

# 基于MaxEnt模型的中国欧洲山杨林潜在分布预测

李鹏浩

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2025年12月13日; 录用日期: 2026年1月6日; 发布日期: 2026年1月14日

## 摘要

为明确影响欧洲山杨林分布的主导环境因子, 量化不同时期的潜在适生区, 本研究借助MaxEnt模型与ArcGIS空间分析技术, 融合我国境内910个欧洲山杨林点位及生物气候数据, 对其在当前及4个未来时期的潜在适生区进行预测分析。结果表面, MaxEnt模型受试者工作特征曲线下面积(Area under the curve, AUC)值为0.889, 预测结果有较好可靠性。欧洲山杨林的分布主要受年降水量(bio12)、最冷季度的降水量(bio19)、最冷季度的平均温度(bio11)、年平均温度(bio1)、最干燥季度的平均温度(bio9)、最热月份的最高温度(bio5)影响。与当前适生区相比, 四种气候情境下, 未来四个年代的适生区均有扩张趋势。

## 关键词

欧洲山杨, MaxEnt模型, 环境因子, 适生区预测

# Prediction of Potential Distribution of *Populus tremula* Forests in China Based on the MaxEnt Model

Penghao Li

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

Received: December 13, 2025; accepted: January 6, 2026; published: January 14, 2026

## Abstract

To identify the dominant environmental factors affecting the distribution of *Populus tremula* forests, and quantify their potential suitable habitats in different periods, this study used the MaxEnt model

and ArcGIS spatial analysis technology, integrated 910 distribution sites of European aspen forests in China and bioclimatic data, to predict and analyze their potential suitable habitats in the current period and four future periods. The results showed that the Area Under the Curve (AUC) value of the MaxEnt model was 0.889, indicating that the prediction results had good reliability. The distribution of European aspen forests was mainly affected by annual precipitation (bio12), precipitation of the coldest quarter (bio19), mean temperature of the coldest quarter (bio11), annual mean temperature (bio1), mean temperature of the driest quarter (bio9), and maximum temperature of the warmest month (bio5). Compared with the current suitable habitats, the suitable habitats in the four future decades showed an expansion trend under the four climate scenarios.

## Keywords

*Populus tremula*, MaxEnt Model, Environmental Factors, Suitable Habitat Prediction

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

欧洲山杨林(*Populus tremula* L.)是杨柳科杨属乔木, 高度可达 20 至 35 米, 树冠呈圆锥形或卵形, 其枝条细长直立, 叶片圆形或三角状卵形, 边缘有锯齿, 表面光滑略带光泽, 背面覆盖白色绒毛。欧洲山杨林在我国分布十分广泛, 包括东北、华北、西北、华中及西南地区等[1]。它喜凉爽湿润气候, 根系发达, 生长迅速, 耐寒不耐旱, 常作山地森林伴生先锋树种[2]。山杨林具有涵养水源、固碳释氧、水体保持、保育物种作用, 具有重要的生态价值, 是绿色生命线[3]。因此, 开展山杨林的预测分布研究, 可以为森林的生态系统优化控制提供理论解释, 更好应对全球气候变暖和实现国家碳中和目标[4] [5]。

近年来, 物种分布模型(SDM)能有效揭示物种分布格局及其对气候变化的响应, 为生物多样性保护提供关键科学依据[6] [7]。MaxEnt 等模型在小样本条件下表现出高精度与强实用性, 广泛应用于濒危物种保护、入侵种预警及未来分布预测[8]。

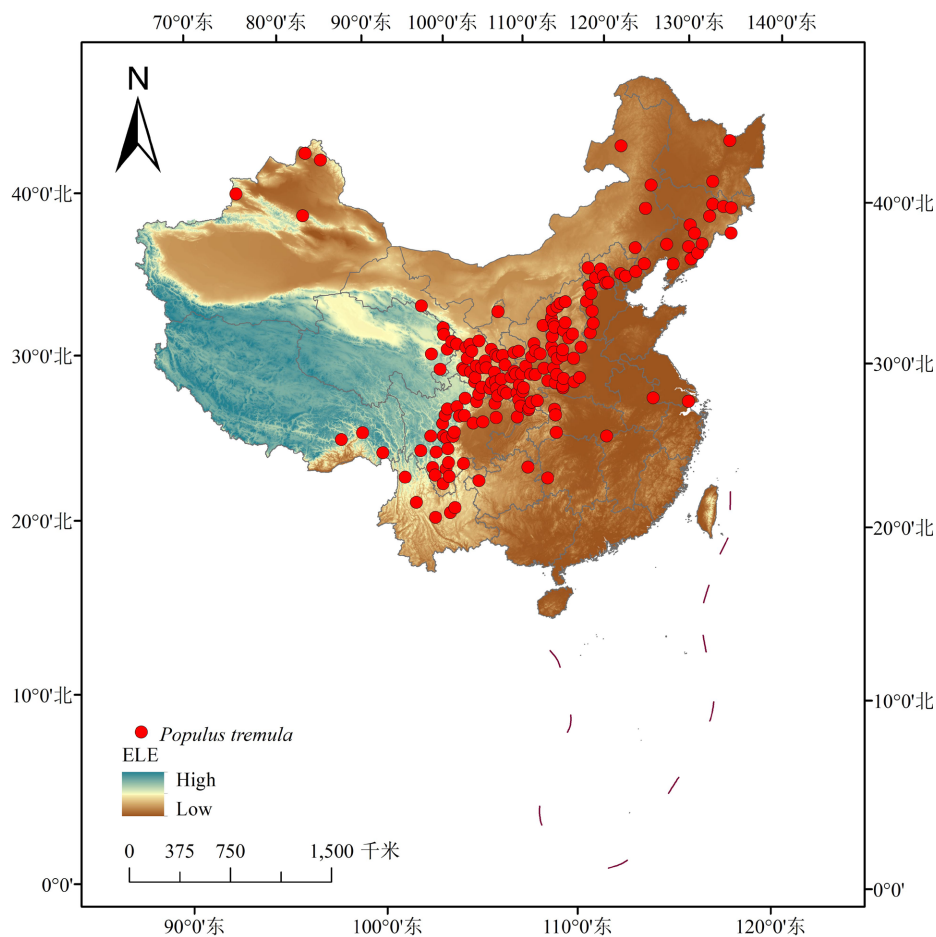
本研究针对中国境内欧洲山杨林保护, 运用 SDMs 相关理论和方法, 结合当前欧洲山杨林的分布数据, 探讨温度、降水等因子对其分布的影响, 并预测未来四种不同气候情境下(SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)在中国的分布变化。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 数据筛选和处理

本研究中使用的高程数据取自 ASTER GDEM 数据库中的中国分省 DEM 数据, 省界数据取自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 气候因子数据来自世界气象数据库(Worldclim, <https://worldclim.org/>), 包括当前(1970~2000 年)和未来(2030 年代; 2050 年代; 2070 年代; 2090 年代)的 19 个生物气候因子(表 1), 欧洲山杨林数据来自 GBIF (<https://www.gbif.org/>)。

