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

气候变化背景下光核桃的潜在分布区和生态位变化

张淑宁 包文泉 敖敦 赵光华 王淋 乌云塔娜 白玉娥 韩其木格

Potential distribution area and niche change of *Prunus mira* under context of climate change

Zhang Shuning, Bao Wenquan, Ao Dun, Zhao Guanghua, Wang Lin, Wuyun Tana, Bai Yu’e, Han Qimuge

引用本文:
张淑宁, 包文泉, 敖敦, 赵光华, 王淋, 乌云塔娜, 白玉娥, 韩其木格. 气候变化背景下光核桃的潜在分布区和生态位变化[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9):45–56. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230014
Zhang Shuning, Bao Wenquan, Ao Dun, Zhao Guanghua, Wang Lin, Wuyun Tana, Bai Yu’e, Han Qimuge. Potential distribution area and niche change of *Prunus mira* under context of climate change[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9):45–56. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230014

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230014

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

基于优化的MaxEnt模型预测青海省祁连圆柏潜在分布区

Predicting potential suitable distribution areas for *Juniperus przewalskii* in Qinghai Province of northwestern China based on the optimized MaxEnt model

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 19–31. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220515

西藏光核桃果实表型性状变异分析与种质资源筛选

Analysis on phenotypic variation and germplasm resource selection of wild *Amygdalus mira* in Tibet of southwestern China

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 48–57. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190422

羽叶铁线莲的分布区与生态位模型分析

Distribution and niche modeling analysis of *Clematis pinnata*

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 70–79. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180189

矮牡丹在中国的地理分布及潜在分布区预测

Geographical distribution and potential distribution area prediction of *Paeonia jishanensis* in China

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 83–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200360

基于MaxEnt模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析

Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200103

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230014

气候变化背景下光核桃的潜在分布区和生态位变化

张淑宁[1]　包文泉[1]　敖　敦[2]　赵光华[3]　王　淋[4]
乌云塔娜[4]　白玉娥[1]　韩其木格[5]
（1. 内蒙古农业大学林学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 汕尾中学，广东 汕尾 516600；4. 中国林业科学研究院经济林研究所，河南 郑州 450003；5. 赤峰市林业科学研究所，内蒙古 赤峰 024005）

摘要:【目的】探究气候变化对光核桃分布和生态位的影响，为光核桃资源的保护和开发提供理论支撑。**【方法】**本研究根据光核桃的 216 条地理分布数据，结合 11 个气候、土壤和地形因子，调用 ENMeval 程序包优化后的最大熵值模型（MaxEnt）模拟我国光核桃潜在分布区在未来 3 种气候条件下的空间分布格局，并使用 ecospat 软件包分析光核桃气候生态位变化，以确定影响光核桃分布的主要环境变量。**【结果】**（1）优化后的 MaxEnt 模型可准确预测光核桃的潜在地理分布区，分布区主要位于青藏高原和云贵高原等较高海拔地区，总面积约为 360 711.8 km^2，其中拉萨河谷、雅鲁藏布江中游河谷、怒江、澜沧江、金沙江等干热河谷等地为光核桃高度适生区；（2）在未来气候条件下，光核桃适生区整体呈向西南收缩趋势，生境适宜度总体呈下降趋势；（3）影响光核桃分布的主要环境变量为气温年较差、等温性和海拔，光核桃未来时期与当前时期生态位的重叠率随气候变化加剧逐渐降低。**【结论】**随着未来气候变化，我国光核桃适生区将向纬度与海拔相对较高的地区进行迁移，光核桃气候生态位也将与当前生态位逐渐分化，温度和海拔是影响光核桃分布的主要环境因子。基于上述结果，我们应在当前和未来环境适宜度均无显著变化的区域设立保护地，以减少全球气候变暖影响，同时也可避免人类活动对光核桃资源的进一步破坏。

关键词：光核桃；MaxEnt 模型；潜在分布区；生态位；气候变暖
中图分类号：S725.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)09−0045−12
引文格式：张淑宁，包文泉，敖敦，等. 气候变化背景下光核桃的潜在分布区和生态位变化［J］. 北京林业大学学报，2024，46(9)：45−56. Zhang Shuning, Bao Wenquan, Ao Dun, et al. Potential distribution area and niche change of *Prunus mira* under context of climate change［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 45−56.

Potential distribution area and niche change of *Prunus mira* under context of climate change

Zhang Shuning[1]　Bao Wenquan[1]　Ao Dun[2]　Zhao Guanghua[3]　Wang Lin[4]
Wuyun Tana[4]　Bai Yu'e[1]　Han Qimuge[5]
(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;
2. College of Glassland, Recourses and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;
3. Shanwei Middle School, Shanwei 516600, Guangdong, China;
4. Economic Forest Research Institute, Chinese Academy of Forestry, Zhengzhou 4500033, Henan, China;
5. Chifeng Institute of Forestry Science, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China)

Abstract: [**Objective**] This paper investigates the effects of environmental changes on the distribution and niche of *Prunus mira* to provide theoretical support for the conservation and development of *P. mira*

收稿日期: 2023−02−01　**修回日期:** 2023−05−04
基金项目: 内蒙古自治区高等学校"青年科技英才支持计划"项目（NJYT22032），国家自然科学基金项目（32001338）。
第一作者: 张淑宁。主要研究方向：气候变化背景下光核桃空间分布格局的变化。Email: zsn18580492482@163.com　地址：010010 内蒙古自治区呼和浩特市内蒙古农业大学林学院。
责任作者: 包文泉，博士，副教授。主要研究方向：经济林育种与栽培。Email: bwq_fire@163.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

resources. [**Method**] In this study, based on 216 geographical distribution data of *P. mira*, we combined 11 climatic, soil and topographic factors, invoked the maximum entropy value model (MaxEnt) optimized by ENMeval program package to simulate the spatial distribution pattern of potential distribution areas of *P. mira* under three future climatic conditions. The ecospat package was also used to analyze the changes in the climatic niche of *P. mira* to determine the main environmental variables affecting the distribution of *P. mira*. [**Result**] (1) The optimized MaxEnt model can accurately predict the potential geographical distribution areas of *P. mira*. The distribution areas were mainly located in higher altitude areas such as the Qinghai-Tibet Plateau of northwestern China and the Yunnan-Guizhou Plateau of southwestern China, with a total area of about 360 711.8 km^2, among which the Lhasa River Valley, the middle Yarlung Tsangpo River Valley, the Nujiang River, the Lancang River, the Jinsha River and other dry and hot river valleys were highly suitable areas for *P. mira*. (2) Under future climatic conditions, the overall trend of *P. mira* suitable area was shrinking to the southwest, and the overall trend of suitable area was decreasing. (3) The main environmental variables affecting distribution of *P. mira* were annual difference in temperature, isothermality and elevation; the overlap between niche of *P. mira* and the current niche in the future period gradually decreased with increasing climate change. [**Conclusion**] With future climate change, *P. mira* will migrate to areas with relatively higher latitude and altitude, and the climatic niche of *P. mira* will gradually diverge from the current niche, with temperature and altitude being the main environmental factors affecting the distribution of *P. mira.* Based on the above results, we should establish conservation sites in areas where there is no significant change in both current and future environmental suitability to reduce the effects of global warming, and also to avoid further damage to *P. mira* resources from disruptive human activities.

