

基于MaxEnt模型和ArcGIS的雪层杜鹃在中国的潜在适生区预测

郭永欣

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2026年1月30日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

雪层杜鹃(*Rhododendron nivale* Hook. f.)作为典型的高山杜鹃物种, 其地理分布受生境与气候因子的严格限制, 对高山生态系统的稳定性具有重要指示意义。为明确雪层杜鹃的潜在适生区分布格局及主导影响因子, 本研究基于225个分布点数据和19个生物气候因子, 采用MaxEnt模型和ArcGIS软件构建雪层杜鹃不同时期分布与环境因子的关系模型, 选取的是当前及未来四个时期的四种气候情景(ssp126, ssp245, ssp370, ssp585)下其在中国潜在适生区的分布情况。结果表明, MaxEnt预测结果可靠(AUC = 0.956), 雪层杜鹃适生区面积为 9.6×10^6 km², 未来各个时期、气候情景下, 雪层杜鹃适生区面积整体呈扩张趋势。等温性和气温季节性变动系数是影响雪层杜鹃适宜区分布的主导环境因子。当前雪层杜鹃高适生区呈集中分布特征, 主要集中在我国西南地区, 以四川盆地为核心, 向周边的西藏东南部、云南北部、贵州西北部及甘肃南部延伸。本研究结果可为了解雪层杜鹃的生态需求与资源保护提供依据。

关键词

雪层杜鹃, 潜在适生区, MaxEnt模型, 环境因子

Prediction of Potential Habitats for *Rhododendron nivale* Hook. f. in China Using MaxEnt Models and ArcGIS Change

Yongxin Guo

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

Received: January 30, 2026; accepted: February 24, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

Rhododendron nivale Hook. f., a typical alpine rhododendron species, exhibits a geographic distribution strictly constrained by habitat and climatic factors, making it a crucial indicator for the stability of alpine ecosystems. To clarify the distribution pattern of its potential habitat and dominant influencing factors, this study employed the MaxEnt model and ArcGIS software to construct a relationship model between the distribution of *Rhododendron nivale* at different time periods and environmental factors. This analysis utilized data from 225 distribution points and 19 bioclimatic factors, focusing on four climate scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, ssp585) to map its potential habitat distribution across China. Results indicate reliable MaxEnt predictions (AUC = 0.956), with a current suitable habitat area of 9.6×10^6 km². Future projections under various climate scenarios show an overall expansion trend in suitable habitat area. Isothermality and seasonal temperature variation coefficient were identified as the dominant environmental factors influencing the distribution of the snow-layer rhododendron's suitable habitat. Currently, areas of high suitability for the snow-layer rhododendron are concentrated primarily in the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding high-mountain regions of China. The findings of this study provide a basis for understanding the ecological requirements of the snow-layer rhododendron and for resource conservation efforts.

Keywords

Rhododendron nivale Hook. f., Potential Suitable Habitat, MaxEnt Model, Environmental Factors

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

雪层杜鹃(*Rhododendron nivale* Hook. f.)是杜鹃花科杜鹃属的常绿小灌木,多呈垫状或匍匐状生长,是典型的高山寒带、亚寒带适应型植物。其产地集中于中国青藏高原及周边高海拔区域,包括西藏、云南西北部、四川西部等地,在不丹、锡金等邻近国家的高山地带也有零星分布。据统计全世界杜鹃属植物存在约960~1000种,中国存在杜鹃属植物近600种,其中409种为中国特有[1]。杜鹃属植物兼具极高的观赏价值与药用价值。该属多数种类观赏性优良,是园林造景和盆栽养护的热门选择。近年来的研究还发现,杜鹃属植物含有单萜、倍半萜、酚类、黄酮类等丰富的化学成分,这些物质使其具备多样的药理活性,凸显出不俗的药用开发前景。雪层杜鹃在传统医学中,尤其是藏医学中被称为“巴鲁”,具有延缓衰老、止咳、化痰的作用[2]。研究表明,含“巴鲁”的藏族方剂大多主治衰老类疾病,且通过药材的配伍发现,“巴鲁”可能是通过使机体拥有正常的消化吸收功能以及消炎宁神来发挥抗衰老作用[3]。

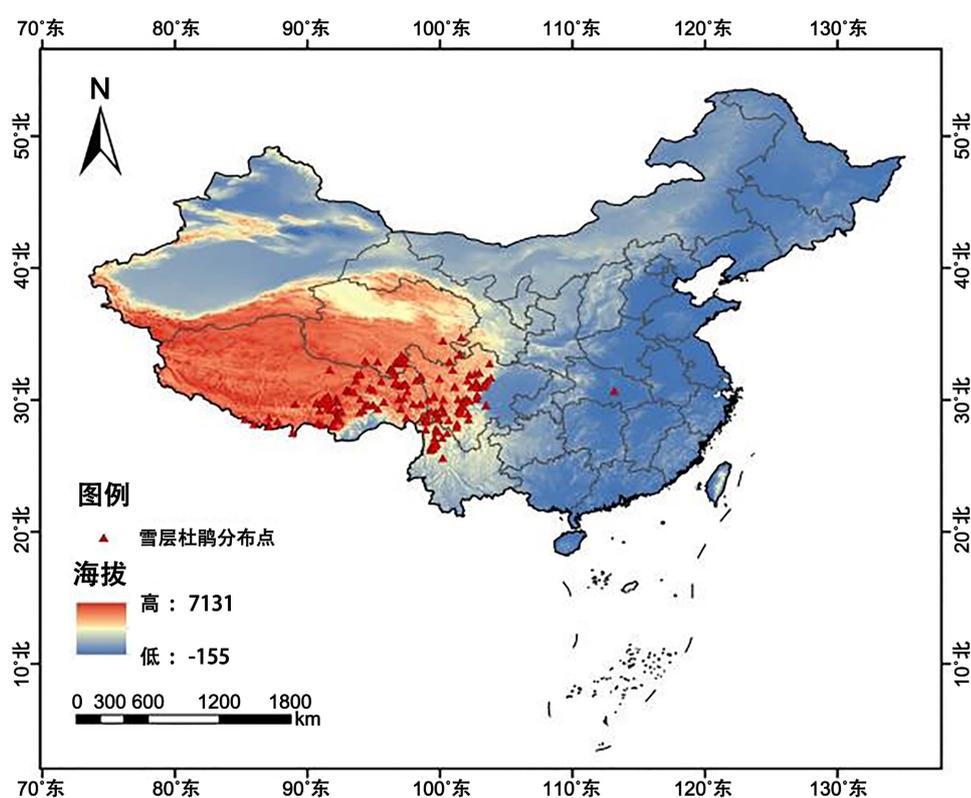
研究表明,在多种物种分布预测模型中,最大熵(MaxEnt)模型预测物种的潜在分布具有失真小、稳定性好的特点,在该研究领域表现更优[4][5],现已被广泛应用于物种分布模拟、生态适应性分析,以及濒危物种保护与管理,涉及农学、林学及病毒学等多学科领域[6]-[8]。近年来,应用根据调查数据、气候及土地环境要素的物种分布模型,已成为预测物种潜在分布范围的一种高效方法。最大熵(MaxEnt)模型以生态位理论为基础,利用物种分布点数据及环境气候因子,在生态位约束条件下推测物种的最优分布模式,从而预测其适生区[9]。最大熵模型预测精度高,所需样本量少,近年来已广泛应用于外来物种入侵、珍稀动植物保护及真菌、病毒传播范围等领域的适生区预测研究[10]-[16]。除此之外,最大熵模型还能分

