北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

气候驱动下泛喜马拉雅地区多花芍药潜在适生区迁移

孙洪喆 于晓南 陈乐 陈启航 高泰 纪晨晨

Climate-driven shifts in potential suitable habitat of *Paeonia emodi* across the Pan-Himalaya region

Sun Hongzhe, Yu Xiaonan, Chen Le, Chen Qihang, Gao Tai, Ji Chenchen

引用本文:
孙洪喆, 于晓南, 陈乐, 陈启航, 高泰, 纪晨晨. 气候驱动下泛喜马拉雅地区多花芍药潜在适生区迁移[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):15–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260159
Sun Hongzhe, Yu Xiaonan, Chen Le, Chen Qihang, Gao Tai, Ji Chenchen. Climate–driven shifts in potential suitable habitat of *Paeonia emodi* across the Pan–Himalaya region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):15–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260159

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260159

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测
Prediction of potential suitable areas of *Keteleeria calcarea* and *Keteleeria cyclolepis* under climate change
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 30–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240094

未来气候情景下2种新疆特有树种潜在适生区预测
Prediction of the potential distribution of two endemic tree species in Xinjiang of western China under future climate scenarios
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 10–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210301

基于MaxEnt模型的不同气候情景下假俭草中国适生区预测
Prediction of suitable areas of *Eremochloa ophiuroides* in China under different climate scenarios based on MaxEnt model
北京林业大学学报, 2024, 46(3): 91–102. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230022

基于SSPs预测格木在中国的潜在地理分布
Predicting the potential geographical distribution of *Erythrophleum fordii* in China based on SSPs
北京林业大学学报, 2022, 44(4): 54–65. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210308

气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测
Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33–43. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200254

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响
Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 82–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230072

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260159

气候驱动下泛喜马拉雅地区多花芍药潜在适生区迁移

孙洪喆[1] 于晓南[1] 陈 乐[1] 陈启航[2] 高 泰[1] 纪晨晨[1]
（1. 北京林业大学园林学院，北京观赏植物种质创新与分子育种重点实验室，国家花卉工程技术研究中心，北京城乡生态环境重点实验室，北京 100083；2. 广州医科大学 GMU-GIBH 生命科学联合学院，粤港澳细胞命运调控与疾病联合实验室，广东 广州 511436）

摘要:【目的】对于生态敏感植物多花芍药，预测其在泛喜马拉雅地区气候变化背景下的潜在适生区格局及迁移趋势，明确其分布的关键环境限制因子，为该物种保护与利用提供科学依据。**【方法】**基于泛喜马拉雅地区 64 个筛选后的分布记录，选取 6 个环境变量，采用 MaxEnt 模型结合 GIS 方法，对多花芍药历史时期（1970—2000 年）及未来 SSP2-4.5 情景下 2030s、2050s 和 2070s 的潜在适生区进行模拟；并通过 Jackknife 检验、响应曲线、适生区面积统计和质心迁移分析，评估其环境主导因子及未来时空变化格局。**【结果】**（1）模型预测精度较高，平均测试 AUC 为 0.986；（2）核心适生区主要位于巴基斯坦北部、印度北部、尼泊尔、不丹及中国西藏南部；（3）最冷月最低温（Bio6）、海拔（Elev）和最干月降水量（Bio14）是影响其分布的主要环境因子；（4）在宏观区域尺度上，多花芍药潜在适生区总体呈缩小趋势，并向湿润山地高海拔区域重分布，适生区质心沿喜马拉雅山弧迁移，整体趋向巴基斯坦北部和印度西北部。**【结论】**多花芍药潜在适生区对海拔和低温条件变化高度敏感，未来气候变暖将导致其适生区收缩并向高海拔山地集中。泛喜马拉雅地区的湿润高海拔区域或是未来气候变化情境下多花芍药的核心气候避难所，其中中国西藏东南部等分布边缘区域兼具种群保存、遗传多样性维持和生态预警价值，应作为重点保护区域。

关键词：多花芍药；MaxEnt；喜马拉雅高山植物；高山气候避难所；物种分布模型；海拔依赖增温；潜在适生区预测
中图分类号：S717；Q16 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)05−0015−11
引文格式：孙洪喆，于晓南，陈乐，等. 气候驱动下泛喜马拉雅地区多花芍药潜在适生区迁移［J］. 北京林业大学学报，2026，48(5)：15−25. Sun Hongzhe, Yu Xiaonan, Chen Le, et al. Climate-driven shifts in potential suitable habitat of *Paeonia emodi* across the Pan-Himalaya region［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 15−25.

Climate-driven shifts in potential suitable habitat of *Paeonia emodi* across the Pan-Himalaya region

Sun Hongzhe[1] Yu Xiaonan[1] Chen Le[1] Chen Qihang[2] Gao Tai[1] Ji Chenchen[1]
(1. School of Landscape Architecture, Beijing Key Laboratory for Flower Germplasm Innovation and Molecular Breeding, National Engineer Research Center for Floriculture, Beijing Key Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. GMU-GIBH Joint School of Life Sciences, Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Cell Fate Regulation and Diseases, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, Guangdong, China)

Abstract: ［**Objective**］For the climate-sensitive plant *Paeonia emodi*, this study aimed to predict the potential suitable habitat pattern and migration trend across the Pan-Himalaya region under climate change, identify the key environmental limiting factors affecting its distribution, and provide a scientific basis for the conservation and utilization of this species. ［**Method**］Based on 64 filtered occurrence records from the Pan-Himalaya region and six environmental variables, the MaxEnt model combined with GIS was used to

收稿日期: 2026−04−04 **修回日期:** 2026−05−05
基金项目: 国家自然科学基金项目（32071817）。
第一作者: 孙洪喆。主要研究方向：种质资源。 Email: gigi1286571399@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
责任作者: 于晓南，教授，博士生导师。主要研究方向：园林植物资源与育种、观赏植物栽培与生产、景观植物设计与应用。 Email: yuxiaonan626@126.com 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

simulate the potential suitable habitat of *P. emodi* during the historical period (1970–2000) and under the SSP2-4.5 scenario for the 2030s, 2050s, and 2070s. Jackknife tests, response curves, suitable habitat area statistics, and centroid migration analysis were further conducted to evaluate the dominant environmental factors and future spatiotemporal dynamics of its potential distribution. [**Result**] (1) The model showed high predictive accuracy, with a mean test AUC of 0.986. (2) The core suitable areas were mainly located in northern Pakistan, northern India, Nepal, Bhutan, and southern Xizang of China. (3) The minimum temperature of the coldest month (Bio6), elevation (Elev), and precipitation of the driest month (Bio14) were major environmental factors affecting its distribution. (4) At a broad regional scale, the potential suitable habitat of *P. emodi* showed an overall shrinking trend and was redistributed toward humid montane high-elevation regions. The centroid of suitable habitat shifted along the Himalayan arc, with an overall tendency toward northern Pakistan and northwestern India. [**Conclusion**] The potential suitable habitat of *P. emodi* is highly sensitive to changes in elevation and low-temperature conditions. Future climate warming is likely to cause habitat contraction and concentration toward high-elevation mountain regions. The humid high-elevation areas of the Pan-Himalaya region may serve as core climatic refugia for *P. emodi* under future climate change, and the distributional marginal regions in southeastern Xizang of China possess both population conservation, genetic diversity maintenance, and ecological early warning value, should be prioritized as key protected areas.

