

全球气候变暖对极小种群植物扣树生境适宜性的影响

谭显胜^{1,2}, 段仁燕^{1*}, 邹乐¹, 张涵¹, 胡伟¹

(1. 湖南人文科技学院 农业与生物技术学院, 中国湖南 娄底 417000; 2. 农田杂草防控技术与应用协同创新中心, 中国湖南 娄底 417000)

摘要: 极小种群植物扣树(*Ilex kaushue* S. Y. Hu)是分布于中国南方的特有树种, 易受到气候变化的影响。为加强扣树的保护, 有必要研究气候变暖背景下其生境适宜性范围的变化。通过对10种物种分布模型的预测精度进行对比, 选择3种预测性能较好的物种分布模型(GBM、MaxEnt和RF)的平均值来评估气候变暖对扣树生境适宜性的影响。当前气候下扣树适宜生境区的预测结果表明, 扣树的分布较为集中, 最冷月最低温度(bio6)、降雨量季节性变化(bio15)和最干旱月降雨量(bio14)对模型贡献最大, 说明扣树对温度和降水较为敏感。在未来气候情景下, 扣树的生境适宜区呈现向北迁移的趋势, 适宜分布范围存在不同程度的缩小; 预测到2070年, 随着温室气体排放增加, 扣树的适生范围由RCP2.6情景下的92.70%缩小到RCP8.5情景下的51.52%, 特别是在低纬度的海南省, 4种情景的平均适生生境缩减了93.67%。因此, 在制定极小种群植物扣树的保护策略时应考虑气候变暖的影响。

关键词: 扣树; 适宜生境; 气候变暖; 物种分布模型(SDM)

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1007-7847(2023)01-0056-07

Effects of Global Warming on Habitat Suitability of *Ilex kaushue*, a Plant with an Extremely Small Population

TAN Xiansheng^{1,2}, DUAN Renyan^{1*}, ZOU Le¹, ZHANG Han¹, HU Wei¹

(1. College of Agriculture and Biology Technology, Hunan University of Humanities Science and Technology, Loudi 417000, Hunan, China; 2. Collaborative Innovation Center of Farmland Weed Control Technology and Application, Loudi 417000, Hunan, China)

Abstract: *Ilex kaushue*, a tree species with an extremely small population, is uniquely distributed in southern China and is vulnerable to climate change. In order to strengthen the protection of *I. kaushue*, it is necessary to study its habitat suitability range in the background of climate warming. Based on the current bioclimatic data and future climate prediction, 10 species distribution models were used to predict the potential distribution of *I. kaushue*. Among them, 3 species distribution models (GBM, MaxEnt and RF) with good prediction performance were selected out to evaluate the impact of climate warming on the habitat suitability of *I. kaushue*. In the current climate, the distribution range of *I. kaushue* was predicted to be relatively concentrated. The lowest temperature in the coldest month (bio6), the seasonal variation of precipitation (bio15) and the precipitation in the driest month (bio14) contributed the most to the models, indicating that *I. kaushue* should be more sensitive to the temperature and precipitation. Under the future climate conditions, the habitat suitable area of *I. kaushue* would move northward and its habitat suitability range would decrease. The suitable growth range of *I. kaushue* may be reduced from 92.70% in RCP2.6 scenario to 51.52% in RCP8.5

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-10-04; 网络首发时间: 2022-11-24

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30375); 湖南省教育厅自然科学基金项目(20A275); 湖南省科技创新团队项目(201937924); 湖南省科技创新人才计划大学生科技创新创业项目(2021RC1016)

作者简介: 谭显胜(1980—), 男, 湖南涟源人, 博士, 讲师, 主要从事物种分布模拟及计算生态学研究; *通信作者: 段仁燕(1978—), 男, 湖北枣阳人, 博士, 教授, 主要从事生态模拟及生态学研究, Tel: 0738-8326674, E-mail: duanrenyan78@163.com。

scenario in 2070, with increasing emissions of greenhouse gases. Especially in the low-latitude Hainan Province, the average suitable habitat under the 4 scenarios decreased by 93.67%. Therefore, the influence of climate change should be taken into account in protection strategies for plant species with extremely small populations like *I. kaushue*.

