

气候变化背景下五叶地锦在中国的潜在适生区预测

胡炳浩

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2025年8月12日; 录用日期: 2025年9月17日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia*)是多年生藤本植物, 常用于城市绿化、降尘以及医药领域, 为探究气候变化对五叶地锦适生区的影响, 本研究基于519条分布点位数据和19个生物气候因子, 利用MaxEnt模型与ArcGIS技术预测了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 = 0.928), 年均降水量、最暖季降水量、最冷月最低温是主导因子, 其适宜阈值分别为753.19~1891.42 mm、435.42~721.89 mm和-4.90°C~5.66°C; 当前气候条件下, 适生区面积为 $215.15 \times 10^4 \text{ km}^2$, 集中分布于中南部省份; 未来适生区呈扩张趋势, 尤以高排放情景显著: 2081~2100年SSP370情景面积达 $413.67 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前增长92.27%, 扩张区向华北北部、西北东部及东北迁移; 研究揭示五叶地锦对湿润气候的依赖性及其气候变暖下的适应性扩张潜力, 为潜在引种区域的生态风险评估提供了科学参考。

关键词

五叶地锦, 气候变化, MaxEnt模型

Projecting the Potential Suitable Habitat of *Parthenocissus quinquefolia* in China under Climate Change

Binghao Hu

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

Received: Aug. 12th, 2025; accepted: Sep. 17th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

Parthenocissus quinquefolia is a perennial vine widely used in urban greening, dust reduction, and

文章引用: 胡炳浩. 气候变化背景下五叶地锦在中国的潜在适生区预测[J]. 植物学研究, 2025, 14(5): 333-346.

DOI: 10.12677/br.2025.145038

the pharmaceutical industry. To explore the impact of climate change on its suitable habitats, this study predicted the distribution of its potential suitable habitats in China under current and future climate conditions using the MaxEnt model and ArcGIS technology, based on 519 distribution records and 19 bioclimatic variables. Future predictions covered four periods under four shared socioeconomic pathways (SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585). The results showed that the MaxEnt model had high prediction reliability (AUC = 0.928). Annual precipitation, precipitation of the warmest quarter, and minimum temperature of the coldest month were identified as the dominant factors, with optimal thresholds of 753.19~1891.42 mm, 435.42~721.89 mm, and -4.90°C ~ 5.66°C , respectively. Under current climate conditions, the area of suitable habitats was $215.15 \times 10^4 \text{ km}^2$, concentrated in provinces in central and southern China. Future suitable habitats are projected to show an expanding trend, particularly under high-emission scenarios. By the 2081~2100 period, the suitable habitat area under the SSP370 scenario will reach $413.67 \times 10^4 \text{ km}^2$, an increase of 92.27% compared to the current period. The expansion areas will migrate toward northern North China, eastern Northwest China, and Northeast China. This study reveals the dependence of *Parthenocissus quinquefolia* on humid climates and its potential for adaptive expansion under global warming. Research reveals *Parthenocissus quinquefolia*'s dependence on humid climates and its potential for adaptive expansion under global warming, offering a scientific reference for assessing ecological risks in prospective introduction areas.

Keywords

Parthenocissus quinquefolia, Climate Change, MaxEnt Model

Copyright © 2025 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

生态位模型是一种以现有物种分布、丰富度以及多种环境因子数据为基础的数学模型[1][2],可以在拟定的多维生态空间中根据分布点数据信息,预测物种的生态位需求、适生环境指数的范围,是对植物种群分布、适生范围以及演替趋势进行分析预测的常用工具[3]-[5]。在现今已有的诸多生态位模型中,MaxEnt 最大熵模型因预测精度高、稳定性强、耗费时间短等优点[6]-[9],因此在动植物适生区预测、分析领域具有一定的代表性,并得到了广泛的应用[5]。例如,陈艺晖等人基于 MaxEnt 模型预测了骨碎补在当前及未来四种气候情景下的中国潜在适生区,明确了最干月降水量、最冷月最低温和最湿月降水量是其分布的主导气候因子[10];Wu 等人利用 MaxEnt 模型,结合实地采样数据,首次构建了云南三七“适生区-品质”双维度评估体系,实现了对全省潜在适生区与皂苷品质分区的精准预测[11];Duan 等人通过 MaxEnt 模型预测了沙棘属植物在全球当前及未来气候情景下的潜在适生区,发现其分布将整体向高纬或高海拔迁移,面积略有增加,温度、降水和紫外线为主要限制因子[12]。

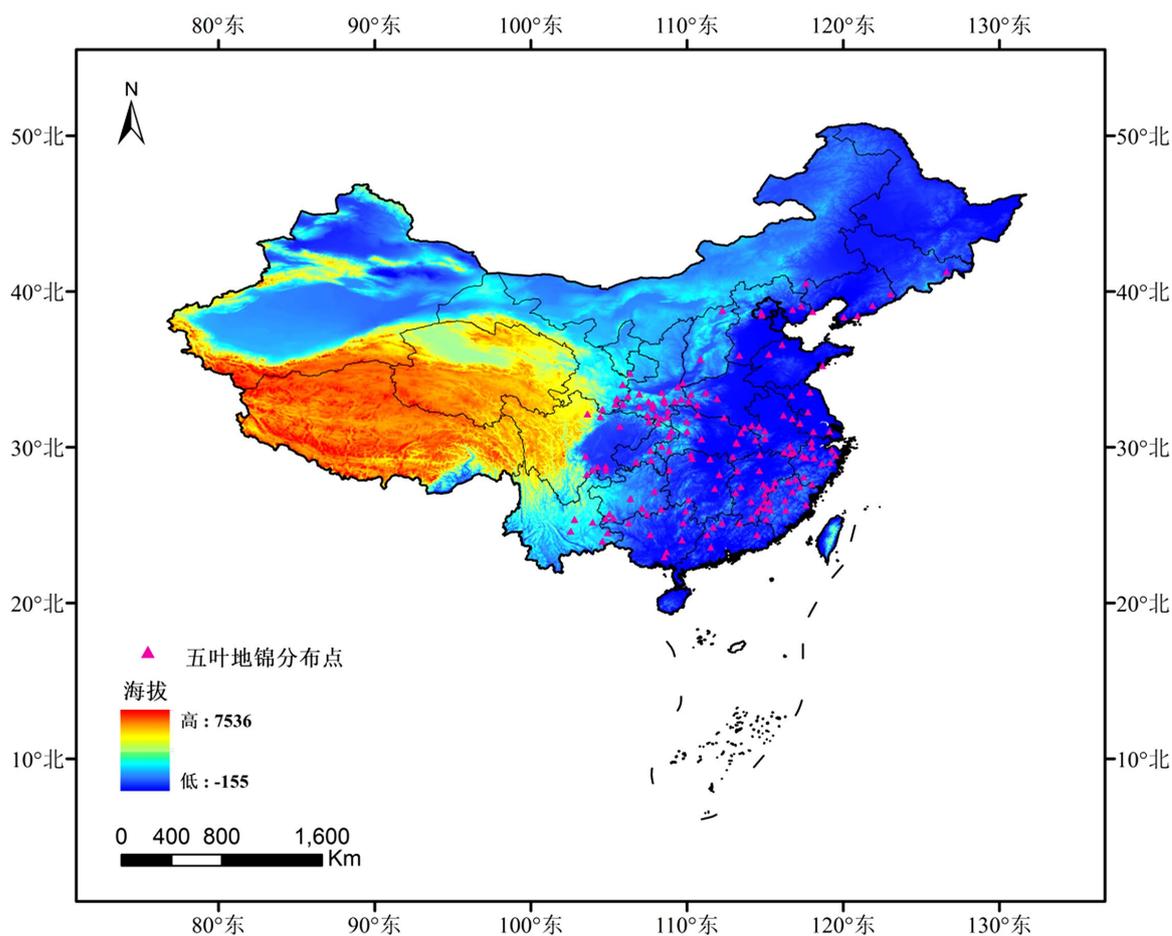
五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia*)是葡萄科地锦属多年生落叶木质藤本植物,原产北美,现广泛引种于我国华北、东北及中南部地区,常生长于建筑墙面、山坡、篱垣等处,是北方城市垂直绿化的核心物种之一[13]。其凭借强大的攀援能力、快速生长特性及显著的生态功能,在园林绿化、护坡固土、滞尘净化空气等方面发挥重要作用,能有效吸附大气颗粒物及重金属,降低建筑能耗,改善城市生态环境[14]-[16];此外,五叶地锦的根茎、果实可入药,具活血散瘀、通经解毒之效,富含没食子酸、白藜芦醇等活性成分,具有抗肿瘤、抗氧化等药理潜力[17][18]。然而,五叶地锦抗寒性较弱,半致死温度仅 -2.64°C ,