Key words: *Paeonia emodi*; MaxEnt; Himalayan alpine plants; alpine climate refugia; species distribution model; elevation-dependent warming; potential suitable habitat prediction

全球气温持续上升，未来增温趋势仍将延续[1]。随着全球变暖加剧及气候格局改变，热胁迫将日益威胁众多植物物种，尤其是那些已接近热耐受上限、生态适应幅度较窄的脆弱类群可能发生区域性丧失[2−5]。喜马拉雅地区地处热带纬度，其升温速率高于全球平均水平[6]，增温幅度随海拔升高而增强[7]，高山植被面临更高风险[8]。因此，适应低温环境的本地高山植物在生境持续变暖背景下可能更加脆弱[9−11]。近年来，针对高山植物热耐受性及其对气候变暖响应的研究[12−14]不断增多，结果普遍表明，持续升温将对高山植物的生存与分布格局产生显著影响。

喜马拉雅及其邻近山系共同构成的泛喜马拉雅地区是全球重要的生物地理单元，也是众多高山植物类群现代分布与分化的中心，具有极高的生物多样性保护价值[15−16]。然而，该区植物多样性目前正受到气候变化和人为干扰的双重威胁[17]，物种再分布和生境迁移趋势日益明显。已有研究[18]表明，未来气候变化可能导致喜马拉雅部分植物潜在适生范围迁移，并伴随遗传多样性下降。鉴于该区域兼具丰富的特有植物资源和显著的生态敏感性，系统评估代表性高山植物对气候变暖的响应不仅有助于揭示其潜在适生区变化规律，也可为区域生物多样性保护和气候变化预警提供科学依据。

芍药属（*Paeonia*）植物兼具重要的观赏、药用和育种价值，长期以来一直是园艺学与资源植物学研究的重要对象。围绕芍药组（*Paeonia* sect. *Paeonia*）与牡丹组（*Paeonia* sect. *Moutan*）类群，前人已在遗传多样性与系统关系、组织培养与离体再生、花器官性状与香气成分、杂交授粉与繁殖生物学、种子营养与生物活性物质等方面开展了较多研究[19−25]，形成了较为丰富的研究基础。相较之下，针对多花芍药（*Paeonia emodi*）及相关类群在气候变化背景下潜在适生区格局与未来分布动态的研究仍相对较少，因此有必要从物种分布模型角度对其开展进一步分析。

多花芍药为原产于西喜马拉雅的多年生草本植物，其分布范围西起阿富汗东部，经巴基斯坦、印度北部至尼泊尔西部和中国西南地区[26−27]。在中国，目前仅在中尼边境吉隆镇附近确认到一个野生种群[28]。多花芍药是重要的药用植物，具有较为广泛的药理活性[29]。在已报导的芍药属系统发育研究[30]中，多花芍药处于长枝、深度分化的位置，与属内多数近缘种在系统发育上相距较远。其较高的系统发育独特性意味着其携带了不成比例的进化历史和性状独特性，这些特征通常与寒冷高海拔环境中的特化生活史策略相关。因此，作为喜马拉雅典型山地草本，对多花芍药的保护不仅有助于保存独特的进化信息，也有助于维持高山植物群落的功能多样性；同时，其持续存在还可作为区域生态廊道完整性和气候避难所稳定性的敏感生物指示物。近年来，随着环境变化加剧和人类活动增强，多花芍药野生种群明显衰退，因其具有较高生态价值和迫切保护需求而受到越来越多关注。Sher 等[31]指出，该物种虽可分布于

较广区域，但受过度采挖、践踏和市场需求较高等因素影响，往往难以形成高密度群落。有研究[32]发现，多花芍药野生种群密度随海拔升高而下降，表明资源可获得性较差。杨勇[33]认为，多花芍药对环境条件要求较为严格，应给予更高程度的关注与保护。现有保护评估也存在不足，例如 IUCN 红色名录对未来气候风险的纳入仍不充分[34]。在喜马拉雅不同森林利用类型中，多花芍药被鉴定为老龄林指示物种之一，且仅出现于原生林和更新林中，并被世界自然基金会巴基斯坦分会（WWF-Pakistan）报告为研究区域内高度脆弱的植物之一[35]。由于其分布区位于对气候变化高度敏感的全球热点地区[36–37]，明确其在现有分布点之外的潜在适生区对于理解气候驱动下的分布动态及制定有效保护策略具有重要意义。

物种分布模型通过将已知分布记录与环境和土壤等预测因子相结合，在特定算法下估计物种生态位，并进一步投影潜在适生区空间格局。最大熵模型（MaxEnt）是当前植物潜在适生区研究中应用最广泛的模型之一，因为其对小样本数据具有较好适应性，预测精度高[38]，且稳定性较强[39]。近年来，已有研究[40]利用 MaxEnt 评估气候变化驱动下的生境变化。

本研究结合 MaxEnt 与 ArcGIS 10.8，对多花芍药历史时期（1970—2000 年）潜在适生区格局进行重建，并预测其在 2030s、2050s 和 2070s 的潜在适生区变化。通过识别影响该物种分布的关键环境因子及其适生区迁移方向，旨在为多花芍药的原地保护、迁地保护及科学引种栽培提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　物种分布点数据的收集与处理

多花芍药分布记录来源于全球生物多样性信息平台、国家标本资源共享平台中国数字植物标本馆以及经核验的 iNaturalist 记录，以增加数据来源并尽可能降低采样偏倚。除已发表记录外，本研究还纳入了中尼边境吉隆县的野外调查记录[28]，在该地确认到保存状况较好的野生种群。为保证数据质量，剔除了缺乏地理坐标或存在明显空间错误的记录，将保留点统一转换为 WGS84 坐标系，并在去除完全重复点前对坐标施加小幅随机扰动，以减少点位堆叠。最终共获得泛喜马拉雅地区 64 个有效分布点（图 1）。

1.2　环境变量的获取与共线性诊断

从 WorldClim v2.1 数据库获取 19 个生物气候变量（Bio1 ~ Bio19）及海拔数据，空间分辨率为 30 arc-second，约 0.93 km。

1.3　MaxEnt 建模、变量筛选与精度评价

采用 MaxEnt v3.4.4 构建多花芍药适生性预测模型。将清洗后的分布点坐标与筛选后的环境变量导入模型，参数设置为最大迭代次数 1 000，特征组合和正则化倍数均采用默认值，背景点数设置为 10 000。为评估模型稳定性与预测能力，进行 20 次交叉验证重复，并输出响应曲线和预测分布图，同时利用 MaxEnt 内置程序评估变量重要性。模型预测精度采用受试者工作特征曲线下面积（AUC）进行评价。AUC 取值范围为 0~1，通常认为，AUC 大于 0.9 表明模型具有较高的判别能力，即能够较好地区分适生与不适生环境。

环境变量筛选采用 3 步法。首先，利用 Pearson 相关分析剔除高度相关变量；其次，通过逐步迭代的方差膨胀因子（VIF）分析降低多重共线性，仅保留 VIF 小于 10 的变量；最后，结合完整 MaxEnt 模型中的百分贡献率，进一步确认变量的生态学相关性。最终保留贡献率较高且冗余较低的变量用于建模。