Key words: *Prunus mira*; MaxEnt model; potential distribution area; niche; climate warming

气候环境的变化会严重影响植物的物候、生长、生殖和分布[1−2]，自 19 世纪以来，全球气候变化显著，据 IPCC 第五次评估报告，过去 100 年全球气温上升近 1 ℃，预测到 2100 年全球地表温度仍将升温 1.4 ~ 5.8 ℃，相应的降水、辐射、潜在蒸散以及其他气候变量的季节性变化模式也将随气候变暖而发生改变[3−4]。气候变化会直接影响到物种的地理分布格局和生态系统结构、功能与稳定性[5−6]；使植物分布由低纬度和低海拔向高纬度和高海拔地区迁移，造成分布区域减小[7]。分析物种潜在地理分布，了解物种潜在适宜区的分布以及在气候变化下的动态变化，可帮助有关部门对植物资源进行合理开发与科学保护，并采取积极适当的应对策略以减轻气候变化的不利影响[8]。

为了加强植物资源管理与保护，分析植物在未来不同气候背景下分布区时空变化，依据客观存在的种群分布位置及其环境变量信息构建物种分布模型成为模拟预测物种分布对气候环境变化响应的主流方法[9]。目前常用的生态位模型有最大熵值模型（MaxEnt）、广义线性模型（GLM）、生境模型（HABITAT）、遗传算法模型（GARP）和生物气候模型（BIOCLIM）等模型，其中，MaxEnt 模型预测准确、可靠、稳定性强，在模拟预测未来气候情景下物种分布格局研究中有良好的应用，也是物种保育、谱系地理、物种潜在分布区模拟等研究领域的首选模型[10−12]。MaxEnt 模型的优势在于其特征类的选择可以运行各种数量的样本，处理变量间复杂的相互作用[13]。在现有的物种分布建模算法中，MaxEnt 被证明表现最好，同时预测结果更切合实际[14]。

光核桃（*Prunus mira*）又名西藏桃，是我国珍贵的桃种质资源“活化石群”。光核桃花色美、坐果率高，其年产果量约为 500 万 kg[15−16]。光核桃祖先类群在始新纪—中新纪时期曾广泛分布于青藏高原，而目前仅分布于雅鲁藏布江中下游海拔 1 700 ~ 4 000 m 的 20 个县境内，其野生资源数量有限，现已被列入我国重点保护植物。近年来，在气候变化的影响下，光核桃的种群数量逐年减少，分布区域大面积丧失。同时，由于人为过度采摘和野生动物的抢食，光核桃的种群更新极为困难，现已面临濒危状况。本研究运用 MaxEnt 模型和基于 R 语言的 ecospat 软件包预测气候变化下光核桃地理分布和生态位的变化，确定影响光核桃分布的关键环境因素，可为光核桃资源的保护和开发提供科学依据。

1 研究方法

1.1 地理分布数据的收集

在 2015—2019 年期间，对光核桃天然分布区进行了系统调查，另结合相关研究文献、国家标本馆、

全球生物多样性信息网络数据库收集样本数据，并删除其错误和重复分布点，最终获得 216 个分布点（图 1）。

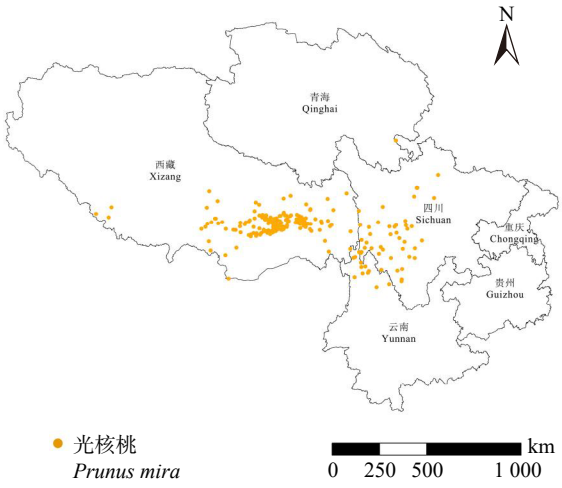


图 1　我国光核桃地理分布点信息

Fig. 1　Distribution sampling information of *P. mira* in China

1.2　环境因子的获取和筛选

通过分析光核桃分布区的气候、地形和土壤因子，初步筛选出 34 个分辨率均为 30″的环境因子作为建模变量（表 1），包括 19 个气候因子、14 个土壤因子和 1 个地形因子。其中，气候因子数据取自世界气候数据库（www.worldclim.org）的当前（1960—1990 年）、未来 2050s（2041—2060 年）和 2090s（2061—2100 年）3 个时期，以第二代国家（北京）气候中心气候系统模式（BCC-CSM2-MR）作为未来气候系统模式，采用不同温室气体排放浓度和社会发展水平下的 SSP126、SSP245 和 SSP585 气候预测结果作为从低到高 3 个等级的气候情景代表未来全球气候变暖的 3 种趋势[17]。其中，SSP126 代表低浓度温室气体排放水平，即在 21 世纪 50 年代温室气体排放总量达到峰值并开始逐年下降；SSP585 是一种模拟温室气体排放浓度以当前速率增加的气候情景，预计到下个世纪时大气中平均 CO_2 浓度为 1 135 ppm；SSP245 气候情境下温室气体排放量则介于 SSP126 和 SSP585 气候情景之间。土壤和地形数据选用世界土壤数据库（www.fao.org）提供的 14 个表层土壤因子和 1 个地形数据。光核桃生长在海拔 2 600 m 以上的盆地、高原和河谷中，因此地形变量数据只选取海拔。地图数据来源于自然资源部官网（http://www.mnr.gov.cn），基于 GS（2016）1576 审图号中国地图为底图绘制。

为避免各环境因子间的共线性而导致模型预测结果过度拟合，本研究利用方差膨胀因子（VIF）和 Pearson 相关性检验，筛选相关性小于 0.8 且 VIF 值小于 10 的因子[18]；同时，对相关系数大于 0.8 的因子，保留其生态学意义重要的因子[19]。最终，筛选出 6 个气候因子、4 个土壤因子和 1 个地形因子（表 2）。

1.3　物种分布模型的构建与评价

将处理后的物种分布点数据和环境变量数据导入 MaxEnt 模型，初步建立其物种分布模型。随机选取 75% 的样点作为训练数据集构建模型，将剩余 25% 的样点作为测试数据集验证模型，设置 10 次重复；并用 Jackknife 评估各环境因子的权重，结合其贡献率确定主导环境因子。为准确评价模型的可靠性，采用刀切法分析环境因子的贡献率，利用受试者工作特征曲线 ROC（receiver operating characteristic curve）下的面积 AUC 值（area under curve）评估所建模型精度[20]。通常认为 AUC 值越大预测越精确，其中，AUC 值在 0.5 ~ 0.7 时表示预测较差，0.8 ~ 0.9 时表示较好，而 0.9 ~ 1.0 时则表示非常好[21]。

1.4　模型的优化

在默认参数下的物种分布模型较为复杂，极易出现过度拟合，为降低模型复杂性，提高模型预测结果，应用 ENMeval 程序包优化 MaxEnt 模型，将调控倍频设置为 0.5 ~ 8.0，每次间隔 0.5，共设置 16 种调控倍频；将模型中提供的 5 种特征：线性特征（L）、二次型特征（Q）、片段化特征（H）、乘积型特征（P）和阈值性特征（T），组合构建 L、LQ、H、LQH、LQHP、LQHPT、QHP、QHPT 和 HPT 共 9 个特征组合。基于 ENMeval 程序包将上述 144 种参数组合进行测试，最终依据 Akaike 信息量准则（AICc），以 ΔAICc 作为测试模型的复杂度和拟合度，选取参数组合，其中 ΔAICc 值越低，表示模型预测越准确，ΔAICc 值为 0 时，表示模型最佳[22]。

1.5　预测结果可视化

根据 MaxEnt 模型预测的光核桃适宜性阈值，结合自然断点法划分光核桃生境适宜性指数，并运用 ArcGIS 软件将其可视化。将光核桃生境适宜性划分为 4 个等级，即：不适生区（0 ~ 0.1）、较不适生区（0.1 ~ 0.4）、一般适生区（0.4 ~ 0.6）和高度适生区（0.6 ~ 1.0）。比较不同时期的适生区变化，获得气候变化背景下光核桃未来空间分布格局变化[23−25]。

1.6　影响光核桃生态位变化分析

当前气候条件下背景点选择区以光核桃分布点和 1 度缓冲距离确定，未来不同气候背景下则以 MaxEnt 预测的适生区为光核桃背景点选择区。根据分布点和不同气候背景下的气候数据，使用 ecospat 软件包对光核桃生态位的变化进行可视化，并计算未来不同气候背景下光核桃生态位与当前生态位的重叠率，其范围为 0 ~ 1，表示生态位从无叠加到完

