网络出版时间:2025-12-05 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.06.015

# 吉林省野山参对未来极端气候变化的响应

王智宇[1,2,3],范婷婷[4],李楠[5],张婷婷[6],王佳艳[3,6],黄晓楠[1],陈丽娟[2],袁福香[3,7]

(1 通化市气象局,吉林 通化 134001;2 阿勒泰地区气象局,新疆 阿勒泰 654301;3 人参气象服务中心,吉林 长春 130062;
4 大安市气象局,吉林 大安 131300;5 长白山气象局,吉林 长白山 133613;6 集安市气象局,吉林 集安 134200;
7 吉林省气象科学研究所,吉林 长春 130062)

[摘 要] 【目的】利用物种分布模型系统探讨吉林省野山参的生境适宜性变化,揭示未来气候变化情景下野山参栖息地的迁移趋势和潜在威胁。【方法】通过野外调查并利用GBIF数据库获取野山参的物种分布数据,通过WordClim获取当前及未来不同气候情景下的生物气候数据,利用Biomdo2模型建模,对吉林野山参当前、未来潜在适生区进行预测,进一步对其空间格局变化、质心转移、响应曲线、生态位动态进行分析。【结果】吉林野山参的高适生区主要集中在长白山及其周边的山地,且与等温性、降水量和降水量变异系数等关键环境因子密切相关。在当前气候条件下,高适生区覆盖面积为2.34万 $km^2$,但随着气候情境转向更为极端的SSP245及SSP585情景,适宜生境面积显著下降,2种气候情境下野山参的高适生区面积分别下降至2.00万和1.93万 $km^2$。多元环境相似度面(MESS)分析显示,在极端情境下,环境相似度值急剧下降,物种面临更大范围的环境不适区域。生态位重叠量化分析进一步揭示,气候变化导致野山参栖息地碎片化,物种生态位的重叠度逐渐降低,尤其在SSP585情景下,生态位重叠度指数(Schoener's *D*)值骤降至0.39,表明物种适宜生境的持续性显著受限。【结论】随着未来气候变化加剧,吉林野山参的生存能力及其栖息地稳定性将面临严峻考验。未来保护工作应注重栖息地修复、生态连接与适应性管理,以应对气候变化带来的挑战,保障野山参的长期生存及生态功能的维持。

[关键词] 野山参;气候变化;生态位变化;物种分布模型;吉林省

[中图分类号] S567.51;S162.5+4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)06-0144-12

# Response of *Panax ginseng* in Jilin Province to future extreme climate change

WANG Zhiyu[1,2,3], FAN Tingting[4], LI Nan[5], ZHANG Tingting[6], WANG Jiayan[3,6], HUANG Xiaonan[1], CHEN Lijuan[2], YUAN Fuxiang[3,7]

(1 *Tonghua Meteorological Bureau, Tonghua, Jilin* 134001, *China*; 2 *Altai Meteorological Bureau, Altai, Xinjiang* 654301, *China*; 3 *Ginseng Meteorological Service Center, Changchun, Jilin* 130062, *China*; 4 *Da'an Meteorological Bureau, Da'an, Jilin* 131300, *China*; 5 *Changbai Mountain Meteorological Bureau, Changbai Mountain, Jilin* 133613, *China*; 6 *Ji'an Meteorological Bureau, Ji'an, Jilin* 134200, *China*; 7 *Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun, Jilin* 130062, *China*)

**Abstract**: 【Objective】 This research aims to systematically assess changes in habitat suitability for *Panax ginseng* in Jilin Province by using species distribution models, to reveal migration trends and potential threats to *P. ginseng* habitats under future climate scenarios. 【Method】 Occurrence records of *P. ginseng* were collected

[收稿日期] 2025-04-25 [修回日期] 2025-06-23

[基金项目] 中国气象局创新发展专项(CXFZ2025J158);吉林省气象局技术发展专项(202430);吉林省气象标准执行专项(QX/BZZX-202409)

[作者简介] 王智宇(1981—),男,吉林磐石人,高级工程师,硕士,主要从事天气预报及长白山人参、葡萄等特色农业气象服务技术研究。E-mail:s_shmily@126.com

[通信作者] 王佳艳(1985—),女,吉林集安人,高级工程师,主要从事长白山人参、葡萄等特色农业气象服务技术研究。E-mail:187131276@qq.com

袁福香(1969—),女,吉林桦甸人,正高级工程师,主要从事人参、葡萄等应用气象服务技术研究。E-mail:yfx1998@126.com

from field surveys and GBIF database, and current and future bioclimatic variables were obtained from WorldClim. The Biomod2 framework was used to predict the current and future potential suitable habitats for *P. ginseng* in Jilin. The spatial pattern changes, centroid shifts, response curves, and niche dynamics, including multivariate environmental similarity surface (MESS) analysis were then quantified.【Result】Highly suitable habitats for *P. ginseng* are mainly distributed in the Changbai Mountains and the adjacent uplands, which is tightly associated with key environmental factors such as isothermality, total precipitation, and precipitation seasonality. Under the current climate condition, the area of highly suitable habitat is 23 400 km$^2$. Under progressively warmer scenarios, however, this area declines markedly to 20 000 km$^2$ (under SSP245) and 19 300 km$^2$ (under SSP585). MESS analysis indicates that the environmental similarity is sharply decreased and the environmentally unsuitable area is expanded under the extreme scenario. Niche overlap analyses further indicate an increase in habitat fragmentation and a gradual reduction in *P. ginseng*'s niche stability. Under SSP585 scenario, Schoener's *D* index drops to 0.39, indicating that the continuity of suitable habitats for the species is significantly constrained.【Conclusion】Intensifying climate change is projected to pose substantial challenges to the viability and habitat stability of *P. ginseng* in Jilin Province. Future conservation should prioritize habitat restoration, maintenance of ecological connectivity, and adaptive management to buffer climate risks and safeguard the long-term survival and ecological functions of *P. ginseng*.

**Key words**: *Panax ginseng*; climate change; niche variation; species distribution model; Jilin Province

地球正经历第6次大规模物种灭绝，主要由栖息地退化与丧失引起的栖息地破碎化所驱动，其中气候变化是一个关键因素[1-3]。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的报告，2011－2020年全球平均地表温度相较于工业化前上升了1.1 ℃[4]，这一温度升高与人类活动引起的温室气体排放量增加密切相关，从而加剧了全球变暖。全球变暖与其他环境压力因素的叠加效应显著影响了陆地生态系统，导致其结构和功能发生改变，并引起了物种栖息地和分布范围的变化[5-6]。栖息地的破碎化进一步削弱了物种之间的相互作用，增加了物种的脆弱性，并加剧了大规模灭绝现象[7-9]。

人参（*Panax ginseng* C. A. Mey）属于五加科（Araliaceae），其起源可追溯至约六千万年前的新生代第三纪，曾广泛分布并繁荣一时[10]。作为一种生长于我国东北与朝鲜半岛高纬度寒温带地区的珍贵阴生药用植物，人参喜生长在凉爽湿润的林下山地环境中。研究指出，*Panax*属植物总体分布在高纬度寒温带区，资源有限且易受气候扰动影响[11]。人参对环境变化极为敏感，较低的冬季气温有利于人参根部皂苷类活性成分的积累，而其整体生态耐受性较弱，因此人参的分布范围主要受气候因子限制。