1.4　适生区分级与质心迁移分析

利用 ArcGIS 10.8.1，将多次重复输出结果的均值转换为 Logistic 适生性栅格，适生值记为 P，取值范围为 0 ~ 1。随后采用 2 种互补方式进行分析。其一，对历史时期 P 值图层采用 Jenks 自然断点法划分为 4 个等级，即非适生区（$P < 0.066\ 4$）、低适生区（$0.066\ 4 \leqslant P < 0.250\ 3$）、中适生区（$0.250\ 3 \leqslant P < 0.586\ 9$）和高适生区（$P \geqslant 0.586\ 9$），并将 $P \geqslant 0.066\ 4$ 统称为适生区。其二，为保证不同时期可比性，采用最大灵敏度与特异度准则确定统一阈值 $P^* = 0.095$，并将所有时期中 $P \geqslant P^*$ 的区域定义为适生区。进一步利用 SDMtoolbox 2.4 定量分析不同时期适生区面积的增加和丧失，并计算适生区质心迁移轨迹，以评估未来气候变化情景下的分布迁移。

1.5　气候情景

未来气候数据来源于 WorldClim v2.1 数据库中的 CMIP6 产品，选取 BCC-CSM2-MR 全球气候模式下 SSP2-4.5 情景进行分析。分别对 2030s（2021—2040 年）、2050s（2041—2060 年）和 2070s（2061—2080 年）3 个时期进行预测，并与 WorldClim 用于未来图层偏差校正和分发所采用的历史基准期 1970—2000 年进行比较。所有气候栅格数据均保持 30 arc-second 空间分辨率。

1.6　环境变量的最终筛选

首先以全部 20 个候选变量，包括 19 个生物气候变量和海拔，运行 MaxEnt 模型，获得各变量的百分贡献率，用以指导后续共线性检验。为提高模型

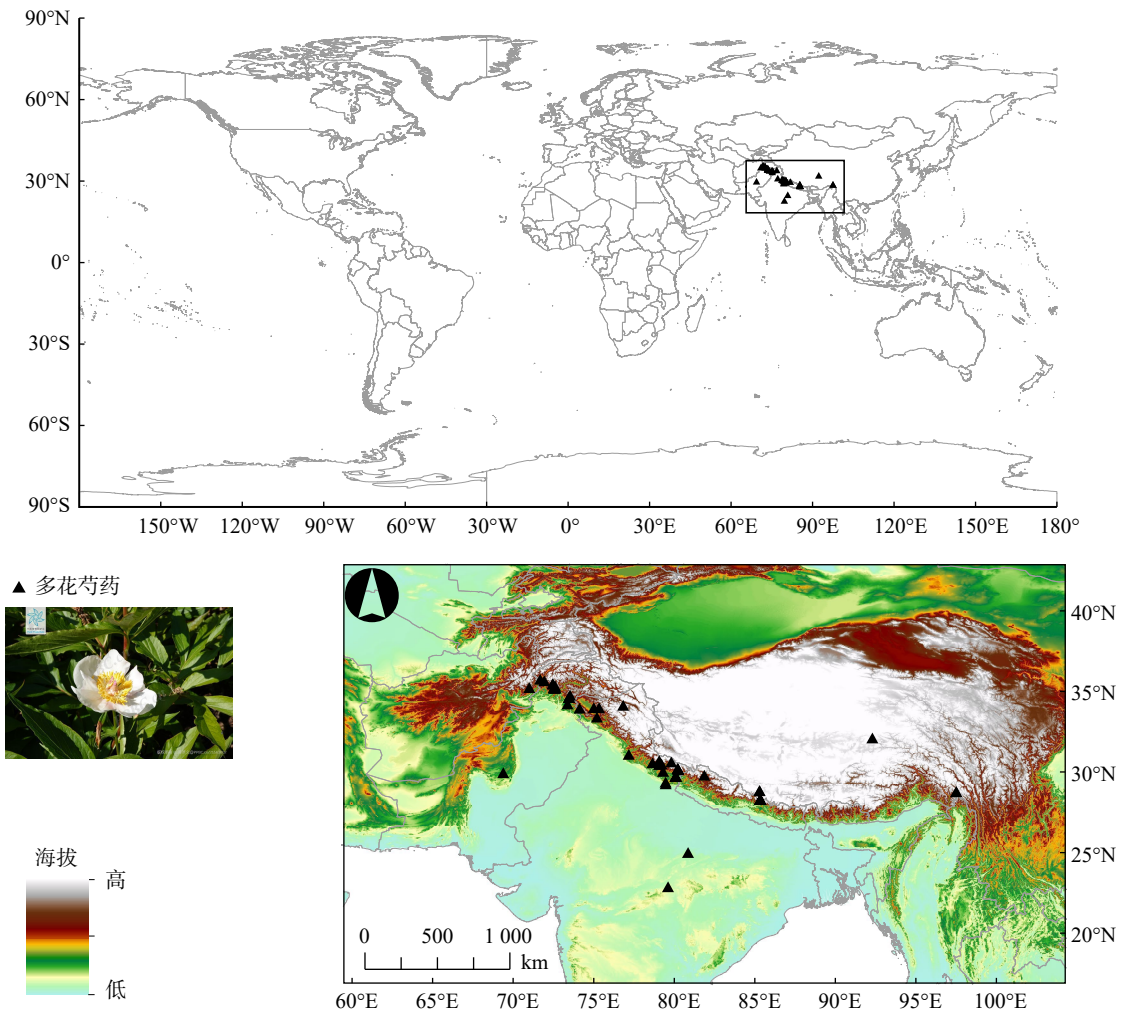


图 1 泛喜马拉雅地区多花芍药分布记录

Fig. 1 Distribution records of *Paeonia emodi* across the Pan-Himalaya region

精度和可解释性，变量筛选综合考虑 3 个方面：一是依据完整模型中的百分贡献率和 Jackknife 结果，识别关键变量与低贡献变量；二是利用 R 4.3.3 中 car 程序包逐步计算 VIF，并删除共线性较强的变量；三是结合 R 4.3.3 中 corrplot 绘制 Pearson 相关矩阵，识别高度相关且贡献率较低的变量。在综合生态学合理性及 Pearson 和 VIF 诊断结果后，最终保留 6 个环境变量用于建模，即等温性(Bio3)、最冷月最低温(Bio6)、最干月降水量(Bio14)、降水季节性(Bio15)、最干季度降水量(Bio17)和海拔(Elev)。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测精度评价

基于 64 个筛选后的分布点和 6 个最终环境变量，构建了多花芍药适生性预测模型。结果表明，模型具有较高的判别能力，训练集 AUC 为 0.989 4，测试集 AUC 为 0.996 5，多次重复计算的平均测试 AUC 为 0.986(图 2)，均明显高于标准，说明模型预测结果可靠性较高。

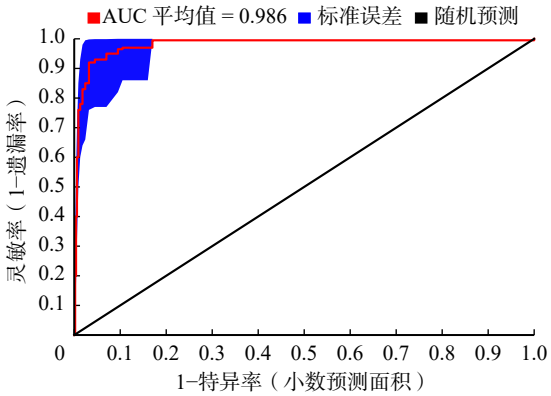


图 2 多花芍药 MaxEnt 模型 ROC 曲线

Fig. 2 ROC curve of the MaxEnt model for *P. emodi*

在 BCC-CSM2-MR 模型的 SSP2-4.5 情景下，未来各时期模型同样表现出较高的预测精度，训练集 AUC 为 0.988 4 ~ 0.989 3，测试集 AUC 为 0.994 9 ~ 0.998 0，表明所构建模型在不同气候情景下，均具有较好的稳定性和适用性。