表 1 初步筛选出的环境因子

Tab. 1 Initial screening for environmental factors

类型 Type	因子 Variable	描述 Description	单位 Unit
气候因子 Climatic factor	Bio1	年平均气温 Annual mean temperature	℃
	Bio3	等温性 Isothermality	%
	Bio4	温度季节性变动系数 Temperature seasonal variation coefficient	%
	Bio5	最热月最高温 Max. temperature of the warmest month	℃
	Bio6	最冷月最低温 Min. temperature of the coldest month	℃
	Bio7	气温年较差 Temperature annual range	℃
	Bio8	最湿季度平均气温 Mean temperature of the wettest quarter	℃
	Bio9	最干季度平均气温 Mean temperature of the driest quarter	℃
	Bio10	最暖季度平均气温 Mean temperature of the warmest quarter	℃
	Bio11	最冷季度平均气温 Mean temperature of the coldest quarter	℃
	Bio12	年降水量 Annual precipitation	mm
	Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
	Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
	Bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality	%
	Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
	Bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
	Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
	Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm
土壤因子 Soil factor	T_REF_BULK	土壤密度 Soil density	kg/dm^3
	T_CEC_SOIL	土壤阳离子交换能力 Soil cation exchange capacity	cmol/kg
	T-PH-H_2O	表层土壤pH值 pH of topsoil	
	T_GRAVEL	表层土砾石含量 Topsoil gravel content	%
	T_SAND	表层砂砾百分比 Topsoil gravel percentage	%
	T_SILT	表层淤泥含量 Topsoil silt content	%
	T_CLAY	表层黏土含量 Topsoil clay content	%
	T_USDA_TEX_CLASS	USDA 土壤质地分类 Topsoil USDA texture classification	
	T_OC	土壤有机碳百分比 Topsoil organic carbon percentage	%
	T_CEC_CLAY	黏性层土壤的阳离子交换能力 Cation exchange capacity of cohesive soil layer	cmol/kg
	T_BS	表层土壤基本饱和度 Topsoil base saturation	%
	T_TEB	表层土壤交换性盐基 Surface soil exchangeable salt base	cmol/kg
	T_ESP	表层土壤可交换钠盐 Surface soil exchangeable sodium salt	%
	T_ECE	表层土壤电导率 Topsoil salinity	dS/m
地形因子 Terrain factor	ELEV	海拔 Elevation	m

表 2 最终筛选出的预测光核桃地理分布的环境因子

Tab. 2 Final screening of environmental variables for prediction of geographical distribution of *P. mira*

类型 Type	因子 Variable	描述 Description	单位 Unit
气候因子 Climatic factor	Bio1	年平均气温 Annual mean temperature	℃
	Bio3	等温性 Isothermality	%
	Bio5	最热月最高温 Max. temperature of the warmest month	℃
	Bio6	最冷月最低温 Min. temperature of the coldest month	℃
	Bio7	气温年较差 Temperature annual range	℃
	Bio12	年降水量 Annual precipitation	mm
土壤因子 Soil factor	T_REF_BULK	土壤密度 Soil density	kg/dm^3
	T_CEC_SOIL	土壤阳离子交换能力 Soil cation exchange capacity	cmol/kg
	T-PH-H_2O	表层土壤pH值 pH of topsoil	
	T_ECE	表层土壤电导率 Electrical conductivity of topsoil	dS/m
地形因子 Terrain factor	ELEV	海拔 Elevation	m

全叠加。同时，利用主成分分析（PCA）分析影响光核桃生态位变化的主要驱动因子，探讨气候变化对光核桃生态位的影响。

2　结果与分析

2.1　MaxEnt 模型的优化与评价

基于 216 个光核桃分布点、11 个环境变量图层，运用 MaxEnt 模型对光核桃的潜在分布区进行模拟预测，在 MaxEnt 默认参数设置下，调控倍率（RM）= 1，特征组合（FC）= LQHP，ΔAICc = 225.87。而当 RM = 1.5，FC = LQHPT 时，ΔAICc = 0；由 AIC 信息准则可知，此时模型为最优模型，优化模型的 10% 训练遗漏率（avg.test.or10pct）和 AUC 平均差异值（avg.diff.AUC）值均低于默认参数值（图 2）。说明参数优化后，大大降低了模型的复杂性和拟合度，提高了预测结果的准确性和可靠性。因此，本研究采用 RM = 1.5、FC = LQHPT 作为最终参数设置。

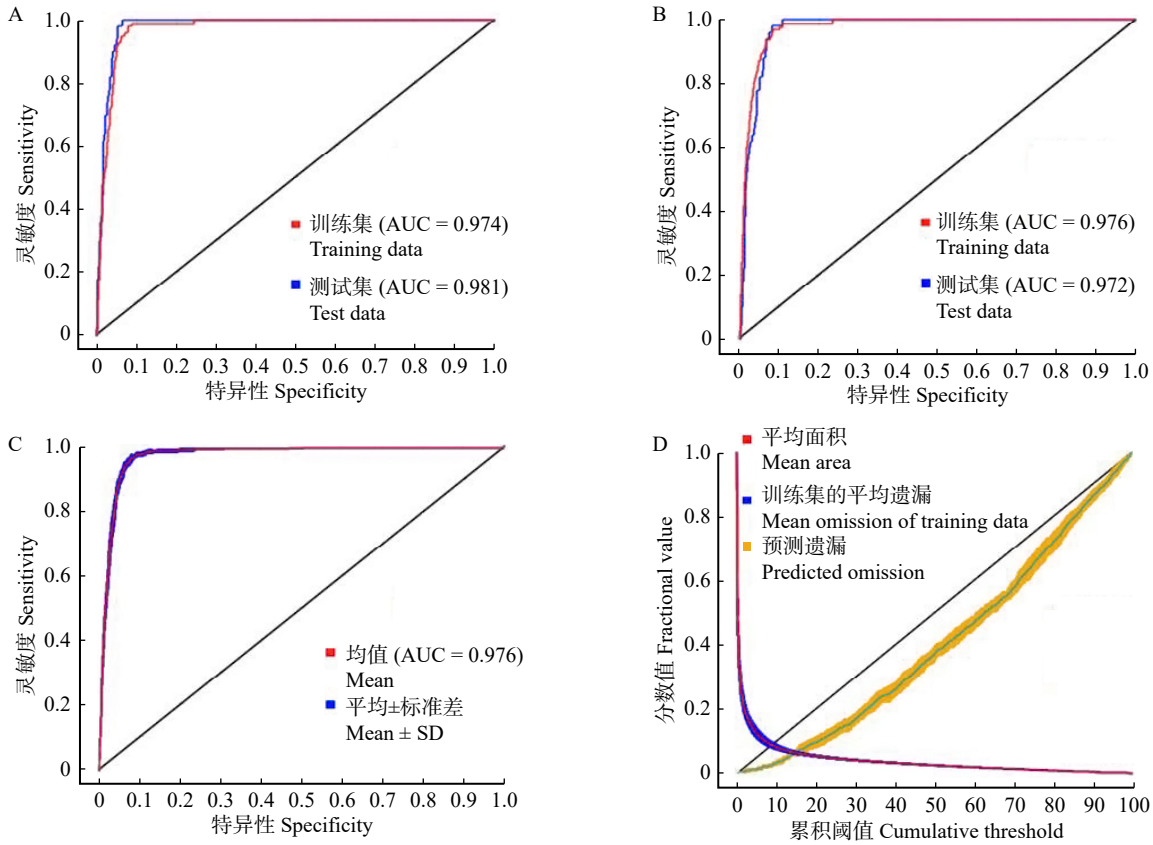
2.2　主导环境因子分析

环境因子的选择是决定建模准确性的关键，根据环境贡献率（表 4）对环境因子进行评估，选定贡献率大于 4% 且置换重要值大于 5% 的环境因子为影响光核桃分布的主导环境因子[26–27]。结合环境因子主要参数，综合分析得出：影响光核桃分布的主要环境因子为气温年较差、海拔、等温性、年降水量和最热月最高气温，这 5 个环境因子的总贡献率高达 96.1%，总置换重要值为 96.7%。