析环境因子对物种分布的相对贡献，筛选出决定物种分布的关键因子，为后续研究提供明确方向。

2. 材料与方法

2.1. 数据来源

雪层杜鹃的分布数据主要来自于开放性信息网站，如：全球生物多样性信息网络平台(<https://www.gbif.org>)、中国植物标本馆数字化平台(<https://www.cvh.ac.cn>)、中国国家标本资源共享系统(<https://www.nsii.org.cn>)、教育与科研标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)等，共计获取雪层杜鹃分布数据坐标 225 个，且各个数据位点在 1 km × 1 km 均无重复，以确保后续雪层杜鹃分布情况模拟结果的准确性和真实性。如图 1 所示，雪层杜鹃主要集中在我国四川，云南地区，延伸至西藏东南部，云南北部、贵州西北部及甘肃南部。



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. Geographical distribution of *Rhododendron nivale* Hook. f.

图 1. 雪层杜鹃的地理分布情况

2.2. 环境因子数据来源与处理

本研究的气候数据全部来源于世界气候数据库 World Clim (<https://www.worldclim.org>)，其空间分布率为 2.5'，版本为 2.1 的 19 个生物气候因子，以及与当前气候因子数据的版本和分辨率相同，且由中国气象局自主研发的耦合气候模拟系统 BCC-CSM2-MR 模拟得到的 2021~2040 年、2041~2060 年、2061~5080 年和 2081~2100 年的未来生物气候因子数据[17]，其中每个时期的数据包含四种情景框架(ssp126：代表低排放可持续发展情景；ssp245：代表中等排放情景；ssp370：代表高排放情景；ssp585 代表高排放、高

碳用的未来情景)[18], 本研究对于分布点的筛选是利用 ENMTools 工具直接进行分布点筛选和校正。使用 ENMTools 工具的好处是可以使物种分布数据精准匹配环境数据栅格, 确保一个环境栅格中只有一个分布点, 处理过的分布数据会自动校正到该栅格的中心点坐标位置。本研究最后筛选出 13 个环境因子参与模型预测(表 1)。对于环境数据相关性的分析是使用 ArcGis 中的重采样工具提取各个物种分布点的环境数据, 导入 SPSS 软件中进行共线性分析, 得出 Pearson 系数相关性矩阵(图 2)。

Table 1. Contribution values of environmental variables

表 1. 各环境变量贡献值

| 变量 | 变量描述 | 贡献率/% | 置换重要值/% |
|-------|--|-------|---------|
| bio3 | 等温性 Isothermality | 49.3 | 42.8 |
| bio12 | 年均降水量 Annual precipitation (mm) | 17.3 | 4.4 |
| bio4 | 气温季节性变动系数 Temperature seasonality | 10.3 | 5.9 |
| bio9 | 最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter (°C) | 7.4 | 8.9 |
| bio10 | 最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter (°C) | 4.4 | 0.4 |
| bio11 | 最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter (°C) | 4.1 | 0 |
| bio6 | 最冷月份最低温度 Minimum temperature of coldest month (°C) | 2 | 1.7 |
| bio7 | 年温差范围 Temperature annual range (°C) | 1.9 | 4.2 |
| bio18 | 最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter (mm) | 1.4 | 22.6 |
| bio15 | 降水量季节性变化 Precipitation seasonality (mm) | 0.9 | 5 |
| bio14 | 最干月份降水量 Precipitation of driest month (mm) | 0.2 | 0.6 |
| bio19 | 最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter (mm) | 0.2 | 2.6 |
| bio13 | 最湿月份降水量 Precipitation of wettest month (mm) | 0 | 1 |

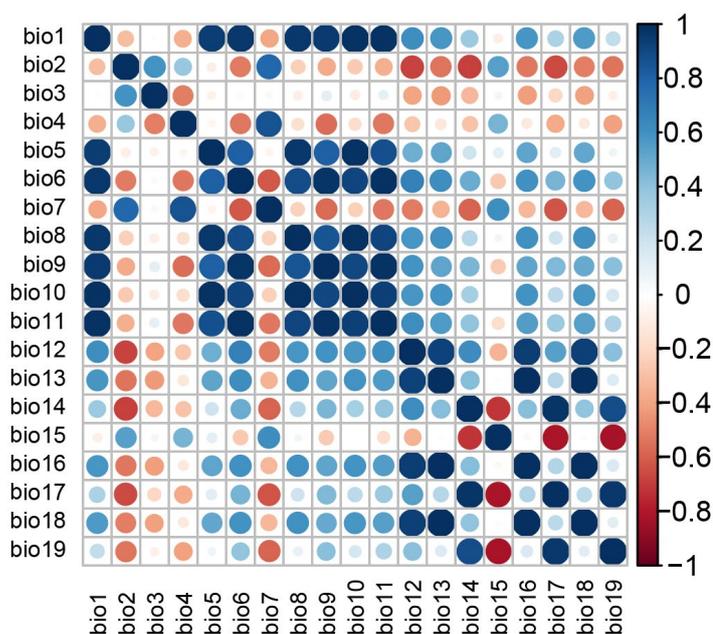


Figure 2. Correlation analysis of bioclimatic variables

图 2. 生物气候因子间相关性分析

2.3. 最大熵模型建立

先对气候因子数据开展预处理工作，历经剪切、转换以及筛选。接着，把雪层杜鹃的地理分布数据与处理好的气候因子数据一同录入 MaxEnt V3.4.4 中。挑选刀切法来评估各气候因子对物种分布的相对重要性，同时构建雪层杜鹃分布与气候因子间的响应曲线。将输出格式设定为 Logistic，文件类型设定为 asc，依次导入未来四种情景下、四个不同时间阶段的气候因子数据。设定运行参数中 25%为测试数据、75%为训练数据，选择 Random seed 选项，针对每个时间阶段、每种气候情景所构建的模型，均独立运行十次，最终取这十次运行结果的平均值作为最终分析依据。