首先, 将 910 个欧洲山杨林分布点的经纬度数据进行整理并使用 ENMtools 中的 Trim duplicate occurrences 工具进行筛选, 剔除重复点及异常点, 导出空间分辨率为 2.5' 的 csv 点文件(图 1), 使其与环境因子的空间分辨率相一致, 以便更好建立模型; 其次, 对 19 个生物气候因子进行掩膜提取、裁剪、重采样和投影, 导出中国区域的 ASC 文件, 随后, 基于 IBM SPSS Statistics 27 对生物气候因子进行相关性分析。



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 *Populus tremula* Forests

图 1. 欧洲山杨林分布点

Table 1. Nineteen bioclimatic factors

表 1. 19 个生物气候因子

名称	描述
BIO1	年平均温度
BIO2	平均昼夜范围(每月平均值(最高温度 - 最低温度))
BIO3	等温度(BIO2/BIO7) × 100
BIO4	温度季节性(标准差 × 100)
BIO5	最热月份的最高温度
BIO6	最冷月份的最低温度
BIO7	年温差(BIO5-BIO6)
BIO8	最潮湿季度的平均温度
BIO9	最干燥季度的平均温度
BIO10	最暖季度的平均温度
BIO11	最冷季度的平均温度

续表

BIO12	年降水量
BIO13	最潮湿月份的降水量
BIO14	最干旱月份的降水量
BIO15	降水季节性(变异系数)
BIO16	最潮湿季度的降水量
BIO17	最干燥季度的降水量
BIO18	最暖季度的降水量
BIO19	最冷季度的降水量

## 2.2. MaxEnt 模型的应用

MaxEnt 模型是一种基于生态位原理的生境适宜性模型, 应用物种出现点数据和环境变量数据对物种生境适宜性进行评价, 具有较高的精度[9]-[11]。

我们将物种点数据和环境因子数据加载到 MaxEnt 软件中, 将训练和测试数据集比例分别设置为 75% 和 25% [12], 即 3:1, 正则化乘数(RM)设置为 1, 其余参数均为默认值。运用刀切法, 迭代 5000 次, 重复 10 次, 输出类型为 logistic, 输出文件格式为 ASCII。模型精度评价通过受试者特征工作曲线 ROC (Receiver Operator Characteristic Curve)下面积 AUC (Area Under ROC)进行评价来检验 MaxEnt 模型效果 [13]。理论上讲, AUC 值越大, 模型预测效果越好[14] [15]。一般认为范围在 0.5~0.6 为预测失败、0.6~0.7 预测结果较差、0.7~0.8 为预测结果一般、0.8~0.9 为预测结果良好、大于 0.9 为预测结果优秀, 而测试集的平均 AUC 曲线值为 0.889, 表明预测精度与模型拟合良好(图 2)。

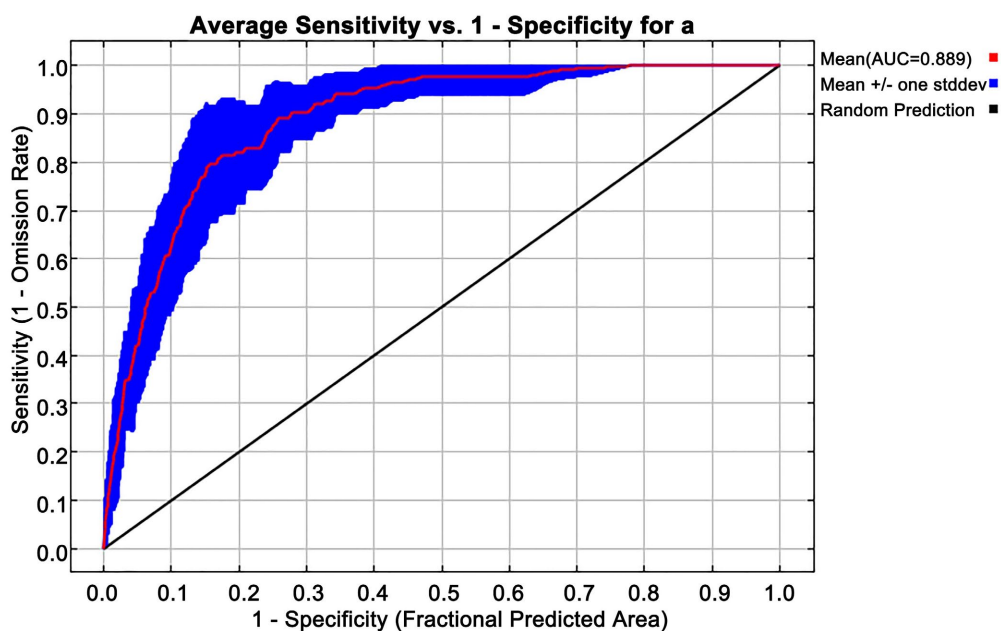


Figure 2. ROC curve

图 2. ROC 曲线

## 2.3. 自适应分布分类、增减趋势

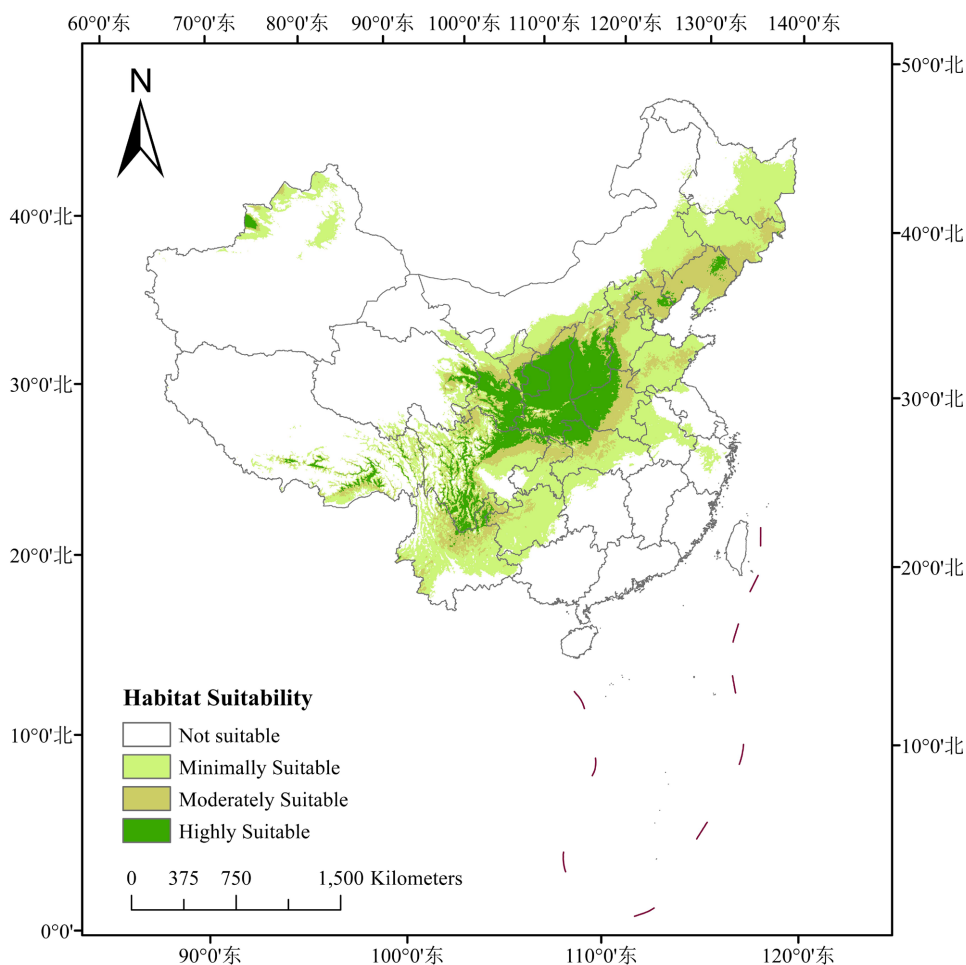
首先将 MaxEnt 模型运行结果文件导入 ArcGIS, 并使用空间分析工具中的重分类工具, 对物种潜在