根据光核桃潜在适生区分布概率与环境因子之间的关系，绘制环境因子响应曲线（图 3），发现气温年较差的适生阈值范围为 25 ~ 32 ℃，海拔的适生阈值范围为 2 420 ~ 5 180 m，等温性的适生阈值范围为 37 ~ 48，年降水量的适生阈值范围为 500 ~ 900 mm，最热月最高气温适生阈值范围为 2 ~ 23 ℃。

2.3　光核桃在我国当前潜在地理分布

基于 MaxEnt 模型，构建光核桃当前适生分布区（图 4），将一般适生区和高度适生区统称为总适生区，当前气候背景下光核桃的高度适生区面积为 247 604 km^2（表 5），总适生区面积为 360 711 km^2，约占我国国土面积的 3.76%，当前我国光核桃的适生区分布范围主要集中于青藏高原区、四川盆地和云贵高原，如西藏的昌都、日喀则、山南、林芝等地，四川的甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州，云南的迪庆藏族自治州。光核桃的高度适生区沿拉萨河



A. MaxEnt 第 1 次运行 ROC 曲线；B. MaxEnt 第 10 次运行 ROC 曲线；C. MaxEnt 重复 10 次运行 ROC 曲线平均值；D. MaxEnt 重复 10 次运行遗漏率曲线平均值。A, MaxEnt's first run ROC curve; B, MaxEnt's 10th run ROC curve; C, MaxEnt repeats 10 times to run the ROC curve average; D, mean value of MaxEnt missed rate curve after 10 repetitions.

图 2　最优参数设置下 MaxEnt 模型 ROC 曲线和遗漏率曲线

Fig. 2　ROC curves and omission curves of MaxEnt model under optimal parameter setting

表 3 参与建模的环境因子贡献率和置换重要值

Tab. 3 Percentage contribution and permutation importance of environment variables for *P. mira* in the MaxEnt model

因子 Variable	贡献率 Contribution rate/%	置换重要值 Permutation importance
气温年较差 Temperature annual range	38.3	74.1
海拔 Elevation	22.2	2.0
等温性 Isothermality	20.9	12.4
年降水量 Annual precipitation	9.8	7.9
最热月最高温 Max. temperature of the warmest month	4.9	0.3
最冷月最低温 Min. temperature of the coldest month	2.1	2.1
年平均气温 Annual mean temperature	1.3	0.4
表层土壤pH值 pH of topsoil	0.3	0.4
土壤密度 Soil density	0.2	0.1
土壤阳离子交换能力 Soil cation exchange capacity	0	0.2
表层土壤电导率 Electrical conductivity of topsoil	0	0

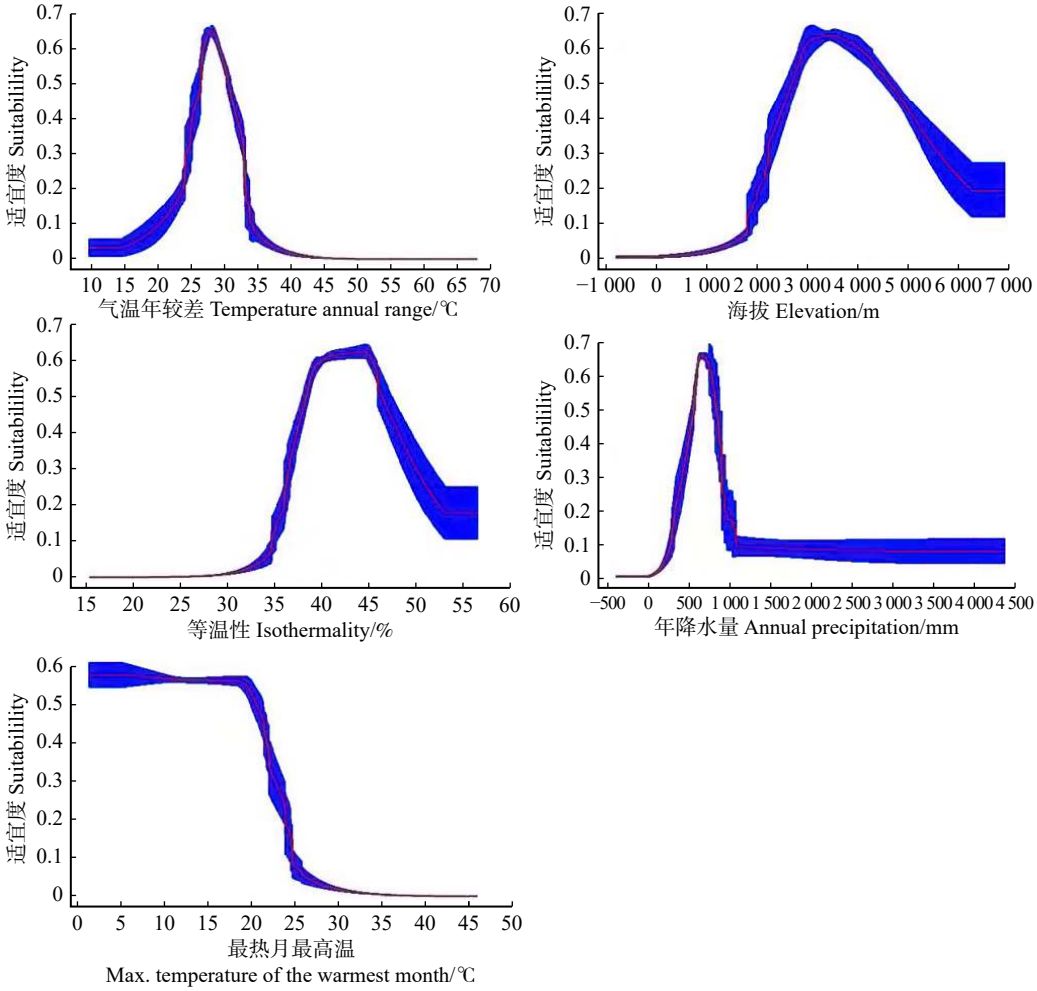


图 3 参与建模环境因子响应曲线

Fig. 3 Response curves of major environment factors participating in modeling

谷、雅鲁藏布江中游河谷、怒江、澜沧江、金沙江等干热河谷两岸周边呈条带状分布，依水而生；此外，在西藏与尼泊尔交界的地方也存在零星光核桃高度适生区。

2.4 未来气候情景下的光核桃适生区预测

在未来不同气候情景(2050s、2090s)下，光核桃适生区除在 2050s-SSP245 和 2090s-SSP585 情景下较当前有增加外(增加率为 4.11% 和 0.36%)，其余未来气候情景下均有不同程度的缩减(图 5)。在 2050s-SSP245 情景下，适生区丧失面积最少(22 566 km^2)，新增率最大(10.6%)，新增区零星分布在西藏的札达县、昌都、林芝，四川凉山彝族自治州(图 5，表 5)；该情景下，光核桃适生区面积约为 375 520.8 km^2，是当前适生区的 1.04 倍。2090s-

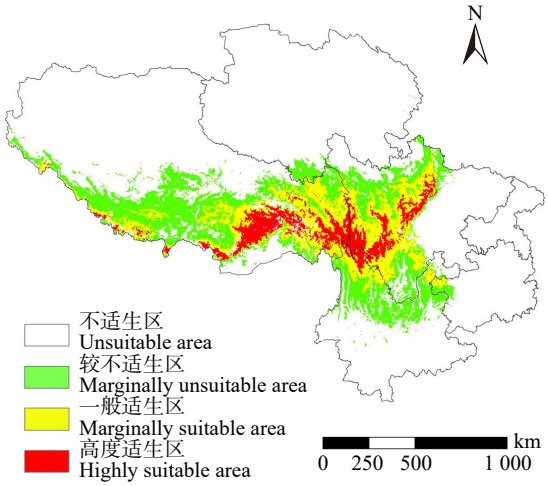


图 4　基于 MaxEnt 模型预测的我国光核桃当前适生区分布

Fig. 4　Distribution of current suitable areas of *P. mira* in China based on MaxEnt

SSP245 情景下，光核桃适生区面积约为 324 114.6 km^2，较当前适生区收缩了近 1/10，适生区新增率最小（4.4%），新增区域分布于西藏、四川、云南等地。在 2050s-SSP585 情景下，光核桃适生区丧失面积最大（69 876 km^2），丧失率为 19.4%（表 5），丧失区主要位于西藏西南部地区。