随着全球气候变化加剧,降水格局改变、极端温度事件增多可能影响其适生范围[19];同时,城市扩张中人为引种的盲目性也可能导致其生态功能发挥受限。目前,学界对五叶地锦的研究多集中在化学成分、生理抗性 & 绿化应用等方面,针对气候变化背景下其潜在适生区动态的研究较为匮乏,难以支撑其在生态修复、城市绿化中的科学应用[13]。因此,探究气候变化下五叶地锦适生区分布及空间格局变化具有重要意义。通过预测其当前及未来潜在分布,不仅能揭示其地理分布规律,还可为合理引种规划、生态功能优化及应对气候变化的绿化策略制定提供科学依据,对充分发挥其生态与景观价值具有实践指导作用。

2. 材料与amp;方法

2.1. 数据来源

五叶地锦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(<http://www.cvh.ac.cn>)、中国国家标本资源共享系统(<http://www.nsii.org.cn>)、教育与科研标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn>)等,共获取五叶地锦分布数据坐标 519 个,且各个数据位点在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 均无重复,以确保后续五叶地锦分布情况模拟结果的准确性和真实性。如图 1 所示,五叶地锦主要分布于我国东部、南部以及中原地区。



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 *Parthenocissus quinquefolia*

图 1. 五叶地锦的地理分布情况

2.2. 环境因子数据来源与处理

本研究中的环境因子数据全部由世界气候数据平台 World Clim (<https://www.worldclim.org>)中下载, 选取的分辨率为 2.5' (即 5 km × 5 km), 版本为 2.1 的 19 个生物气候因子当前数据, 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、2061~2080 年和 2081~2100 年的未来生物气候因子数据[20], 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) [21]。通过 ArcGIS10.8 统一坐标系为 GCS-1984 投影坐标系, 并通过掩膜提取研究区域并转化为 ASC 格式备用。此外, 为确定对五叶地锦分布造成主要影响的生物气候因子, 以避免相关性过高使模型拟合过渡。本研究采用两种方法对当前气候数据进行处理。(1) 将数据导入 MaxEnt V3.4.4 模型进行 10 次重复预测, 得到环境因子对适生区的预测贡献率、置换重要值(表 1); (2) 将 10 次重复预测的到的 19 个环境因子的贡献值导入 Origin 中, 利用软件中 Correlation Plot 功能, 通过 Pearson 相关系数法进行分析, 得到各因子间的相关系数(图 2)。经过贡献率、置换重要值和因子间相关性比对分析, 筛选出 9 个重要环境因子进行下一步工作。

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/%
bio12	年均降水量 Annual precipitation (mm)	38.9	23.7
bio6	最冷月份最低温度 Minimum temperature of coldest month (°C)	24.6	14.1
bio2	平均气温日较差 Mean diurnal temperature range (°C)	7.8	4.2
bio4	气温季节性变动系数 Temperature seasonality	5	5.3
bio5	最热月份最高温度 Maximum temperature of warmest month (°C)	3.8	5.1
bio3	等温性 Isothermality	3.5	0.2
bio14	最干月份降水量 Precipitation of driest month (mm)	2.6	5.2
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter (°C)	2	1.4
bio1	年平均温度 Annual mean temperature (°C)	1.9	0
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter (°C)	1.8	0.2
bio7	年温差范围 Temperature annual range (°C)	1.4	0.1
bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter (mm)	1.3	18.7
bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality (mm)	1.2	2.4
bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter (mm)	1.1	3
bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter (°C)	1	0.5
bio13	最湿月份降水量 Precipitation of wettest month (mm)	1	9.6
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter (°C)	0.8	3.9
bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter (mm)	0.4	2.4
bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter (mm)	0.1	0

