DOI: 10.5846/stxb201802010282

冉巧,卫海燕,赵泽芳,张权中,刘静,顾蔚.气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响.生态学报,2019,39(7): - . Ran Q, Wei H Y, Zhao Z F, Zhang Q Z, Liu J, Gu W.Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang.Acta Ecologica Sinica,2019,39(7): - .

气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的 影响

冉 巧^{1,2},卫海燕^{1,*},赵泽芳^{1,2},张权中^{1,2},刘 静^{1,2},顾 蔚^{2,3}

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119

2 陕西师范大学西北濒危药材资源开发国家工程实验室, 西安 710119

3 陕西师范大学生命科学学院, 西安 710119

摘要:以孑遗植物银杉(Cathaya argyrophylla Chun et Kuang)为研究对象,选取 65 个地理分布记录和 19 个生物气候因子(bio1-bio19),利用 MaxEnt 模型预测四种不同浓度路径下(RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5),银杉在 2050s 和 2070s 两个年代的 潜在分布变化,并利用景观指数对气候变化情景下银杉适宜生境空间格局特征转变及生境破碎度变化进行分析。结果表明:在 当前气候情景下,银杉适宜生境面积约占研究区面积的 14.32%,主要分布于北纬 24°—32°、东经 105°—114°之间,位于四川盆 地东南地区、云贵高原东北地区、南岭西段地区以及浙闽丘陵的北部地区。在未来不同气候情景下,银杉适宜生境变化特征显 著,面积呈增加趋势,形状上整体呈四周向中间聚集。气候变化对银杉适宜生境的景观指数影响主要表现在斑块数量增多、斑 块密度增加、面积加权平均形状指数变大,对分离度与聚散性影响较小;气候变化对银杉生境破碎化程度的影响表现在破碎化 两极现象减弱,总体破碎化程度加剧。本文选取了 7 个景观指数并结合 PCA 法得到综合的破碎度指数来定量分析银杉适宜生 境破碎化程度变化,相比单一指标的定量评价和多个指标的定性分析,更能代表银杉生境的实际破碎化程度。 关键词:气候变化;孑遗植物;景观指数;生境破碎化;银杉

Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang

RAN Qiao^{1,2}, WEI Haiyan^{1,*}, ZHAO Zefang^{1,2}, ZHANG Quanzhong^{1,2}, LIU Jing^{1,2}, GU Wei^{2,3}

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 National Engineering Laboratory for Resource Development of Endangered Crude Drugs in Northwest of China, Shaanxi Normal University, Xi' an 710119, China

3 College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: In this study, using *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang based on 65 current geographical distribution records, and 19 bioclimatic factors based on maximum entropy models (MaxEnt), we estimated the transformation of the potential geographic distribution and habitat fragmentation of *C. argyrophylla* for the 2050s and 2070s under the climate change scenarios of RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5 emission scenarios. The results showed that in the current climate conditions, the suitable habitat area of *C. argyrophylla* accounted for about 14.32% of the research area, and was mainly distributed at 24—32°N and 105—114°E, located Southeast of the Sichuan Basin, Northeast of the Yunnan-Guizhou Plateau, West of Nanling, and North of the Zhejiang-Fujian hilly region. Under the future climate scenarios, the

收稿日期:2018-02-01; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:国家自然科学基金项目(31070293),陕西省科学技术研究发展计划项目(2014K-01-02)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: weihy@ snnu.edu.cn

characteristics of suitable habitat change of *C. argyrophylla* were obvious, and mainly manifested in increased suitable habitat areas and aggregations. Results of the landscape index and habitat fragmentation of suitable habitat for *C. argyrophylla* showed that climate change would lead to increased patches, patch density, and area weighted mean shape index, with less influence on the landscape division and aggregation indexes. Simultaneously, the effect of climate change on habitat fragmentation of *C. argyrophylla* mainly reflected on the weakening of the polarization phenomenon of habitat fragmentation, and higher overall fragmentation. In this research, seven indicators of the quantitative comprehensive analysis were more indicative than single indexes or multiple indicators of qualitative analysis, and were more representative of actual *C. argyrophylla* habitat fragmentation.