近年来，学者们利用生态位模型系统研究了气候变化对野山参潜在分布和生存能力的影响。赵泽芳等[12]利用10种物种分布模型对中国东北地区人参当前潜在适生区进行模拟，并预测了2050年和2070年不同IPCC排放情景下人参适生区分布的变化。结果显示，目前研究区约10.4%的区域为适宜生境，主要分布于长白山和小兴安岭东南部的森林山区，而未来各种情景下人参适宜生境范围将明显缩小。近年来，随着气候变化和过度采挖，野山参数量显著减少，已于2021年被列入《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》[13]。

目前，Biomod2模型已广泛应用于濒危物种分布预测与栖息地适宜性评估[14]，但有关野山参的相关研究还比较鲜见。为此，本研究采用Biomod2对吉林省野山参的适生区进行预测，并分析气候、地形、土壤等环境因素对其生境适宜性的影响，以期为吉林省野山参栖息地保护与可持续经营管理提供理论支持与参考依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　物种分布数据

野山参的分布数据来自全球生物多样性信息服务中心（http://www.gbif.org/）、中国植物标本馆（http://www.cvh.ac.cn）、国际农业和生物科学中心（https://www.cabi.org/）以及实地调查结果，得到吉林野山参种群分布点如图1所示。使用ENMtools优化分布数据，使其与环境变量的分辨率相匹配[15]。为减少空间自相关的影响，每个0.5 km×0.5 km网格中只保留1个分布点数据，因为未处理的空间自相关性会造成数据点聚集，导致结果偏

差。经过数据筛选的分布点为本研究的预测建模提供了支持,确保了物种分布点与环境因素之间的强相关性,从而保证分析结果的可靠性。

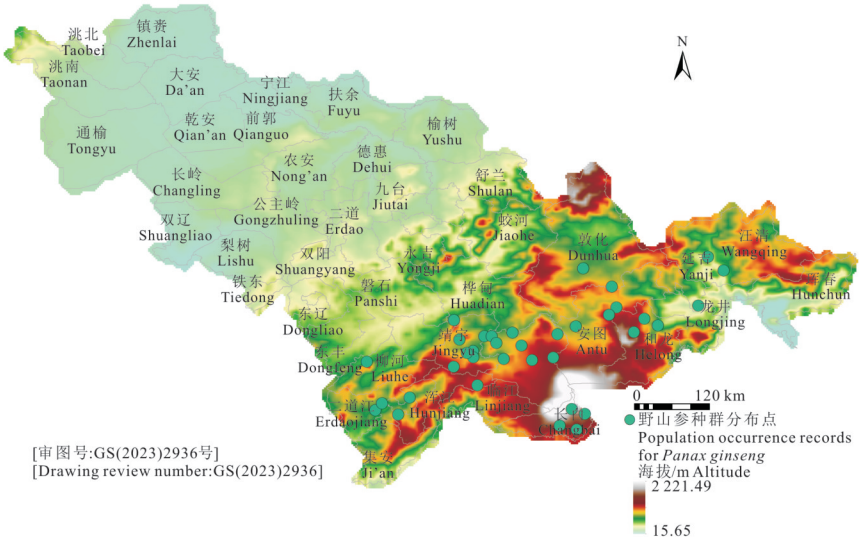



图 1 吉林野山参种群分布点

Fig. 1 *Panax ginseng* population distribution points in Jilin

### 1.2 气候数据来源及预处理

研究气候数据来源于 WorldClim 数据库(https://worldclim.org/),包括当前(1970—2000年)和未来(2050s、2090s)气候数据。为全面评估不同社会经济发展路径对野山参适生区格局的潜在影响,本研究选取来自 CMIP6 的 3 种典型共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs):低排放情景 SSP126、中等排放情景 SSP245 和高排放情景 SSP585,并设置 2 个未来时间节点(2050s 和 2090s),以捕捉不同时期的气候变化效应。这些情景可以代表从可持续发展到高排放发展路径下的气候变化率,具有广泛代表性和政策指导意义[16]。为减少单一广义环流模型(general circulation models, GCMs)预测的不确定性[17],本研究对 ACCESS-CM2、BCC-CSM2-MR 和 CMCC-ESM2 共 3 个模型的预测结果进行了加权平均[18-19]。

研究共选取了 19 个反映温度和降水时空变化特征的生物气候变量(表 1)。为避免环境变量间的多重共线性[20],本研究通过相关性筛选和方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检验,剔除相关性大于 0.8 且 VIF 值大于 10 的变量,并结合生态学意义与主成分分析(principal component analysis, PCA)结果,最终保留了对野山参分布具有主导影响的 4 个环境变量[21],即平均温度日较差、等温性、最干月降水量和降水量变异系数。

**表 1 野山参适生区生物气候变量**

Table 1 Bioclimatic variables for the suitable habitat of wild *Panax ginseng*

| 变量 Variables | 变量描述 Variables description | 单位 Unit | 指标意义 Significance of variables |
|---|---|---|---|
| Bio1 | 年均温 Annual mean temperature | ℃ | 反映平均气温及其变异幅度 Reflects mean temperature and its variability |
| **Bio2** | **平均温度日较差 Mean diurnal range** | ℃ | 反映温差特点 Reflects diurnal temperature range characteristics |
| **Bio3** | **等温性 Isothermality** | % | 反映温差特点 Reflects diurnal temperature range characteristics |
| Bio4 | 温度季节性变化 Temperature seasonality | | 反映平均温度及其变异温度 Reflects mean temperature and its variability |
| Bio5 | 最热月最高温度 Max temperature of warmest month | ℃ | 反映极端温度影响 Reflects the impact of extreme temperature events |
| Bio6 | 最冷月最低温度 Min temperature of coldest month | ℃ | 反映极端温度影响 Reflects the impact of extreme temperature events |
| Bio7 | 气温年较差 Temperature annual range | ℃ | 反映温差特点 Reflects diurnal temperature range characteristics |

表 1（续）　Table 1(continued)

| 变量<br>Variables | 变量描述<br>Variables description | 单位<br>Unit | 指标意义<br>Significance of variables |
|---|---|---|---|
| Bio8 | 最湿季度平均温度<br>Mean temperature of wettest quarter | ℃ | 反映水热是否同步<br>Reflects the synchrony between water and heat regimes |
| Bio9 | 最干季度平均温度<br>Mean temperature of driest quarter | ℃ | 反映水热是否同步<br>Reflects the synchrony between water and heat regimes |
| Bio10 | 最暖季度平均温度<br>Mean temperature of warmest quarter | ℃ | 反映极端温度影响<br>Reflects the impact of extreme temperature events |
| Bio11 | 最冷季度平均温度<br>Mean temperature of coldest quarter | ℃ | 反映极端温度影响<br>Reflects the impact of extreme temperature events |
| Bio12 | 年平均降水量<br>Annual mean precipitation | mm | 反映降水量及季节性分布<br>Reflects precipitation amount and its seasonal distribution |
| Bio13 | 最湿月降水量<br>Precipitation of wettest month | mm | 反映极端水分条件<br>Reflects extreme moisture conditions |
| **Bio14** | **最干月降水量**<br>**Precipitation of driest month** | mm | 反映极端水分条件<br>Reflects extreme moisture conditions |
| **Bio15** | **降水量变异系数**<br>**Precipitation seasonality** | % | 反映降水量及季节性分布<br>Reflects precipitation amount and its seasonal distribution |
| Bio16 | 最湿季度降水量<br>Precipitation of wettest quarter | mm | 反映极端水分条件<br>Reflects extreme moisture conditions |
| Bio17 | 最干季度降水量<br>Precipitation of driest quarter | mm | 反映极端水分条件<br>Reflects extreme moisture conditions |
| Bio18 | 最暖季度降水量<br>Precipitation of warmest quarter | mm | 反映水热是否同步<br>Reflects the synchrony between water and heat regimes |
| Bio19 | 最冷季度降水量<br>Precipitation of coldest quarter | mm | 反映水热是否同步<br>Reflects the synchrony between water and heat regimes |

注：黑体部分为模型使用气候变量即主导环境因子。

Note: Variables in bold represent the climatic predictors used in the model, i. e. , the dominant environmental factors.