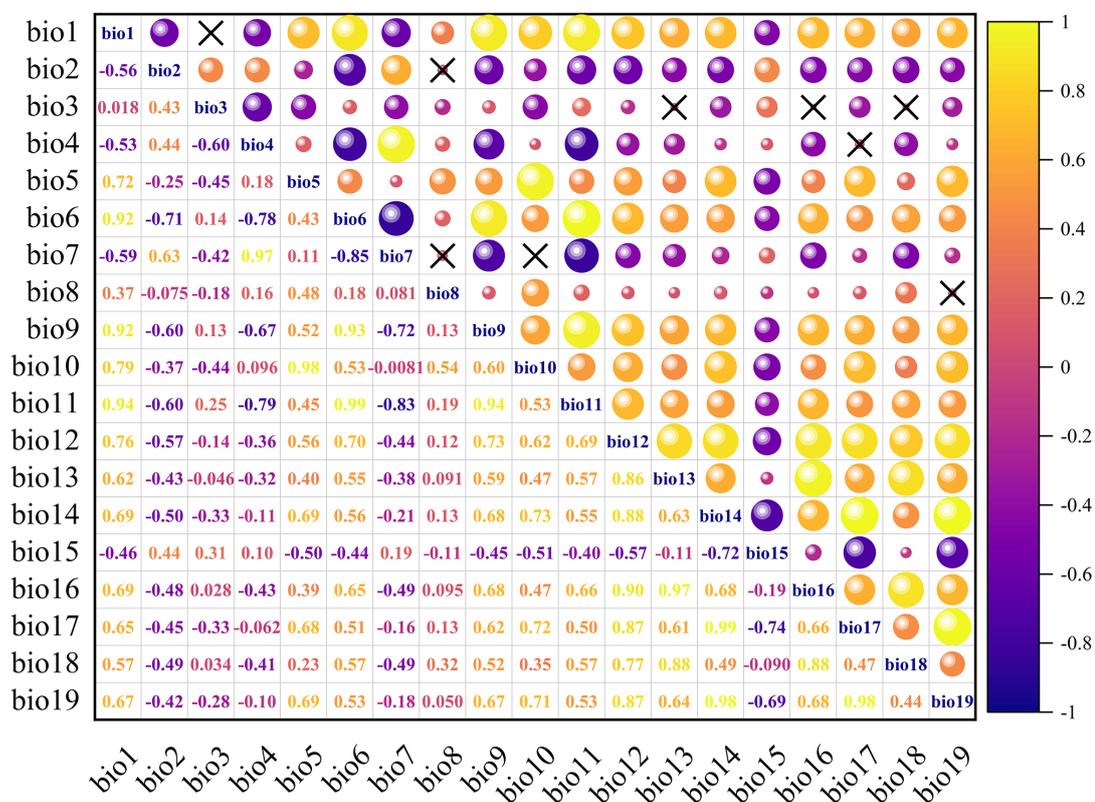


Figure 2. Correlation analysis of bioclimatic variables
图 2. 生物气候因子间相关性分析

2.3. MaxEnt 参数调试与模拟

将五叶地锦的地理分布数据与剪切、转换、筛选好的气候因子数据导入 MaxEnt V3.4.4 中, 选取刀切法并构建响应曲线, 设置文件输出格式为 Logistic、文件类型为 asc, 分别导入未来四种情境下四个时期的气候因子。设定运行参数中 25% 为测试数据、75% 为训练数据, 选择 Randon seed 选项, 令每个时期、情境对应构建的模型均运行十次, 并取平均结果进行分析。

2.4. ArcGIS 分析

利用 ArcGIS 软件工具中的重分类功能, 将 MaxEnt 模型预测的各时期、情景结果按照 Value 值自然断点法重新划分为四个类型, 分别为非适生区、低适生区、中适生区以及高适生区, 同时计算各适生区面积分布情况。将 MaxEnt 预测得到的各时期、情景结果导入 ArcGIS 中, 利用工具 Quick Reclassify Binary 处理为 2 进制, 阈值设置为 0.1, 而后通过分布变化工具将 2 进制、asc 格式的预测结果导入处理, 从而生成各时期不同条件下五叶地锦的分布格局。

3. 结果分析

3.1. 模型精度检验

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, 面积值越接近于 1 说明预测结果越精准, 当 AUC 值小于 0.5 时, 说明预测结果失败[22]。本研究中的 AUC 值为 0.928 (图 3), 且重复运行后具有一定的稳定性, 故说明五叶地锦潜在适生区预测结果可靠。

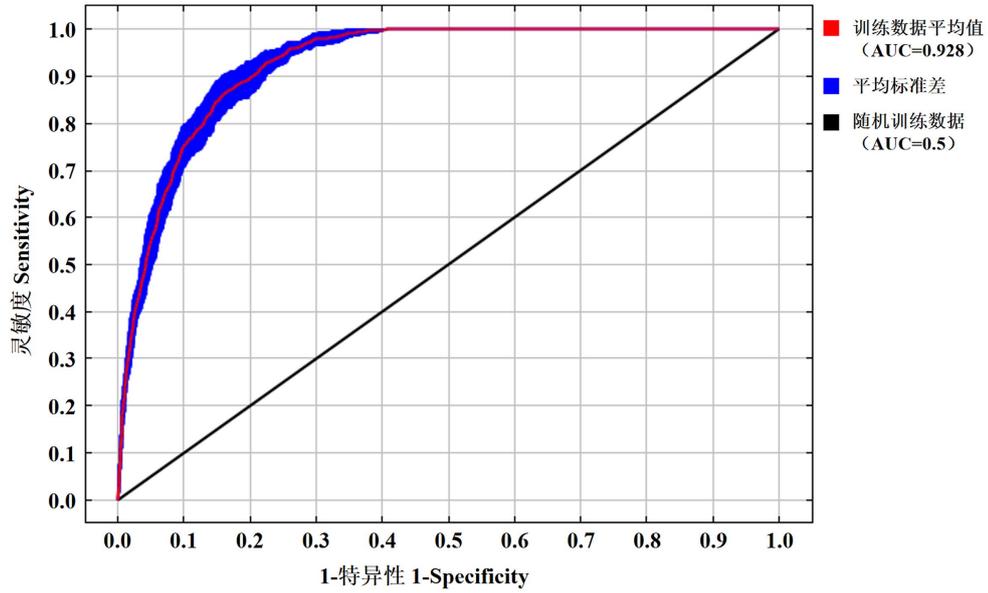


Figure 3. ROC curve validation of predicted data for *Parthenocissus quinquefolia*
图 3. 五叶地锦预测数据结果的 ROC 曲线验证

3.2. 重要气候因子分析

各环境因子的贡献率和重要值是衡量环境因子的关键指标，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(图 4)可知，对于影响五叶地锦未来适生区分布的诸多环境因子中，bio12-年均降水量、bio18-最暖季度降水量、bio6-最冷月份最低温、bio13-最湿月份降水量、bio4-气温季节性变动系数、bio14-最干月份降水量最为重要，累计贡献率与累计置换重要率分别为 73.4%和 76.6%，其中(bio12)年均降水量的贡献率为 38.9%、置换重要值为 23.7%，由此可知年均降水量是对五叶地锦的适生区影响最为关键的环境变量。

