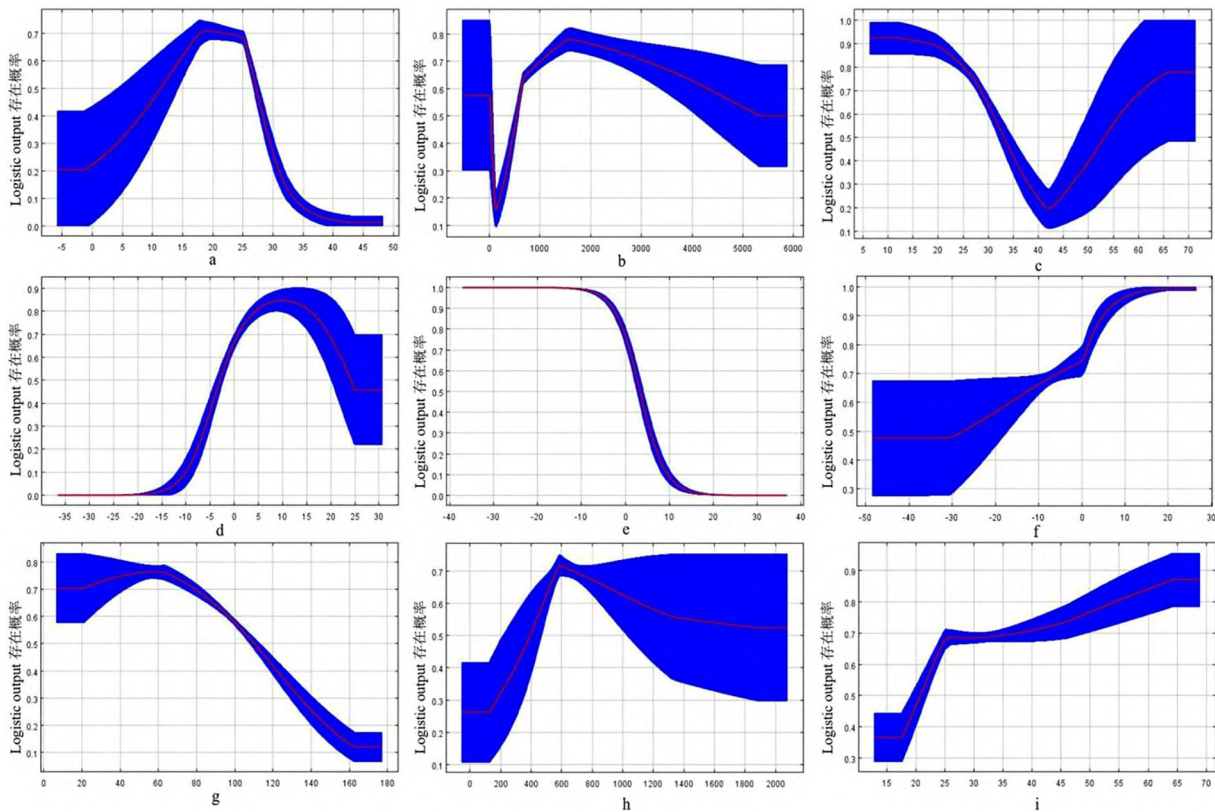


图 2 刀切法评价环境变量对人参属植物分布的影响



注: a、b、c、d、e、f、g、h、i 分别代表最暖月最高温度 (BIO05)、年降水量 (BIO12)、年均温变化范围 (BIO07)、最冷季度平均温度 (BIO11)、最干季度平均温度 (BIO09)、最冷月最低温度 (BIO06)、降水量季节性变化方差 (BIO15)、温度季节性变化方差 (BIO04)、等温性 (BIO03)。

图 3 主导环境因子响应曲线

种水平中年均温变化范围 (BIO07) 是对狭叶竹节参、三七、屏边三七影响最大的环境因子; 最冷季度平均温度 (BIO11) 对疙瘩七和假人参影响最大; 等温性 (BIO03) 对姜状三七影响最大; 年平均气温 (BIO01) 对人参影响最大; 最干季度平均温度 (BIO09) 对竹节参影响最大; 最暖季度降水量 (BIO18) 对珠子参影响最大, 见图 4。