### 1.3　模型构建与精度评估

采用 RStudio 环境中的 Biomod2（版本 4.2.4）包进行模型构建与分析，共选取 12 种单一模型，包括人工神经网络（artificial neural network，ANN）、分类树分析（classification tree analysis，CTA）、灵活判别分析（flexible discriminant analysis，FDA）、广义加性模型（generalized additive model，GAM）、梯度提升机（generalized boosted model，GBM）、广义线性模型（generalized linear model，GLM）、多元自适应回归样条（multivariate adaptive regression splines，MARS）、最大熵模型（maximum entropy model，MaxEnt）、最大熵网络模型（maximum entropy network，MaxNet）、随机森林（random forest，RF）、表面分布区室模型（surface range envelope，SRE）和极端梯度提升模型（extreme gradient boosting，XGBoost），所有模型均使用 bm_tuning 函数优化参数[22]。为全面评估各算法的性能并提升预测结果的稳健性，本研究对 12 种单一模型算法进行了 10 次独立重复建模。为确保模型结果的可比性，本研究在所有建模过程中均采用野山参出现点数据，并在此基础上随机生成 2 套伪不存在点数据集（每套含 1 000 个点）。因此，每次建模均由 1 套固定的出现点数据与 2 套不同的伪不存在点数据共同构成，共计完成 12×10×3=360 次模型运行。通过汇总这 360 次模型的适生度输出，计算了每种算法的平均栖息地适宜度，并提取了关键性能指标和环境变量重要性评分。该方法不仅量化了算法选择和伪不存在抽样带来的不确定性，还为后续的集成模型构建提供的更可靠的数据支持，从而显著增强了研究成果的稳定性与可重复性[23]。随后在单模型评估的基础上，本研究采用加权平均法构建集成模型，以验证集上的评价指标作为权重提升模型稳健性。

初步模型评估基于真实技巧统计量（true skill statistic，TSS）值（阈值＞0.8）选择表现最佳的单一模型构建集成模型，用于后续预测。模型精度评估采用真实技巧统计量（TSS）[24]、曲线下面积（area under the receiver operating characteristic curve，AUC）和 KAPPA（kappa coefficient）一致性检验[25]等指标，同时利用受试者操作特征曲线（receiver operating characteristic，ROC）分析模型灵敏度，其中横轴为假阳性率，纵轴为真阳性率[26]。KAPPA 值用于检验模型阈值设定对随机预测准确性的影响[27]。

### 1.4　多元环境相似度面和最不相似变量分析

以当前生物气候变量为基准，采用多元环境相似度面（multivariate environmental similarity surface，MESS）方法，评估野山参在未来气候情景（SSP126、SSP245、SSP585）下的环境变化。于

MESS分析中,用相似度指标$S$值衡量未来气候条件与基准期气候条件之间的匹配程度。首先,针对每个气候变量界定其在基准期内的取值范围(最小值与最大值);随后在未来情景下,对研究区各栅格点提取相应变量值并计算其相对于基准范围的相似度,当变量值位于基准范围内时,$S$值反映其与最近边界的距离,越接近边界相似度越低;当变量值超出基准范围时,赋予负值,表示环境条件已超出现有生态幅度。最后,跨所有气候变量取最小值作为该栅格点的综合$S$值,以给出最保守的相似度判定。据此,$S=100$表示完全一致;$0\leqslant S<100$表示存在不同程度的偏离,且数值越小偏差越大;当$S<0$时则判定为环境异常区域[28]。此外,借助最不相似变量(most dissimilar variable,MoD)分析,可识别各栅格点上与基准期差异最大的气候变量,从而评估不同环境因子对野山参潜在分布变化影响的相对强度与主导性[29]。

为形式化表达$S$值的计算,设定第$v$个气候变量在基准期的取值范围为$[\min_v,\max_v]$,其范围宽度为$R_v=\min_v-\max_v$。对任一点(像元)$p$,记$x_{v,p}$为该点在变量$v$上的取值,则变量层面的相似度记为$\phi_v(x_{v,p})$:

$$\phi_v(x_{v,p})=\begin{cases}\dfrac{200}{R_v}\min(x_{v,p}-\min_v,\max_v-x_{v,p}),\min_v\leqslant x_{v,p}\leqslant\max_v;\\ -\dfrac{100}{R_v}(\min_v-x_{v,p}),x_{v,p}<\min_v;\\ -\dfrac{100}{R_v}(x_{v,p}-\max_v),x_{v,p}>\max_v。\end{cases}\tag{1}$$

其中,区间内的$\phi_v$在区间中点处取100,在边界处取0;区间外按超出幅度线性递减为负值。该像元的综合相似度定义为所有变量相似度的下确界(最小值),即有:

$$S(p)=\min_{v\in V}\phi_v(x_{v,p})。$$

与MESS判定规则一致:$S(p)=100$表示与基准完全一致,$0\leqslant S(p)<100$表示不同程度偏离,且数值越小偏差越大;$S(p)<0$表示超出基准生态幅度,为环境异常区域[28]。

### 1.5 生态位动态量化分析

利用R语言的"ecospat"包分析野山参生态位动态,评估气候变化对其分布的影响。采用生态位重叠度指数(Schoener's $D$)量化不同气候情景下生态位的重叠程度(0表示无重叠,1表示完全重叠)[30-31]。通过ecospat.niche.evol()函数,计算生态位扩展、收缩与稳定区域的比例,明确气候变化对野山参栖息地适宜性的驱动作用[30]。进一步利用ecospat.niche.overlap()和ecospat.plot.niche()函数,进行生态位重叠计算与二维空间可视化分析,直观展示当前与未来气候情景下野山参生态位的变化情况[32]。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型性能评估

为准确预测野山参潜在地理分布,以真实技巧统计量(TSS)值和受试者操作特征曲线(ROC)值为评价指标,对12种单一物种分布模型及其集成模型(EM)进行性能评估,结果(表2)表明,各单一模型在ROC值与TSS值方面表现不一,其中MaxNet、RF、FDA、ANN和XGBoost模型的表现较为突出,其ROC值均在0.89以上,TSS值均达0.74左右,显示出良好的预测稳定性和灵敏度;而MaxEet模型则表现最差,ROC值(0.60)和TSS值(0.40)均明显低于其他模型,预测精度和稳健性不足。集成模型(EM)的ROC值(0.91±0.03)与TSS值(0.76±0.08)均达到最高,与其他单一物种分布模型相比,其稳定性和预测精度均更为突出。综合考虑模型稳定性和预测效果,最终选择集成模型进行后续野山参潜在适生区预测与生态位动态分析,以确保研究结果的可靠性与科学性。