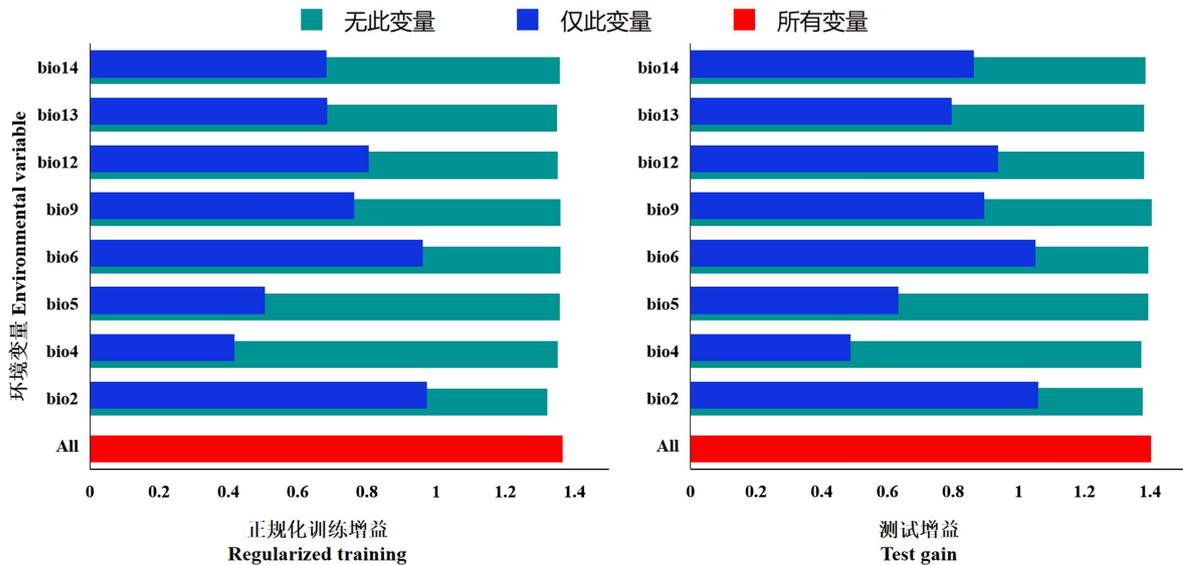


Figure 4. Jackknife test of key environmental factors influencing the distribution of *Parthenocissus quinquefolia*
图 4. 影响五叶地锦分布重要环境因子的刀切法检验

将 bio12-年均降水量、bio18-最暖季度降水量、bio6-最冷月份最低温、bio13-最湿月份降水量、bio4-气温季节性变动系数、bio14-最干月份降水量六个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，对于降水方面，当年均降水量介于 753.19 mm~1891.42 mm、最暖季降水量在 435.42 mm~721.89 mm 之间、最湿月份降水量介于 174.40 mm~424.16 mm、最干月份降水量大于 10.92 mm 时，最适宜五叶地锦生存。同时五叶地锦在最冷月份中温度不高于 -4.90℃ 不高于 5.66℃ 的地区更容易存活。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 MaxEnt 预测结果可知，当变动系数在 647.19~910.66 之间波动时，更适合五叶地锦发展。

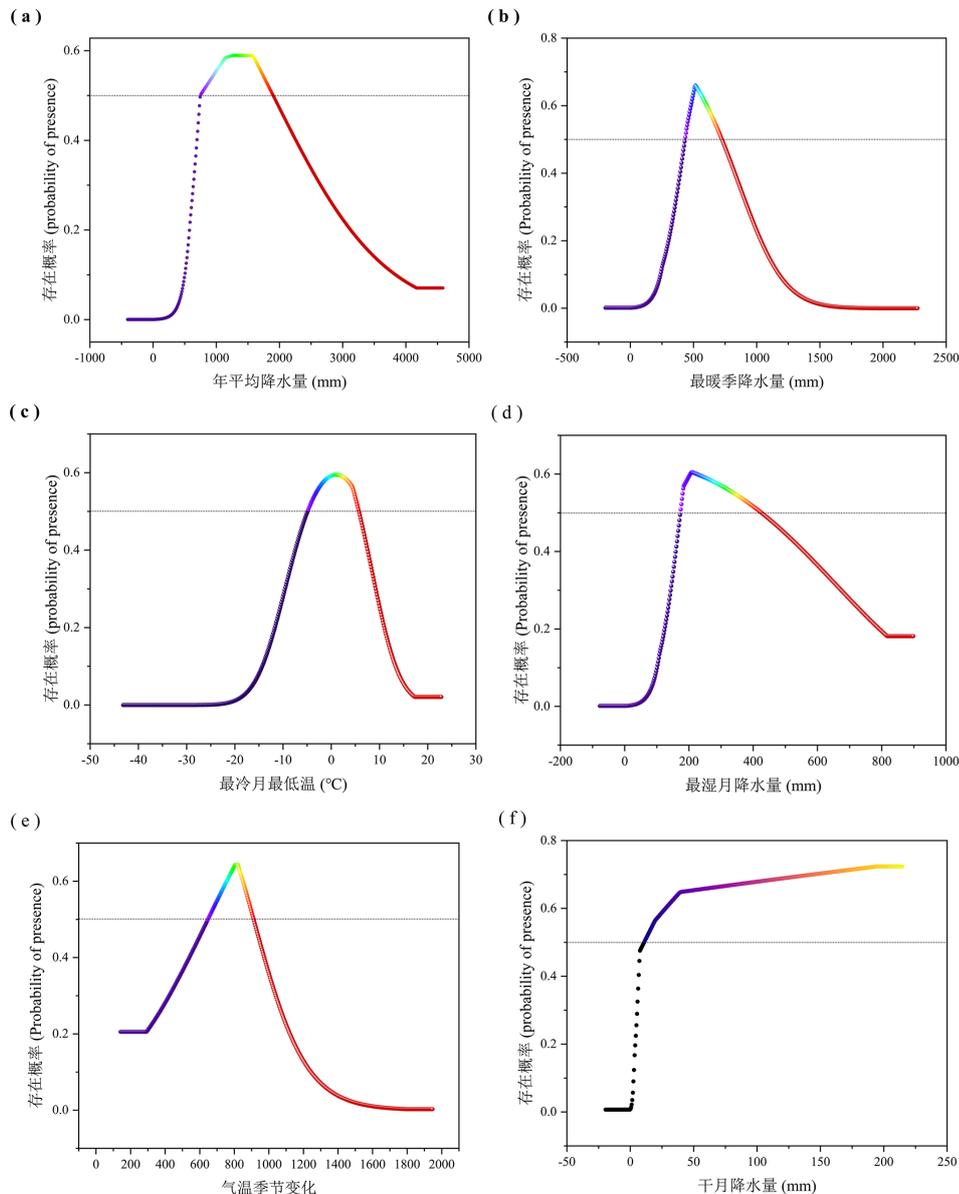
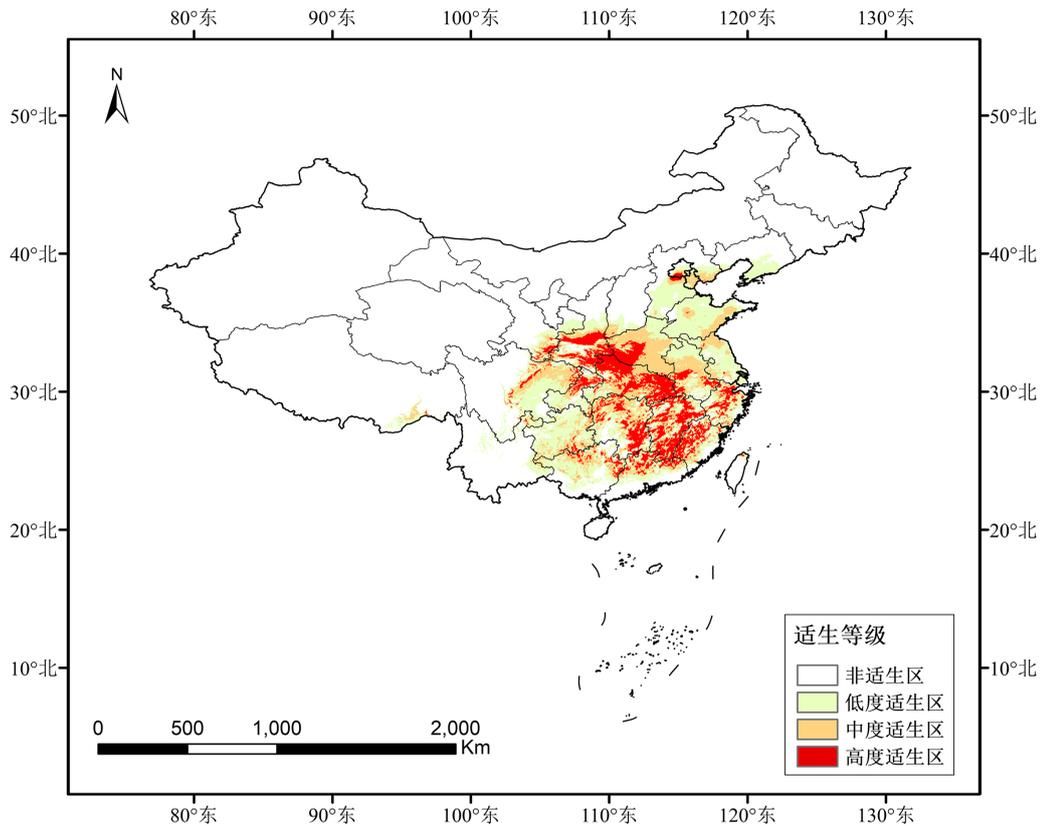