通过预测未来气候情景下的光核桃适生区空间分布格局变化可知，光核桃对未来不同气候情景下气候变化的响应存在一定差异（图 6）。在中低浓度情景（SSP126，SSP245）下，光核桃适生区面积随时间的推移呈缩减趋势；而在高浓度排放情景（SSP585）下，光核桃适生区面积均随时间的增加而增加。

2.5　不同时期气候变化下光核桃生态位变化

在不同气候条件下，光核桃未来各个气候情景下生态位与当前时期生态位重叠率随温室气体排放浓度增加而逐渐降低，表明光核桃生态位变化程度随气候变化加剧而增加（图 7，图 8）。在模拟以当前速率增加的排放方案的 SSP585 气候背景下，光核桃生态位的迁移幅度最大，生态位重叠率最低，在 2090s 光核桃生态位与当前时期重叠率仅有 69.1%。在能够大幅度控制温室气体排放浓度的 SSP126 气候背景下，光核桃生态位的迁移幅度最小，生态位重叠率最高，但在此气候背景下光核桃生态位仍发生了较大幅度转移。

主成分分析表明，前 2 个主成分解释了研究区环境因子方差的 86.14% ~ 89.67%（PC1：55.56% ~ 57.04%；PC2：30.58% ~ 32.63%），最冷月份最低温度、气温年较差、最热月份最高温度和年平均气温是影响生态位变化的主要驱动因子，未来光核桃生态位中心将向最冷月份最低温度、最热月份最高温度和年平均气温方向移动（图 9）。

3　讨　　论

3.1　模型优化后对光核桃适生区的预测

本研究采用 ENMeval 程序包优化参数后的 MaxEnt 模型，模型的 ΔAICc 值由 225.87 降低至 0，形成最优模型，降低了模型的复杂度，显著提高了模型预测结果的准确性，其预测结果也与我国光核桃当前实际分布于中国四川、云南和西藏一带的山坡和沟谷的客观事实相一致[16]。这与 Rong 等[28]在对青海云杉（*Picea crassifolia*）的适生区进行预测时提出的 MaxEnt 模型参数优化可使预测结果更具说服力的结论一致。可见，对最大熵模型进行深层次优化以提升预测准确性对物种分布的研究意义重大。

本研究对未来的预测是基于物种现有分布情况与环境因子拟合关系不变的前提下得出的，属于较

表 4　不同气候情景下光核桃适生区空间变化

Tab. 4　Spatial changes of *P. mira* suitable areas under different climate scenarios

气候情景 Climate scenario	总适生区面积 Total suitable area/km^2	高度适生区面积 Most suitable area/km^2	丧失区面积 Contraction area/km^2	新增区面积 Expansion area/km^2	保留区面积 Unchanged area/km^2	丧失率 Contraction rate/%	增加率 Expansion rate/%	保留率 Unchanged rate/%
当前 Current	360 711.8	113 107.6						
SSP126-2050s	354 166.6	138 350.6	35 849.3	29 453.1	324 493.8	9.9	8.2	90.00
SSP126-2090s	336 892.3	983 50.7	51 712.0	34 633.3	302 981.3	14.3	9.6	89.25
SSP245-2050s	375 520.8	121 892.4	22 566.1	38 184.0	338 333.4	6.3	10.6	93.80
SSP245-2090s	324 114.6	101 996.5	67 874.7	15 745.7	308 393.2	18.8	4.4	84.00
SSP585-2050s	317 517.4	107 569.4	69 876.0	26 235.4	291 546.0	19.4	7.3	80.80
SSP585-2090s	362 013.9	926 56.2	38 640.4	83 228.0	279 373.3	10.7	23.1	77.50

注：SSP126-2050s表示未来2050s时期以SSP126气候模式的预测结果作为气候背景，SSP126-2090s、SSP245-2050s、SSP245-2090s、SSP585-2050s、SSP585-2090s以此类推。Notes：SSP126-2050s indicates that the projections of the SSP126 climate model are used as the climate background for the next 2050s period. SSP126-2090s, SSP245-2050s, SSP245-2090s, SSP585-2050s, SSP585-2090s are in the same manner.

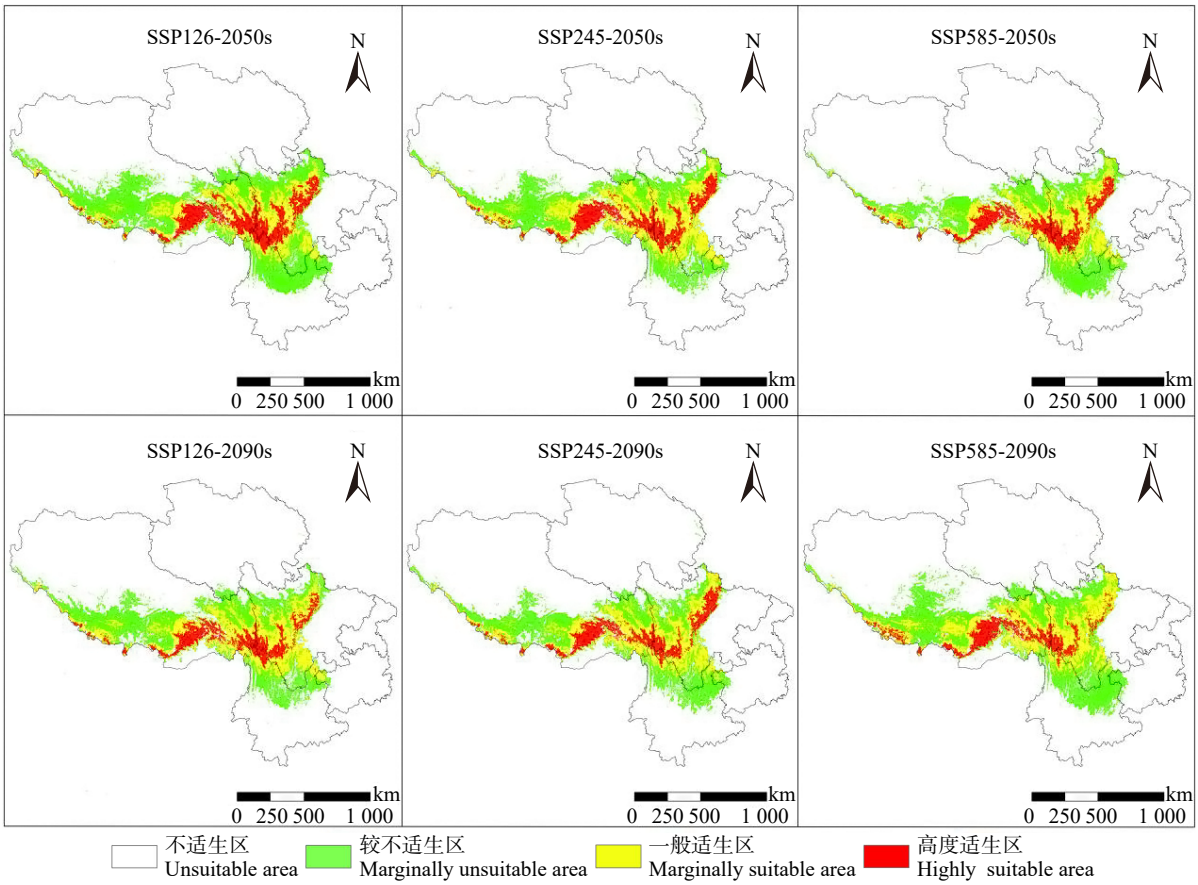


图 5 未来不同气候情景下光核桃在中国的适生分布区

Fig. 5 Suitable distribution area for *P. mira* in China under different future climate change scenarios