适宜区进行分类。通过自然断点法,将模拟结果分为4类,非适宜区为0~0.1;低适宜区为0.1~0.3;中适宜区为0.3~0.5;高适宜区为0.5~1 [16]。然后分别使用 ArcGIS 软件中 SDM 工具的 Distribution Changes Between Binary SDMs 和 Centroid Changes (Lines)进行计算未来气候情境下增减趋势。

### 3. 结果

#### 3.1. 自适应分布和驱动因素

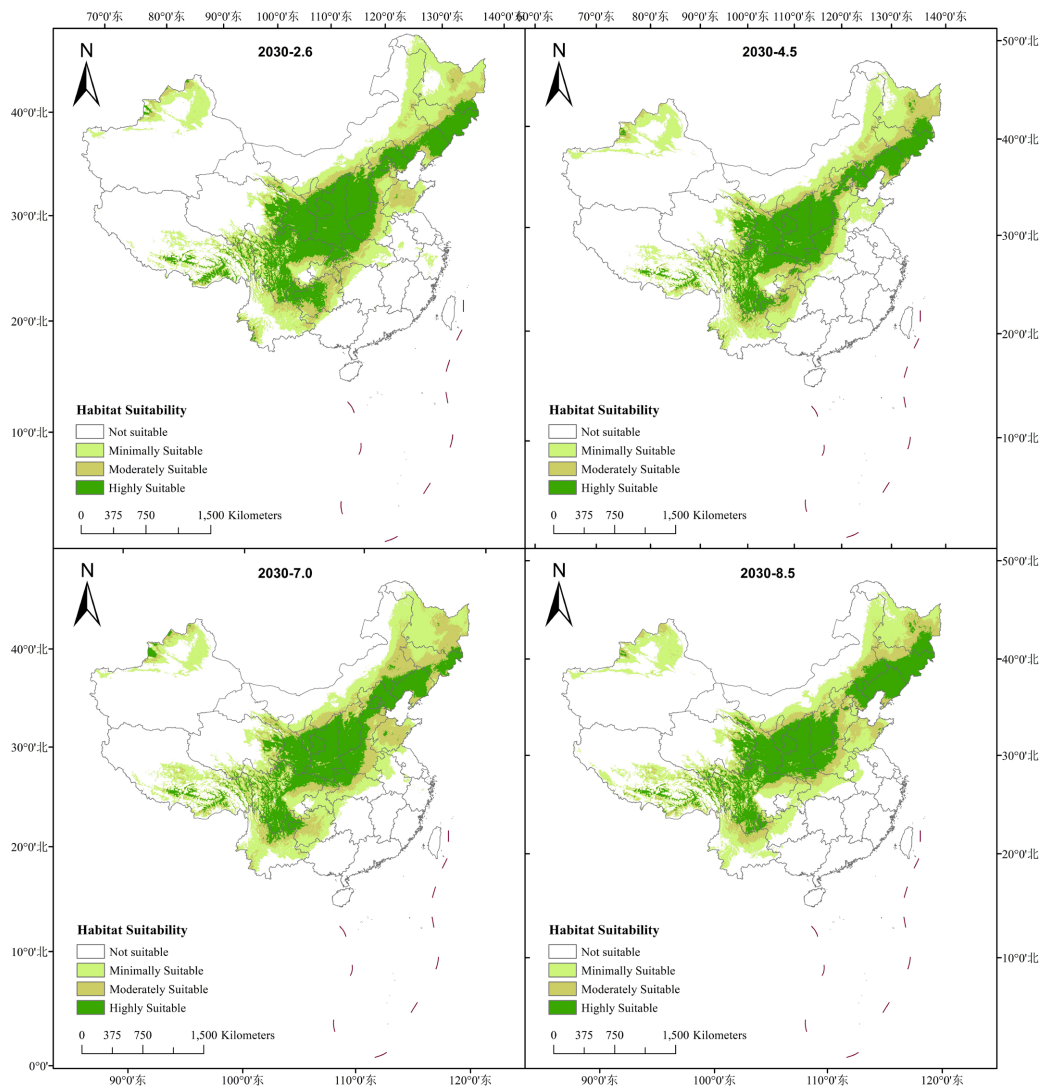
基于 MaxEnt 模型运行结果,欧洲山杨林在当前时期与气候情境下的适生区面积为 341.21 万平方千米(表 2)。其中高、中、低适生区面积分别为 68.18、84.31、188.72 万平方千米。欧洲山杨林高适宜区主要分布在陕西、河北西南部、河南西部、甘肃南部、四川北部和南部;中适宜区主要分布在云南北部、四川东北部、重庆北部、湖北西北部、河南中部、河北西北部和辽宁地区;低适宜区主要分布在黑龙江地区、吉林地区、河北东南部、山东地区、河南东南部、安徽东部、湖北中部、贵州地区、云南地区、甘肃中部和内蒙古东南部(图 3)。未来适宜区分布的总体格局与当前适宜区分布相对一致,不同气候场景略有差异(图 4)。