Key Words: climate change; relict plant; landscape indices; habitat fragmentation; Cathaya argyrophylla Chun et Kuang

政府间气候变化专门委员会第五次评估报告(IPCC AR5)指出,在过去的 100 多年间(1901—2012 年),全球地表年平均气温升高 0.89℃,按其预设的温室气体排放情景推算,全球地表年平均气温到 21 世纪末 将升高 0.3—4.8℃^[1]。为应对不断加剧的气候变化,许多陆生和水生植物已改变自身特性,进而使其物种丰 度、分布范围和迁徙规律发生相应的变化^[2],气候变化被认为是 21 世纪全球生物多样性面临的最主要威胁之 一^[34]。大多数陆地和淡水物种将面临巨大的灭绝风险^[5],预估近四分之一的植物物种正面临灭绝^[6]。建立 自然保护区,就地保护物种多样性是减缓物种灭绝速度最有效的手段^[7-8],但目前的自然保护区多基于物种 的当前分布而设计,难以满足未来气候变化情景下物种的生境保护需求^[9]。因此,了解未来气候情景下的物 种适宜生境的变化,及早采取针对性保护措施,对提高物种多样性保护的成效具有至关重要的作用^[10-12]。

景观指数是景观生态学中的重要指标,是景观生态学中研究景观类型空间格局与生态过程的重要手段, 被广泛地应用于土地利用格局与生态环境响应^[13]、森林破碎化监测^[14-15]、城市景观演变及区域生境质量评价^[16-17]等生态学的研究。物种分布模型(species distribution models, SDMs)目前是生态学和生物地理学研究 过程中的重要工具之一,其中 MaxEnt 模型被认为具有更好的模拟效果^[18-20],被广泛用于未来气候变化情景 下的土地利用变化^[21]、生物多样性缺失^[22]、生物入侵风险^[23]、珍稀药材培育^[24-25]、濒危物种管理与保护^[26-27] 等研究。

银杉(*Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang)为松科单种属,是我国特有的世界级"活化石"植物。气候变 化严重制约银杉的生境分布,银杉在第三纪时期广布于北半球的欧亚大陆,第四纪冰川后几乎绝迹,现仅在中 国亚热带山地的局部地区零星残存^[28]。银杉自然更新速度慢,生理特性对环境要求高等因素使其现处于濒 危状态。银杉起源古老,对研究松科植物的系统发育、古植物区系、古地理及第四期冰期气候等均有较重要的 科研价值。自 1955 年被发现于广西花坪林区以来,大量的研究集中于银杉的种群生态学^[29-31]、群落生态 学^[32-34]、生物学特性^[35-36]、遗传特性^[37-39]等方面,而从生物地理学及景观生态学方面来研究气候变化下野生 银杉的适宜生境空间格局转变及生境破碎化的时空变化研究甚少。本研究利用物种分布模型对未来气候变 化下野生银杉的适宜生境做合理预测,将景观指数引入物种生境变化研究,以期全球气候变化背景下更准确 的分析银杉的适宜生境空间格局变化及生境破碎度的变化程度,为银杉的保护及其保护区建设提供理论 依据。

1 数据与方法

1.1 银杉分布点数据获取

本文主要通过查询标本库和文献资料来获取银杉的分布样本。具体来源包括:(1)文献数据库(中国知网、万方、维普、Springer、Wiley Inter-Science、ScienceDirect等)收录的相关研究文献;(2)中国数字植物标本馆(http://www.cvh.org.cn/);(3)国家标本平台(http://www.nsii.org.cn/);(4)全球生物多样性信息机构(http://www.gbif.org/)。最终获取原始样本181个,除去重复的样本并剔除地理信息不精确的样本,最后获

得参与建模样本共 65 个。据统计得到银杉主要分布在 重庆南川境内的金佛山,大巴山东段,贵州、广西与湖南 交界处的雪峰山,广西中部的大瑶山,湖南东部的罗霄 山脉,江西北部的九岭山。本文依据采样点分布点的信 息和数字高程模型(DEM)划定我国南方地区为研究区 (图 1)。

1.2 气候因子数据获取

7期

本文的 19 个生物气候因子(bio 1—bio 19)选取自 世界气候数据库(WORLDCLIM version 1.4 和 version 2.0, http://www.worldclim.org)。当前数据是基于 1970—2000 年全球有记录的气象站点观测的气候和降 水量衍生得到,相比简单的年或月平均气温或降水量更 具生物意义^[40-41]。基于本文的研究区域,选用对我国 气候模拟较好的 BCC-CSM1 大气环流模式^[42]下 IPCC AR5 最新定义的 4 种不同浓度路径(representive concentration pathways, RCPs),即 RCP 2.6、RCP 4.5、 RCP 6.0、RCP 8.5,作为未来气候数据,参与银杉未来潜 在分布建模,并预测其在 2050s(2041—2060)和 2070s