2.2 潜在适生区环境决定因子

对历史气候条件下百分贡献率的分析结果(表 1)

表 1　多花芍药 MaxEnt 模型中环境变量的百分比贡献率与置换重要性

Tab. 1　Percentage contribution rates and permutation importance of environmental variables in the MaxEnt models for *P. emodi*　%

环境变量	贡献率	置换重要性
等温性(Bio3)	3.9	1.2
最冷月最低温(Bio6)	18.0	13.7
最干月降水量(Bio14)	13.6	0.5
降水季节性(Bio15)	6.2	0.7
最干季度降水量(Bio17)	5.1	1.3
海拔(Elev)	53.1	82.7

表明，海拔(Elev)是影响多花芍药分布的首要环境因子，贡献率为 53.1%；其次为最冷月最低温(Bio6) 18.0%、最干月降水量(Bio14)13.6%、降水季节性(Bio15)6.2%、最干季度降水量(Bio17)5.1% 和等温性(Bio3)3.9%。上述 6 个变量的累计贡献率为 100%，说明 Elev、对历史气候条件下百分贡献率的分析结果(表 1)表明，海拔(Elev)是影响多花芍药分布的首要环境因子，贡献率为 53.1%；其次，Bio6 和 Bio14 是控制多花芍药潜在适生区格局的主要环境驱动因子。

Jackknife 检验结果(图 3)进一步支持了上述结论。在训练增益、测试增益和 AUC 3 个评价面板中，Elev 和 Bio6 均表现出较高的单变量增益，且在移除相应变量后，模型性能下降较为明显，表明这 2 个变量不仅具有较强的独立解释能力，同时还包含较多难以被其他变量替代的信息。Bio14 的重要性次之，而 Bio15、Bio17 和 Bio3 相对于完整模型的独特信息贡献则相对有限。

基于 MaxEnt v3.4.4 输出的边际响应曲线(图 4)可知，随着 Bio6 升高，多花芍药的适生性迅速增加；随着 Bio14 增大，其适生性也明显增强。Elev 与适生性之间呈现单峰型关系，即最适区域主要位于中高海拔地带，而当 Elev 过高时，适生性反而下降。Bio3 存在较为明显的中间最适范围，较高的 Bio15 和 Bio17 总体上也有利于该物种分布。

上述结果表明，多花芍药潜在适生区主要受地形条件与干冷气候共同制约，其中对冬季低温极值和旱季水分条件尤为敏感。这一结果与其偏好湿润

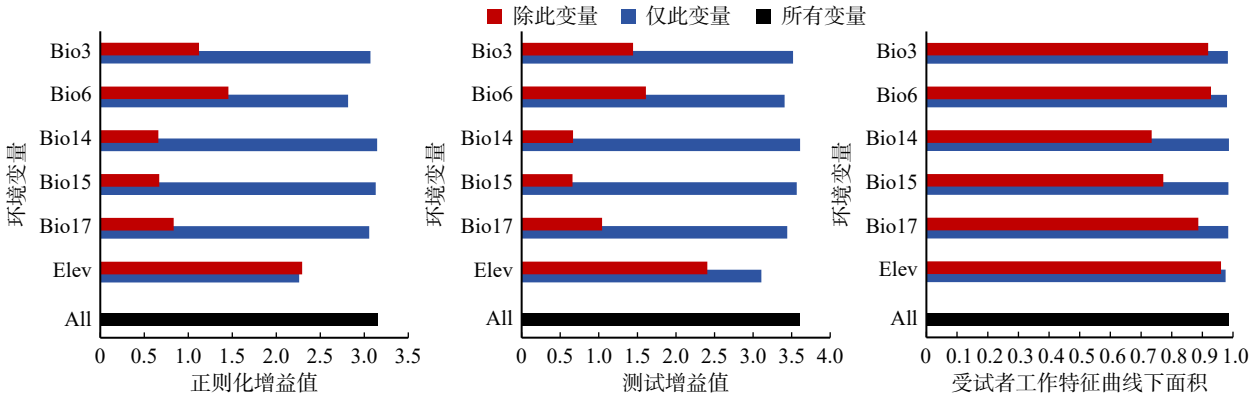


图 3　多花芍药 MaxEnt 模型的环境变量 Jackknife 重要性分析

Fig. 3　Jackknife test of environmental variable importance for the MaxEnt model of *P. emodi*

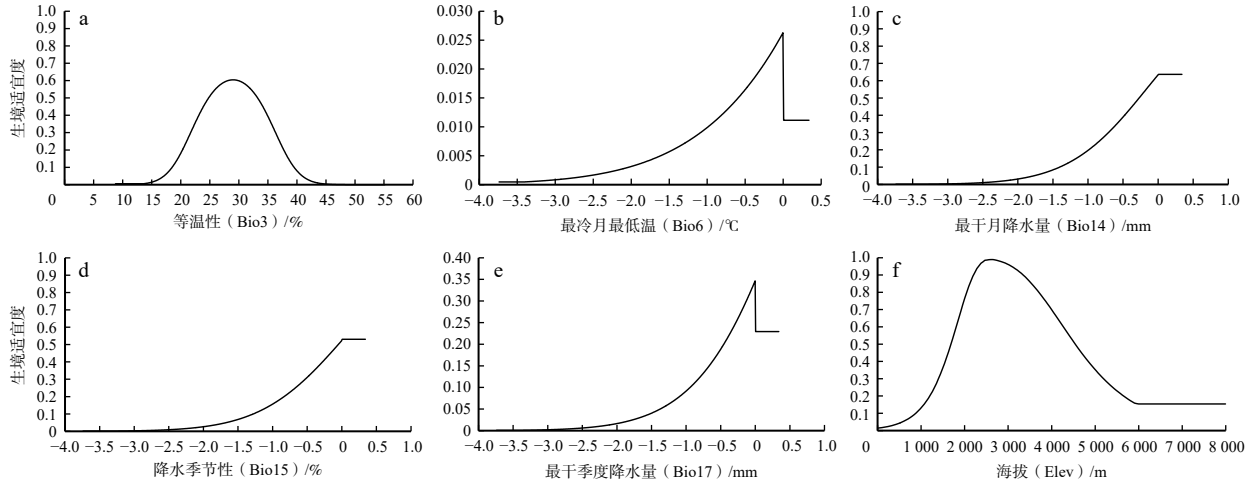


图 4　多花芍药主要环境变量的响应曲线

Fig. 4　Response curves of major environmental variables for *P. emodi*

高海拔喜马拉雅山地环境的生态习性基本一致，也说明温度和降水因子的协同作用共同塑造了其潜在适生区边界。

2.3 潜在适生区面积变化

在当前时期(1970—2000 年)，多花芍药潜在适生区主要分布于欧亚大陆中南部的山地和高原地区，包括中国西南和西藏东南部、喜马拉雅山弧、中亚南缘以及向西延伸至土耳其和高加索地区(图 5)。在统一阈值 $P^* = 0.095$ 条件下，64 个分布点中，有 98.44% 落入适生区，表明模型对现有分布点具有较好的覆盖能力。