### 2.2 吉林省野山参当前气候情境下适宜性生境的分布

当前气候情景下吉林省野山参适生区预测结果(图2)显示,吉林省整体呈现出明显的区域性差异。吉林省野山参的非适生区面积约为10.06万$km^2$,主要集中在吉林省北部及中西部平原,包括长春市、松原市、白城市等地区,地势相对平缓,气候较干燥,难以满足野山参对温凉湿润环境的需求;低适生区面积约为3.05万$km^2$,多位于向山区过渡的缓丘地带或河谷区域,呈零散或条带状分布,主要位于通化市和白山市外围或延边朝鲜族自治州的局部区域;中适生区面积约为3.27万$km^2$,主要围绕高适生区分布,在通化市(通化县、辉南县、柳河县、集安市)和白山市(抚

松县、靖宇县、长白朝鲜族自治县、临江市）部分县域中占据较高比重；高适生区面积约为 2.34 万 km²，集中于上述两市以及延边州南部的山地森林地带。整体而言，吉林省南部及东南部山地在当前气候情景下为野山参提供了核心适宜生境，显示出该区域在野山参物种保护与可持续利用中的重要性。

**表 2　基于模型预测精度（TSS 值）和灵敏度（ROC 值）的 12 种单一模型与集成模型性能的比较**

Table 2　Performance comparison of twelve single model algorithms and ensemble model based on predictive accuracy (TSS value) and sensitivity (ROC value) of the model

| 模型类型 Model type | TSS 值 TSS values | ROC 值 ROC values | 模型类型 Model type | TSS 值 TSS values | ROC 值 ROC values |
|---|---|---|---|---|---|
| ANN | 0.74±0.09 | 0.89±0.03 | MaxEet | 0.40±0.32 | 0.60±0.16 |
| CTA | 0.66±0.17 | 0.84±0.07 | MaxNet | 0.74±0.10 | 0.90±0.04 |
| FDA | 0.74±0.10 | 0.90±0.05 | RF | 0.74±0.10 | 0.90±0.05 |
| GAM | 0.74±0.09 | 0.89±0.04 | SRE | 0.66±0.09 | 0.85±0.05 |
| GBM | 0.73±0.11 | 0.88±0.04 | XGBoost | 0.74±0.09 | 0.89±0.04 |
| GLM | 0.74±0.09 | 0.89±0.03 | Ensemble model（EM） | 0.76±0.08 | 0.91±0.03 |
| MARS | 0.73±0.12 | 0.88±0.04 | | | |

注：表中数据均为“平均值±SD”。

Note：Data in the table are all “mean±SD”.

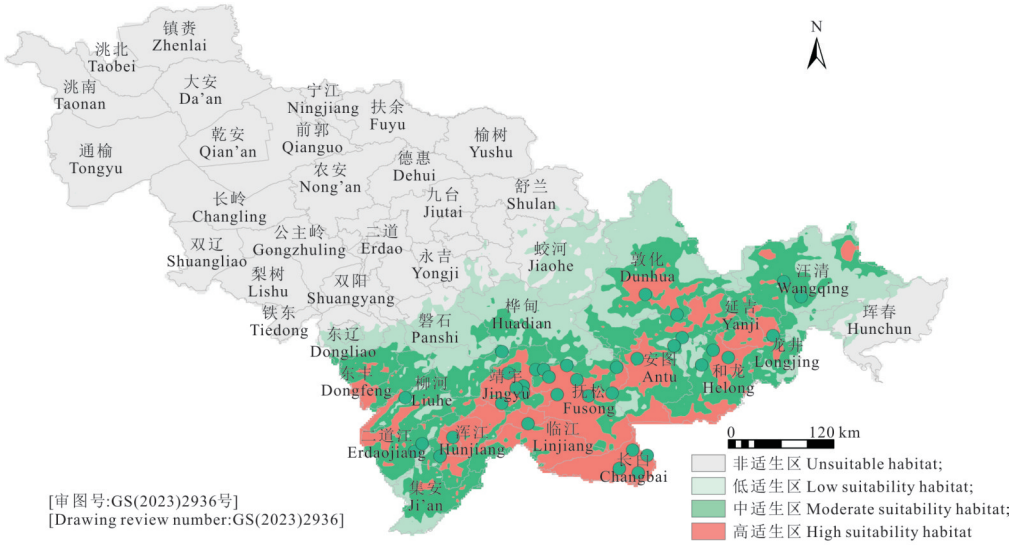



图 2　当前气候情景下吉林野山参的潜在地理分布

Fig. 2　Potential geographic distribution of wild *P. ginseng* in Jilin Province under the current climate scenario

### 2.3　吉林省野山参未来气候情境下的潜在适生区分布

在未来气候情景（2050s_SSP126、2050s_SSP245、2050s_SSP585、2090s_SSP126、2090s_SSP245、2090s_SSP585）下，吉林省野山参适生区的预测结果如图 3 所示。图 3 显示，野山参的生境适宜性随时间递进呈现出显著的空间差异。在不同情景下，其适生区面积和空间分布格局均发生了明显变化，尤其在高排放情景下，潜在适生区的收缩和碎片化更为显著，反映出未来气候变暖对野山参生存空间构成了较大挑战。

由图 3 可知，在 2050s_SSP126 情景下，吉林省野山参的非适生区面积为 9.14 万 km²，主要分布在吉林省的北部与西部地区，涵盖了长春市的双阳区、农安县、松原市及白城市的大片区域；低适生区面积为 3.09 万 km²，分布较为零散，主要集中在省域的中部及山地过渡区域，如通化市、白山市的抚松县、长白朝鲜族自治县；中适生区面积为 3.18 万 km²，分布广泛，主要位于通化市、白山市以及东北部部分县区和延边朝鲜族自治州的局部区域；高适生区面积为 3.30 万 km²，主要集中在吉林省南部的山地区域，其中临江市、抚松县和长白朝鲜族自治县等地的气候条件最适宜野山参的生长。在 2050s_SSP245 情景下，野山参的非适生区面积略有增加，达到 9.21 万 km²，主要分布在吉林省的北部与西部，尤其是白城市、松原市和长春市的部分县

区;低适生区面积增至 3.71 万 km²,涵盖了更广泛的区域,尤其在通化市、白山市及延边州部分地区的适宜性显著下降;中适生区的面积为 3.80 万 km²,主要分布在吉林省的中部地区,但相较于 2050s_SSP126 情景有一定的收缩;高适生区面积缩减至 2.00 万 km²,主要集中在长白山脉一带的局部区域,适宜生境面积显著减少。在 2050s_SSP585 情景下,野山参的非适生区面积大幅增加至 11.08 万 km²,主要分布在吉林省的西部、北部以及东部的平原地带;低适生区面积为 3.07 万 km²,分布较为分散,尤其在通化市、白山市及延边州等地有所扩展;中适生区的面积缩减至 2.64 万 km²,主要分布在吉林省的山地地区,尤其是通化市和延边州的高海拔地区;高适生区面积降至 1.93 万 km²,集中在长白山脉的核心区域,面积较 2050s_SSP245 情景进一步收缩。