Fig. 1 Study area and geographic locations of *C. argyrophylla* sample points

(2061—2080)两个不同年代的潜在地理分布。IPCC AR5 中所用的排放情景即浓度路径(RCPs)与第3次和第4次报告所用的排放情景(SRES)相比,RCPs 以全面精确的高分辨率资料、土地利用变化数据、空气污染物排放情景和2100年的人为排放量等基础数据来模拟排放情景,其可以代表21世纪的气候政策,对气候的模拟精度也较高。

1.3 气候变化下银杉潜在分布预测模型构建与评估

本文选择基于最大熵理论的 MaxEnt 模型来预测气候变化下银杉潜在适宜分布,建模时采用 MaxEnt 3.3. 3 版本(http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/),输入银杉采样点数据与 19 个气候因子数据,随机 选取 25%的样本作为测试数据集(testing data),75%的样本作为训练数据集(training data),重复迭代 10 次。 采用接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)进行模型精度检验,ROC 曲线与横坐标 围成的面积值 AUC(the area under the ROC curve)作为评价指标。模型输出数据格式为 ASCII 图层,其中每个 点的值代表银杉在该栅格内的生境适宜性指数(habitat suitability index, HSI),取值范围为[0,1],将 MaxEnt 结果导入 AreGIS 10.2 生成的栅格数据文件进行重分类,按照适宜生境评价指数划分依据^[43,44],将银杉潜生 境分为不适宜生境(HSI≤0.2)、次适宜生境(0.2<HSI≤0.5)和高适宜生境(0.5<HSI≤1)3 个等级,得到当前 气候条件下银杉潜在分布图。通过 AreGIS 10.2 空间分析模块叠加显示,并计算各适宜生境等级面积。

将当前和未来气候条件下银杉潜在分布次适宜生境和高适宜生境合并为适宜生境 0.2<HSI≤1),用1表示适宜生境,0表示不适宜生境,然后导入 ArcGIS 10.2 进行叠加分析,具体的地图代数如下:

$$X = SHC \times 10 + SHF, X \in (0, 1, 10, 11)$$
(1)

式中,SHC (suitable habitat under current climate conditions)和 SHF (suitable habitat under future climate conditions)分别代表当前气候条件下和未来气候条件下的银杉适宜生境,取值为0(不适宜生境)和1(适宜生境)。*X* 值表示未来气候条件下银杉潜在分布的转变状态,*X*=0 代表当前和未来都是不适宜生境;*X*=1 代表新增适宜生境;*X*=10 代表消失适宜生境;*X*=11 代表当前和未来都是适宜生境。

1.5 气候变化下的银杉生境空间格局及破碎度分析

1.5.1 景观指数选取与计算

生境破碎化是指人类活动或自然环境干扰下,大块连续分布的适宜生境缩小并分割成两个或多个面积较 小的生境斑块的过程^[45],包含以下几种含义^[46-47]:(1)适宜生境总面积减少;(2)生境斑块数量增加;(3)生境 斑块面积减小;(4)斑块间距离增加。本文采用景观指数来定量化研究气候变化下银杉生境空间格局、破碎 化程度及破碎过程。选用七个景观指数,包括:描述生境斑块面积与数量指标(斑块数量、斑块密度、平均斑 块面积),描述生境的几何形状指标(面积加权平均形状指数、面积加权平均分维数)和景观聚散性指数(景观 分离度、聚合指数),各景观指数的计算公式和公式描述见文献^[48]。上述指标是由 Fragstats 4.2 软件计算 得到。

1.5.2 银杉适宜生境的破碎化程度分析

本文利用 Fragstats 4.2 软件,采用移动窗口空间分析法分别计算出当前时期和未来气候情景下银杉适宜 生境的七个景观指数的空间分布格局。其中,移动窗口选用边长 3 km×3 km 的移动窗口在研究区内从左上 角开始移动,每次移动 1 个栅格,计算窗口内的景观指数值,并将该值赋给该窗口的中心栅格,最后形成 7 个 景观指数的栅格图。利用 ArcGIS 10.2 对各指标进行无量纲标准归一化处理,然后对各时期不同气候情景的 七个指标进行主成分分析(PCA)与计算,选择累计贡献率大于 90%的主成分,以各空间主成分权重为系数, 利用 ArcGIS 10.2 加权总和模块进行叠加分析,得到各时期不同气候情景下银杉适宜生境破碎度^[16,49],通过 极差标准化处理,得到不同时期不同气候情景下银杉适宜生境破碎度空间分布格局,并按照等距分类法分成 5 个等级^[49],0—0.2 极低破碎度;0.2—0.4 低破碎度;0.4—0.6 中破碎度;0.6—0.8 高破碎度;0.8—1 极高破 碎度。