3. 结果分析

3.1. MaxEnt 模型准确度分析

采用 ROC 曲线与坐标轴围成的面积(AUC 值)，对 MaxEnt 预测模型进行模拟精度的验证。模型预测的准确性与 AUC 数值大小呈正相关，其范围通常为 0.5~1。0.5≤AUC<0.6 为模型预测无效，0.6≤AUC<0.7 为模型性能较差，0.7≤AUC<0.8 为模型性能表现一般，0.8≤AUC<0.9 为模型性能表现良好，0.9≤AUC<1 为模型性能表现优秀[19]。本研究中的 AUC 值为 0.956 (图 3)，表明该模型对雪层杜鹃潜在分布区的预测具有较高的准确性和可靠性。

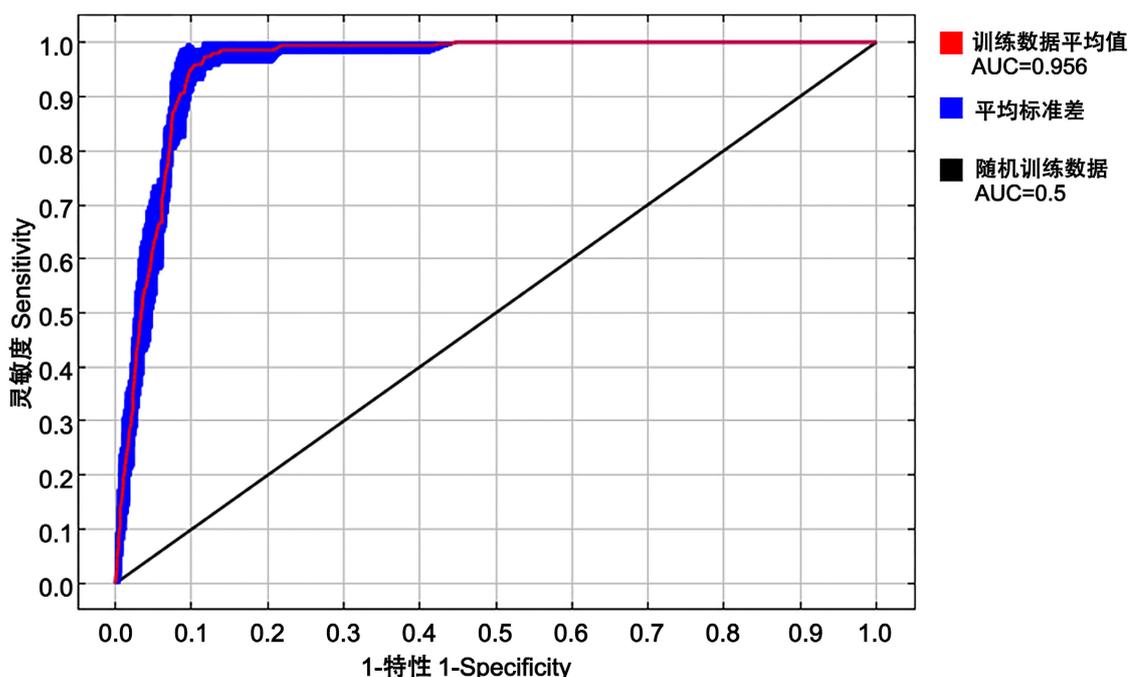


Figure 3. ROC curve validation of predicted data for *Rhododendron nivale* Hook. f.

图 3. 雪层杜鹃预测数据结果的 ROC 曲线验证

3.2. 影响雪层杜鹃地理分布主要气候因子分析

由 MaxEnt 预测结果中正规化训练增益和测试增益的刀切法检验可知，深蓝色条带代表单一变量对模型预测增益的贡献，条带长度越长，表明该变量对雪层杜鹃适宜区分布的影响越大；青色条带则表示移除该变量后，其他变量对模型预测增益的总贡献，条带长度越长，表明移除变量对模型的影响越小；红色条带代表所有预测因素的累积贡献量。当仅考虑单一变量时，bio3-等温性和 bio4-气温季节性变动系

数的贡献值超过 1, 说明这两个变量是对雪层杜鹃适生区影响最大的两个因子, 认为 bio3-等温性和 bio4-气温季节性变动系数是影响雪层杜鹃适宜区分布的主导环境因子(图 4)。

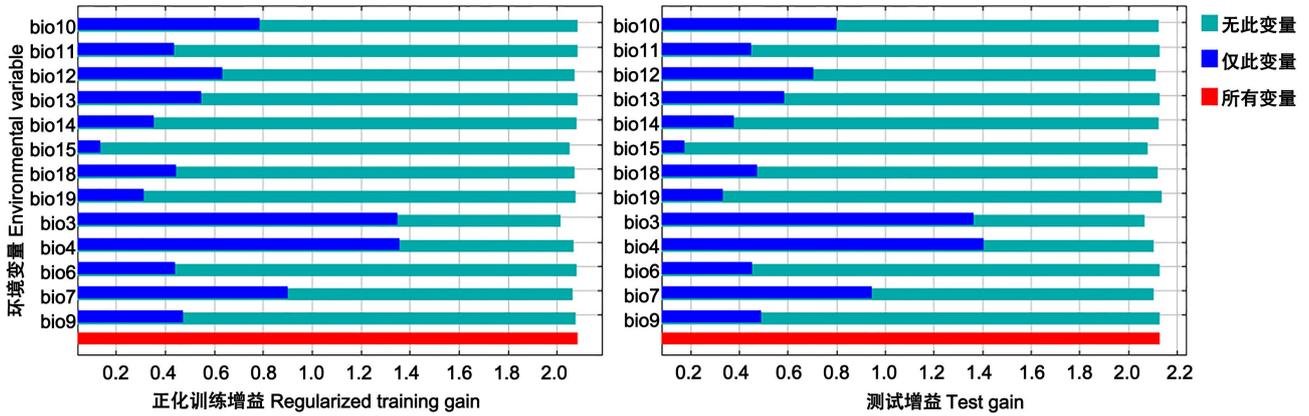


Figure 4. Jackknife test of key environmental factors influencing the distribution of *Rhododendron nivale* Hook. f.