Key words: *Ilex kaushue*; suitable habitat; global warming; species distribution model (SDM)

(*Life Science Research*, 2023, 27(1): 056–062)

由联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)编制的第五次评估报告指出,全球正在持续变暖,到 2100 年,地球平均温度将比 1986—2005 年上升 0.3~4.5 °C^[1]。全球气候正以前所未有的速度发生变化,可能对生物多样性甚至整个生态系统的各个层面产生一定影响^[1]。研究表明,气候变化将影响植物(被子植物、裸子植物等)和动物(兽类、鸟类、两栖类、无脊椎动物等)的地理分布^[2]。因气候变化,物种会做出不同反应,如物种适宜生存范围的扩张、转移或缩小等^[3]。郭飞龙等^[4]指出,未来气候变化会导致国家一级保护植物伯乐树(*Bretschneidera sinensis*)的潜在分布生境呈收缩趋势。肖建华等^[5]的研究显示,在未来气候变暖的情境下,珍稀树种闽楠(*Phoebe bournei*)的潜在分布区存在破碎化甚至丧失的风险。张文秀等^[6]的研究证实,未来气候变暖将导致珍稀物种白豆杉(*Pseudotaxus chienii*)的适宜分布区面积大幅减小,该物种往高海拔山地收缩,适宜该物种存活的生境面临考验。

目前,许多不同的方法和工具已被开发出来评价物种的生态需求、生态响应和分布区^[7]。物种分布模型(species distribution model, SDM)是基于物种现有的分布情况与环境气候因子数据之间的关系建立的数学模型。它将物种采样点的信息投射到地理信息空间中,再用概率的形式显示该物种在不同位点出现的可能性^[2-3]。物种分布模型作为生物多样性分布预测的重要研究手段,已得到广泛的应用。在过去二十年中,物种分布模型已成为研究气候变化对物种生境适宜性影响的主要技术之一,它不仅可提供物种生境适宜性方面的有用信息,也有助于发现未来气候情景下适宜物种分布的地理位点和气候条件^[8-9]。目前,应用较多的物种分布模型包括最大熵、随机森林、增强回归树、多元自适应回归、广义线性模型等^[2-3]。

极小种群植物扣树(*Ilex kaushue*),别名苦丁茶,属冬青科(Aquifoliaceae)冬青属(*Ilex*)常绿乔木,主

要分布于湖北、湖南、广东、广西、海南、四川和云南等海拔为 1 000~1 200 m 的密林中^[10]。为了评估气候变化对极小种群植物扣树生境适宜性的影响,本研究通过筛选和排序影响扣树分布的重要气候因子,对比不同物种分布模型的预测精度,选择合适的模型来预测扣树在当前和未来气候中的潜在分布,以期对扣树保护政策的制定提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据

扣树现有的分布主要在中国南方,分布范围为 103°~120°E、18°~30°N。基于野外调查,通过查询已发表的研究论文、标本馆的数据记录和 GBIF 数据库(<http://www.gbif.org/>; 2022-03-18)等,收集整理了扣树的地理分布数据。为减少抽样偏差的影响,在每个 2.5'×2.5'的网格单元(大小为 4.6 km×4.6 km)内随机保留 1 个出现点^[11]。所获得的样本数据符合模型精确预测所需的最小样本数^[12-13]。

1.2 环境变量选择

从 WorldClim version 2.1 (<https://www.worldclim.org/>; 2022-03-22)下载分辨率为 2.5'的 19 个生物气候变量^[14]。具体变量见图 1。为了避免变量间的冗余效应,通过 IBM SPSS Statistics 26 计算 19 个生物气候变量的皮尔逊相关系数(r),从中选择两两间 $|r|$ 值小于 0.70 的变量用于扣树建模^[15]。通过 WorldClim 下载 2050 年和 2070 年的 4 个温室气体场景数据,分别为低浓度排放路径 RCP2.6、中低浓度排放路径 RCP4.5、中高浓度排放路径 RCP6.0、高浓度排放路径 RCP8.5,并将其作为气候变暖的气候数据。

1.3 模型构建

为了对扣树的潜在分布进行预测,构建的模型集成了 10 种常用算法,分别为人工神经网络(artificial neural network, ANN)、分类树分析(classification tree analysis, CTA)、柔性判别分析(flexible discriminant analysis, FDA)、广义可加模型(genera-

lized additive model, GAM)、广义推进模型(generalized boosted model, GBM)、广义线性模型(generalized linear model, GLM)、多元自适应回归(multivariate adaptive regression spline, MARS)、最大熵(maximum entropy, MaxEnt)、随机森林(random forest, RF)和包络模型(surface range envelope, SRE)。从研究区随机选取 1 000 个缺失数据作为扣树的不出位点^[7]。使用交叉验证的方法,通过模型软件包 biomod2 来运行和检测模型。随机选择 80% 的数据(包括出现数据和缺失数据)用于训练模型,剩下的 20% 数据用于模型测试^[7]。