2 结果与分析

2.1 当前气候条件下的银杉潜在地理分布预测

银杉潜在分布预测模型的训练集数据和测试集数据的 AUC 值分别为 0.9861 和 0.9893,表明模型拟合效 果结果比较好。当前气候条件下银杉潜在地理分布结果(图 2)显示,高适宜生境主要包括重庆西南部、东南 部以及中部;湖北恩施、神农架林区以及宜昌市西南部;贵州省遵义北部,凯里东南部;湖南省怀化南部、邵阳、 永州南部;广西桂林及合山北部;浙江温州、台州及宁波市的北部;台湾北部的基隆、台北、新北以及宜兰县。 次适宜生境包括四川华蓥、泸州;重庆南部;湖北的神农架林区、宜昌及恩施;贵州的遵义、铜仁、凯里以及毕 节、贵阳和都匀的东北部地区;湖南西部及南部地区;广西的桂林、贺州及合山北部;广东与湖南交界处、福建 北部及浙江沿海地区;台湾北部的新北市、宜兰县及东南部的台东县。对各级适宜生境的面积比例统计显示, 银杉在研究区的高适宜生境面积占研究区总面积的 2.40%,次适宜生境面积占研究区总面积的 11.92%,不适 宜生境面积占 85.68%。从预测结果来看,银杉适宜生境所占研究区面积比例小,生长区域较狭窄。

2.2 影响银杉潜在分布的主导气候因子分析

MaxEnt 通过迭代算法不断修正单个气候因子系数,计算得到 19 个评价因子对模型的单因子响应曲线 (图 3)和贡献率(表 1),结果表明:最干月降水量(bio 14)、平均日较差(bio 2)、最热季平均温度(bio 10)、最 干季平均温度(bio 9)、温度季节性变动系数(bio 4)、年降水量(bio 12)6个因子之和贡献率达到 94.8%,其中 最干月降水量为影响银杉潜在分布的最主要因子,贡献率达到 58.6%,主导因子中降水因子贡献率之和为 61%,温度因子贡献率之和为 33.8%,说明降水因子对银杉的影响远远高于温度因子。从银杉单因子响应曲 线(图 3)来看,银杉最适宜生境条件为:bio 14 在 20 mm 以上,值越大越适宜;bio 2 在 7.5℃以下,越小越适宜; bio 10 阈值为 21—27℃,23℃时最适宜;bio 9 阈值为 2—9℃,6℃时最适宜;bio 4 的阈值为 6000—7400,7100 时最适宜; bio 12 的阈值为 1200—1700 mm,1300 mm 时最适宜。

将银杉适宜分布区预测结果与单气候因子叠加后进行分区统计,并以此为基础计算银杉适宜生境的各气





Fig.2 Predicted potential suitable habitat distribution of C. argyrophylla under current climate conditions

候因子的阈值及平均值(表1)。总体上,对于每个气候因子来说,随着银杉生境适宜性的增加,主导气候因子 的阈值范围在变小,结果导致银杉最适宜生境的气候因子阈值范围变窄,说明银杉生长在最适宜生境区域的 生态位要求更高。随着气候因子贡献率的降低,不同适宜生境等级之间阈值范围、均值和标准差之间的相对 差逐渐缩小,尤其是次适宜生境和高适宜生境之间差别最小。同时,各因子在不同适宜等级的阈值范围与单 因子响应曲线的范围也保持一致。

2.3 气候变化情景下的银杉潜在分布变化

将当前银杉潜在分布与未来气候情景下的银杉潜在分布进行叠加,得到未来气候情境下银杉生境空间转换特征(图4),可更直观地呈现银杉的适宜生境随气候情景的变化。由图4可知,未来四种气候情景下银杉适宜生境相对当前适宜生境空间转换特征保持相对一致,当前适宜生境西北部和东南部向内部退缩,西南部和东北部向两极延伸,东部沿海地区向低纬地区移动,整体呈现四周向中部聚集的趋势。但不同情景下生境变化有细微差别,在RCP 2.6 气候情景下,2050s时期(图4A)银杉消失生境主要包括四川盆中丘陵、江西与福建交界处的武夷山一带,新增适宜生境主要分布在武陵山、五岭一带以及两湖平原;2070s时期(图4E)银杉消失生境主要分布在广西东北部猫儿山、大瑶山一带,新增适宜生境与2050s时期相比,增加了贵州中南部。对比 RCP 4.5、RCP 6.0 与 RCP 8.5 三种气候情景下,2050s 与 2070s 时期的适宜生境空间转换特征大致