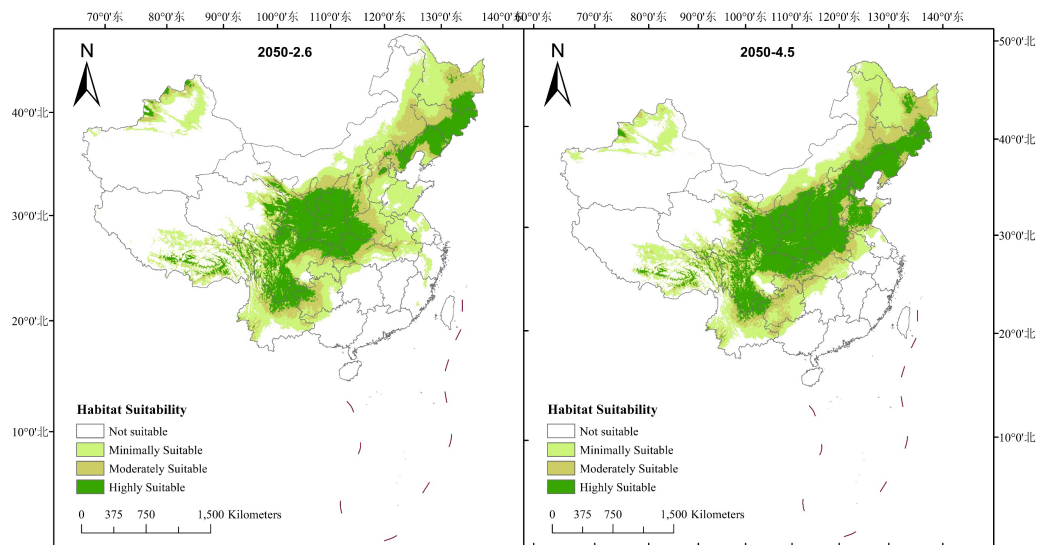
注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改。

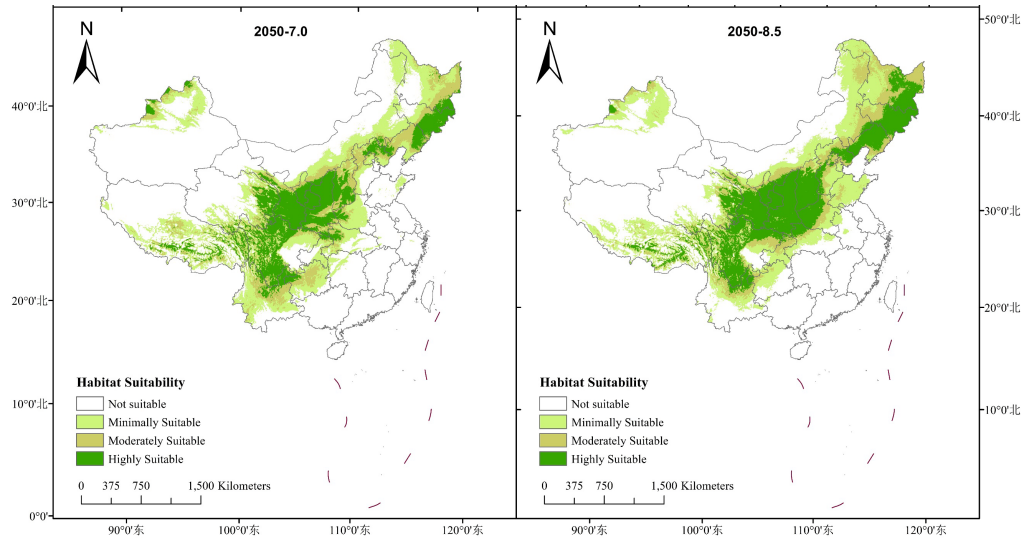
Figure 3. Current suitable areas for *Populus tremula* forests