采用真实预测统计(true skill statistic, TSS)和曲线下面积(area under curve, AUC)来评价 10 种物种分布模型的预测性能^[16]。选择 $TSS \geq 0.50$ 和 $AUC \geq 0.70$ 的物种分布模型来预测扣树适宜分布区。采用随机化的方法^[7]评估气候变量在模型运算中的相对贡献,预测扣树在当前和未来气候下的生境适宜性。为了减少单一算法预测时的偏差,对所有选取的模型预测值取相同权重的平均值来进行预测^[7]。为了更好地解释当前和未来气候下的分布变化,选用最大 TSS 值作为阈值^[7],将扣树潜在分布预测结果转换为二值图(适宜或不适宜)。通过比较未来和当前气候条件下扣树的适宜生境,统计扣树适宜分布的减少区、稳定区和增加区的栅格单元数量,以计算适宜分布范围大小的变化。

2 结果与分析

2.1 模型的预测性能和预测变量的贡献

为了从 19 个气候因子中获得与扣树分布紧密相关的环境因子,对各因子间的皮尔逊相关系数进行了计算(图 1),从中选取两两间 r 值小于 0.70 的 7 个变量,分别为:平均气温日较差($^{\circ}\text{C}$), bio2; 气温季节性变动系数, bio4; 最热月最高温度($^{\circ}\text{C}$), bio5; 最冷月最低温度($^{\circ}\text{C}$), bio6; 最湿月降雨量(mm), bio13; 最干旱月降雨量(mm), bio14; 降雨量季节性变化(mm), bio15。采用这 7 个变量对扣树的生境适宜性进行建模。

对比 10 种建模算法的预测性能发现,3 种模型(GBM、MaxEnt 和 RF)的预测性能较高,明显优于其他 7 种模型(图 2)。从气候因子相对贡献值大小上看,最冷月最低温度(bio6)是限制扣树生境适宜性最重要的变量,其贡献值达到了 0.46;其次是降雨量季节性变化(bio15),贡献值为 0.38;再次为最干旱月降雨量(bio14) (图 3)。7 个因子按其贡

献大小排序为:最冷月最低温度(bio6)>降雨量季节性变化(bio15)>最干旱月降雨量(bio14)>最湿月降雨量(bio13)>平均气温日较差(bio2)>气温季节性变动系数(bio4)>最热月最高温度(bio5)。

2.2 当前和未来气候下的生境适宜性

为提高预测结果的准确性,以 3 种模型(GBM、MaxEnt 和 RF)预测结果的平均值作为扣树在当前气候条件下和未来气候变暖环境下的潜在分布范围。在当前气候情况下,扣树的适宜生境主要位于我国的南方地区,包括湖南、广东、广西、海南等省;此外,湖北、云南、四川、江西和福建也有零星分布(图 4)。在未来气候条件下,扣树生境适宜区的预测结果由所采用的代表性浓度路径(representative concentration pathway, RCP)尺度决定。图 5 的结果显示,在 4 种 RCP 尺度下,无论是 2050 年还是 2070 年,扣树的生境范围均存在不同程度的缩小。到 2070 年时,随着 RCP 的温室气体排放情景不断增高,扣树的适生范围由 RCP2.6 时的 92.70% 缩小到 RCP8.5 时的 51.52%,最严重时适生区只剩下目前的一半。

RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 等 4 个情景下扣树在 2050 年和 2070 年的适生生境变化趋势结果见图 6。蓝色区为目前适宜且未来仍可能适宜的栖息地,黄色区是未来新增的适宜生境,黑色区是目前适宜但在未来变得不适宜的生境。由图 5 可知,在 2050 年 RCP8.5 情景下,扣树适生生境为现在的 93.21%。到 2070 年时,在 RCP2.6 的情形下,扣树适生生境降低为现在的 92.70%;在 RCP8.5 的情形下,其适生生境仅为现在的 51.52%。通过对比图 6 中的黄色区域(未来新增的适宜生境)和黑色区域(未来失去的适生生境),模型计算出来的结果证实,黄色区域的平均纬度要高于黑色区域的平均纬度,表明在未来气候条件下,扣树的适宜生境范围总体呈缩小趋势,且整个适生区域呈现往北移的趋势(最高纬度达到了 30.65°)。其中,全球气候变暖导致扣树在低纬度的海南的适生生境下降最大,预测适生生境范围缩小了 74.33% (2050 年 RCP2.6 情景)至 97.80% (2070 年 RCP4.5 情景);到 2070 年,4 种情景下的平均适生生境仅为现在的 6.33% (表 1)。