图 3 银杉主导气候因子响应曲线

Fig.3 Dominant climate factors's response curves of C. argyrophylla

相同,当前生境的西部边界向东部退缩,东部沿海地区适宜生境向低纬移动,两湖平原出现新的适宜生境。

表 1	影响研究区银杉地理分布的主导气候因子贡献率与阈值范围
~~ I	》时初76世版776程为市的工作《秋日·文献中与两世76日

Table 1 Percent contribution and threshold value of dominant climate factors for geographic distribution of C. argyrophylla							
			次适宜生境		高适宜生境		
左 侵国了 / 英位	因子贡献率/%	Sub-suitable habitat			High suitable habitat		
气候凶丁/ 単位 Climate factors/Unit	Percent contribution	范围 Range	均值 Mean	标准差 Standard deviation	范围 Range	均值 Mean	标准差 Standard deviation
最干月降水量(bio 14)/mm Precipitation of driest month	58.6	13—177	33.1	13.4	18—179	39.9	17.9
平均日较差(bio 2)/℃ Mean diurnal range	15.5	5.6—9.1	7.5	0.5	5.3—8.6	7.2	0.6
最热季平均温度(bio 10)/℃ Mean temperature of warmest quarter	9.5	13.0—28.5	24.5	2.1	10.9—28.0	22.7	2.4
最干季平均温度(bio 9)/℃ Mean temperature of driest quarter	5.8	-5.1-18.1	6.6	2.8	-6.9—17.9	5.5	3.2
温度季节性变动系数(bio 4) Temperature seasonality	3	2427—8681	7197	517	3280—8169	7079	505
年降水量(bio 12)/mm Annual precipitation	2.4	953—3902	1400	295	1086—4441	1544	314

7



Fig.4 Space transformation characteristic of suitable habitat for C. argyrophylla under future climate scenarios

2.4 气候变化情景下银杉潜在生境格局的变化

2.4.1 银杉潜在适宜生境景观指数变化

对当前和未来气候情景下银杉适宜生境景观指数进行计算(表 2),结果显示不同景观指数在气候变化下表现出一定的差异性。从斑块数量来看,2050s 和 2070s 时期 4 种情景的斑块数量相比当前都大幅增加;从斑块密度来看,2050s 和 2070s 时期 4 种情景的斑块密度相比当前气候情景呈现增加趋势;从平均斑块面积来看,RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景 2050s 和 2070s 时期相比当前均有增加,而 RCP 4.5 和 RCP 6.0 情景下则大幅减小。

生境的几何形状两个指标可以表征银杉适宜生境的形状复杂性,以揭示未来气候情景下其生境的形态变化。表 2显示面积加权平均形状指数在未来 2050s 和 2070s 时期 4 种气候情景下,除 2050s 时期 RCP 4.5 和 2070s 时期 RCP 2.6 外,均呈上升趋势,但幅度较小(除 2050s 时期 RCP 6.0 外),说明生境形状在一定程度上 有受到气候变化的影响,但影响不大^[48]。面积加权平均分维数在未来 2 个时期 4 种气候情景下差异不大,均 在 1.2 左右,表明生境分形特征边缘周长较简单^[48]。总体来看,气候变化对银杉适宜生境几何形状复杂度的 影响不显著。

从表征景观聚散性的景观分离度和聚合指数来看,未来不同气候情景下,景观分离度与聚合指数的变化





Fig.5 Area change of suitable habitat for C. argyrophylla under future climate scenarios

趋势并不一致,到2050s,景观分离度有增有减,聚合度大多减小;到2070s,两个指标的变化趋势与2050s基本 相同。未来气候变化下,不同时期不同气候情景对银杉生境的影响并不相同,其中 RCP 4.5 和 RCP 6.0 情景 下,景观分离度两个时期均呈上升趋势,聚合指数呈下降趋势,说明 RCP 4.5 和 RCP 6.0 情景下银杉适宜生境 更易破碎化。