图 3. 当前欧洲山杨林适宜区

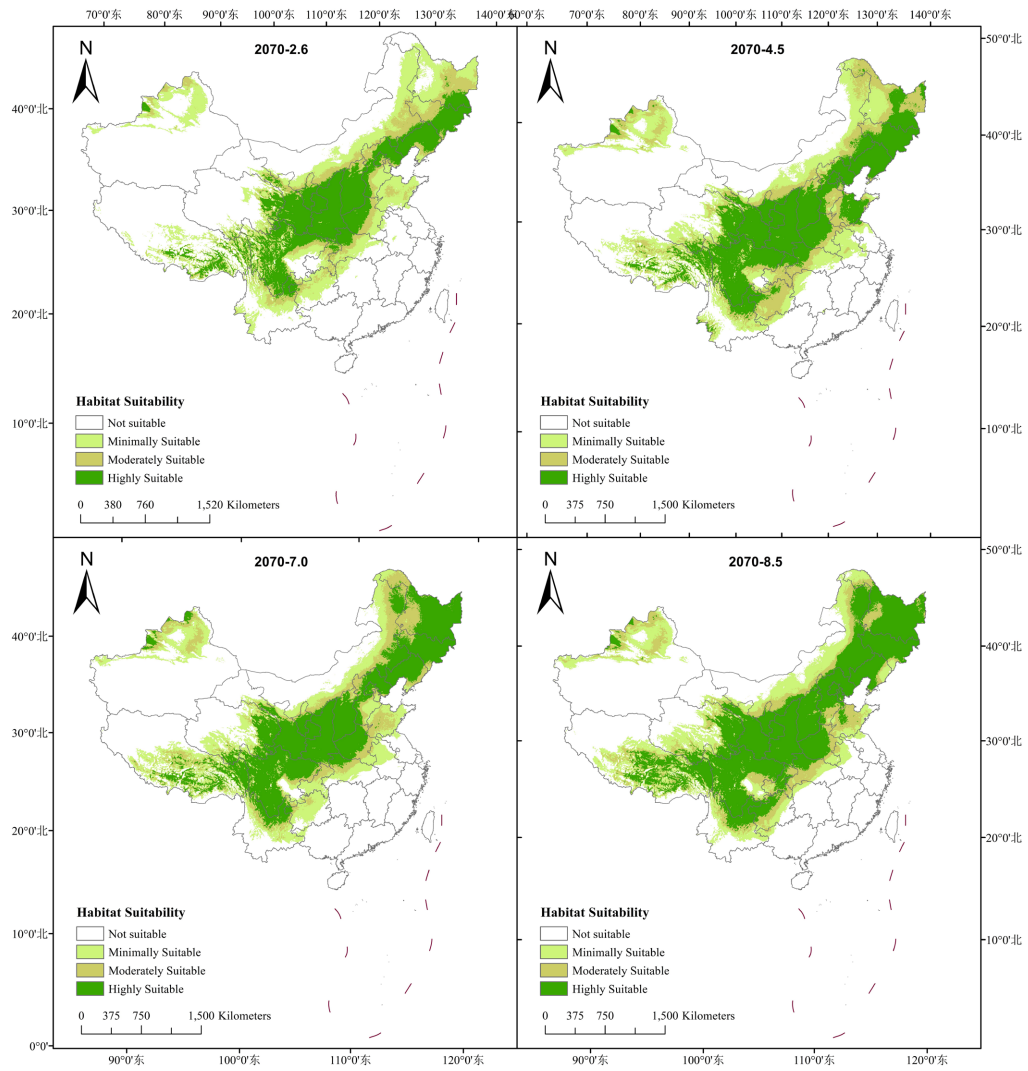


(a) 2030 年代四种情境下欧洲山杨林适宜区

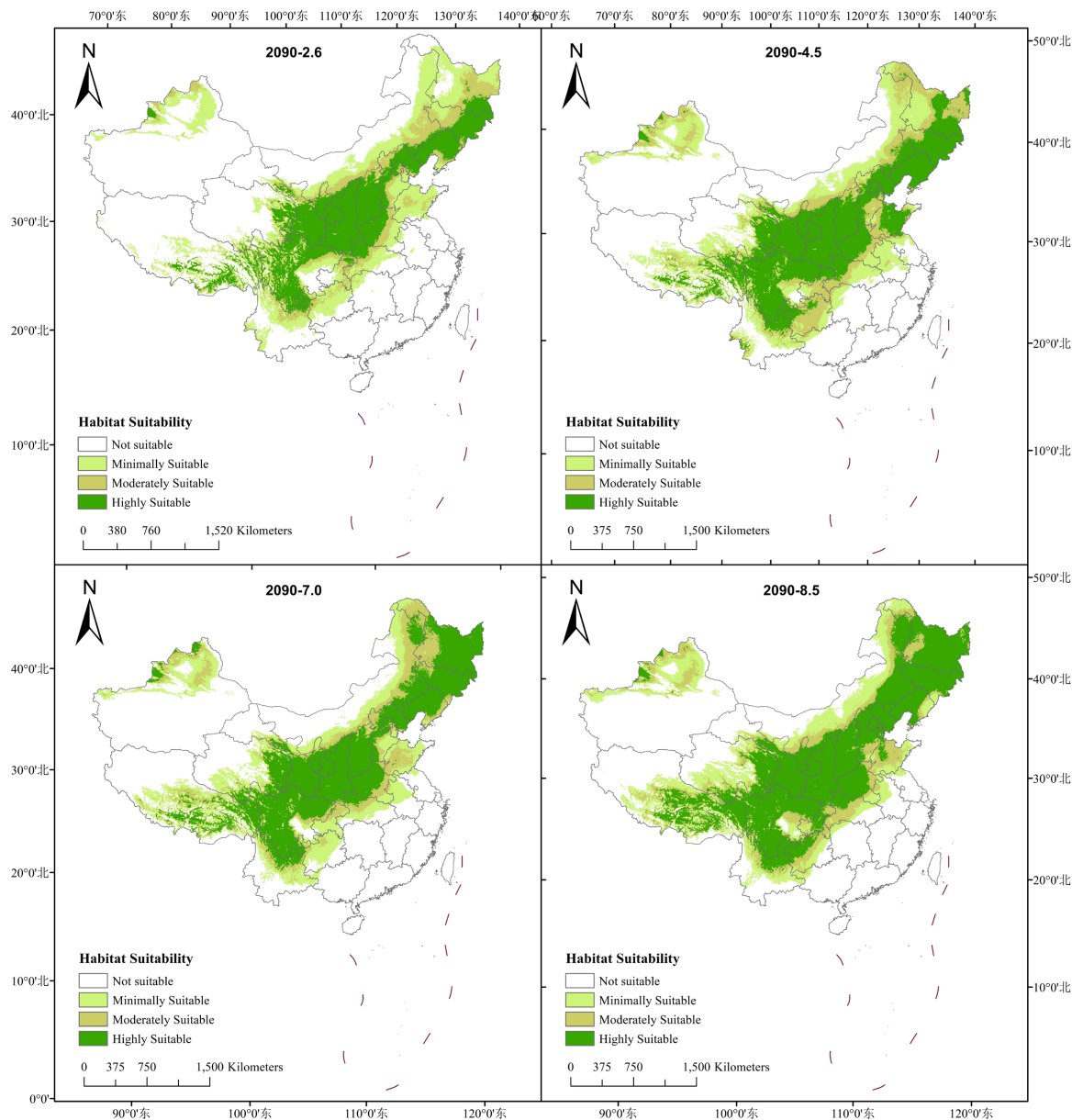




(b) 2050 年代四种情境下欧洲山杨林适宜区



(c) 2070 年代四种情境下欧洲山杨林适宜区



(d) 2090 年代 SSP585 情境下欧洲山杨林适宜区

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 4.** Future suitable areas for *Populus tremula* Forests: (a)~(d) are the distribution maps of suitable areas for European poplar forests in the 2021s~2040s, 2041s~2060s, 2061s~2080s, and 2081s~2100s, respectively

**图 4.** 未来欧洲山杨林适宜区：(a)~(d)分别为 21~40 年代、41~60 年代、61~80 年代、81~00 年代的欧洲山杨林适宜区分布图

**Table 2.** Area of suitable habitats under different climate scenarios in various periods

**表 2.** 各年代不同气候情境适生区面积

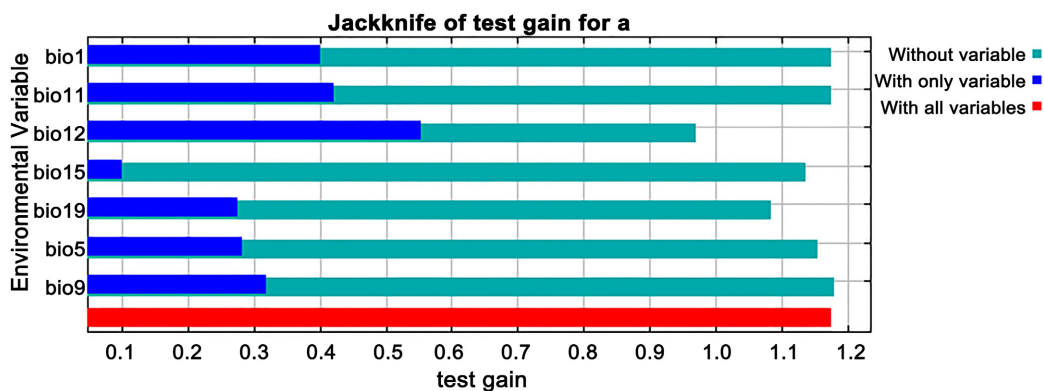
年代	气候情境	非适生区( $10^4$ km $^2$ )	低适生区( $10^4$ km $^2$ )	中适生区( $10^4$ km $^2$ )	高适生区( $10^4$ km $^2$ )
	Current	618.79	188.72	84.31	68.18
21~40	SSP126	538.22	172.50	90.54	158.74
	SSP245	554.68	172.74	90.91	141.67