图 4. 影响雪层杜鹃分布重要环境因子的刀切法检验

将 bio3-等温性和 bio4-气温季节性变动系数重要环境因子依次单独导入 MaxEnt 模型中构建单因子模型, 以确定最适宜五叶地锦生存的环境条件。由图 5 可知, 雪层杜鹃的适宜等温区间集中在 45~47 之间。气温季节性变动系数是衡量某地区一年中气温随季节周期性波动的重要参数, 由最大熵预测结果可知, 当变动系数在 580~640 之间波动时, 更适合雪层杜鹃的发展。

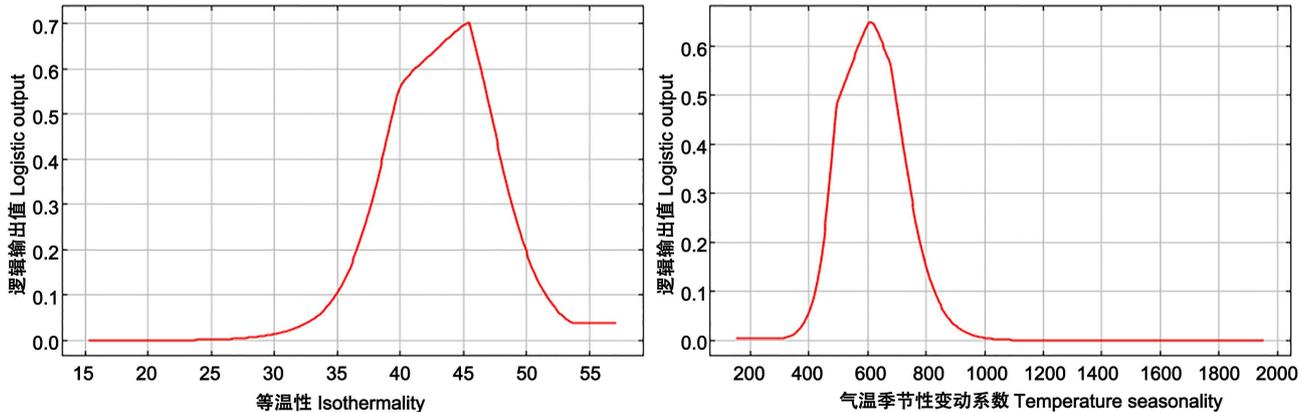
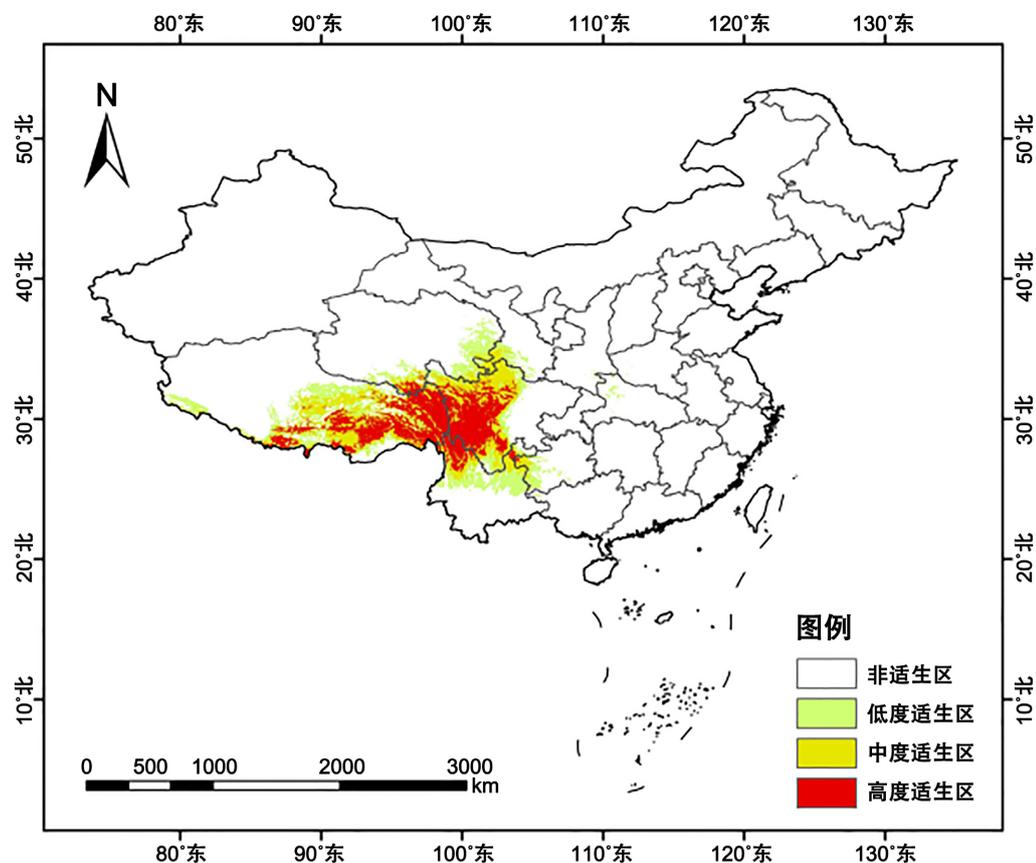


Figure 5. Response curves of main climate factors in the potential distribution model of *Rhododendron nivale* Hook. f.

图 5. 雪层杜鹃分布模型中主要气候因子的响应曲线

3.3. 不同时期、气候情景下雪层杜鹃适生区分布情况

MaxEnt 模拟结果显示(图 6), 雪层杜鹃在当前时期与当前气候情景下, 总适生区面积为 $9.6 \times 10^6 \text{ km}^2$, 高度适生区面积为 $36.37 \times 10^5 \text{ km}^2$, 中度适生区面积约 $34.69 \times 10^5 \text{ km}^2$, 低度适生区为 $37.15 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。从空间分布来看, 高度适生区主要集中在我国西南地区, 以四川盆地为核心, 向周边的云南北部、贵州西北部及甘肃南部延伸, 呈现出明显的聚集性。中度适生区围绕高度适生区向外扩展, 覆盖了四川大部、云南东北部及西藏东部的部分区域。低度适生区则进一步向周边扩散, 涉及贵州中部, 陕西南部等区域。此外, 在西藏东南部、青海东南部等区域也存在零星的适生区分布。



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 6. Current suitable distribution of *Rhododendron nivale* Hook. f.