Figure 5. Response curves of key climatic variables: Panels (a)–(f) correspond to the response curves for annual mean precipitation, warmest-quarter precipitation, minimum temperature of the coldest month, precipitation of the wettest month, temperature seasonality coefficient, and precipitation of the driest month, respectively

图 5. 重要气候因子响应曲线：(a)~(f) 分别对应年均降水量、最暖季降水量、最冷月最低温、最湿月降水量、气温季节变化系数、最干月降水量六个气候因子的响应曲线图

3.3. 不同时期、气候情景下五叶地锦适生区分布情况

对 MaxEnt 模拟结果重分类显示(图 6), 五叶地锦在当前时期与当前气候情景下, 总适生区面积为 $215.15 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占我国总面积 22.4%, 高度适生区面积为 $44.45 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中度适生区面积约 $67.06 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低度适生区为 $103.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中, 适生区主要分布在我国中南部的陕西省、河北省、山东省、河南省、湖北省、湖南省、江西省、安徽省、福建省、广东省、浙江省以及重庆市。此外四川省、西藏自治区、北京与河北交界处、辽宁省南部、山西省南部也有少量五叶地锦适生区分布。



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 *Parthenocissus quinquefolia*

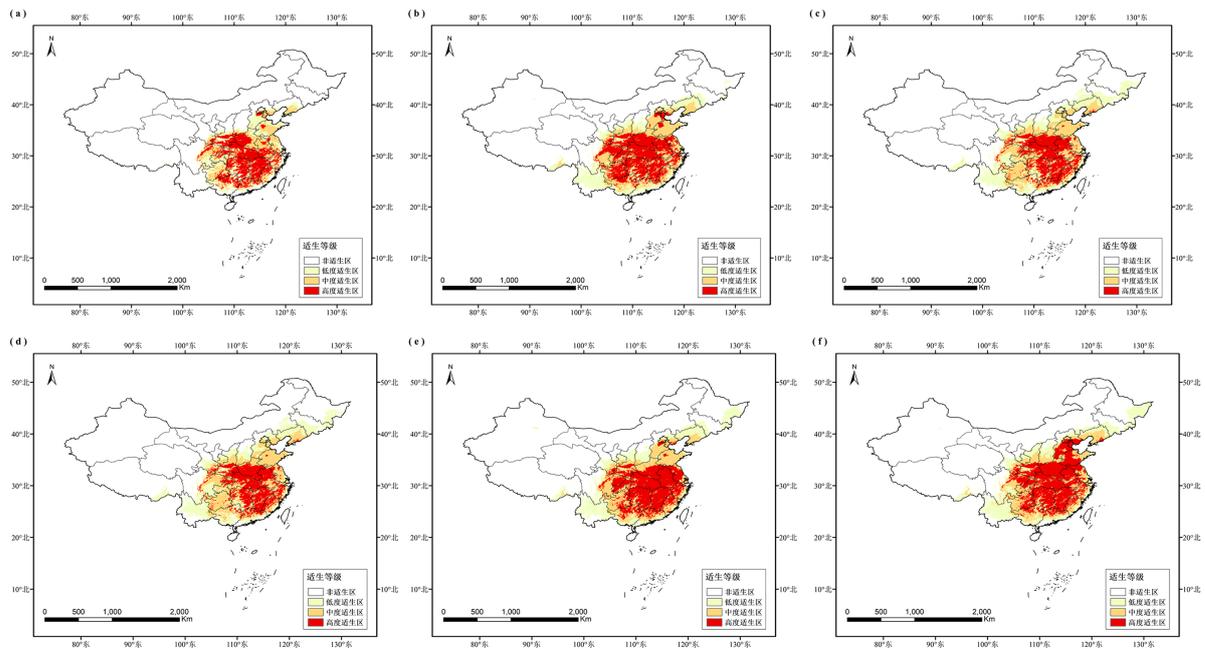
图 6. 五叶地锦当前适生区分布情况

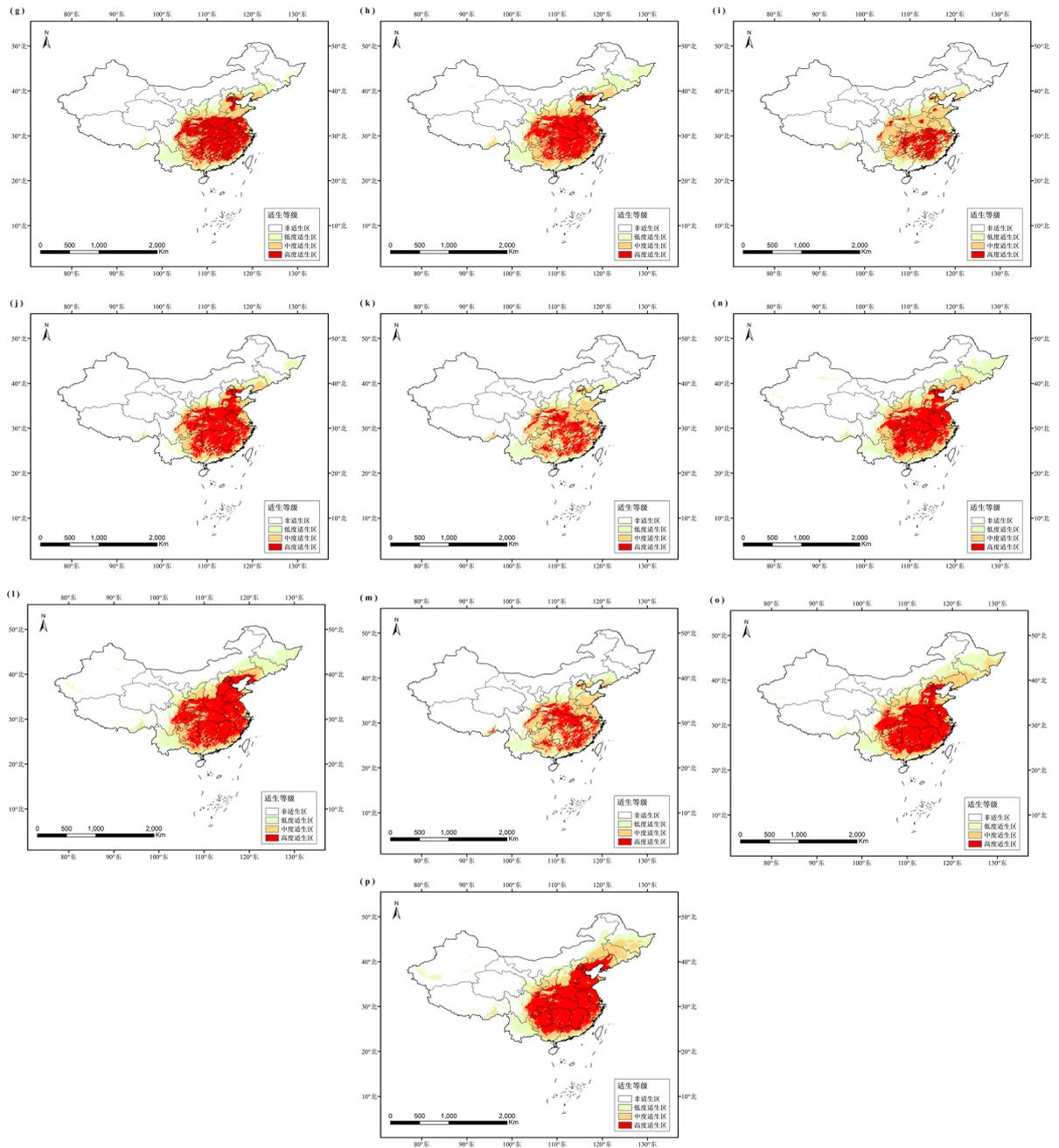
经过 MaxEnt 模型对五叶地锦未来 2021~2040 年、2041~2060 年、2061~2080 年、2081~2100 年四个时间段中 ssp126、ssp245、ssp370、ssp585 四种气候情景的适生区分布预测, 发现未来各个时期、气候情景下, 五叶地锦的适生区面积整体呈扩张趋势, 如表 2 所示。其中, 2081~2100 年 ssp370、2061~2080 年 ssp585、2081~2100 年 ssp245 三种未来情景下适生区总面积增长最多, 分别增长 $198.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $187.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $163.10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 适生区总面积分别为 $413.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $402.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $379.