3 结论与讨论

本研究分析了在当前和未来气候条件下扣树的适宜生境,这为制定扣树切实可行的保护策略

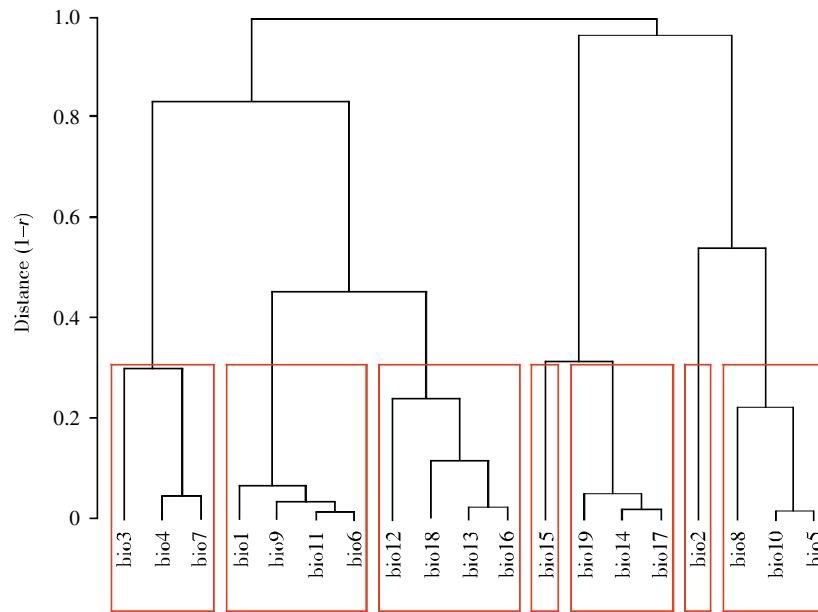


图 1 19 个气候因子的皮尔逊相关系数

bio1: 年均温(°C); bio2: 平均气温日较差(°C); bio3: 等温性(bio2/bio7) (×100); bio4: 气温季节性变动系数(标准差×100); bio5: 最热月最高温度(°C); bio6: 最冷月最低温度(°C); bio7: 温度年变化幅度(bio5-bio6) (°C); bio8: 最湿季平均温度(°C); bio9: 最干季平均温度(°C); bio10: 最暖季节的平均温度(°C); bio11: 最冷季节的平均温度(°C); bio12: 年降雨量(mm); bio13: 最湿月降雨量(mm); bio14: 最干旱月降雨量(mm); bio15: 降雨量季节性变化(mm); bio16: 最潮湿季度降雨量(mm); bio17: 最干燥季度降雨量(mm); bio18: 最热季度降雨量(mm); bio19: 最冷季度降雨量(mm)。

Fig.1 The Pearson correlation coefficient results of 19 climate factors

bio1: Annual mean temperature (°C); bio2: Mean diurnal range (°C); bio3: Isothermality (bio2/bio7) (×100); bio4: Temperature seasonality (standard deviation × 100); bio5: Maximum temperature of warmest month (°C); bio6: Minimum temperature of coldest month (°C); bio7: Annual temperature range (bio5-bio6) (°C); bio8: Mean temperature of wettest quarter (°C); bio9: Mean temperature of driest quarter (°C); bio10: Mean temperature of warmest quarter (°C); bio11: Mean temperature of coldest quarter (°C); bio12: Annual precipitation (mm); bio13: Precipitation of wettest month (mm); bio14: Precipitation of driest month (mm); bio15: Precipitation seasonality (mm); bio16: Precipitation of wettest quarter (mm); bio17: Precipitation of driest quarter (mm); bio18: Precipitation of warmest quarter (mm); bio19: Precipitation of coldest quarter (mm).