图 6. 雪层杜鹃当前适生区分布情况

经过 MaxEnt 模型对雪层杜鹃未来 2021~2040 年、2041~2060 年、2061~2080 年、2081~2100 年四个时间段中 ssp126、ssp245、ssp370、ssp585 四种气候情景的适生区分布预测，发现未来各个时期、气候情景下，雪层杜鹃适生区面积整体呈扩张趋势，如表 2 所示。其中，2081~2100 年 ssp245 未来情景下适生区总面积增长最多，增长 $125.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，适生区总面积为 $233.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2021~2040 年 ssp126、2021~2040 年 ssp245 两种未来情景下适生区总面积增长最少，分别增长 $33.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $40.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，适生区总面积分别为 $141.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $148.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，具体如图 7 所示。

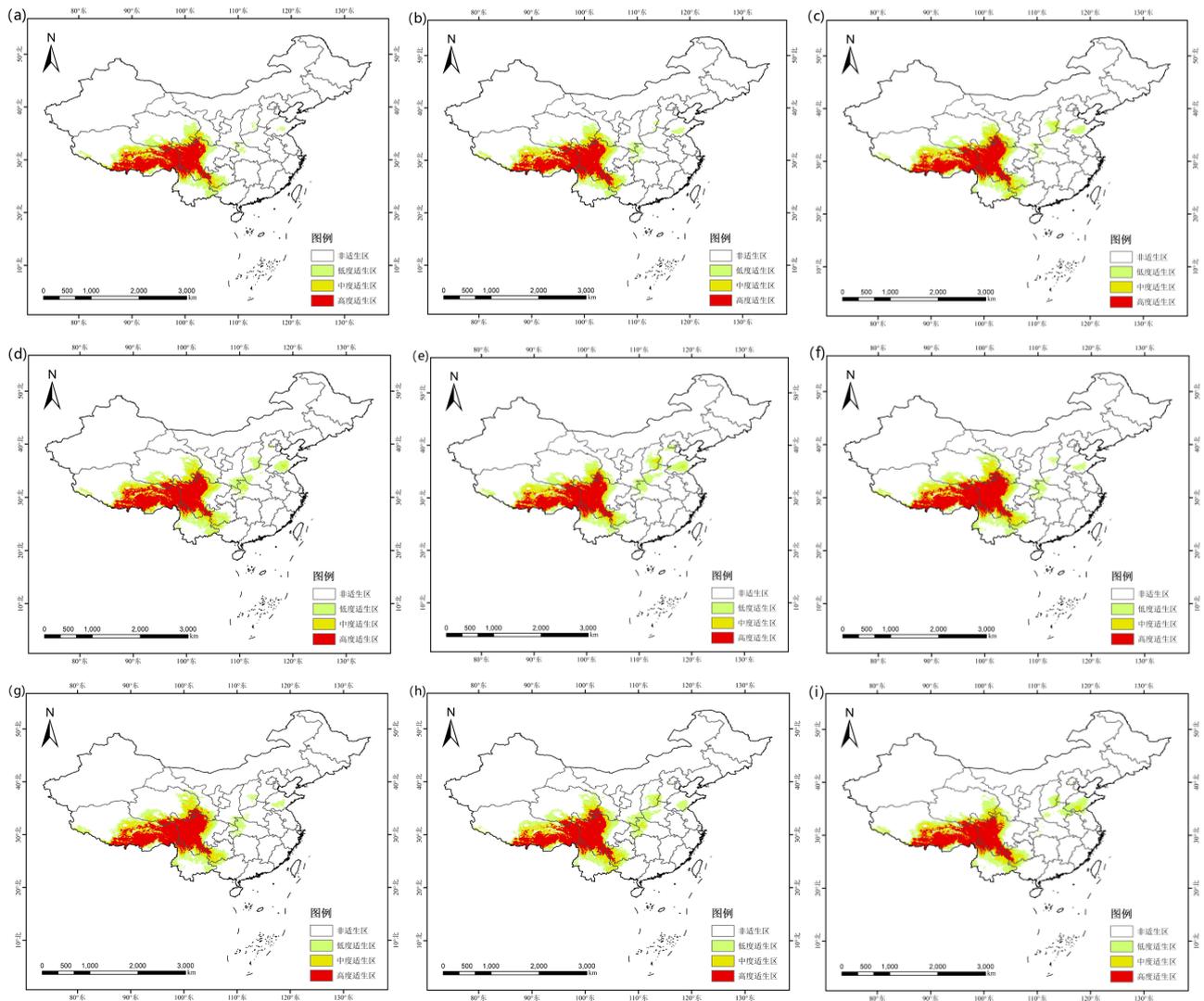
Table 2. Area of suitable habitat for *Rhododendron nivale* Hook. f. under different periods and climate scenarios