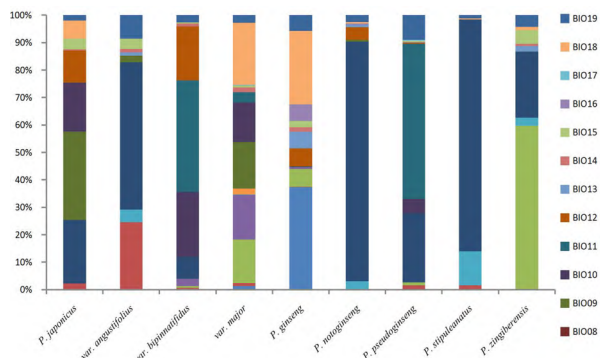


图 4 环境因子对人参属各个种贡献百分比

2.4 适生区划分

将 MaxEnt 模型输出的结果划分为非适生区 (0~0.0274)、低度适生区 (0.0274~0.3516)、中度适生

区 (0.3516~0.6758)、高度适生区 (0.6758~1) 4 个等级。人参属植物的总潜在适生区面积为 $550.88 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中高度适生区面积整个研究区面积的 4.62%; 中度适生区面积整个区域面积的 10.96%; 低度适生区面积占整个区域面积的 84.42%, 见表 2。

2.5 过去及未来人参属潜在适生区模拟

LGM 时期, 人参属植物的总潜在适生区面积占 $687.54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中高度适生区占整个研究区面积的 8.16%; 中度适生区占整个区域面积的 16.29%; 低度适生区面积最大, 占整个区域面积的 75.55%。MH 时期, 人参属植物的总潜在适生区面积占 $816.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中人参属潜在高度适生区占整个研究区面积的 3.08%; 中度适生区面积占整个区域面积的 9.35%; 低度适生区面积最大, 占整个区域面积的 87.57%, 见表 2。

本研究在探讨人参属未来时期时潜在分布区时采用了 BCC-CSM2-MR 与 MIROC-ES2L 2 种大气环流模型, 为弱化由于选择不同大气环流模型所导致的结果的不确定性, 采取策略为对这 2 种模型预测结果叠加取平均值。选取 SSP245 (中度碳排放气候) 和 SSP585 (极高碳排放气候) 2 种共享社会经济路径气候变化情景下的未来 4 个时期 (2021—2040 年、

2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年) 进行人参属潜在分布区预测。伴随气候变化, 物种可能会向更适宜其生长的区域的分布。未来气候情景下, 人参属在空间分布上大部分适生区出现收缩现象。在SSP245情境下, 2021—2040年、2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年4个时间段中总适生区面积依次为 $538.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $534.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $497.94 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $474.25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为97.70%、96.96%、90.39%、86.09%, 低度适生区面积依次为 $462.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $461.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $429.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $406.03 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为99.45%、99.31%、92.25%、87.31%, 中度适生区面积依次为 $56.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $56.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $55.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $56.10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为93.63%、93.59%、92.72%、92.93%, 高度适生区面积依次为 $19.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $15.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $12.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $12.13 \times 10^4 \text{ km}^2$,

占当代预测面积百分比分别为75.30%、62.10%、50.87%、47.63%, 见表2。

在SSP585情境下, 2021—2040年、2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年4个时间段中总适生区面积依次为 $552.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $506.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $418.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $368.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为100.38%、92.01%、75.94%、66.89%, 低度适生区面积依次为 $474.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $439.79 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $354.79 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $307.79 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为102.05%、94.57%、76.29%、66.18%, 中度适生区面积依次为 $58.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $55.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $54.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $52.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为97.36%、91.37%、90.22%、87.68%, 高度适生区面积依次为 $19.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $11.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $9.10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $7.77 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占当代预测面积百分比分别为77.01%、46.80%、35.75%、30.52%, 见表2。

表2 不同时期人参属植物潜在适生区面积

时期	末次盛冰期	中全新世	当代	2021—2040年		2041—2060年		2061—2080年		2081—2100年	
				SSP245	SSP585	SSP245	SSP585	SSP245	SSP585	SSP245	SSP585
总适生区/万 km ²	687.54	816.55	550.88	538.20	552.97	534.15	506.86	497.94	418.35	474.25	368.49
低度适生区/万 km ²	519.46	715.06	465.06	462.51	474.59	461.85	439.79	429.02	354.79	406.03	307.79
中度适生区/万 km ²	111.99	76.33	60.36	56.52	58.77	56.49	55.15	55.97	54.46	56.10	52.93
高度适生区/万 km ²	56.09	25.16	25.46	19.17	19.61	15.81	11.92	12.95	9.10	12.13	7.77