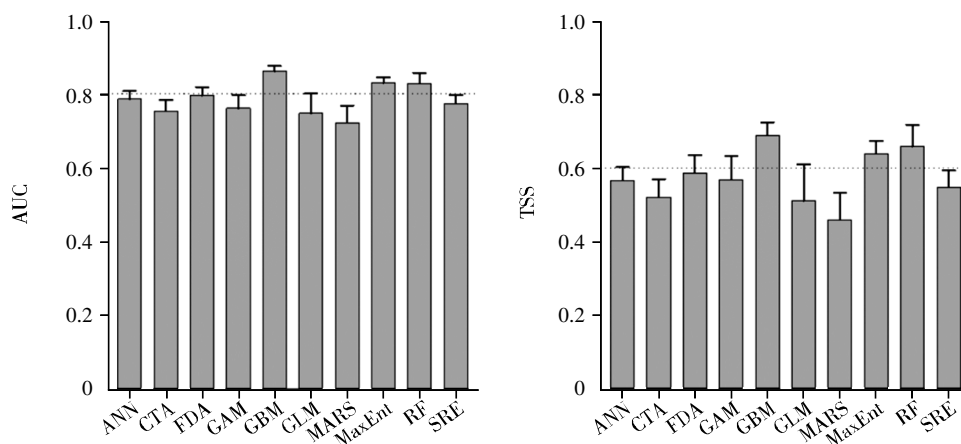


图 2 用于估计扣树生境适宜性的 10 种建模算法的预测能力(基于 AUC 和 TSS)

ANN: 人工神经网络; CTA: 分类树分析; FDA: 柔性判别分析; GAM: 广义可加模型; GBM: 广义推进模型; GLM: 广义线性模型; MARS: 多元自适应回归; MaxEnt: 最大熵; RF: 随机森林; SRE: 包络模型; TSS: 真实预测统计; AUC: 曲线下面积。

Fig.2 The predictive power of 10 modeling algorithms (using AUC and TSS) for estimating the habitat suitability of *I. kaushue*

ANN: Artificial neural network; CTA: Classification tree analysis; FDA: Flexible discriminant analysis; GAM: Generalized additive model; GBM: Generalized boosted model; GLM: Generalized linear model; MARS: Multivariate adaptive regression spline; MaxEnt: Maximum entropy; RF: Random forest; SRE: Surface range envelope; TSS: True skill statistic; AUC: Area under curve.

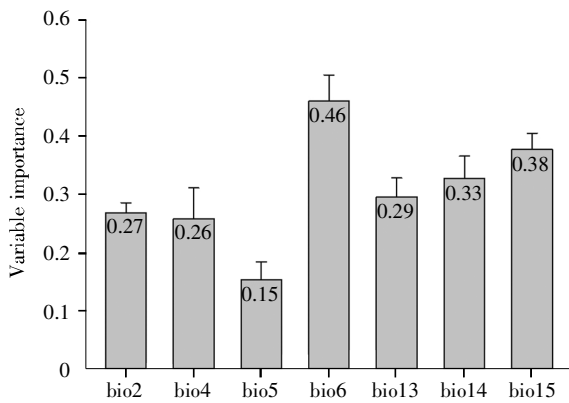


图3 选取的7个气候因子在模型中的相对重要性值

bio2: 平均气温日较差(°C); bio4: 气温季节性变动系数(标准差×100); bio5: 最热月最高温度(°C); bio6: 最冷月最低温度(°C); bio13: 最湿月降雨量(mm); bio14: 最干旱月降雨量(mm); bio15: 降雨量季节性变化(mm)。

Fig.3 The relative important values of 7 selected climate factors in the model

bio2: Mean diurnal range (°C); bio4: Temperature seasonality (standard deviation × 100); bio5: Maximum temperature of warmest month (°C); bio6: Minimum temperature of coldest month (°C); bio13: Precipitation of wettest month (mm); bio14: Precipitation of driest month (mm); bio15: Precipitation seasonality (mm).

提供了重要依据。在当前气候条件下, 扣树适宜生境的中心区域在广东、海南、广西等热带和亚热带地区, 分布相对集中; 但在这些集中分布区, 扣树多呈现出一定的零散分布(图4)。

相关分析证实, 在模型采用的7个气候因子中, 最冷月最低温度、降雨量季节性变化和最干旱月降雨量对扣树分布模型的贡献率均超过了0.3

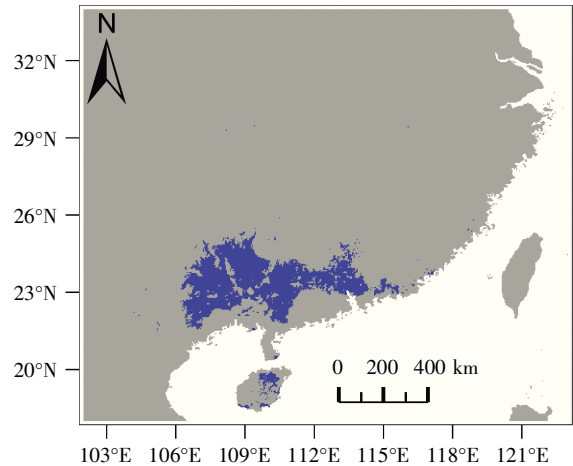


图4 当前气候条件下扣树的生境适宜性区域

蓝色表示适宜的分布区, 灰色表示不适宜的分布区。

Fig.4 The simulated habitat suitability region of *I. kaushue* under current climate conditions

Blue indicates suitable distribution area, and gray indicates unsuitable distribution area.