由当前时期到未来时期，多花芍药潜在适生区总体上表现为明显收缩和空间重分布，而非简单的向外扩张。到 2030s，总适生区面积由 1.23×10^7 km^2 降至 4.35×10^6 km^2，低适生区、中适生区和高适生区面积均明显下降，表明未来气候条件下，适生区发生大幅收缩。空间上，未来适生区仍主要沿喜马拉雅山弧、中亚南缘及西亚山地带分布，但与当前时期相比，原有适生带出现较大范围丧失，仅在局部地区形成少量新增适生斑块。到 2050s，总适生区面积进一步降至 4.31×10^6 km^2，整体格局与 2030s 相近，适生区继续以收缩和重分布为主。到 2070s，总适生区面积进一步减少至 4.01×10^6 km^2，西亚和中亚部分区域格局趋于相对稳定，而青藏高原中北部及原有适生带边缘区域的适生性进一步降低(图 6、表 2)。

总体来看，未来新增适生区面积有限，主要呈零散分布；适生区丧失则明显多于新增，主要发生于喜马拉雅山弧、中国西南山地、中亚南缘及西亚部分原有适生带区域。说明在持续增温背景下，多花芍药潜在适生区格局将发生显著改变，其适生区并非整体扩张，而是在局部区域维持或小幅增强的同时，整体呈现明显退缩和破碎化加剧的趋势。

2.4 潜在适生区时空格局

不同时期多花芍药适生区质心总体表现为由西喜马拉雅向东持续迁移。由当前时期到 2030s，质心向东迁移 181.51 km；由 2030s 到 2050s，进一步向东迁移 224.23 km；由 2050s 到 2070s，质心继续向东南方向迁移 135.88 km，累计净位移为 519.19 km(图 7、表 3)。整体而言，未来适生区质心趋向巴基斯坦北部至印度西北部区域，表现出较为明确的东向迁移特征。

从新增与丧失格局看，未来新增适生区总体较少，主要呈零散分布，而原有适生带范围内的丧失更为广泛(图 6、表 4)。总体来看，适生区质心迁移轨迹具有较强方向性，未来多花芍药适生区空间格局总体表现为在持续收缩背景下，向东及东南方向重分布，以及向地形缓冲较强的山地区域收缩和集中。这表明，在未来气候变化背景下，多花芍药适生格局的调整不仅体现为面积减少，更表现为适生区空间位置及核心区域的持续迁移。

3 讨 论

3.1 地理分布的环境控制因素

在最终保留的 6 个环境变量中，海拔、最冷月最低温、最干月降水量、降水季节性、最干季度降水量和等温性的百分贡献率总和为 100%。其中海拔贡献率最高，为 53.1%，且在单变量模型中，海拔和最冷月最低温引起的 AUC 变化最大。综合来看，多花

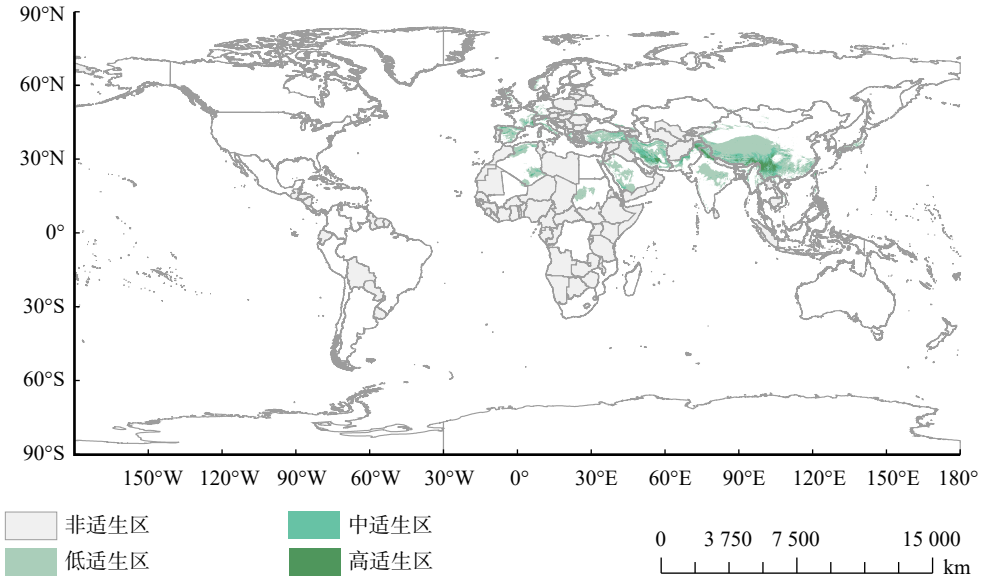
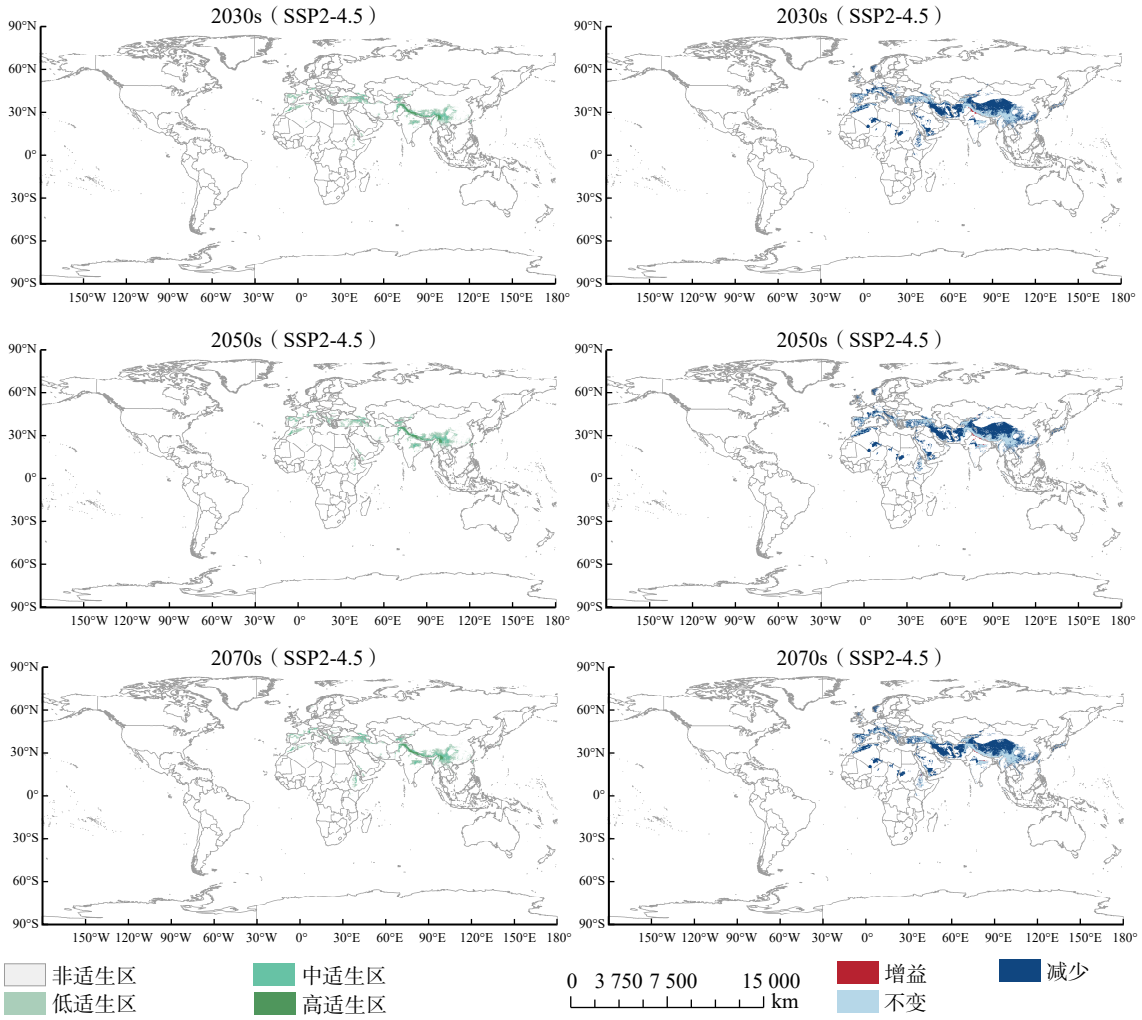