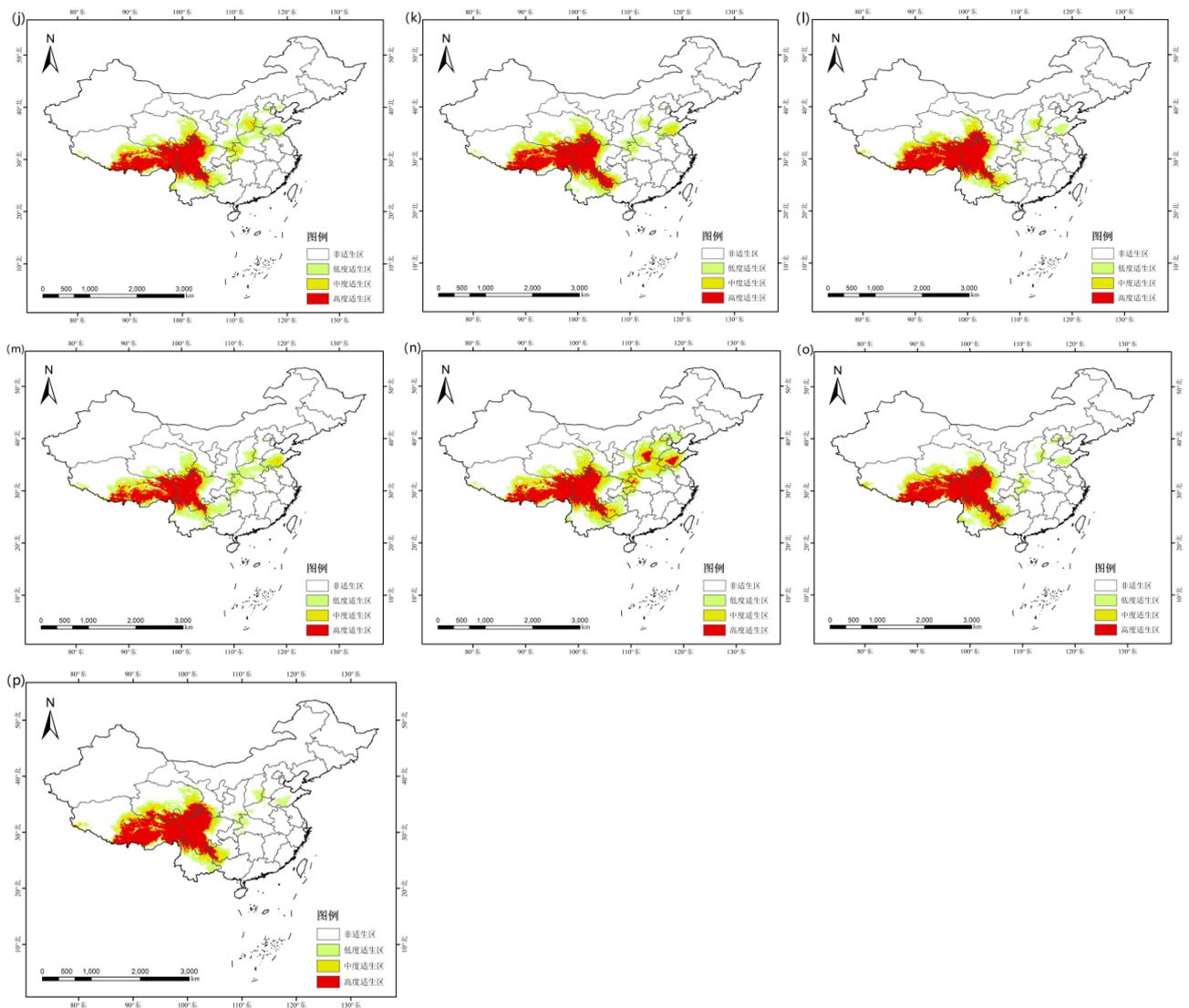
表 2. 不同时期、气候情景下雪层杜鹃适生区分布面积

| 年代 | 气候情景 | 非适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$) | 低度适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$) | 中度适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$) | 高度适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$) |
|-----------|---------|--|---|---|---|
| 当前 | Current | 851.79 | 37.15 | 35.69 | 36.37 |
| 2021~2040 | ssp1.26 | 818.68 | 45.98 | 32.93 | 62.40 |
| | ssp2.45 | 811.37 | 48.29 | 36.01 | 64.33 |
| | ssp3.70 | 801.01 | 55.02 | 39.48 | 64.49 |
| | ssp5.85 | 790.34 | 62.73 | 37.88 | 69.05 |

续表

| | | | | | |
|-----------|---------|--------|-------|-------|-------|
| 2041~2060 | ssp1.26 | 798.12 | 63.94 | 34.73 | 63.20 |
| | ssp2.45 | 789.24 | 66.28 | 37.36 | 67.12 |
| | ssp3.70 | 795.61 | 54.13 | 37.93 | 72.33 |
| | ssp5.85 | 790.22 | 63.56 | 38.59 | 67.63 |
| 2061~2080 | ssp1.26 | 804.27 | 55.73 | 36.62 | 63.38 |
| | ssp2.45 | 763.91 | 77.87 | 43.80 | 74.41 |
| | ssp3.70 | 772.25 | 63.33 | 42.60 | 81.81 |
| | ssp5.85 | 787.57 | 49.57 | 35.88 | 86.99 |
| 2081~2100 | ssp1.26 | 783.93 | 77.27 | 37.28 | 61.52 |
| | ssp2.45 | 726.77 | 83.77 | 72.38 | 77.09 |
| | ssp3.70 | 777.16 | 56.78 | 38.82 | 87.25 |
| | ssp5.85 | 779.05 | 51.29 | 38.11 | 91.56 |





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 7. Projected suitable distribution of *Rhododendron nivale* Hook. f. under future climate scenarios: Panels (a)~(p) depict the projected distributions under four ssp scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, and ssp580) across four time periods—(a)~(d) 2021~2041, (e)~(h) 2041~2060, (i)~(l) 2061~2080, and (m)~(p) 2081~2100

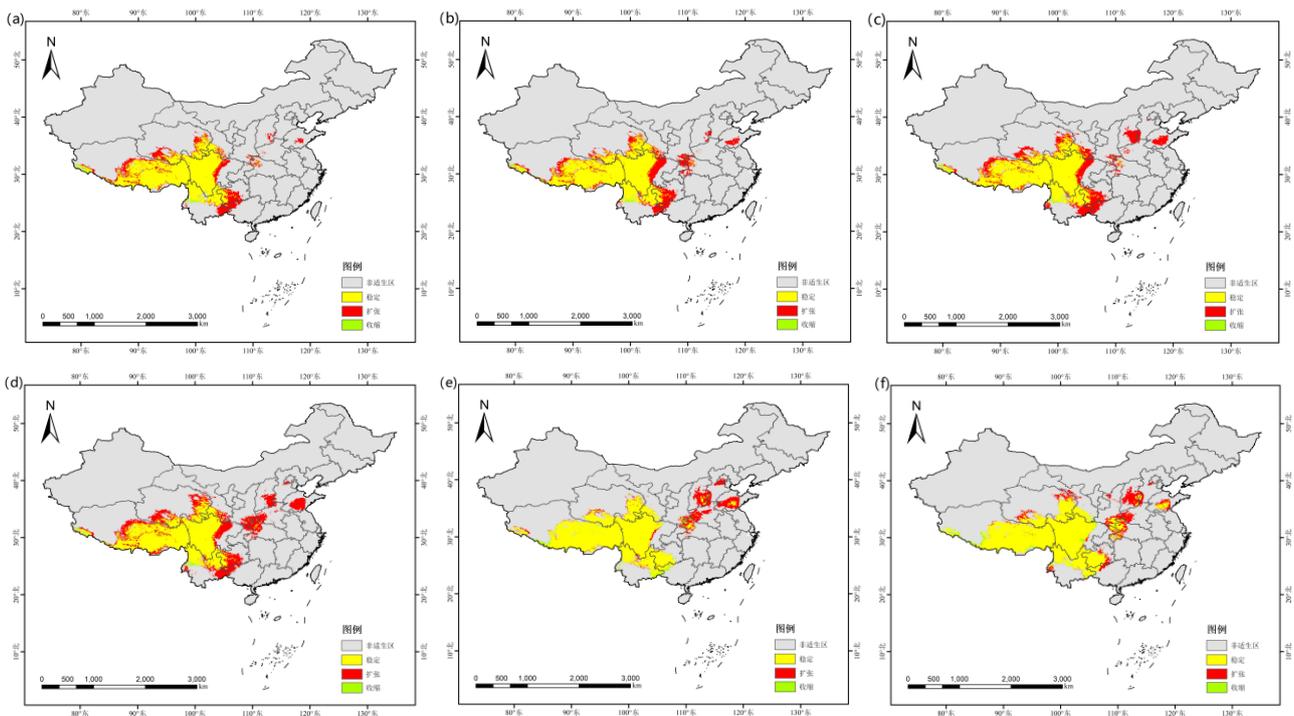
图 7. 未来气候背景下雪层杜鹃适生区分布情况：(a)~(p) 是四个时期 ssp126、ssp245、ssp370、ssp580 四种气候情景下适生区分布图，其中(a)~(d) 对应 2021~2041 年、(e)~(h) 对应 2041~2060 年、(i)~(l) 对应 2061~2080 年、(m)~(p) 对应 2081~2100 年