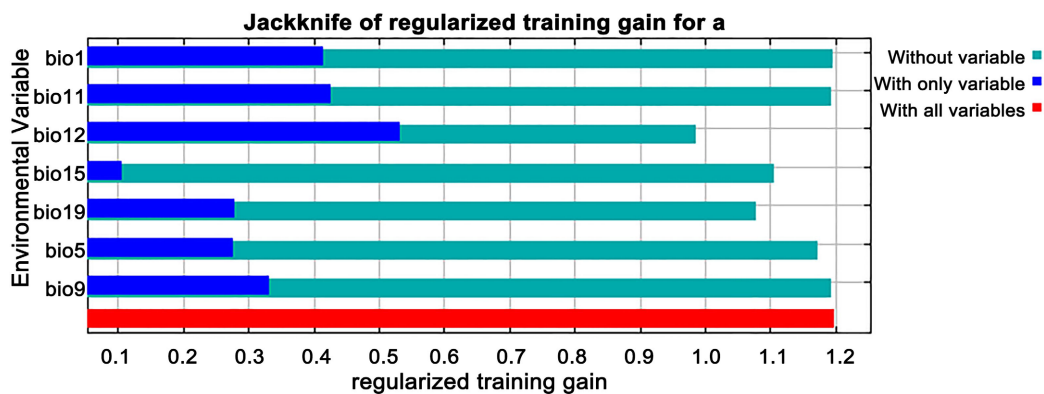
续表

	SSP370	508.84	190.44	120.03	140.69
	SSP585	531.90	183.28	96.76	148.06
41~60	SSP126	519.25	193.54	113.26	133.94
	SSP245	483.43	174.39	113.97	188.21
	SSP370	566.78	94.69	94.69	118.62
	SSP585	520.85	184.89	96.39	157.87
61~80	SSP126	526.54	167.55	94.97	170.95
	SSP245	488.77	180.71	180.71	180.71
	SSP370	494.85	149.36	106.30	209.49
	SSP585	414.34	146.64	104.47	294.56
81~00	SSP126	556.46	164.11	86.10	153.33
	SSP245	448.95	161.62	123.34	226.10
	SSP370	459.49	147.91	110.40	242.20
	SSP585	414.34	146.64	104.47	294.56

### 3.2. 重要气候因子分析



(a) 测试增益



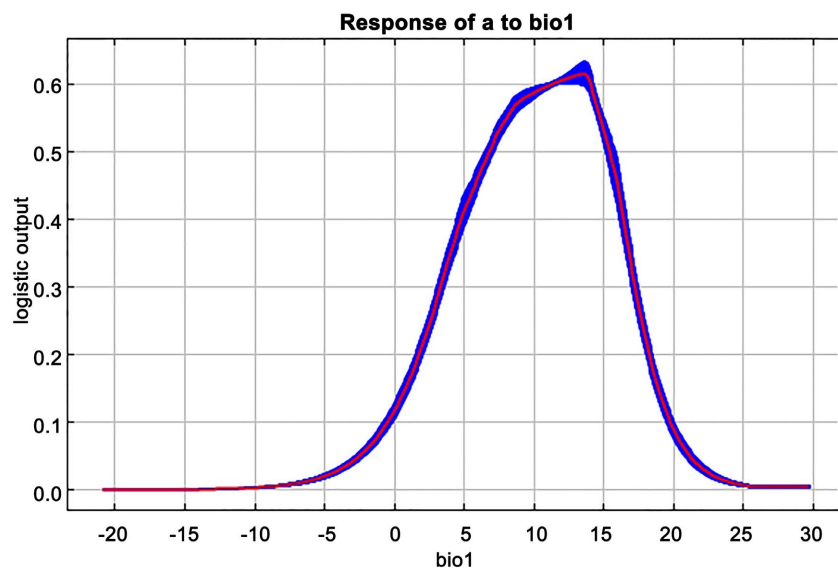
(b) 正则化训练增益

**Figure 5.** Test of important environmental factors using the knife-cut method: (a) shows the test gain, (b) shows the regularized training gain

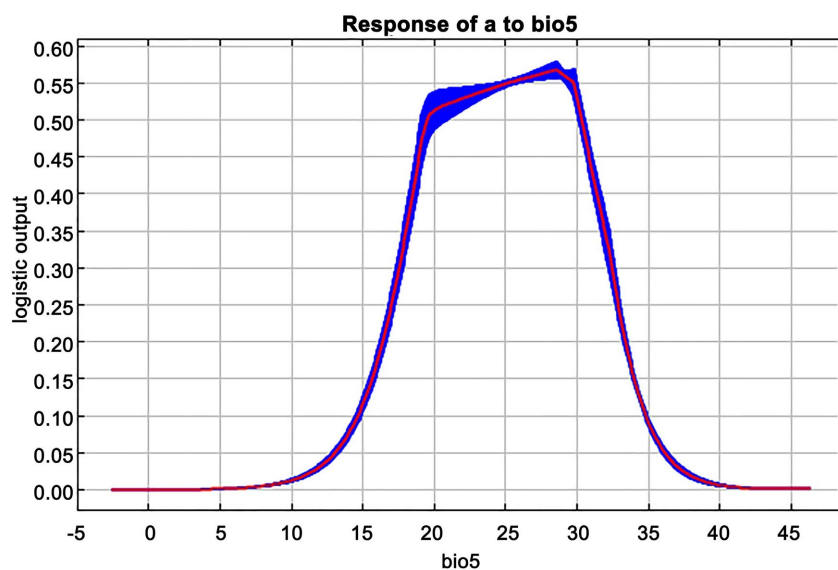
**图 5.** 重要环境因子刀切法检验: (a) 测试增益, (b) 正则化训练增益

**Table 3.** Key environmental factors  
**表 3.** 重要环境因子

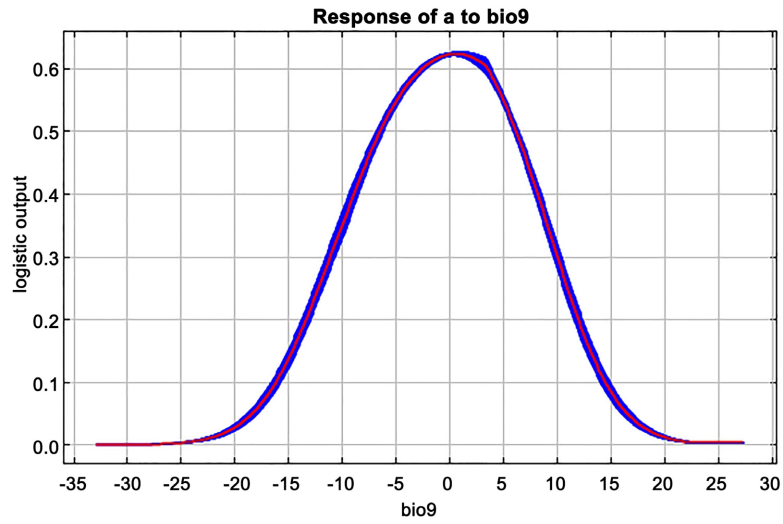
生物气候因子	名称	贡献率
BIO 12	年降水量	31.5
BIO 19	最冷季度的降水量	14.8
BIO 11	最冷季度的平均温度	11.5
BIO 1	年平均温度	11.4
BIO 15	降水季节性(变异系数)	7.2
BIO 9	最干燥季度的平均温度	6
BIO 5	最热月份的最高温度	5.2