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $\times 10^4 \text{ km}^2$, 适生区面积增长率分别为 92.27%、86.93%、76.27%; 2061~2080 年 ssp126、2061~2080 年 ssp370、2081~2100 年 ssp126 三种未来情景下适生区总面积增长最少, 分别增长 $44.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $72.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $75.25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 适生区总面积分别为 $211.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $228.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $259.98 \times 10^4 \text{ km}^2$, 适生区面积增长率分别为 20.84%、33.82%、34.97%。此外, 仅有 2021~2040 年 ssp126 气候情景下五叶

地锦适生区面积呈现下降趋势，相较于当前适生区面积减少 $1.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，面积为 $211.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，下降率为 3.78%，具体如图 7 所示。

Table 2. Area of suitable habitat for *Parthenocissus quinquefolia* under different periods and climate scenarios
表 2. 不同时期、气候情景下五叶地锦适生区分布面积

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	744.85	103.65	67.06	44.45
2021~2040	ssp1.26	748.62	99.10	68.42	43.86
	ssp2.45	646.01	93.49	101.07	119.43
	ssp3.70	658.81	87.17	102.65	111.37
	ssp5.85	632.06	121.51	120.10	86.33
2041~2060	ssp1.26	631.10	101.93	104.82	122.15
	ssp2.45	618.49	105.75	99.56	136.20
	ssp3.70	632.20	93.17	92.35	142.28
	ssp5.85	595.42	119.29	107.78	137.51
2061~2080	ssp1.26	700.02	70.64	128.67	60.68
	ssp2.45	662.81	69.40	84.58	143.20
	ssp3.70	672.07	100.51	117.05	70.36
	ssp5.85	557.81	131.17	85.47	185.55
2081~2100	ssp1.26	669.60	94.10	116.12	80.18
	ssp2.45	580.74	125.70	109.81	143.74
	ssp3.70	546.33	127.15	111.71	174.81
	ssp5.85	595.42	119.29	107.78	137.51





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 *Parthenocissus quinquefolia* 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. 未来气候背景下五叶地锦适生区分布情况：(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