图 5 多花芍药当前时期(1970—2000 年)潜在适生区分布

Fig. 5 Distribution of potential suitable habitat in current period (1970−2000) for *P. emodi*



左列为各时期适生区分布，右列为适生区的动态变化。

图 6　不同时期多花芍药适生区格局

Fig. 6　Patterns of suitable habitat for *P. emodi* in different periods

表 2　多花芍药不同时期适生区面积变化

Tab. 2　Changes in suitable habitat area of *P. emodi* at different periods

10^4 km^2

类型	面积			
	当前时期	2030s	2050s	2070s
非适生区	5 919.29	6 718.81	6 722.70	6 753.14
低适生区	927.04	313.05	315.63	273.51
中适生区	217.69	90.41	88.26	96.49
高适生区	90.15	31.90	315.63	31.02

芍药分布受海拔、温度和降水的层级控制，其中地形起伏和寒冷胁迫是最关键的限制因素。从植物生物气象学角度看，最冷月最低温反映了物种所承受的低温极端暴露，可能进一步影响冻害风险、休眠过程以及生长季初期发育。需要注意的是，在增温背景下，霜冻风险并不一定简单下降，因为植物物候提前的幅度可能快于末次霜冻日期变化，从而形成“假春”风险。

从生态上看，多花芍药主要分布于喜马拉雅及邻近中亚山地，多见于高海拔林缘或林下环境，具有较强耐寒性并偏好湿润条件。泛喜马拉雅地区具有显著的纬度和地形–气候梯度，温度随纬度和海拔升高而下降，降水则表现出明显区域差异。与这些梯度及模型输出一致，边际响应曲线显示，其较适宜的环境条件大致为海拔 1 732 ~ 2 066 m、最冷月最低温约 3.9 ~ 6.9 ℃、最干月降水量约 47.8 ~ 70.8 mm。上述结果表明，多花芍药的核心生态位主要位于山地与高原过渡地带，对冬季低温极值和旱季水分短

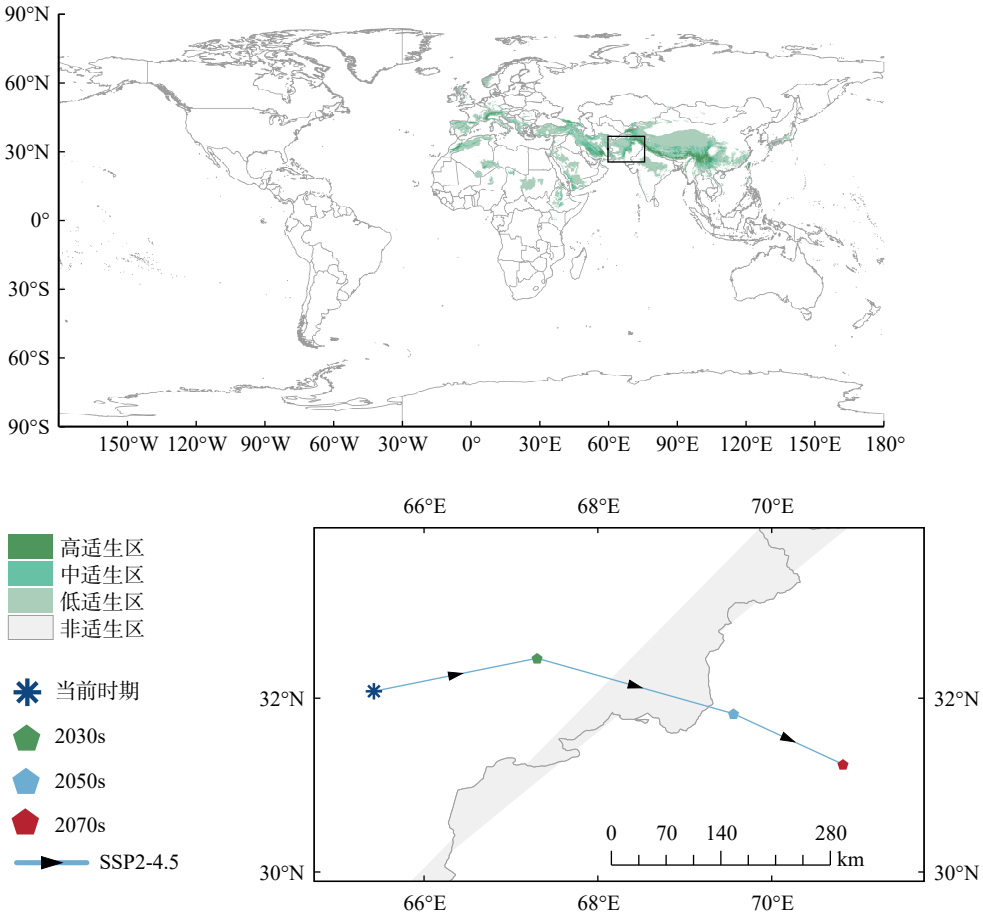


图 7 多花芍药在不同时期质心迁移

Fig. 7 Centroid shift of *P. emodi* under different climate scenarios

表 3 多花芍药不同时期质心迁移情况

Tab. 3 Centroid shift situation of *P. emodi* across different periods

时期	相比前一时期	方位角/(°)	迁移方向	距离/km
2030s	当前时期	76.03	东	181.51
2050s	2030s	107.83	东	224.23
2070s	2050s	118.20	东南	135.88

表 4 不同时期多花芍药适生区空间变化

Tab. 4 Spatial changes in suitable habitat of *P. emodi* in different periods

10^4 km^2

时期	面积			
	新增	保留	丧失	变化
2030s	20.28	415.08	819.80	−799.52
2050s	48.78	382.68	52.68	−3.90
2070s	43.60	357.42	74.04	−30.44