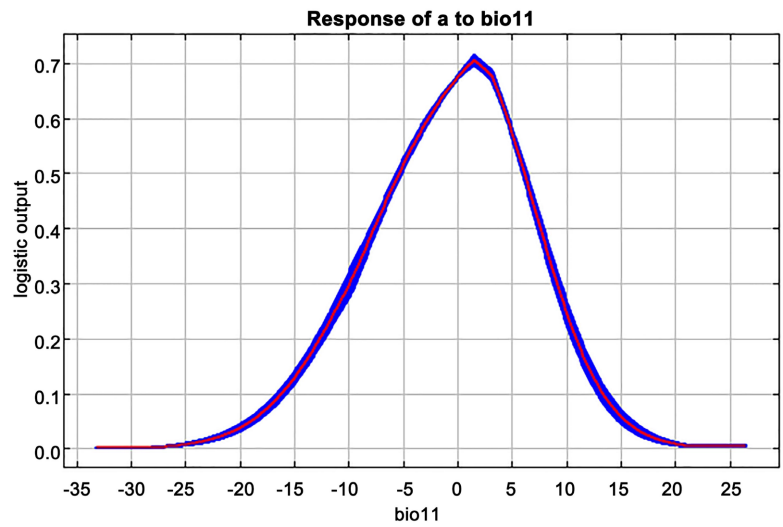
(a) 年平均温度



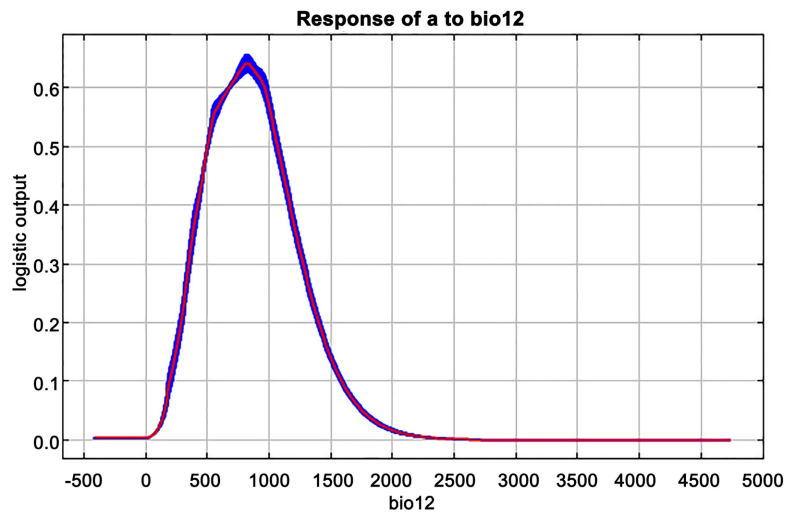
(b) 最热月份最高温度



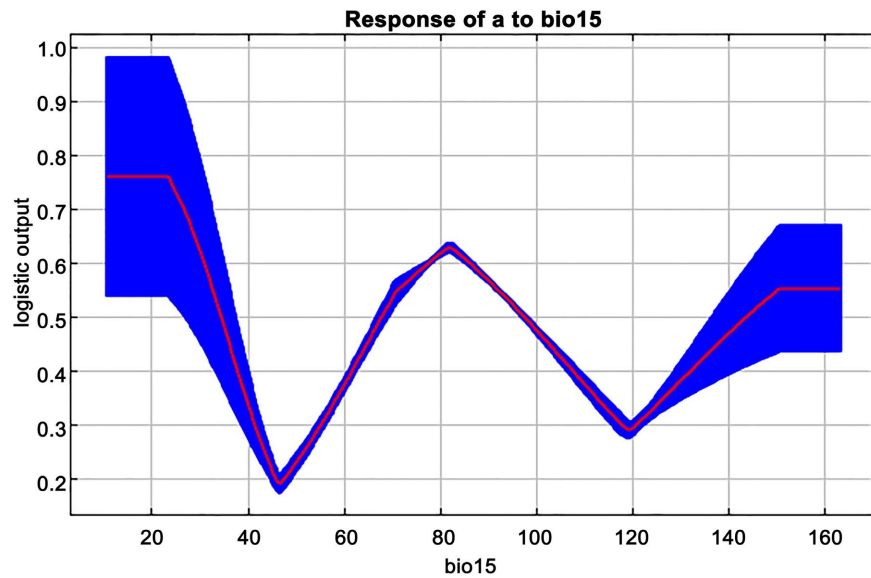
(c) 最干燥季度平均温度



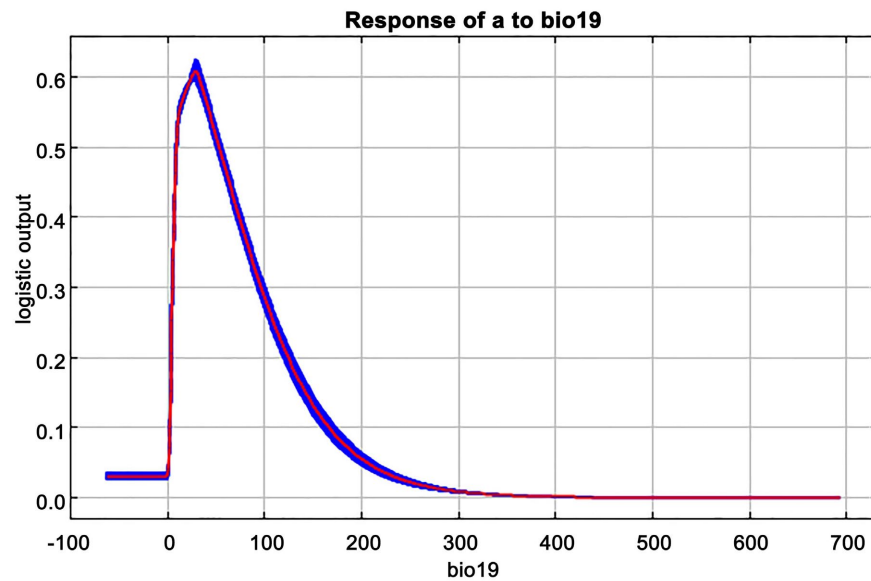
(d) 最冷季度平均温度



(e) 年降水量



(f) 降水季节性



(g) 最冷季度的降水量

**Figure 6.** Response curves of important environmental factors: (a)~(f) correspond to annual mean temperature, maximum temperature of the hottest month, mean temperature of the driest quarter, mean temperature of the coldest quarter, annual precipitation, precipitation seasonality, and precipitation of the coldest quarter, respectively

**图 6.** 重要环境因子响应曲线: (a)~(f) 分别对应年平均温度、最热月份最高温度、最干燥季度平均温度、最冷季度平均温度、年降水量、降水季节性、最冷季度的降水量

刀切法检验结果可反映不同环境气候因子对于分布增益的贡献大小, 图 5 为使用 MaxEnt 软件自带的刀切法分析各环境因子对欧洲山杨林分布的重要结果图。分析可知, 年降水量(bio12)是主要影响因子, 单因子贡献率为 31.5%, 其次为最冷季度的降水量(bio19)、最冷季度的平均气温(bio11)、年平均温度(bio1)、降水季节性(bio15)、最干燥季度的平均温度(bio9)、最热月份的最高温度(bio5), 贡献率分别为 14.8%、11.5%、11.4%、7.2%、6%、5.2% (表 3)。