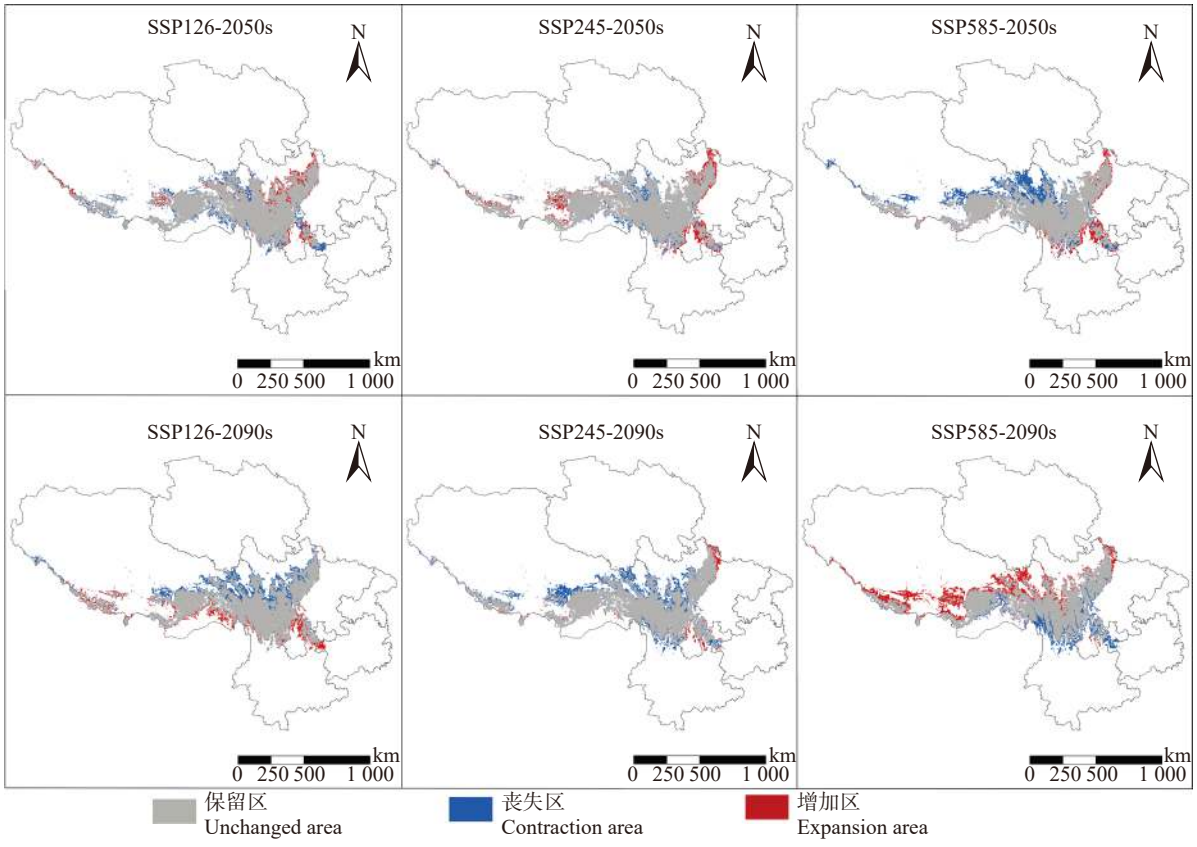


图 6 未来不同气候情景下光核桃在中国的空间分布格局变化

Fig. 6 Spatial patterns of *P. mira* in China under different future climate scenarios

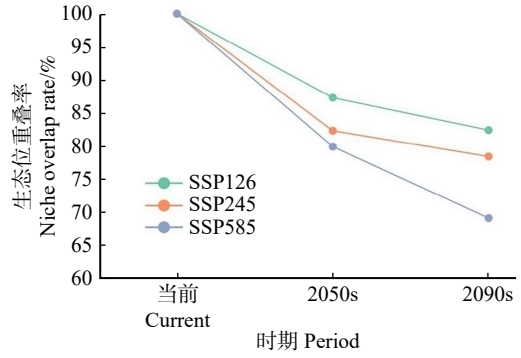


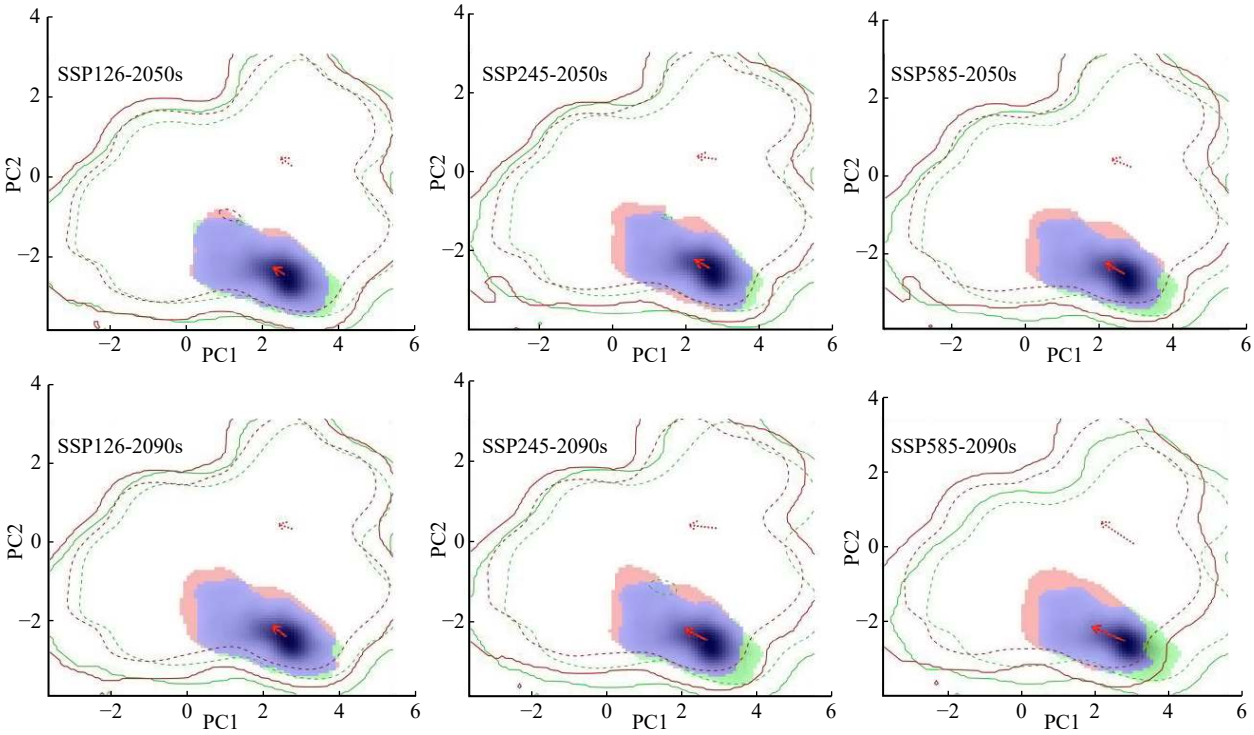
图 7　不同气候背景下光核桃生态位重叠率变化

Fig. 7　Changes of niche overlap rate and highly suitable area for *P. mira* under different future climate scenarios

为理想的结果。然而，在实际演变过程中，随着气候变化的加剧，物种有可能对气候变化产生适应性，从而导致现有物种分布与环境因子的关系发生改变，对未来的预测结果难免与实际出现一定程度的偏差。但很难在短时间内发现物种受气候变化而产生的环境适应性变化方向。因此，模型预测只能是依据当前物种现有分布与环境因子的关系去模拟物种未来的分布区。在后期研究中，应通过长期连续监测全球气候变暖背景下光核桃物种实际迁移的方向和生理特征变化与环境变化的关系，并根据变化趋势对物种分布模型进行修正，以此得到更为精确的预测结果。