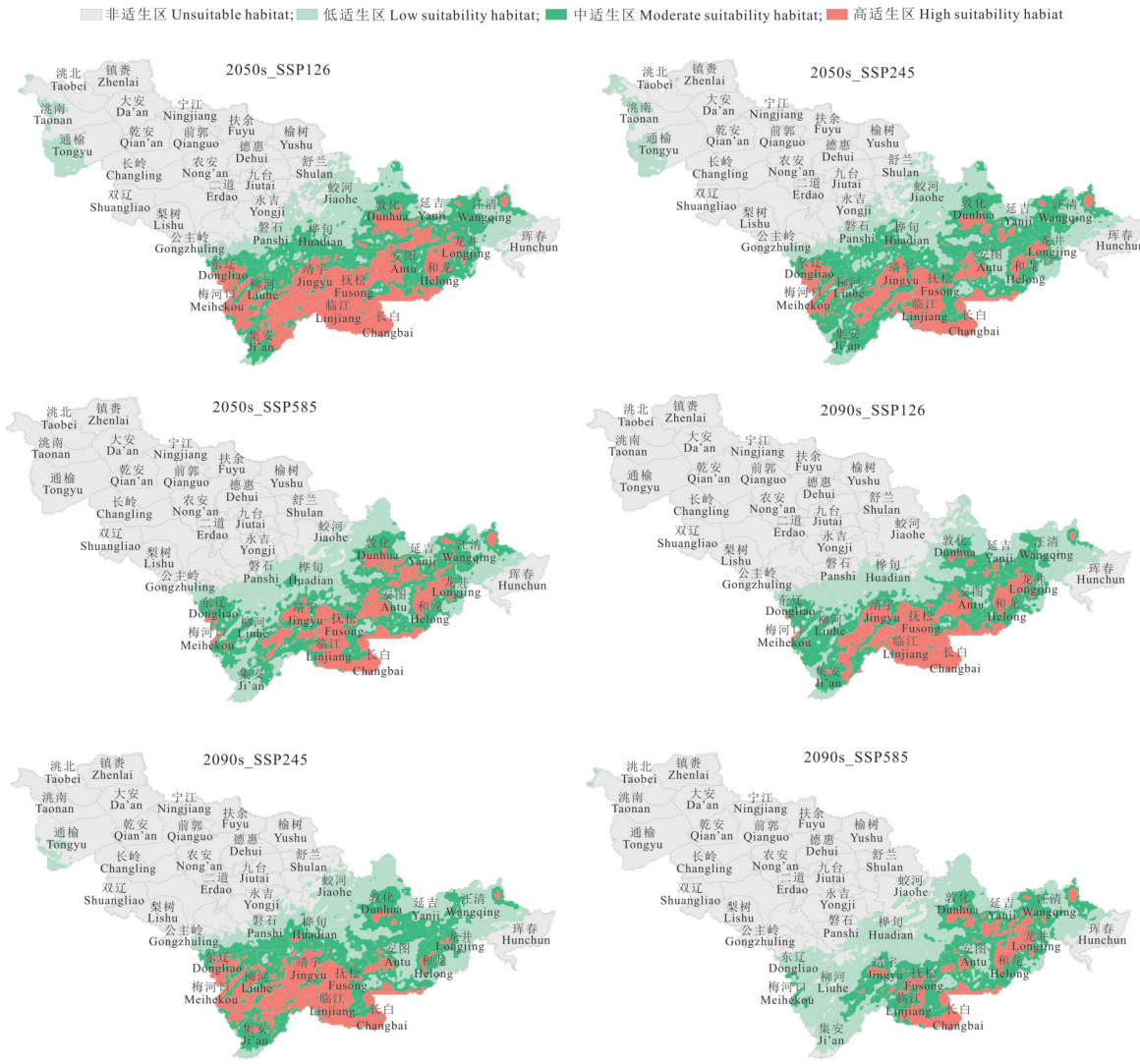



图 3 未来气候情景下吉林野山参的潜在地理分布

Fig. 3 Potential geographic distribution of wild *Panax ginseng* in Jilin Province under future climate scenarios

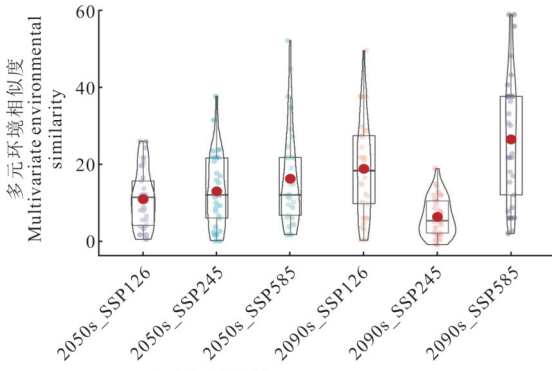
在 2090s_SSP126 情景下,吉林省野山参的非适生区面积较当前气候情景有小幅增加,达到 10.40 万 km²,主要出现在吉林省北部及西部平原地带;低适生区面积为 3.54 万 km²,分布区域略有扩展,特别是在通化市、白山市的山地过渡带及延边州部分地区;中适生区面积为 2.99 万 km²,依旧集中在通化市、白山市及其周边的山区,但分布范围进一步缩小;高适生区面积进一步缩减至 1.80 万 km²,集中在长白山脉地区的高海拔区域,且适宜生境面积显著减少。在 2090s_SSP245 情景下,野山参的非适生区面积为 9.78 万 km²,主要集中在吉林省的北部与西部;低适生区面积为 3.50 万 km²,主要分布在通化市、白山市、延边自治州及其周边区域,范围较为广泛;中适生区面积为 3.25 万 km²,

主要分布在吉林省的中部和东部山地地带，较2050s_SSP126情景略有扩展；高适生区面积恢复至2.19万 km²，集中在长白山一带，适宜生境有所回升。在2090s_SSP585情景下，野山参的非适生区面积增加至10.98万 km²，尤其集中在省域的北部、东部及西部；低适生区面积大幅上升至4.21万 km²，广泛分布于吉林省中部及南部的部分地区；中适生区面积缩小至2.43万 km²，主要集中在长白山脉及其周边区域；高适生区面积降至最小，仅为1.10万 km²，集中在长白山的核心地带，生境适宜性已大幅减少。

综上所述，在未来气候情景下，吉林省野山参的高适生区面积呈逐步缩小趋势，尤其在SSP245与SSP585情景下，适宜生境面积下降最为显著。气候变化将对野山参的栖息地分布产生明显的负面影响，未来野山参的适宜生长区域将向高海拔山区迁移。

### 2.4　多元环境相似度面和最不相似变量分析

为评估未来气候变化背景下野山参生境与当前气候基准之间的匹配程度，基于MESS方法对6种未来气候情景（2050s和2090s时期的SSP126、SSP245、SSP585情景）的相似度进行了分析，结果见图4，其中采用小提琴图形式呈现不同情景下环境相似度值的分布情况。




不同情景下的每个点表示适生区内一个像元的环境相似度，以颜色区分不同情景；黑色边框为箱线图，展示分布范围和四分位数；红色实心圆表示该情景下的平均相似度值。

Each point represents the environmental similarity（*S* value）of a pixel within the suitable habitat，with colors distinguishing climate scenarios. The black-outlined boxplot summarizes the distribution（median，interquartile range，and whiskers），and the solid red circle indicates the scenario-specific mean similarity.