(图3), 说明温度和降雨量这两个因素在扣树分布中起着极重要的作用。对7个因子的进一步分析表明, 一些与极端环境条件有关的变量(如最冷月最低温度、最湿月降雨量和最干旱月降雨量)是决定扣树适宜生境的关键因素。

气候变暖对扣树适宜分布区的预测结果表明, 扣树的适宜范围会向更高纬度转移(图6), 最高纬度达到了30.65°。此外, 研究也发现, 扣树对气候变化具有较大的敏感性。通过对比当前和未来情景下扣树的适生生境, 我们发现气候变暖可能导致其适宜生境发生较大范围的北移, 同时适生

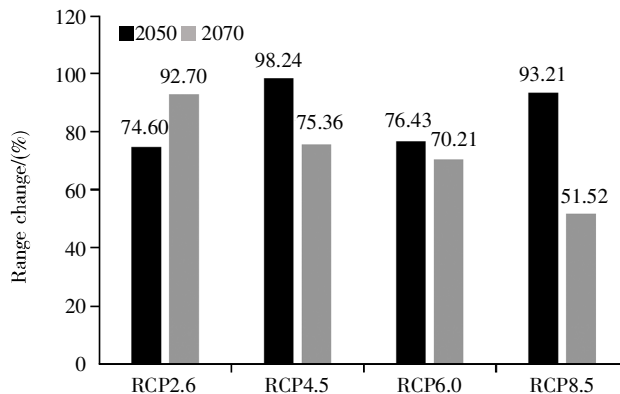


图5 2050年和2070年扣树在不同温室气体排放情景下适宜生长范围的变化

RCP: 代表性浓度路径; RCP2.6: 低浓度排放路径; RCP4.5: 中低浓度排放路径; RCP6.0: 中高浓度排放路径; RCP8.5: 高浓度排放路径。

Fig.5 Variation of suitable growth range of *I. kaushue* under different emission scenarios of greenhouse gases in 2050 and 2070

RCP: Representative concentration pathway; RCP2.6: Low emissions pathway; RCP4.5: Low to medium emissions pathway; RCP6.0: Medium to high emissions pathway; RCP8.5: High emissions pathway.