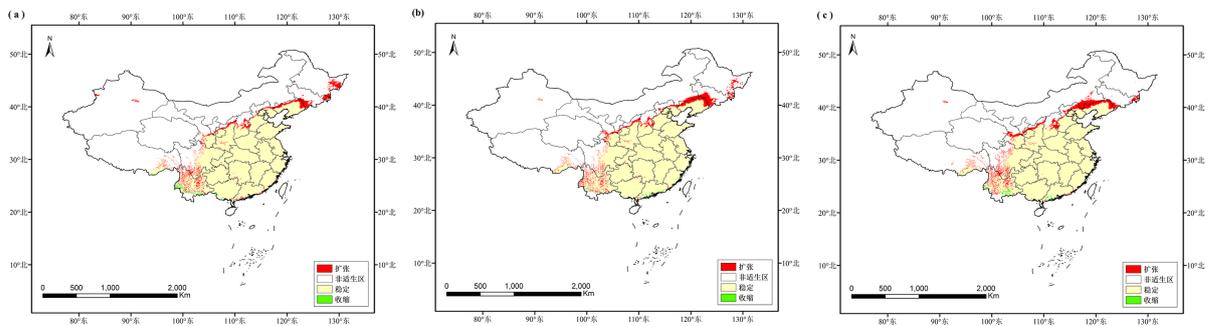
3.4. 五叶地锦适生空间格局变化

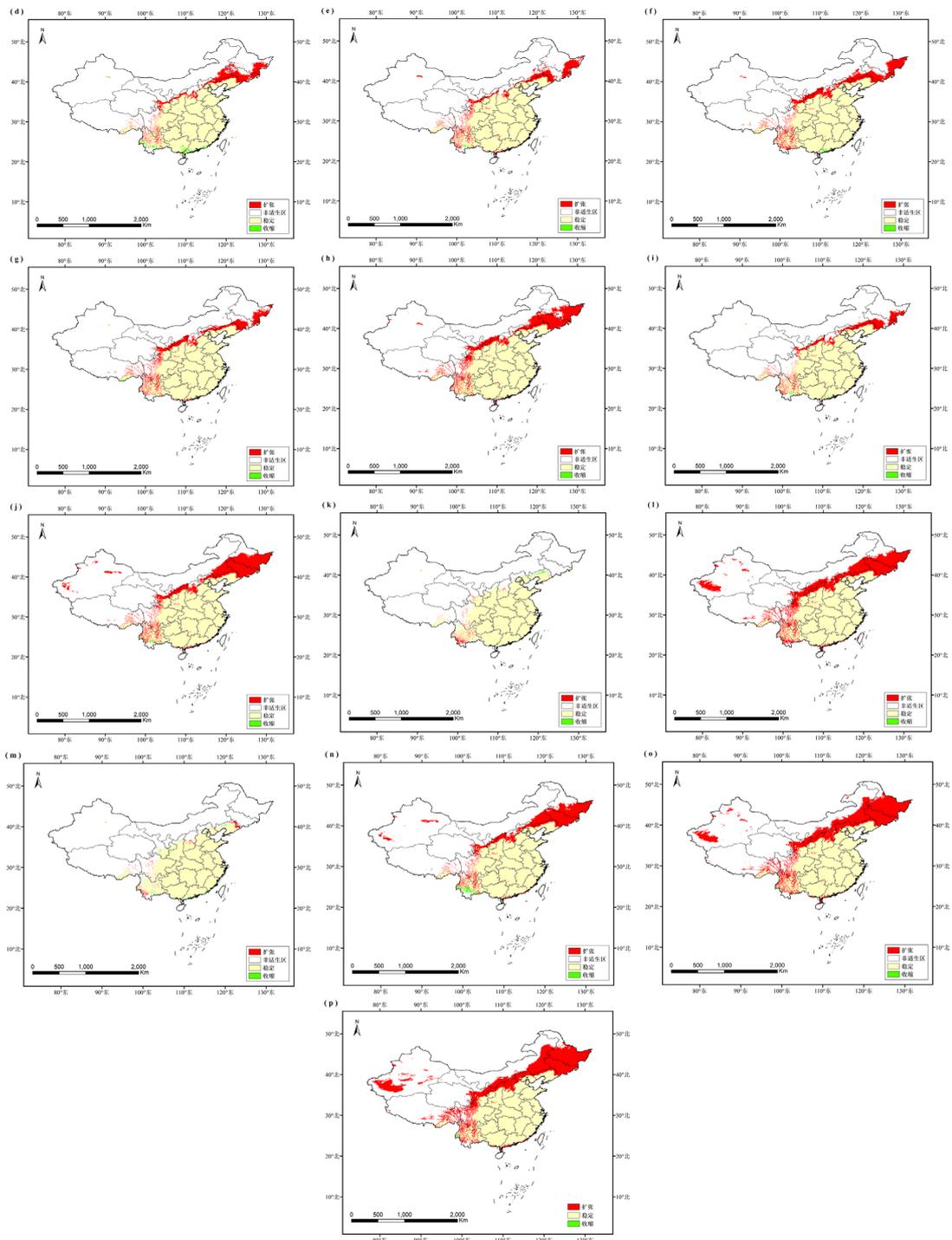
在对五叶地锦未来各时期、气候情景的适生区分布情况进行分析后，进一步探究其适生区分布变化。

如表 3 所示, 五叶地锦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状态。其中, 2081~2100 年 ssp585、2081~2100 年 ssp370、2061~2080 年 ssp585 三种情况下扩张区面积最大, 分别为 $180.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $168.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $143.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, 而 2081~2100 年 ssp126、2061~2080 年 ssp370、2021~2040 年 ssp126 三种情况下, 扩张区面积最小, 分别为 $5.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $5.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $27.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。而在 2021~2040 年 ssp585、2081~2100 年 ssp245 以及 20281~2100 年 ssp126 三种情况下, 五叶地锦适生区收缩面积最大, 分别为 $5.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $4.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $3.98 \times 10^4 \text{ km}^2$; 收缩面积最小的气候情景和时期是 2061~2080 年 ssp585、2081~2100 年 ssp370 和 2041~2060 年 ssp585, 收缩面积分别为 $0.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.83 \times 10^4 \text{ km}^2$, 具体如图 8 所示。

Table 3. Changes in the area of suitable habitat for *Parthenocissus quinquefolia* across different periods and climate scenarios
表 3. 不同时期、气候情景下五叶地锦适生区变化面积

年代	气候情景	扩张区面积 (10^4 km^2)	稳定区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	收缩区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)
2021~2040	ssp126	27.87	305.73	2.89
	ssp245	29.14	306.57	2.05
	ssp370	33.05	305.76	2.86
	ssp5.85	52.20	302.64	5.98
2041~2060	ssp126	52.78	307.48	1.14
	ssp245	72.29	306.79	1.83
	ssp370	59.34	307.42	1.19
	ssp585	95.40	307.78	0.83
2061~2080	ssp126	44.55	306.81	1.80
	ssp245	105.73	307.08	1.54
	ssp370	5.91	306.17	2.44
	ssp585	143.92	308.57	0.05
2081~2100	ssp126	5.47	305.04	3.58
	ssp245	95.76	304.17	4.45
	ssp370	168.08	308.06	0.55
	ssp585	180.56	307.73	0.89





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 *Parthenocissus quinquefolia* under future climate scenarios: Projected Suitable Distribution of *Parthenocissus quinquefolia* 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. 未来气候背景下五叶地锦适生区变化趋势：(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

本研究基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件预测了五叶地锦在当前及未来气候变化情景下的潜在适生区,并在此基础上进一步分析了未来不同气候情景下五叶地锦适生区分布格局的变化趋势。模型 AUC 值达 0.928,表明预测结果具有较高可靠性,验证了 MaxEnt 模型在物种分布预测中的有效性,在利用物种分布点与气候因子耦合分析时,能精准捕捉五叶地锦的生态位特征,为其适生区格局的时空变化分析提供了可靠基础。当前气候背景下,五叶地锦总适生区面积为 $215.15 \times 10^4 \text{ km}^2$,占我国总面积的 22.4%,主要分布于陕西、河北、山东、河南、湖北等中南部地区,同时在四川、西藏及辽南、晋南等地有少量分布。这一预测范围明显大于其实际观测分布区,可能是由于分布数据在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格内虽无重复,但空间分布仍存在不均匀性,导致模型过度拟合[23];此外,MaxEnt 模型基于气候因子与物种分布的理想关联假设,未完全考虑物种间竞争、人为引种限制等现实因素,也可能使预测结果偏高[24];因此,如有引种等相关决策,可在本研究基础之上进行更小尺度下的综合生态评估后开展。