3 讨论与结论

3.1 影响人参属植物分布的主要环境因子

本研究根据优化后的MaxEnt模型所得出的结果中的训练增益值、贡献率以及单因子响应曲线, 揭示影响人参属植物分布的主要环境因子有9个, 其中最主要的环境因子有最暖月最高温度(BIO05)、年降水量(BIO12)、年均温变化范围(BIO07)、最冷季度平均温度(BIO11)、最干季度平均温度(BIO09), 累计贡献率达93.8%, 置换重要性为88.7%。种水平上对各个种贡献率最高的因子分别为年均温变化范围(BIO07)、最冷季度平均温度(BIO11)、等温性(BIO03)、年平均气温(BIO01)、最干季度平均温度(BIO09)、最暖季度降水量(BIO18), 其中对8个种贡献率最高的因子都是气温变量。由此可见, 温度是影响人参属植物分布重要的环境因子。

通过分子系统发育分析发现, 人参属的东亚-北美间断分布是通过2次跨洲远距离迁徙形成的^[19], 地理和生态隔离在人参属的进化和多样性上共同扮演着重要的角色。生态物种形成的动力来自于基于生态差异的歧化选择, 歧化选择的来源中环境的差异是最明

显的来源, 如不同生物群体在海拔、温度、降水、土壤等方面的差异可以导致在不同的群体中自然选择产生不同的性状^[20]。何景在对五加科地理分布的研究中发现, 五加科在我国的分布有明显的地区性, 一般以亚热带地区最多, 温带和热带次之, 寒温带最少, 且人参属中人参只产于温带的北部和寒温带, 但温带和亚热带地区内的种类更多^[21], 证明温度条件通常对植物的分布起着非常重要的作用。刘葵等在对三七的潜在适生区及主要驱动因素进行研究中发现, 温度与降水量是影响三七分布的关键因素, 其中温度的影响极为显著, 与本研究所得的结果相吻合^[22]。

3.2 人参属植物潜在适生区的分布及变化

因种间习性差异较大, 如西洋参、人参等生长在较高纬度地区, 喜阴、忌强光、喜凉爽温和的环境, 较耐寒; 如三七等生长在低纬度地区, 喜温暖和潮湿的环境, 忌严寒和酷暑^[23]。人参属植物的大分布范围致使人参属的适生区在当代的分布几乎涵盖中国的大部分地区, 与实际所搜集到的人参属植物分布点坐标基本一致, 表明模型模拟效果良好。人参属植物的种植产区应选择地势干燥、平坦、土层深厚、肥力中等、灌排条件便利的砂壤土或壤土地区^[23], 在所有

排放情景下,随着时间的推移,人参属的适生区以及中高度适宜区范围都将减少,可能的原因是降水量和温度过高,印证了本研究影响人参属分布主导环境因子为温度与降水量。

在本研究的各个时期中,人参属植物的潜在适生区主要集中在我国西南地区,大多人参属植物的潜在适生区虽呈现缩小的趋势,但几乎所有高等适生区和中等适生区都集中在云南省。在未来 SSP245 中度碳排放气候排放场景下,人参属植物潜在适生区均呈现收缩趋势。在未来 SSP585 高度碳排放气候排放场景下,除 2021—2040 年,潜在适生区均呈现扩张趋势(其中低度潜在适生区扩张 $9.53 \times 10^4 \text{ km}^2$,总潜在适生区仅扩张 $2.09 \times 10^4 \text{ km}^2$),其余时期均呈现收缩趋势,但人参属植物的收缩以及扩张趋势的方向都为西南方向。在吴征镒对人参属地理分布的研究中,人参属植物起源于第三纪古热带山区的“东亚”“北美”分布的植物区系成分,现代分布中心在我国西南部,说明西南地区可能是人参属植物的起源中心^[24]。云南省是人参属的稳定适生区,可能是由于温室气体浓度的上升使得气候不断变暖,使得环境更加的温暖湿润,使得人参属植物不断向起源中心西南地区缩小靠近。这些地区可能是人参属的气候避难所,这与詹鹏对我国三七适宜生产区预测的结果一致^[25]。

温度是影响人参属的最主要环境因子,且我国西南地区在气候变化下各个时期中均为人参属植物分布的集中区,因此,我国西南地区为人参属物种多样性保护的关键区域。本研究建议应继续增加我国在西南地区自然保护区的面积,且增加自然保护区之间的连通性以适应未来人参属植物潜在适生区的变化,以便更好地保护人参属植物的物种多样性。

参考文献

[1] Doblas-Reyes F J, Srensson A A, Almazroui M, et al. IPCC AR6 WGI Chapter 10: Linking global to regional climate change [M]. 2021.