不难看出, 欧洲山杨林潜在适宜区分布中起主导作用的主要是温度和降水, 它们对欧洲山杨林的

每个生长阶段具有共同作用, 最终反映了研究区欧洲山杨林的适宜生长情况(图 6)。研究发现, 年降水量(bio12)的适宜范围为 500~1000 mm, 最冷季度降水量(bio19)适宜范围为 5~40 mm, 最冷季度平均温度(bio11)适宜范围为-6℃~6℃, 年平均温度(bio1)适宜范围为 7℃~15℃, 降水季节性(bio15)适宜范围为 65 mm~95 mm, 最干燥季度平均温度(bio9)的适宜范围为-7℃~6℃, 最热月份最高温度适宜范围为 19℃~30℃。

### 3.3. 增减趋势

未来欧洲山杨林适宜区整体增加趋势高于减小趋势。2030、2050、2070 与 2090 年代四种情境情境适宜区增加区域大致相同, 主要有辽宁地区、吉林东部、黑龙江东南部、内蒙古东南部、青海东部、贵州西部等; 四种情境稳定区主要在陕西地区、山西中南部、河南西部、甘肃南部、四川南部和北部等; SSP126 情境下适宜区减少区域主要在云南北部、SSP245 和 SSP370 情境下主要在河南中部、SSP585 情境下减少区域主要在河南中部、湖北西北部、四川东南部等。

## 4. 讨论

模型 AUC 值为 0.889, 表明模型精度良好, 表明模型具有良好的准确性和可信度[17]。在 19 个生物环境影响因子中, 温度和降水是影响欧洲山杨林的主要因素, 与其他学者研究结果大致相同[2] [18]。结果表明, 在生物气候变量中, 降水对欧洲山杨林的影响超过了温度, 尤其是年降水量(bio12)和最冷季度的降水量(bio19), 贡献率达到 46.2%。分布和建模结果还可能受到其他内在因素(物种的扩散距离和速率及其生成时间)以及外在因素的影响。然而, 本研究仅使用了气候因素, 忽视了气候、地形及人类活动[19]的潜在影响, 人类可以通过植被保护等手段干预欧洲山杨林的适宜区, 可能与预测结果存在一些偏差。

## 5. 结论

本研究利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 利用筛选后的 176 个分布点和 19 个生物气候因子探究了欧洲山杨林的潜在分布。根据结果, 欧洲山杨林目前潜在适生区主要分布在东北、华北、华中和西南地区。年降水量(bio12)、最冷季度的降水量(bio19)、最冷季度的平均温度(bio11)、年平均温度(bio1)是影响欧洲山杨林分布的关键环境因子。未来四种情境下, 欧洲山杨林的适生分布区总体呈现扩大趋势。随着二氧化碳浓度升高, 四种气候情境下欧洲山杨林的适生区均向西北和东南扩张。本研究为了解欧洲山杨林对气候变化的响应提供了科学依据, 也为山杨林生态系统的管理与规划提供了理论指导和数据支撑, 有助于山杨林的植被恢复与生物多样性保护。

## 参考文献

- [1] 郭树平, 李春明. 中国山杨资源与发展现状[J]. 林业科技, 2012, 37(1): 48-52.
- [2] 李新平, 冯京华, 王宗汉. 欧洲山杨适应性研究[J]. 山西林业科技, 1992(4): 17-21.
- [3] 张春茹, 陈波, 张伟, 等. 冀北山区森林生态系统服务价值评价[J]. 林业资源管理, 2013(1): 49-52, 61.
- [4] 张守东. 植树造林与森林经营助力碳中和[J]. 现代农村科技, 2025(6): 139-141.
- [5] Schwaab, J., Davin, E.L., Bebi, P., Duguay-Tetzlaff, A., Waser, L.T., Haeni, M., *et al.* (2020) Increasing the Broad-Leaved Tree Fraction in European Forests Mitigates Hot Temperature Extremes. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 14153. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71055-1>
- [6] Sun, S., Zhang, Y., Huang, D., Wang, H., Cao, Q., Fan, P., *et al.* (2020) The Effect of Climate Change on the Richness Distribution Pattern of Oaks (*Quercus L.*) in China. *Science of the Total Environment*, **744**, Article ID: 140786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140786>
- [7] 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.

- [8] 陈俪心, 和梅香, 王彬, 等. 基于 MaxEnt 模型的凉山山系珙桐种群适宜生境分布及其影响因素分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2018, 55(4): 873-880.
- [9] 徐卫华, 罗翀. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用[J]. 森林工程, 2010, 26(2): 1-3, 26.
- [10] Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., *et al.* (2006) Novel Methods Improve Prediction of Species' Distributions from Occurrence Data. *Ecography*, **29**, 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- [11] Byeon, D., Jung, S. and Lee, W. (2018) Review of CLIMEX and Maxent for Studying Species Distribution in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, **11**, 325-333. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2018.06.002>
- [12] Karuppaiah, V., Maruthadurai, R., Das, B., Soumia, P.S., Gadge, A.S., Thangasamy, A., *et al.* (2023) Predicting the Potential Geographical Distribution of Onion Thrips, *Thrips tabaci* in India Based on Climate Change Projections Using Maxent. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 7934. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35012-y>
- [13] 张峥男, 崔键, 李金凤, 等. 基于 MaxEnt 模型的中国苍术属重要药用植物生境适宜性评价研究[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 40(10): 1-27.
- [14] 刘旭, 付胜杰, 穆立蕾. 基于 MaxEnt 模型预测未来气候下月见草在黑龙江省的潜在适生区[J]. 中国农学通报, 2024, 40(31): 97-104.
- [15] 徐慧, 佟珂珂, 姚霞珍, 等. 基于 MaxEnt 模型的濒危植物大花黄牡丹潜在适生区预测[J]. 高原农业, 2023, 7(3): 278-290.
- [16] Zhang, H., Liu, P., Zhang, Y., Wang, Z. and Liu, Z. (2024) Global Warming and Landscape Fragmentation Drive the Adaptive Distribution of *Phyllostachys Edulis* in China. *Forests*, **15**, Article 2231. <https://doi.org/10.3390/f15122231>
- [17] Li, L., Wu, H., Gao, Y. and Zhang, S. (2023) Predicting Ecologically Suitable Areas of Cotton Cultivation Using the Maxent Model in Xinjiang, China. *Ecologies*, **4**, 654-670. <https://doi.org/10.3390/ecologies4040043>
- [18] Gallardo, B., Zieritz, A. and Aldridge, D.C. (2015) The Importance of the Human Footprint in Shaping the Global Distribution of Terrestrial, Freshwater and Marine Invaders. *PLOS ONE*, **10**, e0125801. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125801>
- [19] Zhang, Y., Tang, J., Ren, G., Zhao, K. and Wang, X. (2021) Global Potential Distribution Prediction of *Xanthium italicum* Based on Maxent Model. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 16545. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96041-z>