3.2　环境因子对光核桃当前潜在地理分布的制约

通过环境因子的分析发现，温度因子、降水因子、地形因子和土壤因子通过相互作用一同影响光核桃潜在地理分布格局。光核桃在海拔 2 700 ~ 4 800 m 时的生境适宜度大于 0.4，此时的海拔高度为最适高度，这一结论与实地调查结果相符[29]。光核桃适生区年降水量为 500 ~ 900 mm，此时适生区适宜度较高；但当降水量大于 900 mm 时，光核桃生境适宜度开始急剧下降；当年降水量大于 1 000 mm 时，物种适宜度约为 0.1，物种几乎无法生长。这与我们的前期调查和研究中发现的光核桃喜光、耐旱、不耐涝这一生物学特性相切合[30]。当最热月最高气温超过 20 ℃，环境因子响应曲线发生突变，当最热月最高气温达到 25 ℃ 时，物种生境适宜度趋近为零，物种几乎无法存活；这与青藏高原地区光核桃生长地区的温度特点相符[31−32]。此外，本研究筛选出 4 个土壤因子进行建模，但没有任何土壤因子的贡献率大于 4%，符合光核桃对土壤条件要求不高的特性[33]。本研究结果表明：光核桃的主要适生区分布在我国西南地区，温度和海拔是影响光核桃适生的主要因



绿色阴影表示目前的物种发生密度，红色阴影表示未来的物种发生密度，蓝色阴影表示重叠。100% 和 50% 的可用环境空间分别使用实线和虚线轮廓线进行标记。红色箭头表示光核桃的气候生态位（实线）和两个范围之间的背景范围中心（虚线）的变化方向。Green shading indicates current density of species occurrence, red shading indicates future density of species occurrence, and blue shading indicates overlap. 100% and 50% of the available environmental space are marked using solid and dashed contour lines, respectively. Red arrows indicate direction of change in climatic niche of *P. mira* (solid line) and the center of background range between two ranges (dashed line).

图 8　未来不同气候背景下的光核桃生态位变化

Fig. 8　Niche changes of *P. mira* under different future climate scenarios

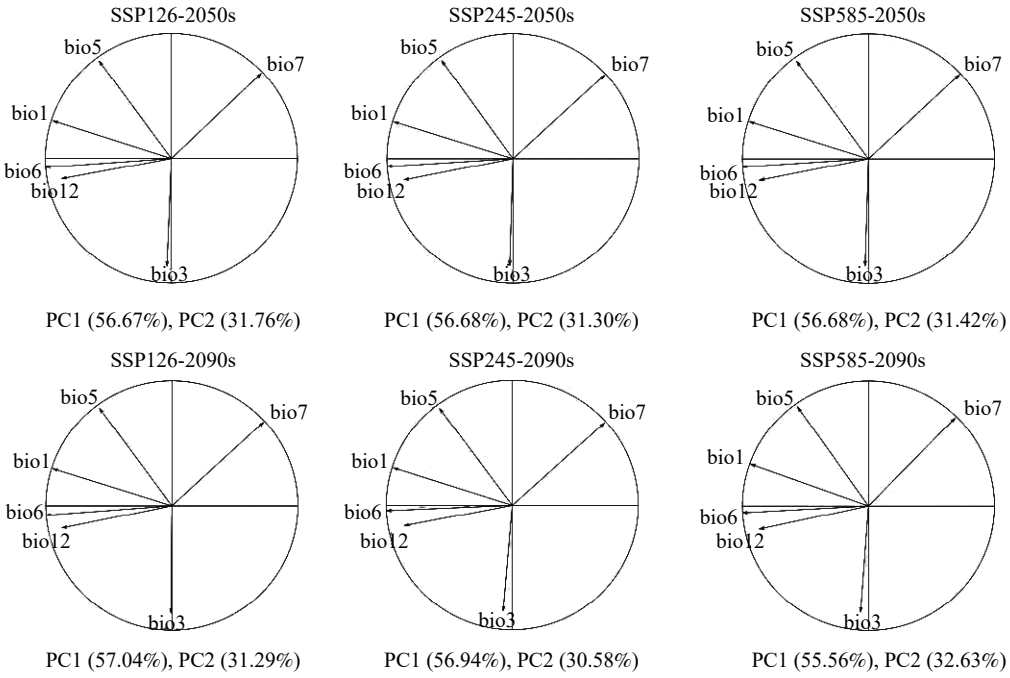


图 9 未来不同气候背景下的光核桃生态位变化影响因子主成分分析

Fig. 9 Principal component analysis of factors affecting future ecological niche changes in *P. mira* under different climate scenarios

子，其贡献值显著大于降水和土壤因子。但由于土壤因子可对温度和降水进行再分配，因此，降水、土壤、地形因素对光核桃适生分布的影响也不能忽视。

3.3 气候变暖对光核桃潜在地理分布变迁的影响

在全球增温增湿的大背景下，未来我国光核桃适生区并未大范围地迁移，同当前相比，未来高温高湿环境使光核桃适生分布区面积出现缩减，尽管适生区存在一定的扩张，但扩张面积低于丧失面积，表明光核桃的分布受气候变化的影响较大，尤其在SSP585气候背景下，温室气体排放浓度达到最大[17,34]，此时水热条件相较当前改变程度较大，光核桃分布受气候变化影响也最为严重。光核桃适生区空间分布格局的变化分析表明：随着气候变暖，光核桃适生空间有向西南迁移的趋势。这与温带树种适生分布在气候变暖下往高海拔区迁移的趋势相符。因此，光核桃应采取就地保护与开发策略，在当前及未来环境适宜度均无显著变化的区域设立保护地，以减少全球气候变暖影响，同时也可避免人类活动对光核桃资源的进一步破坏。

3.4 气候变暖对光核桃生态位的影响

通过将光核桃在当前气候情景和未来气候情景的生态位变化进行比较，当前与未来光核桃生态位重叠程度随气候变化剧烈程度增加而降低。本研究中，温度因子是造成光核桃生态位迁移的主要影响因子，这与光核桃的适生区变化主要受温度制约且与降水关系较弱的特征相一致[35]。光核桃在SSP585气候模式生态位变化最为剧烈，生态位重叠率最低，此时光核桃将向更高海拔和更高纬度地区进行迁移，以规避气候变化对其造成的不利影响[36–37]。在未来气候变化中，光核桃的生态位变化会不可避免的挤占其他更高海拔植物的生态位，其原有生态位将被其他低海拔地区物种侵占，当地原有生态系统结构会遭受进一步破坏[33,38]。同时，如果未来气候变暖进一步加剧，光核桃生态位同当前相比将发生完全分离，由于受海拔纵向空间的限制，青藏高原地区光核桃存在较大灭绝风险。

4 结 论

本研究对MaxEnt模型默认参数进行优化，优化后模型的训练遗漏率较低，复杂度低，预测与实际结果一致，准确可靠。当前我国光核桃的适生区主要分布于我国西南地区青藏高原南侧及横断山脉等高海拔地区。在全球气候变化背景下，光核桃未来时期的适生区面积逐渐减小，且新增适生区大多出现在当前适生区的北部海拔相对较高的地区，而当前适生区的南部及北部边缘区局部受气候变化影响较大的地区转为非适生区。同时，对比未来不同气候情景时光核桃生态位变化，发现随着全球气候变暖程度加剧光核桃生态位也随之逐渐迁移。虽然气候变化将对光核桃生长分布造成一定影响，但未来各时期光核桃主要分布区并未出现较大尺度的迁移，因此应对其进行长期连续监测，进一步分析气候变化对光核桃生理的影响，并根据当前光核桃分布情况对种质资源进行就地保护。

参 考 文 献

［1］ Ochieng J, Krimi L, Mathenge M. Effects of climate variability

and change on agricultural production: the case of small scale farmers in Kenya[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2016, 77: 71−78.

[2] 孙颖, 秦大河, 刘洪滨. IPCC 第五次评估报告不确定性处理方法的介绍 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 150−153.
Sun Y, Qin D H, Liu H B. Introduction to treatment of uncertainties for IPCC fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitions de Mutatione Climatis, 2012, 8(2): 150−153.

[3] Trindade W C F, Santos M H, Artoni R F. Climate change shifts the distribution of vegetation types in South Brazilian hotspots[J]. Regional Environmental Change, 2020, 20(3): 90.

[4] NASA. NOAA data show 2016 warmest year on record [EB/OL]. (2017−01−18)[2023−1−12]. https://www.giss.nasa.gov/research/news/20170118.html.

[5] Chen C, Hill J K, Ohlemuller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. Science, 2011, 333: 1024−1026.