图 4　基于多元环境相似面的未来气候情景下吉林野山参环境相似度分析

Fig. 4　Environmental similarity analysis of wild *Panax ginseng* in Jilin under future climate scenarios based on the MESS

图4结果表明，2050s时期3个情景（SSP126、SSP245、SSP585）下的平均相似度值较为相近，均集中于15～20之间，说明在中近期内，不同排放路径下的气候差异性尚未显著扩大。然而进入2090s时期后，在SSP245和SSP585 2个中高排放情景下的环境相似度波动范围显著增大，尤其在SSP585情景下，相似度值分布极为分散，SSP245情景下部分区域的相似度值降至5以下，提示吉林野山参将面临更严重的气候不适配压力。总体而言，未来情景下多元环境相似度呈现出“长期趋劣、极端路径更剧烈”的变化趋势，表明高排放气候路径对物种生境的扰动风险显著高于低排放路径。

为了进一步识别造成环境相似度下降的关键因子，基于MoD分析提取了各情景下最具贡献的4个主导生物气候因子，即Bio2（平均温度日较差）、Bio3（等温性）、Bio14（最干月降水量）和Bio15（降水量变异系数），其在未来6个情景下的变化情况如图5所示，这些变量在前期通过VIF去共线性与PCA主轴负荷分析中被识别为解释力最强的变量。图5显示，在2050s_SSP126情景下，各主导变量的变异幅度相对平稳（变化率为20%～30%），而随着时间推移与排放情景加剧，bio3的变化幅度显著提升，在2090s_SSP585情景下的变化率接近40%，成为野山参生态位收缩的重要驱动因子。

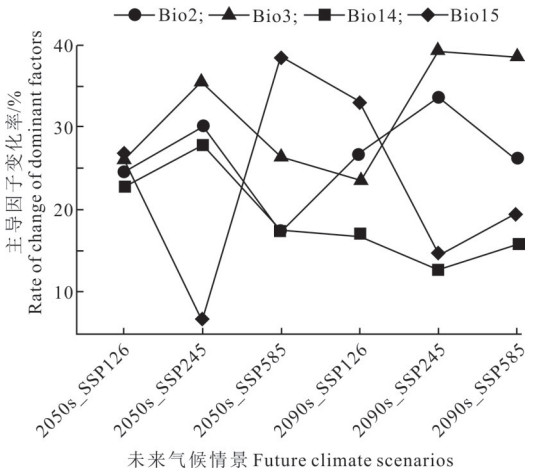



图 5　未来气候情景下吉林野山参主导气候因子的变化

Fig. 5　Changes in dominant climatic factors for wild *Panax ginseng* in Jilin Province under future climate scenarios

综上所述，气候变异强度的增加尤其是在高排放路径下（如SSP585），将显著加剧野山参生境与当前气候条件的不一致性，其中温度与降水的季节性变化为最主要的驱动变量。这一结果为理解野山

参未来生境稳定性的脆弱性提供了数据支撑,也强调了在气候极端情景下制定野山参保育对策的紧迫性。

### 2.5 野山参生境主导因子响应曲线

为深入解析吉林野山参潜在适生区形成的环境机制,进一步分析得到4个主导生物气候因子(Bio2、Bio3、Bio14、Bio15)的响应曲线如图6所示,以评估其对野山参适生概率的影响。响应曲线以生物气候因子取值为横轴、Logistic适生概率为纵轴,能够反映不同气候变量范围内野山参的适宜生境区间。其中,当适生概率超过0.5时,所对应的气候变量取值即被视为该物种的适宜生境范围。

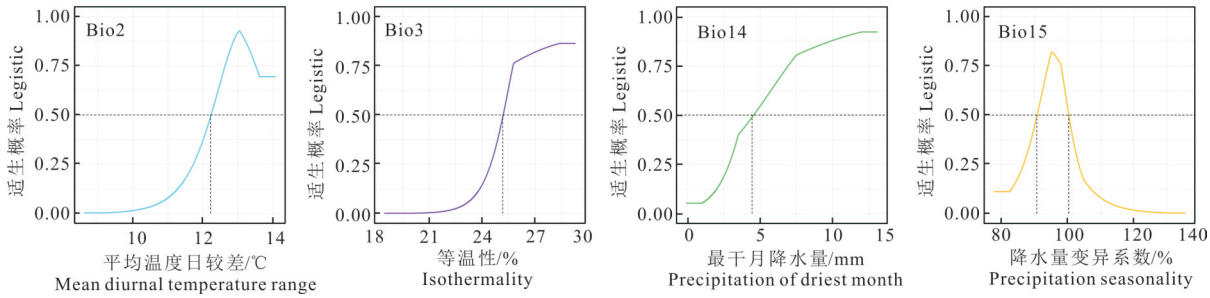



图6 吉林野山参主导生物气候因子与适生概率的关系曲线

Fig. 6 Response curves relating dominant bioclimatic factors to suitability probability for wild *Panax ginseng* in Jilin Province

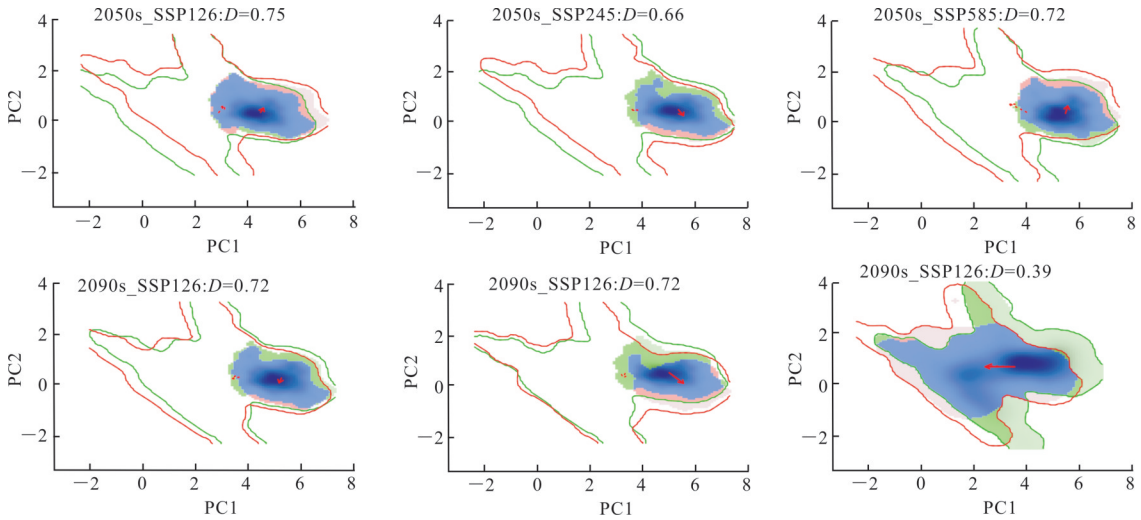
由图6可见,Bio2(平均温度日较差)对野山参生境具有较强解释力,其适生概率随温差升高呈明显上升趋势,在温差为12~14 ℃时达到最优,表明野山参偏好具有一定昼夜温差的冷凉气候环境。适生概率对Bio3(等温性)的响应曲线呈陡峭S型,在等温性为24%~27%时出现快速跃升并趋于平稳,显示野山参对温度年内变率的容忍范围相对狭窄。适生概率与Bio14(最干月降水量)的关系曲线几乎呈线性正相关趋势,适生概率在最干月降水量为4~12 mm时迅速提升,反映出野山参对干旱月最小降水条件较为敏感,需维持一定的最低降水阈值方能适应生长需求。Bio15(降水量变异系数)的适生概率响应曲线呈钟形,在降水量变异系数为95%~105%时达到峰值,说明野山参在降水分布相对均匀的气候条件下更具生态适应性,极端季节性波动可能会对其种群分布形成限制。