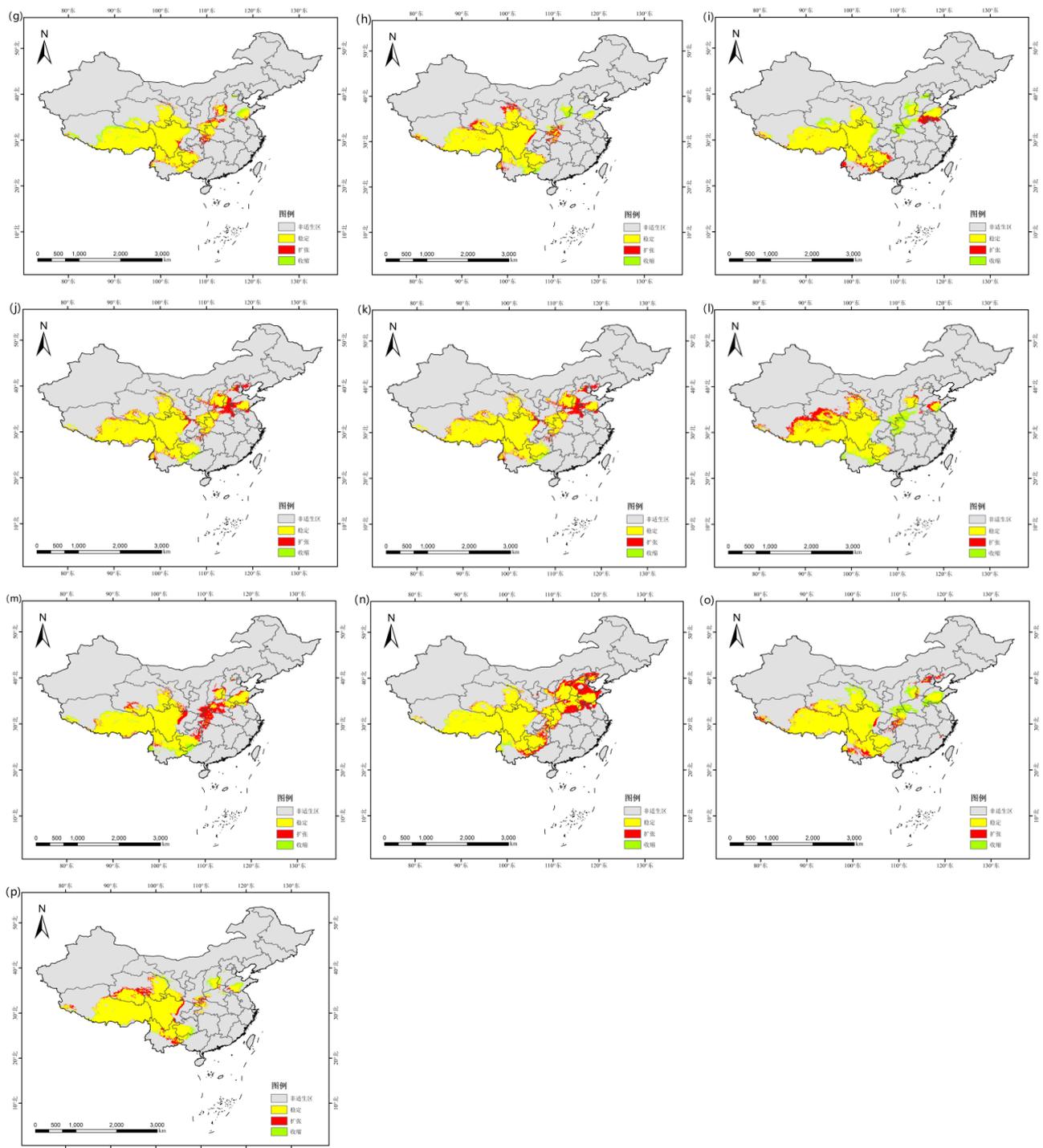
3.4. 雪层杜鹃适生空间格局变化

通过对雪层杜鹃在未来各时期和气候情景下的适生区分布变化分析可得，如表 3 所示，雪层杜鹃在未来四个时期的四种气候情景下，适生空间变化整体呈稳定上升状态。其中，2021~2040 年 ssp585 情况下扩张区面积最大，为 $66.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，2041~2060 年 ssp585 情况下扩张区面积最小，为 $12.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 2061~2080 年 ssp126 和 2081~2100 年 ssp370 情况下收缩区面积最大，分别为 $20.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $21.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，在 2021~2040 年 ssp245、ssp370、ssp585 情况下收缩区面积最小，分别为 $1.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $1.79 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $1.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，具体如图 8 所示。

Table 3. Changes in the area of suitable habitat for *Rhododendron nivale* Hook. f. across different periods and climate scenarios
表 3. 不同时期、气候情景下雪层杜鹃适生区变化面积

| 年代 | 气候情景 | 扩张区面积 (10 ⁴ km ²) | 稳定区面积 (×10 ⁴ km ²) | 收缩区面积 (×10 ⁴ km ²) |
|-----------|--------|---|--|--|
| 2021~2040 | ssp126 | 37.30 | 113.46 | 2.13 |
| | ssp245 | 44.37 | 114.09 | 1.49 |
| | ssp370 | 55.28 | 113.80 | 1.79 |
| | ssp585 | 66.32 | 113.74 | 1.85 |
| 2041~2060 | ssp126 | 25.29 | 146.01 | 4.74 |
| | ssp245 | 27.72 | 153.18 | 5.28 |
| | ssp370 | 16.27 | 158.30 | 10.78 |
| | ssp585 | 12.13 | 168.17 | 11.89 |
| 2061~2080 | ssp126 | 14.95 | 150.73 | 20.57 |
| | ssp245 | 28.92 | 177.63 | 3.27 |
| | ssp370 | 31.08 | 167.39 | 7.18 |
| | ssp585 | 23.13 | 159.13 | 21.17 |
| 2081~2100 | ssp126 | 31.30 | 155.09 | 10.57 |
| | ssp245 | 42.38 | 201.76 | 4.78 |
| | ssp370 | 17.06 | 176.97 | 21.50 |
| | ssp585 | 17.62 | 173.65 | 8.62 |





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. Trends in the suitable distribution of *Rhododendron nivale* Hook. f. under future climate scenarios: Projected Suitable Distribution of *Rhododendron nivale* Hook. f. under Future Climate Scenarios: Panels (a)~(p) depict the projected distributions under four ssp scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, and ssp580) across four time periods—(a)~(d) 2021~2041, (e)~(h) 2041~2060, (i)~(l) 2061~2080, and (m)~(p) 2081~2100