注：变化面积等于新增面积减去丧失面积。

缺均较为敏感，温度、降水和海拔共同界定了其在泛喜马拉雅地区的潜在适生区。

3.2 潜在适生区的时空格局

在 BCC-CSM2-MR 模型的 SSP2-4.5 情景下，并结合统一阈值分析，多花芍药未来并不表现为简单的适生区扩张，而是表现为适生区净收缩与空间重分布并存。这一结果与野生牡丹类植物的研究[41]结论一致，即未来气候变化更可能引起局部退缩，而非整体性大幅增加。在欧亚尺度上，当前适生区沿喜马拉雅—喀喇昆仑—帕米尔体系及其邻近中亚山地

展开。随时间推移，低海拔、干旱的大陆内部区域更倾向于失去适生性，而高海拔、受地形抬升和水热条件共同作用的湿润区域则更可能保持甚至增强适生性，从而提高山地斑块之间的连通性。

在中国范围内，多花芍药适生区主要集中于横断山地区、青藏高原东缘以及西藏东南部受地形抬升影响的湿润坡面。这些凉湿区域在未来仍可能维持相对稳定，甚至边缘性扩展；相反，外围干热河谷地带则更容易发生退缩。适生区质心整体上略向东南迁移，方向大体与主要山脉走向一致，表明在增温背景下，该物种更依赖海拔缓冲和地形性水分条件。结合变量重要性分析结果可以看出，尽管寒冷限制在一定程度上可能减弱，但其不足以抵消旱季水分胁迫和地形阻隔的影响，因此，多花芍药总体上呈现向更湿润、地形更有利的高地重新配置，而非均匀外扩。

3.3　潜在适生区沿山地廊道的轴向重分布

本研究发现，多花芍药潜在适生区质心沿山系轴向向东迁移，表明其在气候变化背景下的分布调整更接近于沿山地廊道的空间重分布，而非简单的径向扩张。山地系统中，物种分布变化往往受地形结构约束，适生区的形成与维持通常受到海拔依赖增温、地形性降水梯度及季节性水分格局的共同影响。对于喜马拉雅地区而言，湿润坡面和局地微气候缓冲可在一定程度上减弱宏观增温对高山植物的不利影响，从而为适应低温环境的类群提供相对稳定的生境条件。本研究中，海拔、最冷月最低温和最干月降水量的主导作用与这一机制相一致。最冷月最低温决定了物种越冬及生理耐受边界，而旱季水分条件则进一步限制其在低海拔内陆区域的维持，使适生区在增温背景下更倾向于向凉爽、湿润的高地重新配置。已有研究[42−44]表明，全球尺度上，山地植物普遍表现出向高海拔或高纬度迁移的趋势，喜马拉雅地区的相关实证研究[43,45−46]也显示高山植物分布上限上移和群落重组现象不断出现。因此，本研究揭示的多花芍药适生区东移和高地化趋势，实质上反映了该物种在未来气候增温及区域水热格局重组背景下对适生区的重新追踪与再分布。这也提示未来保护工作应更加关注沿喜马拉雅山系分布的潜在稳定适生区及其连通性。

3.4　多花芍药的保护与利用启示

尽管多花芍药的核心潜在适生区主要分布于喜马拉雅西段及其邻近地区，但中国西藏吉隆一带作为其已知东部分布边缘区，仍具有重要的种质保存价值。对于中国境内分布区，未来应加强野生居群调查与动态监测，明确资源现状及生境变化趋势；同时，结合潜在适生区预测结果，优先开展原生境保护、种质资源收集保存及迁地保育工作。在此基础上，可针对未来仍具较高适生等级的区域开展引种栽培试验和栽培表现评价，为多花芍药种质资源保护与可持续利用提供依据。

本研究从适生区分布格局变化、环境主导因子识别及未来适生区预测等方面开展综合分析，也可为其他跨境山地多年生植物的保护优先区识别、动态监测及动态保育提供方法借鉴。

3.5　研究局限性与展望

本研究的局限在于 WorldClim 生物气候变量反映的是长期气候平均状况，可能低估山地地区在植物生理生态上十分重要的短时极端事件和微气候异质性。未来研究可进一步引入与植物胁迫过程直接相关的指标，如结合物候过程的霜冻风险指标[44]和反映大气干旱程度的蒸汽压亏缺指标[45]，同时整合能够表征微避难所的地形气候因子。此外，采用多气候模式集合也有助于为未来分布转移提供不确定性区间。

4　结　　论

综合来看，多花芍药潜在适生区主要受海拔和最冷月最低温控制，最干月降水量次之，其余环境因子贡献相对较小。在 BCC-CSM2-MR 模型的 SSP2-4.5 情景下，相较历史时期，适生区总体表现为明显收缩并伴随空间重分配，而非均匀外扩。在欧亚尺度上，适生区总体仍沿喜马拉雅—帕米尔及中亚山地展开，低海拔干旱内陆区域收缩最为明显，湿润且受地形抬升影响的高海拔区域则相对稳定。在中国范围内，横断山−西藏东南部仍是未来核心区域，而外围干热河谷边缘则趋于退缩；整体格局表现为沿喜马拉雅山弧向东南方向并向更高海拔地区迁移。中国西藏吉隆一带是多花芍药在我国的重要边缘分布区。今后应加强该区域野生资源调查、原生境保护和长期监测，并结合潜在适生区预测结果开展种质保存、迁地保育和引种评价，以提升我国对该物种种质资源的保护与利用水平。

参　考　文　献

[1] McCulloch M T, Winter A, Sherman C E, et al. 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 ℃ [J]. Nature Climate Change, 2024, 14(2): 171−177.

[2] O'sullivan O S, Heskel M A, Reich P B, et al. Thermal limits of leaf metabolism across biomes [J]. Global Change Biology, 2017, 23(1): 209−223.

[3] Sastry A, Barua D. Leaf thermotolerance in tropical trees from a seasonally dry climate varies along the slow-fast resource acquisition spectrum [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 11246.

[4] Feeley K J, Martinez-Villa J, Perez T M, et al. The Thermal tolerances, distributions, and performances of tropical montane tree species [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2020, 3: 25.

[5] Slot M, Garcia M N, Winter K, et al. Leaf heat tolerance of 147 tropical forest species varies with elevation and leaf functional traits but not with phylogeny[J]. Plant, Cell & Environment, 2021, 44(8): 2413–2427.

[6] Dimri A P, Palazzi E, Daloz A S. Elevation dependent precipitation and temperature changes over Indian Himalayan region [J]. Climate Dynamics, 2022, 59: 1−21.

[7] Krishnan R, Shrestha A B, Ren G, et al. Unravelling climate change in the Hindu Kush Himalaya: rapid warming in the mountains and increasing extremes[M]// Wester P, Mishra A, Mukherji A, et al. The Hindu Kush Himalaya assessment: mountains, climate change, sustainability and people. Cham: Springer, 2019: 57–97.

[8] Pepin N, Deng H, Zhang H, et al. An examination of temperature trends at high elevations across the Tibetan Plateau: the use of MODIS LST to understand patterns of elevation-dependent warming [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(11): 5738−5756.

[9] Dangles O, Rabatel A, Kraemer M, et al. Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the tropical Andes [J]. PLoS ONE, 2017, 12(5): e0175814.

[10] Cuesta F, Tovar C, Llambí L D, et al. Thermal niche traits of high alpine plant species and communities across the tropical Andes and their vulnerability to global warming [J]. Journal of Biogeography, 2020, 47(2): 408−420.

[11] Sklenář P, Jaramillo R, Wojtasiak S S, et al. Thermal tolerance of tropical and temperate alpine plants suggests that `mountain passes are not higher in the tropics [J]. Global Ecology and Biogeography, 2023, 32(7): 1073−1086.