本研究通过刀切法训练增益、贡献率及置换值分析,确定年均降水量(bio12)是影响五叶地锦分布的最关键因子,贡献率达 38.9%,置换重要值 23.7%,其次为最暖季度降水量(bio18)、最冷月份最低温(bio6)等,累计贡献率和置换重要率分别达 73.4%和 76.6%。从单因子响应曲线看,五叶地锦的最适环境条件为:年均降水量 753.19~1891.42 mm、最暖季降水量 435.42~721.89 mm、最湿月降水量 174.40~424.16 mm、最干月降水量大于 10.92 mm,最冷月份温度 -4.90°C ~ 5.66°C ,气温季节性变动系数 647.19~910.66。这与五叶地锦喜湿润、不耐严寒的生态习性高度吻合——充足的降水能满足其藤本植物快速生长的水分需求,而冬季温和的气温可避免冻害,适宜的季节温差则利于其完成生长周期。五叶地锦对降水的高度依赖体现了其对湿润气候的特化适应,也解释了其当前在我国季风气候区的集中分布格局。

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[25]。本研究结果显示,未来气候情景下五叶地锦适生区整体呈扩张趋势,仅 2021~2040 年 ssp126 情景出现小幅收缩。其中,高排放情景下扩张最为显著:2081~2100 年 ssp370 情景适生区面积达 $413.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前增长 $198.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,增长率 92.27%;2061~2080 年 ssp585 情景增长 $187.04 \times 10^4 \text{ km}^2$,增长率 86.93%,这一趋势与全球变暖背景下的水热条件变化密切相关。

综上,本研究明确了五叶地锦的当前适生范围、关键环境限制因子及未来气候变化下的分布趋势,为其资源利用与生态管理提供了科学依据。未来研究可进一步整合土壤、生物竞争等因子,扩大数据收集范围,优化模型预测精度;预测的适生区扩张图可作为一份“预警地图”,为华北、东北等高风险区域制定针对性的监测和管理策略提供依据,以平衡其绿化价值与潜在的生态风险。

参考文献

- [1] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. 生物学通报, 2015, 50(11): 9-12.
- [2] Zhang, Y., Li, M., Zhang, X., Qin, Z., Wang, P. and Liu, H. (2025) Prediction of Potential Suitable Habitats of *Malania Oleifera* under Future Climate Scenarios Based on the Maxent Model. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 26422. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09800-7>
- [3] 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.
- [4] Hazarika, A., Deka, J.R., Majumdar, K., Sileshi, G.W., Nath, A.J. and Das, A.K. (2025) Maxent Modeling for Habitat Suitability Assessment of Threatened *Dipterocarpus* Species in the Indian East Himalayas. *Biodiversity and Conservation*, **34**, 859-876. <https://doi.org/10.1007/s10531-024-02997-5>
- [5] 徐帆, 贺鹭瑶, 郑伟. 基于 MaxEnt 模型预测我国怒江山茶的潜在适生区[J]. 西南农业学报, 2025, 38(2): 375-383.
- [6] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 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): 1292-1305.

- [7] Li, X., Yang, D., Wang, J. and Pan, G. (2025) Prediction of the Change in Suitable Growth Area of *Sabina tibetica* on the Qinghai-Tibetan Plateau Using Maxent Model. *Frontiers in Forests and Global Change*, **8**, Article ID: 1465416. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1465416>
- [8] 黄文韬, 罗军, 王思瑶, 盛崧, 郭璞睿, 舒东蓊, 欧阳泽怡. 4 种气候变化情景下梁山慈竹在中国的潜在适生区预测[J]. 中南林业科技大学学报, 2025(8): 103-112.
- [9] 胡淑萍, 何礼文. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 对白水江国家级自然保护区缺苞箭竹适生区分析[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2115-2122.
- [10] 陈艺晖, 史艳财, 包素青, 熊忠臣, 韦霄, 邓丽丽. 不同气候变化情景下骨碎补的中国潜在适生区预测[J]. 中药材, 2025(5): 1123-1127.
- [11] Wu, F., Wang, Y., Zheng, M., Wang, J., Pan, J. and Liu, L. (2025) Prediction and Quality Zoning of Potentially Suitable Areas for Panax Notoginseng Cultivation Using Maxent and Random Forest Algorithms in Yunnan Province, China. *Industrial Crops and Products*, **229**, Article 120960. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120960>
- [12] Duan, Y., Bai, H., Du, Z., Liu, Y., Li, L., Lu, K., et al. (2025) Maxent Modeling for Predicting the Potential Distribution of Hippophae Linn Species. *Tropical Ecology*, **66**, 132-145. <https://doi.org/10.1007/s42965-025-00372-1>
- [13] 阮少华, 于喜波, 吕晓红, 何瑛超, 刘炳友. 地锦与五叶地锦在北方城市绿化中的应用[J]. 现代农业科技, 2014(1): 216.
- [14] 李德宁, 徐彦森, 王百田. 攀援植物对大气颗粒物的吸附作用[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1486-1492.
- [15] 吕晓倩, 张银龙. 城市攀缘植物对大气颗粒物的吸附效果及重金属累积研究[J]. 中国园林, 2020, 36(12): 101-105.
- [16] 程雨萌, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 梁丹. 北京市 5 种典型植物滞尘特征及影响因素[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1690-1697.
- [17] 杨建波, 王爱国, 吉腾飞, 苏亚伦. 五叶地锦化学成分研究[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(12): 1573-1576.
- [18] 柴军红, 何婷婷, 赵楠, 金志民. 五叶地锦果实多糖、花色苷抗氧化、抗肿瘤活性研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(15): 97-101+138.
- [19] 孙立芹. 低温胁迫对三叶地锦和五叶地锦生理指标的影响[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版), 2011, 25(2): 39-41+85.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 陈稳鹏, 蔡关梅, 苏旭, 郑莹晖, 刘玉萍, 孙成林. 气候变化背景下裂瓣角盘兰在中国的地理分布预测及空间格局变化分析[J/OL]. 草业科学, 1-18. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.s.20250723.1803.002>, 2025-09-16.
- [23] 袁艳超, 肖文发, 刘逸夫, 谭灿灿, 郭宇锋, 王志勇, 王军辉, 贾子瑞. 气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6): 30-42.
- [24] 莫舜华, 李莎, 叶家桐, 胡兴华. 基于 MaxEnt 模型对 3 种杜鹃花潜在适生区评价[J]. 中国野生植物资源, 2025, 44(6): 95-102.
- [25] 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.