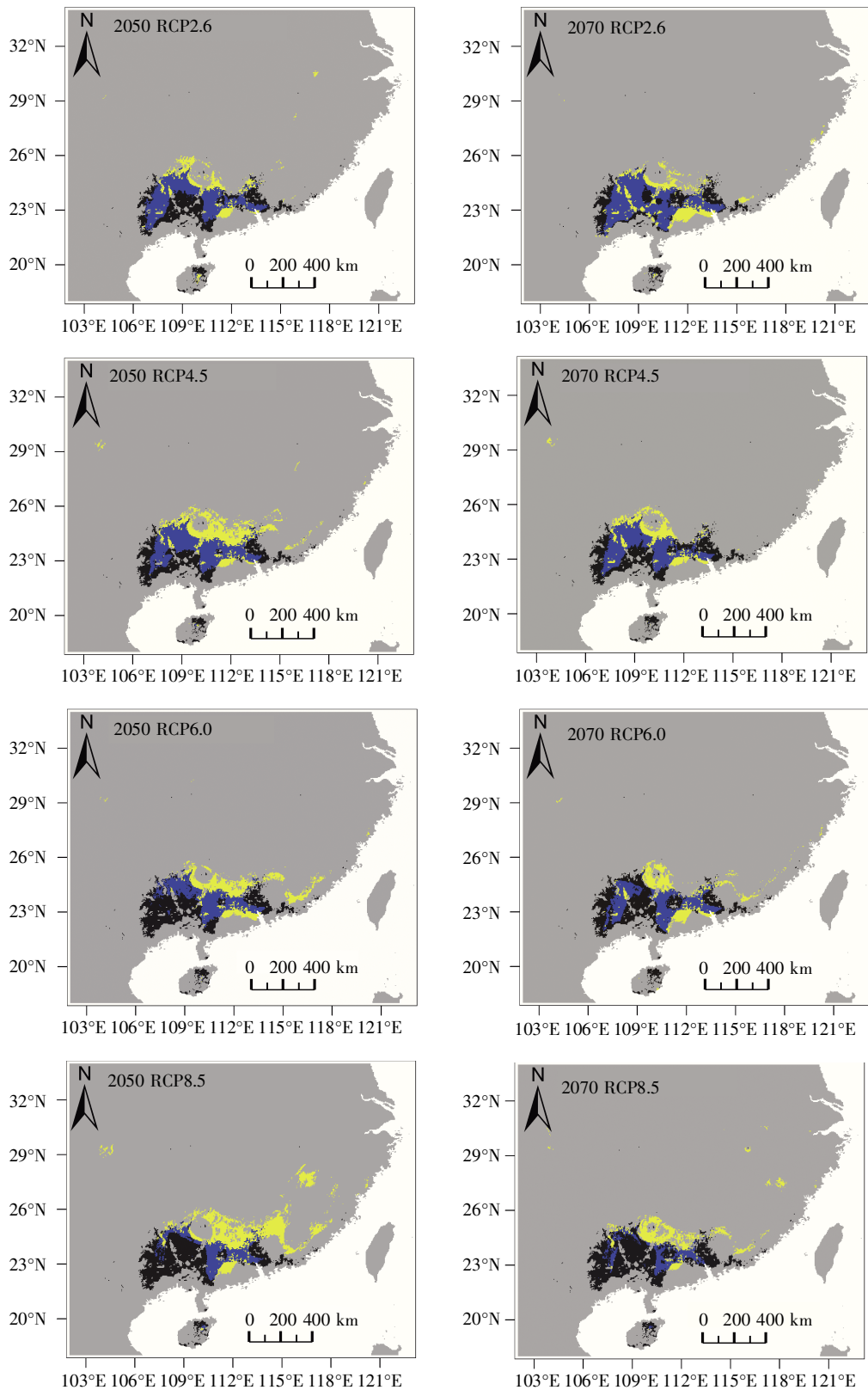


图 6 当前和未来气候情景下的扣树适宜分布区预测

蓝色区域是目前适宜的分布区, 未来可能仍然适宜; 黄色区域是当前没有分布, 未来新的适宜分布区; 黑色区域是目前适宜的分布区, 但未来会变得不适宜。

Fig.6 The predicted suitable habitats of *I. kaushue* under current and future climate scenarios

The blue area is the suitable habitat at present and may still be suitable in the future, the yellow area is the new suitable habitat in the future, and the black area is the suitable habitat at present but will become unsuitable in the future.

表 1 不同 RCP 情景下海南省扣树 2050 年和 2070 年适宜分布范围的变化

Table 1 The change of suitable distribution range of *I. kaushue* in Hainan Province in 2050 and 2070 under different RCP scenarios

Time	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Mean value
2050	25.67	9.08	3.64	16.05	13.61
2070	13.88	2.20	2.96	6.27	6.33

分布面积显著减少(图 6), 例如: 在低纬度的海南, 预测在 2070 年 RCP8.5 情景下扣树的适生区仅为现在的 6.27% (表 1)。气候变暖导致扣树需要迁移并寻找新的适宜生境, 但是地理隔离、迁移困难、新的适宜生境破碎化等可能会导致扣树适宜性生境呈现一定程度的间断性。而分布破碎化会减少种群和栖息地的连通性, 干扰基因交流, 降低迁移率和恢复能力, 对受威胁和濒危物种的长期生存能力产生负面影响^[17-18]。

此外, 海拔、地势和气候的变化也会影响微气候区环境的变化, 进而影响扣树的适生生境在分布上的连续性。随着全球变暖, 一些物种会迁移到高纬度地区, 而另一些物种则可能在生理或物候上适应这些变化^[8]。有研究表明, 气候变化将导致生境相对湿度的下降, 甚至干涸, 而区域温度的升高、干旱和人类活动也会造成土地变化等局部灾害, 这些间接影响也会增加物种灭绝的概率^[19]。

探讨极小种群植物扣树对未来气候变化的响应, 可掌握其面临的生态风险, 对科学制定相应的保育策略具有重要意义。基于本研究的结果, 我们发现气候变化会改变扣树的分布范围, 并导致其适生范围缩小。建议在制订极小种群植物扣树的保护对策时, 应充分考虑气候变化的潜在影响, 采取必要的人为干预措施, 促进其天然更新和扩散。