[6] Gibson L, Lee T M, Koh L P, et al. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity[J]. Nature, 2011, 478: 378−381.

[7] Dieleman C M, Branfireun B A, McLaughlin J W, et al. Climate change drives a shift in peat land ecosystem plant community: implications for ecosystem function and stability[J]. Global Change Biology, 2015, 21(1): 388−395.

[8] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity[J]. Ecology Letters, 2012, 15(4): 365−377.

[9] 王爱君, 路东晔, 张国盛, 等. 基于 MaxEnt 模拟欧亚大陆气候变化下叉子圆柏的潜在分布 [J]. 林业科学, 2021, 57(8): 43−55.
Wang A J, Lu D Y, Zhang G S, et al. Potential distribution of *Juniperus sabina* under climate change in Eurasia Continent based on MaxEnt model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(8): 43−55.

[10] Bertrand R, Perez V, Gegout J C. Disregarding the edaphic dimension in species distribution modelsleads to the omission of crucial spatial information under climate change: the case of *Quercus pubescens* in France[J]. Global Change Biology, 2012, 18(8): 2648−2660.

[11] Kumar S, Stohlgren T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia[J]. Journal of Ecology and the Natural Environment, 2009, 1(4): 94−98.

[12] Wang Y H, Jiang W M, Comes H P, et al. Molecular phylogeography and ecological niche modelling of a widespread herbaceous climber, *Tetrastigma hemsleyanum* (Vitaceae): insights into Plio-Pleistocene range dynamics of evergreen forest in subtropical China[J]. New Phytologist, 2015, 206(2): 852−867.

[13] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, et al. Effects of sample size on the performance of species distribution models[J]. Diversity and Distributions, 2008, 14(5): 763−773.

[14] Booth T H, Nix H A, Busby J R, et al. Bioclim: the first species distribution modeling package, itsearly application and relevance to most current MaxEnt studies[J]. Diversity and Distributions, 2014(20): 1−9.

[15] 刘丽, 孟凡娟. 西藏光核桃果实的品质分析 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(35): 13740−13741, 13743.
Liu L, Meng F J. Fruit quality analysis of *Amygalus mira* in Tibet[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2013, 41(35): 13740−13741, 13743.

[16] 钟政昌. 西藏林芝地区光核桃资源生态学研究 [D]. 西藏: 西藏大学, 2008.
Zhong Z C. Studies on resourse ecology of *Prunus mira* Koehne in Tibet Linzhi[D]. Xizang: Tibet University, 2008.

[17] 翁宇威, 蔡闻佳, 王灿. 共享社会经济路径 (SSPs) 的应用与展望 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 215−222.
Weng Y W, Cai W J, Wang C. The application and future directions of the shared socioeconomic pathways (SSPs)[J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 215−222.

[18] 张天蛟, 刘刚. 提高生态位模型时间转移能力的方法研究 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 98−105.
Zhang T J, Liu G. Study of methods to improve the temporal transferability of niche model[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(2): 98−105.

[19] Ye X Z, Zhao G H, Zhang M Z, et al. Distribution pattern of endangered plant *Semiliquidambar cathayensis* (Hamamelidaceae) in response to climate change after the last interglacial period[J]. Forests, 2020, 11(4): 434.

[20] Fand B B, Kumar M, Kamble A K. Predicting the potential geographic distribution of cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* in India based on MAXENT ecological niche model[J]. Journal of Environmental Biology, 2014, 35(5): 973−982.

[21] Freitas G H S, Costa L M, Silva P H V B P, et al. Spatial ecology and conservation of the microendemic ovenbird Cipo Cinclodes (*Cinclodes espinhacensis*) from the Brazilian highlands[J]. Journal of Field Ornithology, 2019, 80(2): 128−142.

[22] 李 安, 李良涛, 高萌萌, 等. 基于 MaxEnt 模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测 [J]. 农学学报, 2020, 10(1): 60−67, 76.
Li A, Li L T, Gao M M, et al. Distribution prediction of invasive species *Flaveria bidentis* in China: based on Maxent model and climate change scenario[J]. Journal of Agriculture, 2020, 10(1): 60−67, 76.

[23] Jiang X L, An M, Zheng S S, et al. Geographical isolation and environmental heterogeneity contribute to the spatial genetic patterns of *Quercus kerrii* (Fagaceae)[J]. Heredity, 2021, 120: 219−233.

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

[25] 赵光华, 樊保国. 末次间冰期以来濒危植物藤枣适生区空间迁移预测 [J]. 西南农业学报, 2021, 34(1): 174−182, 229.
Zhao G H, Fan B G. Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Eleutharrhena macrocarpa* (Diels) Forman since last inter glacial[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(1): 174−182, 229.

[26] 屈振江, 周广胜. 中国富士苹果种植气候适宜区的年代际变化 [J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7551−7561.
Qu Z J, Zhou G S. Dynamics of decadal changes in the distribution of cultivation regions with climate suitable for the Fuji apple in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7551−7561.

[27] 叶学敏, 陈伏生, 孙荣喜, 等. 基于 MaxEnt 模型的南酸枣潜在适生区预测 [J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(3): 440−446.
Ye X M, Chen F S, Sun R X, et al. Prediction of potential suitable distribution areas for *Choerospondias axillaris* besed on Maxent model[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(3): 440−446.

[28] Rong Z L, Zhao C Y, Liu J J, et al. Modeling the effect of climate change on the potential distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia* Kom.) in Qilian Mountains[J]. Forests, 2019, 10(1): 62.

[29] 周建涛, 钟永模, 王天云, 等. 川西南光核桃类型及桃的起源 [M]//张上隆, 陈昆松. 园艺学进展. 北京: 中国农业出版社. 1994: 74−77.
Zhou J T, Zhong Y M, Wang T Y, et al. Some kinds of *Prunus mira* in Sichuan Province and origin of *P. persica*[M]//Zhang S L, Chen K S. Advances in horticulture. Beijing: China Agriculture Press, 1994: 74−77.

[30] Zhou C P, Bai T, Wang Y, et al. Morpholoical and enzymatic responses to waterlogging in three *Prunus* species[J]. Scientia Horticulturae, 2017(221): 62−67.

[31] 次仁央金, 吴尧, 陈阜, 等. 气候变暖对西藏林芝地区作物生产的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 33−42.
Testing Y J, Wu Y, Chen F, et al. Impact of climate warming on corp production in Nyching, Tibet[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(8): 33−42.

[32] 冉光辉, 贺黔阳, 樊时红, 等. 林芝地区降水农业气候资源分析 [J]. 农业与技术, 2013, 33(1): 143−144, 167.
Ran G H, He Q Y, Fan S H, et al. Agroclimatic resource analysis of precipitation in Linzhi region[J]. Agriculture and Technology, 2013, 33(1): 143−144, 167.

[33] 童国榜, 张俊牌, 范淑贤. 中国第四纪孢粉植物群的分布 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1992(3): 45−56.
Tong G B, Zhang J P, Fan S X. Distribution of Quaternary pollinator flora in China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1992(3): 45−56.

[34] Sun C, Zuo J, Shi X, et al. Diverse inter-annual variations of winter siberian high and link with eurasian snow in observation and bcc-csm2-mr coupled model simulation[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 761311.

[35] Zhang X W , Liu X H, Zhang Q L, et al. Species-specific tree growth and intrinsic water-use efficiency of Dahurian larch (*Larix gmelinii*) and Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) growing in a boreal permafrost region of the Greater Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 145−155.

[36] Davis M B, Shaw R G. Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change[J]. Science, 2001, 292: 673−679.

[37] Sendall K M, Reich P B, Zhao C M, et al. Acclimation of photosynthetic temperature optima of temperate and boreal tree species in response to experimental forest warming[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1342−1357.

[38] 郑卓, 黄康有, 邓辊, 等. 冲绳海槽 200ka 的孢粉记录及冰期–间冰期旋回古环境重建 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 43(8): 1231−1248.
Zheng Z, Huang K Y, Deng Y, et al. A ~ 200 ka pollen record from Okinawa trough: paleoenvironment reconstruction of glacial-interglacial cycles[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 43(8): 1231−1248.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 孟 平）