[12] Braun V, Buchner O, Neuner G. Thermotolerance of photosystem 2 of three alpine plant species under field conditions [J]. Photosynthetica, 2002, 40(4): 587−595.

[13] Marcante S, Erschbamer B, Buchner O, et al. Heat tolerance of early developmental stages of glacier foreland plants [J]. Plant Ecology, 2014, 215(7): 747−758.

[14] Buchner O, Stoll M, Karadar M, et al. Application of heat stress in situ demonstrates a protective role of irradiation on photosynthetic performance in alpine plants[J]. Plant, Cell & Environment, 2015, 38(4): 812–826.

[15] Perera-Castro A V, Brito P, González-Rodríguez A M. Changes in thermic limits and acclimation assessment for an alpine plant by chlorophyll fluorescence analysis: Fv/Fm vs. Rfd [J]. Photosynthetica, 2018, 56(2): 527−536.

[16] León-García I V, Lasso E. High leaf temperature tolerance in tropical alpine Páramo plants: photoprotective role of leaf pubescence [J]. PLoS ONE, 2019, 14(4): e0216205.

[17] González-Rodríguez A M, Roca C, Martín C, et al. Unexpected vulnerability to high temperature in the evergreen shrub *Erysimum scoparium* [J]. Plants, 2021, 10(11): 2315.

[18] Kong H Z. Biodiversity undertakings call for extensive discussion on species concept and the criteria for species delimitation [J]. Biodiversity Science, 2016, 24: 977−978.

[19] Ge S. A review of recent studies of plant systematics and evolution in China [J]. Biodiversity Science, 2022, 30: 22385.

[20] Wang Q, Hong D. Understanding the plant diversity on the roof of the world [J]. The Innovation, 2022, 3(2): 100215.

[21] Hong D Y. Integrating multiplicate data: a new trend for taxonomic study [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2023, 65: 2021−2022.

[22] Ahmad M, Luo Y H, Rathee S, et al. Multifaceted plant diversity patterns across the Himalaya: status and outlook [J]. Plant Diversity, 2025, 47(4): 529−543.

[23] Gwal S, Gupta S, Singh S. Ecosystem services of alpine meadows in western Himalaya: an overview[EB/OL]. (2017–04–26)[2026–04–02].

[24] 于晓南, 季丽静, 王琪. 芍药属植物分子水平遗传多样性研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 130−136.
Yu X N, Ji L J, Wang Q. Research advances in molecular genetic diversity of *Paeonia* L. [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(3): 130−136.

[25] 刘建鑫, 于晓南. 芍药与牡丹远缘杂交花粉萌发与花粉管生长行为观察 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(9): 80−86.
Liu J X, Yu X N. Ultrastructural investigations of *Paeonia* pollen activation and pollen tube growth after intersectional hybridization. [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(9): 80−86.

[26] 宋朝伟, 于晓南. 2 个芍药品种不同花器官香气成分分析 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(2): 92−99.
Song C W, Yu X N. Analysis of the aroma composition of different flower organs of two peony varieties [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(2): 92−99.

[27] 王玉蛟, 高岚, 杨勇, 等. 基于花色表型的芍药品种数量分类研究 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 96−103.
Wang Y J, Gao L, Yang Y, et al. Numerical classification of peony cultivars based on flower color phenotype [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(7): 96−103.

[28] 于晓南, 吕晓龙, 王宇暄, 等. 芍药科植物种子营养成分与生物活性成分研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1): 1−11.
Yu X N, Lü X L, Wang Y X, et al. Research progress of nutritional components and bioactive components in Paeoniaceae plant seeds [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 1−11.

[29] 王吉凤, 李青, 孟会. 5 个芍药品种愈伤组织诱导及分化研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 213−216.
Wang J F, Li Q, Meng H. Induction and regeneration of callus tissues in five peony cultivars [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(3): 213−216.

[30] 张建军, 陈莉祺, 李建光, 等. 芍药根茎解剖结构特征及生长轮分析 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 124−131.

Zhang J J, Chen L Q, Li J G, et al. Anatomical structure characteristics and growth ring analysis of underground rhizome of herbaceous peony [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(5): 124−131.

[31] Sher H, Rahman I U, Bussmann R W, et al. *Paeonia emodi* Wall. ex Royle Paeoniaceae[M]//Kunwar R M, Sher H, Bussmann R W. Ethnobotany of the Himalayas. Cham: Springer, 2021: 1423−1429.

[32] WCVP: World checklist of vascular plants[EB/OL]. Royal Botanic Gardens, Kew, 2024[2026–04–02]. http://sftp.kew.org/pub/data-repositories/WCVP/.

[33] 杨勇. 中国野生芍药表型多样性分析及种子和根的利用潜力研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Yang Y. Research on phenotypic diversity of Chinese wild herbaceous peonies and utilization potential of their seeds and roots[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[34] Zahra N, Iqbal J, Arif M, et al. A comprehensive review on traditional uses, phytochemistry and pharmacological properties of *Paeonia emodi* Wall. ex Royle: current landscape and future perspectives [J]. Chinese Medicine, 2023, 18(1): 23.

[35] Rawat B, Gairola S, Bhatt A. Habitat characteristics and ecological status of *Paeonia emodi* Wallich ex Royle: a high value medicinal plant of West Himalaya [J]. Medicinal Plants-International Journal of Phytomedicines and Related Industries, 2010, 2(2): 121−125.

[36] Prakash P, Joshi P, Purohit V K. Impact on density of *Paeonia emodi* along altitudinal gradient in Garhwal Himalaya, India [J]. Applied Ecology and Environmental Sciences, 2020, 8(5): 319−323.

[37] 闫振国. 中国野生芍药种质资源调查与评价研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Yan Z G. Investigation and evaluation of herbaceous peony (*Paeonia* section *Paeonia*) germplasm resources in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[38] Wei J D, Wang W T. Vulnerability assessment of six endemic Tibetan-Himalayan plants under climate change and human activities [J]. Plants, 2025, 14(15): 2424.

[39] Adnan M, Hölscher D. Diversity of medicinal plants among different forest-use types of the Pakistani Himalaya [J]. Economic Botany, 2012, 66(4): 344−356.

[40] Wang Y, Ren X, Wang K, et al. Maxent model-based prediction of the potential distribution of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 20837.

[41] 唐自豪. 气候变化下中国野生牡丹潜在分布格局变迁及保护空缺研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
Tang Z H. Research on potential distribution changes and hotspots of wild *Paeonia suffruticosa* in China under climate change[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.

[42] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming [J]. Science, 2011, 333(6045): 1024−1026.

[43] Telwala Y, Brook B W, Manish K, et al. Climate-induced elevational range shifts and increase in plant species richness in a Himalayan biodiversity epicentre [J]. PLoS ONE, 2013, 8(2): e57103.

[44] Mountain Research Initiative EDW Working Group. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 424−430.

[45] Dolezal J, Dvorsky M, Kopecky M, et al. Vegetation dynamics at the upper elevational limit of vascular plants in Himalaya [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 24881.

[46] Hamid M, Khuroo A A, Malik A H, et al. Early evidence of shifts in Alpine summit vegetation: a case study from Kashmir Himalaya [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 421.

（责任编辑　李　契
责任编委　戴思兰）