图 8. 未来气候背景下雪层杜鹃适生区变化趋势：(a)~(p) 是四个时期 ssp126、ssp245、ssp370、ssp580 四种气候情景下适生区分布图，其中(a)~(d) 对应 2021~2041 年、(e)~(h) 对应 2041~2060 年、(i)~(l) 对应 2061~2080 年、(m)~(p) 对应 2081~2100 年

4. 结果与讨论

基于最大熵 MaxEnt 模型模拟结果, 本研究中的 AUC 值为 0.956, 这一结果表明 MaxEnt 模型在预测雪层杜鹃适生区方面具有较高的准确性。雪层杜鹃适生区面积为 $9.6 \times 10^6 \text{ km}^2$, 主要集中在我国西南地区, 以四川盆地为核心, 向周边的云南北部、贵州西北部及甘肃南部延伸, 呈现出明显的聚集性。通过模型贡献率与置换重要值分析, 筛选出影响雪层杜鹃分布的核心环境因子, 其中 bio3-等温性和 bio4-气温季节性变动系数是影响雪层杜鹃适宜区分布的主导环境因子。由最大熵预测结果可知雪层杜鹃的适宜等温区间集中在 45~47 之间, 气温季节性变动系数在 580~640 之间波动时, 更适合雪层杜鹃的发展。雪层杜鹃以垫状、矮丛状为主要生长形态, 群落高度 0.3~0.4 m, 为群落建群种, 伴生草本以羊茅、密穗嵩草、圆穗蓼等高寒草甸物种为主, 形成典型的北方雪层杜鹃灌丛群落。核心适生区的雪层杜鹃灌丛受人类干扰较轻, 仅存在轻度放牧、踩踏影响, 而边缘适生区的群落完整性受干扰程度增加。

经过 MaxEnt 模型对雪层杜鹃未来四个时间段中, 四种气候情景的适生区分布预测, 发现未来各个时期、气候情景下, 雪层杜鹃适生区面积整体呈扩张趋势。其中, 2081~2100 年 ssp245 未来情景下适生区总面积增长最多, 增长 $125.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 适生区总面积为 $233.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。雪层杜鹃高海拔适生区的扩张, 本质是其对高海拔极端环境的遗传适应性与气候变暖的协同作用。其中, 2021~2040 年 ssp585 情况下扩张区面积最大, 为 $66.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。先前研究认为, 阐明气候变化背景下物种适生区格局变化, 对评估气候影响及制定保护策略具有重要意义[20]。

综上, 本研究明确了雪层杜鹃的现有适生区范围, 识别了主导其分布的关键环境因子, 并揭示了未来气候变化背景下其适生区的变化趋势, 可为该物种的资源开发利用与生态调控管理提供科学支撑。雪层杜鹃适生区的格局变化, 反映了喜马拉雅高海拔生态系统对气候变暖的响应, 其作为高海拔灌丛生态系统的优势种, 适生区的扩张与收缩将对局部生态系统的结构和功能产生重要影响。

参考文献

- [1] 刘秀群, 周浩洋, 袁一波, 等. 西藏杜鹃花属植物资源及其应用前景分析[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(6): 89-94.
- [2] 嘎务多杰. 藏药晶镜本草[M]. 北京: 民族出版社, 2018: 132.
- [3] 宇妥·元丹贡布. 四部医典[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1982.
- [4] Merow, C. and Silander, J.A. (2014) A Comparison of Maxlike and Maxent for Modelling Species Distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 215-225. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12152>
- [5] 孙成忠, 郝振国, 朱寿东, 等. 地理信息技术在中药资源生产区划研究中的应用[J]. 测绘通报, 2016(12): 96-99, 123.
- [6] Ali, S., Makanda, T.A., Umair, M., et al. (2023) MaxEnt Model Strategies to Studying Current and Future Potential Land Suitability Dynamics of Wheat, Soybean and Rice Cultivation under Climatic Change Scenarios in East Asia. *PLOS ONE*, 18, e0296182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296182>
- [7] Yousaf, A., Hadi, R., Khan, N., et al. (2022) Identification of Suitable Habitat for *Taxus wallichiana* and *Abies pindrow* in Moist Temperate Forest Using Maxent Modelling Technique. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, Article ID: 103459. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103459>
- [8] Velu, R.M., Kwenda, G., Bosomprah, S., et al. (2023) Ecological Niche Modeling of Aedes and Culex Mosquitoes: A Risk Map for Chikungunya and West Nileviruses in Zambia. *Viruses*, 15, 1900. <https://doi.org/10.3390/v15091900>
- [9] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [10] 孙雅姝, 项星月, 李沈思睿, 等. 气候变化对黑腹尼虎天牛在我国适生区的影响[J]. 环境昆虫学报, 2025, 47(4): 1072-1081.
- [11] 施雯, 朱恩骄, 王宇宸, 等. 基于 MaxEnt 模型预测戴褐臂金龟在中国的潜在适生区[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2936-2944.
- [12] 王雨生, 王召海, 邢汉发, 等. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1230-1237.

-
- [13] 秦明东, 张文文, 孙冰洁, 等. 基于 MaxEnt 模型预测中华秋沙鸭在中国东北地区的潜在分布区[J]. 野生动物学报, 2024, 45(4): 789-799.
- [14] 罗才红, 汪皖渝, 黄金夏, 等. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化对黑颈鹤栖息地分布的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36(4): 1251-1260.
- [15] 刘静远, 杨宇超, 于子祥, 等. 基于优化的 MaxEnt 模型预测朱顶红花叶病毒的潜在地理分布[J]. 植物保护, 2025, 51(1): 95-101.
- [16] 张文瑶, 陈雪荣, 谢洪芳, 等. 基于 MaxEnt 模型预测瓜类细菌性果斑病在中国的潜在地理分布[J]. 植物保护, 2025, 51(1): 102-110, 122.
- [17] 李晓霞, 胡宽义, 曾安逸, 董定超. 基于 MaxEnt 生态位模型的小花十万错在中国的潜在分布[J]. 西南农业学报, 2024, 37(4): 860-868.
- [18] 廖剑锋, 易自力, 李世成, 肖亮. 基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8297-8305.
- [19] 方虎强, 章鹏飞, 何兵, 等. 基于 MaxEnt 模型与 ArcGIS 的线叶薊生态适宜性区划研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2023, 30(7): 1-4.
- [20] 徐进博, 毛业帅, 王芳. 基于 MaxEnt 模型的蓝玉簪龙胆潜在适生区预测及其影响因子研究[J]. 高原农业, 2025, 9(3): 371-381.