参考文献(References):

- [1] GRÜNIG M, MAZZI D, CALANCA P, *et al.* Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change[J]. *Communications Biology*, 2020, 3: 233.
- [2] SCRIDEL D, BRAMBILLA M, MARTIN K, *et al.* A review and meta-analysis of the effects of climate change on Holarctic mountain and upland bird populations[J]. *IBIS*, 2018, 160(3): 489-515.
- [3] YOUSEFI M, JOULADEH-ROUDBAR A, KAFASH A. Using endemic freshwater fishes as proxies of their ecosystems to identify high priority rivers for conservation under climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106137.
- [4] 郭飞龙, 徐刚标, 牟虹霖, 等. 伯乐树潜在地理分布时空格局模拟[J]. *植物科学学报*(GUO Feilong, XU Gangbiao, MOU Honglin, *et al.* Simulation of potential spatiotemporal population dynamics of *Bretschneidera sinensis* Hemsl. based on MaxEnt model[J]. *Plant Science Journal*), 2020, 38(2): 185-194.
- [5] 肖建华, 丁鑫, 蔡超男, 等. 闽楠(*Phoebe bournei*, Lauraceae)地理分布及随气候变化的分布格局模拟[J]. *生态学报*(XIAO Jianhua, DING Xin, CAI Chaonan, *et al.* Simulation of the potential distribution of *Phoebe bournei* with climate changes using the maximum-entropy (MaxEnt) model[J]. *Acta Ecologica Sinica*), 2021, 41(14): 5703-5712.
- [6] 张文秀, 寇一翮, 张丽, 等. 采用生态位模拟预测濒危植物白豆杉 5 个时期的适宜分布区[J]. *生态学杂志*(ZHANG Wenxiu, KOU Yixuan, ZHANG Li, *et al.* Suitable distribution of endangered species *Pseudotsaxus chienii* (Cheng) Cheng (Taxaceae) in five periods using niche modeling[J]. *Chinese Journal of Ecology*), 2020, 39(2): 600-613.
- [7] GUIAN A, THUILLER W, ZIMMERMANN N E. *Habitat Suitability and Distribution Models: with Applications in R[M]*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017: 62-63.
- [8] ZHANG Z X, MAMMOLA S, LIANG Z Q, *et al.* Future climate change will severely reduce habitat suitability of the critically endangered Chinese giant salamander[J]. *Freshwater Biology*, 2020, 65(5): 971-980.
- [9] MCCUNE J L. Species distribution models predict rare species occurrences despite significant effects of landscape context[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(6): 1871-1879.
- [10] 廖菊阳, 彭春良, 田晓明. 湖南极小种群野生植物资源及保护对策研究[C]//中国植物学会植物园分会编辑委员会. 中国植物园: 第十八期. 北京: 中国林业出版社(LIAO Juyang, PENG Chunliang, TIAN Xiaoming. Study on the current situation and protection countermeasures of PSESP plant resources in Hunan[C]//The Chinese Association of Botanical Gardens. Botanical Gardens of China: 18th Issue. Beijing: China Forestry Press), 2015: 55-62.
- [11] BORRÀ R A, OLSON L E, GOODMAN S M, *et al.* Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 275: 73-77.
- [12] VAN PROOSDIJ A S J, SOSEF M S M, WIERINGA J J, *et al.* Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models [J]. *Ecography*, 2016, 39(6): 542-552.
- [13] HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, *et al.* The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods[J]. *Ecography*, 2006, 29(5): 773-785.
- [14] 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.
- [15] DAI G H, YANG J, LU S R, *et al.* The potential impact of invasive woody oil plants on protected areas in China under future climate conditions[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1041.
- [16] SHU S S, JIANG W S, WHITTEN T, *et al.* Drought and China's cave species[J]. *Science*, 2013, 340(6130): 272.
- [17] DUAN R Y, KONG X Q, HUANG M Y, *et al.* The potential effects of climate change on amphibian distribution, range fragmentation and turnover in China[J]. *PeerJ*, 2016, 4: e2185.
- [18] SARMENTO CABRAL J, JELTSCH F, THUILLER W, *et al.* Impacts of past habitat loss and future climate change on the range dynamics of South African Proteaceae[J]. *Diversity and Distributions*, 2013, 19(4): 363-376.
- [19] TURVE S T, CHEN S, TAPLEY B, *et al.* Imminent extinction in the wild of the world's largest amphibian[J]. *Current Biology*, 2018, 28(10): R592-R594.