[2] 何建坤, 刘滨. 在可持续发展框架下应对气候变化的挑战 [J]. 环境保护, 2005 (02): 16-19.

[3] Li J Y, Chang H, Liu T, et al. The potential geographical distribution of Haloxylon across Central Asia under climate change in the 21st century [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 243-254.

[4] Wang Y J, Li Y X, Zhou X Y, et al. Prediction of the potentially suitable areas of Leonurus japonicus in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model [J]. Ecology and Evolution, 2023, 13 (10): e10597.

[5] Rana S K, Rana H K, Ranjitkar S, et al. Climate-change threats to distribution, habitats, sustainability and conservation of highly traded medicinal and aromatic plants in Nepal [J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106435.

[6] Shang C B, Porter P L. Araliaceae, Flora of China [J]. Beijing: Science Press, 2007, 23: 489-491.

[7] 胡婉琦. 人参属植物不同部位中 T19 的 HPLC-ELSD 含量测定及制备方法的研究 [D]. 延边: 延边大学, 2017.

[8] 曾建飞. 《中国植物志》第五十四卷 [J]. 植物杂志, 1978 (04): 48.

[9] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用 [J]. 生物多样性, 2013, 21 (01): 90-98.

[10] 环境保护部和中国科学院. 中国生物多样性红色名录高等植物卷 [M]. 北京: 环境保护部和中国科学院, 2013: 136.

[11] 杨崇仁, 丁艳芬, 苏梅, 等. 三七资源与三七产业 [C]. 第七届(西部地区)植物科学与开发研讨会论文集. 云南: 云南省植物学会, 2012: 81-88.

[12] Tang C Q, Matsui T, Ohashi H, et al. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia [J]. Nature Communications, 2018, 9 (4488): 1-14.

[13] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria [J]. Ecological applications, 2011, 11 (2): 335-342.

[14] Colli-Silva M, Pirani J R, Zizka A. Ecological niche models and point distribution data reveal a differential coverage of the cacao relatives (Malvaceae) in South American protected areas [J]. Ecological informatics: an international journal on ecoinformatics and computational ecology, 2022, 69: 101668.

[15] Cobos M E, Pererson A T, Barve N, et al. kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent [J]. Peer J, 2019, 7: e6281.

[16] Steven J, Phillips, Anderson R P, et al. Opening the black box: an open-source release of Maxent [J]. Ecography, 2017, 40 (7): 887-893.

[17] 陈程浩, 龙主多杰, 陆徐伟, 等. 基于优化 MaxEnt 模型的中国紫萼属植物生境适宜性研究 [J]. 生态学报, 2023, 43 (24): 10345-10362.

[18] Swets A J. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240 (4857): 1285-1293.

[19] 李明睿. 栽培人参的起源与驯化 [D]. 长春: 东北师范大学, 2017.

[20] 吕昊敏, 周仁超, 施苏华. 生态物种形成及其研究进展 [J]. 生物多样性, 2015, 23 (03): 398-407.

[21] 何景. 我国五加科的属种数、属间亲缘关系和地理分布 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1961 (01): 1-11.

[22] 刘葵, 黄万斌, 何梦铃, 等. 基于 GIS 和 MaxEnt 的弥勒市林下三七仿野生种植适生区分析 [J]. 西部林业科学, 2022, 51 (01): 56-61.

[23] 沈亮, 徐江, 孟祥霄, 等. 人参属药用植物无公害种植技术探讨 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24 (23): 8-17.

[24] 云南省植物研究所. 人参属植物的三萜成分和分类系统、地理分布的关系 [J]. 植物分类学报, 1975, 13 (02): 29-45.

[25] 詹鹏. 基于皂苷含量和 MaxEnt 模型评估我国三七适宜生产区 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.

(责任编辑 王东印)