综合来看,吉林野山参对温度相关变量(Bio2、Bio3)表现出较强的响应阈值特性,而对降水变量(Bio14、Bio15)而言,野山参仅在一定范围的降水量及其季节性波动下才表现出较高适生性,超出这一范围时适生度明显下降,表明其对降水强度及其季节性变化存在较为明确的生态耐受阈值。这些关键气候因子的响应特征不仅揭示了野山参的生态位属性,也为其未来适生区预测与气候适应性评估提供了理论基础。

### 2.6 生态位重叠量化

为评估未来气候变化背景下野山参生态位的稳定性与迁移趋势,采用Schoener's *D*对当前与6种未来气候情景下吉林野山参的生态位重叠程度进行了量化分析,并在主成分空间(PC1与PC2)中进行可视化表达,结果如图7所示。图7显示,在2050s_SSP126情景下,*D*值为0.75,生态位重叠度较高,表明气候变动对野山参生态位结构的干扰较小,栖息地适宜性基本保持;而在2050s_SSP245和SSP585情景下,*D*值分别为0.66和0.72,虽然仍维持较高重叠,但主成分空间中出现了生态位质心偏移,反映出生境条件逐渐向高温或降水波动更大的方向演化。

由图7可以看出,进入2090s时期后,在SSP126和SSP245情景中,*D*值仍维持在0.72,与2050s时期相近,但需注意图中生态位轮廓边界出现了更显著的扩张与位移,反映出虽然总体重叠度尚可,但物种生态位在空间结构上已发生了微妙重构。这一现象可归因于长期气候累积效应下环境梯度的边缘偏移,如Bio2和Bio15在此阶段波动幅度虽未极端增强,但已足以引发生态位响应。最为显著的变化出现在2090s_SSP585情景下,此时*D*值骤降至0.39,生态位重叠大幅减少,且未来生态位空间明显偏移至PC轴另一侧,反映出当前生态适应范围将难以满足极端高排放情景下的环境要求。结合前述MoD与响应曲线分析,Bio3(等温性)与Bio15(降水量变异系数)的剧烈变异被视为驱动生态位重构的主要气候因子。这种生态位结构的"断裂性"演化表明,吉林野山参在未来高排放情景中可能面临栖息地生态位的崩解,适生区重建的可持续性极为有限。




紫色热区表示当前生态位密度，绿色与红色轮廓线分别代表未来与当前气候下的生态位边界，重叠区域越多，表示物种生态位越稳定。红色箭头表示生态位质心的转移方向，*D*值用于衡量当前与未来生态位的相似度（0表示无重叠，1表示完全重叠）。

Purple hotspots indicate the current niche density. Green and red contour lines delineate the niche boundaries under future and current climate conditions, respectively; greater overlap denotes higher niche stability. Red arrows show the direction of the niche centroid shift. The *D* value (Schoener's *D*) quantifies similarity between current and future niches, ranging from 0 (no overlap) to 1 (complete overlap).

图 7　未来不同气候情景下吉林野山参生态位差异分析

Fig. 7　Analysis of ecological niche differences of *Panax ginseng* in Jilin Province under future climate scenarios

总体而言，Schoener's *D*值的变化趋势揭示出野山参生态位的重叠度随时间推移和排放强度的升高而逐渐降低，尤其在2090s_SSP585极端情景下，生态位空间转移剧烈，重叠区域大幅收缩，野山参未来的环境适应性和分布稳定性将面临严峻挑战。因此，生态位重叠量化不仅揭示了野山参对气候变化的响应机制，也为未来物种保育和适应性管理提供了理论依据。

## 3　讨　论

本研究表明，吉林省野山参的高适生区主要分布于吉林省南部及东南部山地，尤其集中在长白山区域。这些地区具备较为理想的生态条件，如适中的温度和稳定的降水，为野山参提供了良好的生境基础。然而，随着气候变化加剧，尤其是在SSP245与SSP585情景下，模型预测的高适生区面积显著下降，表明气候变化已开始对野山参的栖息地产生直接威胁，尤其是在温度升高和降水季节性波动加剧的双重影响下，野山参栖息地的稳定性受到了极大挑战[33]。温度升高叠加降水季节性增强导致的气候稳定性丧失，成为制约吉林野山参适生区的主要气候因子。

MESS分析结果进一步揭示了未来气候情景下，吉林省野山参生境面临的适宜性退化问题。在2090s_SSP585情景中，环境相似度值降至最低，表明未来气候条件与当前气候条件之间差异极大，野山参将会出现更大范围的环境不适宜区域。这一结果与现有的气候适应性研究一致，即温度、降水和湿度等气候因子的变化将直接影响野山参的生境适宜性。在这一情景下，野山参的迁移能力、栖息地的连通性以及生态环境的恢复能力，将成为影响其生存与繁衍的关键因素[34]。因此，如何有效地提高栖息地的生态承载力，并采取适当的保护措施以确保物种的生存，将成为未来生态学和保护生物学的重要任务。MoD分析确认，等温性（Bio3）和降水量变异系数（Bio15）的剧烈波动是影响野山参生境稳定性的关键驱动因素。这种波动不仅反映出气候的极端化变化趋势，也意味着野山参对温度和降水稳定性的生态依赖较强。与此相关的研究表明，物种对温度波动的适应性不仅限于短期适应，长期的气候波动可能导致物种的适应性发生不可逆转的变化[35]。

生态位重叠度的下降则进一步体现了这一影响。在2090s_SSP585情景下，Schoener's指数（*D*）骤降至0.39，明显低于其他气候情景，说明野山参生态位空间重叠度急剧减少，适生区碎片化趋势显著。这一趋势也与已有研究中指出的物种生态位压缩现象[36]相一致。在气候变化长期累积效应和不确定性增强的双重作用下，野山参的空间生态稳定性将遭受冲击。气候变化将导致野山参栖息地

的空间分布更加分散,适生区的碎片化程度加剧,这一趋势与现有的生态位模型预测结果[37]相符。

因此,从生态管理角度出发,应重视野山参对气候季节性变化的敏感性。在吉林省内,尤其应优先保护野山参高适生区的完整性与连通性,并通过营建生态走廊等措施提升生境网络的适应能力。同时,对未来可能成为边缘适生区的地区应加强动态监测,以提早识别气候压力区域,实现更具前瞻性的保护响应。

## 4 结论与建议

当前吉林野山参高适生区主要集中在吉林省南部及东南部的山地地带,尤其是长白山脉区域,其局部微气候和地形优势为物种提供了稳定且优越的生境条件。然而,随着气候情景逐步趋向极端,尤其在SSP245和SSP585情景下,吉林野山参高适生区面积显著收缩,低适生区与非适生区扩展,整体适宜性分布呈现出明显向高海拔及向局部集中的趋势。平均温度日较差、等温性以及最干月降水量和降水量变异系数是影响野山参生境适宜性的主要驱动因子,其中温度和降水的极端变化尤为显著,对生境稳定性与物种生态位的维持起到了决定性作用。生态位重叠量化分析结果显示,随着气候变化的加剧,野山参生态位重叠度逐步降低,特别是在极端气候情景下,适宜生境的空间连续性遭到破坏,生境碎片化程度明显增加,这将对物种的基因交流和长期生存构成潜在风险。基于本研究结果,对吉林省野山参的保护提出以下建议:

1)加强现有栖息地保护与修复。针对吉林野山参适宜生境趋于集中且逐渐缩减的现状,建议在长白山脉及其周边区域设立重点保护区,通过严格管控和生态恢复措施,维持和提升生境质量,确保野山参生存环境的稳定。

2)构建生态廊道与连通性管理。由于气候变化导致野山参适宜生境碎片化加剧,建议规划并建设生态走廊,促进各适生区之间的连通性,增强野山参种群间的基因交流与适应能力,从而提高整体生态系统的韧性。

3)开展动态监测与长期预警。建立基于遥感与野外调查相结合的长期生态监测体系,实时跟踪气候变化对野山参分布及生境适宜性的影响,及时发布预警信息,为野山参的保护管理提供科学依据。

4)推动适应性管理与综合调控。面对未来气候情景的不确定性,应结合区域气候变化趋势和生态系统特征,制定灵活的适应性管理策略,如加强野山参种质资源的保存、开展迁地保护试验及人工栽培研究,从多方面入手构建吉林野山参可持续发展的保障体系。

## [参考文献]


[1] BARNOSKY A D, MATZKE N, TOMIYA S, et al. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? [J]. Nature, 2011, 471(7336): 51-57.

[2] CEBALLOS G, EHRLICH P R, DIRZO R. Biological annihilation *via* the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(30): E6089.

[3] COWIE R H, BOUCHET P, FONTAINE B. The sixth Mass Extinction: fact, fiction or speculation? [J]. Biological Reviews, 2022, 97(2): 640-663.

[4] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[5] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. Nature, 2003, 421(6918): 57-60.

[6] 叶利奇,张伟皓,叶兴状,等. 基于MaxEnt模型的珙桐潜在分布预测及其重要影响因子分析[J]. 四川农业大学学报,2021,39(5):604-612.
YE L Q, ZHANG W H, YE X Z, et al. Prediction of potential distribution area and analysis of dominant environmental variables of *Davidia involucrate* based on MaxEnt [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(5): 604-612.

[7] CARVALHO S B, VELO-ANTÓN G, TARROSO P, et al. Spatial conservation prioritization of biodiversity spanning the evolutionary continuum [J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1: 151.

[8] FAHRIG L. Ecological responses to habitat fragmentation per Se [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2017, 48: 1-23.

[9] 吕佳佳. 气候变化对我国主要珍稀濒危物种分布影响及其适应对策研究[D]. 北京:中国环境科学研究院,2009.
LÜ J J. Research on the impacts of climate change on the distribution of China's major rare and endangered species and their adaptation strategies [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2009.

[10] 祖舜华. 论野山参真伪鉴别[J]. 北京中医,2001,20(3):48.
ZU S H. Discussion on distinguish betweren between true and false of wild ginseng [J]. Beijing Journal of Traditional Chinese Medicine, 2001, 20(3): 48.

[11] DU Z, WU J, MENG X, et al. Predicting the global potential distribution of four endangered *Panax* species in middle-and

low-latitude regions of china by the geographic information system for global medicinal plants (GMPGIS)[J]. Molecules, 2017,22(10):1630.

[12] 赵泽芳，卫海燕，郭彦龙，等. 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测[J]. 应用生态学报，2016,27(11):3607-3615.
ZHAO Z F, WEI H Y, GUO Y L, et al. Potential distribution of *Panax ginseng* and its predicted response to climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3607-3615.

[13] 王永吉，王家绪. 保护植物种质资源拯救濒临灭绝的野山参[J]. 东北林业大学学报，1990,18(S3):83-85.
WANG Y J, WANG J X. Protection of plant gene resources to rescue extinction of wild ginseng[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1990, 18(S3): 83-85.

[14] GUO F C, YANG Y R, GAO G Z. Climate change impact on three important species of wild fruit forest ecosystems: assessing habitat loss and climatic niche shift[J]. Forests, 2024, 15(8):1281.

[15] WARREN D L, GLOR R E, TURELLI M. ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models [J]. Ecography, 2010, 33(3): 607-611.

[16] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.

[17] PETERSON A, VIEGLAIS D. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem[J]. BioScience, 2001, 51(5): 363-371.

[18] JIANG D B, TIAN Z P, LANG X M. Reliability of climate models for China through the IPCC third to fifth assessment reports[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(3): 1114-1133.

[19] 赵光华，崔馨月，王智，等. 气候变化背景下我国酸枣潜在适生区预测[J]. 林业科学，2021,57(6):158-168.
ZHAO G H, CUI X Y, WANG Z, et al. Prediction of potential distribution of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in China under context of climate change [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(6):158-168.

[20] EDWARDS J L. Research and societal benefits of the global biodiversity information facility[J]. BioScience, 2004, 54(6): 485-486.

[21] THUILLER W, LAFOURCADE B, ENGLER R, et al. BIOMOD: a platform for ensemble forecasting of species distributions[J]. Ecography, 2009, 32(3): 369-373.

[22] NAIMI B, ARAÚJO M B. Sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling [J]. Ecography, 2016, 39(4): 368-375.

[23] HAO T X, ELITH J, GUILLERA-ARROITA G, et al. A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD[J]. Diversity and Distributions, 2019, 25(5): 839-852.

[24] ALLOUCHE O, TSOAR A, KADMON R. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, Kappa and the True Skill Statistic (TSS)[J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(6): 1223-1232.

[25] BOLLIGER J, KIENAST F, BUGMANN H. Comparing models for tree distributions: concept, structures, and behavior [J]. Ecological Modelling, 2000, 134(1): 89-102.

[26] PETERSON A T, PAPEŞ M, SOBERÓN J. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling[J]. Ecological Modelling, 2008, 213(1): 63-72.

[27] MONSERUD R A, LEEMANS R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic[J]. Ecological Modelling, 1992, 62(4): 275-293.

[28] ELITH J, KEARNEY M, PHILLIPS S. The art of modelling range-shifting species[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1(4): 330-342.

[29] HULME P E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization [J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 46(1): 10-18.

[30] DI COLA V, BROENNIMANN O, PETITPIERRE B, et al. Ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions[J]. Ecography, 2017, 40(6): 774-787.

[31] SILLERO N, ARGAÑA E, MATOS C, et al. Local segregation of realised niches in lizards[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(12): 764.

[32] FENG C J, GUO F C, GAO G Z. Climate as a predictive factor for invasion: unravelling the range dynamics of *Carpomya vesuviana* costa[J]. Insects, 2024, 15(6): 374.

[33] KIRSCHBAUM M U F. Forest growth and species distribution in a changing climate[J]. Tree Physiology, 2000, 20(5/6): 309-322.

[34] OLIVER T H, SMITHERS R J, BAILEY S, et al. A decision framework for considering climate change adaptation in biodiversity conservation planning[J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(6): 1247-1255.

[35] TSHABALALA T, MUTANGA O, ABDEL-RAHMAN E M. Predicting the geographical distribution shift of medicinal plants in South Africa due to climate change[J]. Conservation, 2022, 2(4): 694-708.

[36] SINTAYEHU D W. Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: a systematic review[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2018, 4(9): 225-239.

[37] MARTAY B, BREWER M J, ELSTON D A, et al. Impacts of climate change on national biodiversity population trends [J]. Ecography, 2017, 40(10): 1139-1151.

（责任编辑：温晓平）