	Table 2	Table 2 Landscape index of the suitable habitat for C. argyrophylla under different climate seniors							
时期 Periods	气候情景 Climate scenarios	斑块数量 NP/个	斑块密度 PD/(个/km ²)	平均斑块面积 MPS/km ²	面积加权 平均形状指数 SHAPE_AM	面积加权 平均分维数 FRAC_AM	景观分离度 DIVISION	聚合指数 AI	
当前	—	3617	0.15	98.49	19.58	1.221	0.990	91.02	
2050s	RCP 2.6	3690	0.15	118.71	21.29	1.222	0.982	92.45	
	RCP 4.5	4276	0.17	92.13	18.95	1.212	0.991	89.53	
	RCP 6.0	11407	0.46	30.33	33.16	1.241	0.993	81.17	
	RCP 8.5	4211	0.17	103.67	25.99	1.235	0.982	90.91	
2070s	RCP 2.6	4032	0.16	116.25	19.56	1.216	0.979	92.06	
	RCP 4.5	4369	0.18	77.37	26.29	1.234	0.992	87.99	
	RCP 6.0	7876	0.32	38.86	20.94	1.223	0.997	84.97	
	RCP 8.5	4054	0.16	100.45	22.83	1.227	0.984	90.98	

表 2 不同气候情景下银杉适宜生境的景观格局指数

NP:斑块数量 number of patch; PD:斑块密度 patch density; MPS:平均斑块面积 mean patch size; SHAPE_AM: 面积加权平均形状指数 area weighted mean shape index;FRAC_AM;面积加权平均分维数 area weighted mean patch fractal dimension;DIVISION;景观分离度 landscape division index;AI:聚合指数 aggregation index

2.4.2 不同气候情景下银杉适宜生境破碎化程度变化

利用 ArcGIS 10.2 得到不同气候情景下银杉适宜生境破碎度空间分布格局(图 6),对比发现,未来不同时

期不同 RCPs 情景下银杉适宜生境破碎度变化趋势呈现多样化。RCP 2.6(图 6B1、C1)情景下生境破碎化程 度变化较小;RCP 4.5(图 6B2、C2)和 RCP 6.0(图 6B3、C3)情景下的破碎化程度变化最大,在适宜生境的内部 和边缘均有较大幅度的增加;RCP 8.5(图 6B4、C4)情景下破碎化程度增加的部分主要分布在适宜生境的边 缘及云贵高原北缘地区。



图 6 不同气候情景下银杉适宜生境破碎度空间分布格局

Fig. 6 Spatial patterns distribution of landscape fragmentation index for suitable habitat of *C. argyrophylla* under different climate conditions

A:当前时期银杉生境破碎度;B1、B2、B3、B4分别代表 2050s 时期 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0、RCP 8.5 情景下银杉的生境破碎度;C1、C2、C3、C4分别代表 2070s 时期 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0、RCP 8.5 情景下银杉的生境破碎度

对银杉适宜生境破碎度指数的5个等级面积进行计算(表3),结果显示各个时期银杉生境破碎度呈两极 分化,即位于极低破碎度、高破碎度和极高破碎度的面积占各个时期适宜生境面积比例较高,而位于低破碎度 和中破碎度的面积所占比例较低。

从时间序列看,当前到 2050s 时期 4 种情景下,低破碎度等级和中破碎度等级的面积变化较小,极低破碎 度和极高破碎度等级的面积有增有减,高破碎度等级的面积大部分呈增加趋势。从当前到 2070s 时期 4 种情 景下,各破碎等级的面积有增有减,极低破碎等级面积比例在 RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景下有所增加,而在 RCP 4.5 和 RCP 6.0 情景下呈减少趋势,高破碎等级面积比例大部分呈增加趋势(RCP 2.6 除外),极高破碎化等级 面积普遍呈减少趋势。

÷	表3不	同气候情景下银	杉适宜生境砚	皮碎度等级面积	积百分比	
 - C .1:CC		- C C	f	habitat of C		 :

Tuble 8 Theu	percentage of anterent	uegrees of hughie	intution for Sultupl	e hubble of et algroup	<i>myna</i> anaer amere	in childre conditions
时期 Periods	气候情景 Climate scenarios	极低/% Very low	低/% Low	中/% Moderate	高/% High	极高/% Very High
当前时期	_	35.88	6.67	7.66	20.87	28.92
2050s	RCP 2.6	42.25	6.40	6.91	18.60	25.84
	RCP 4.5	30.36	7.02	8.63	23.56	30.44
	RCP 6.0	20.65	7.71	12.20	37.28	22.16
	RCP 8.5	37.99	7.25	8.20	23.39	23.17
2070s	RCP 2.6	40.96	5.85	6.65	18.63	27.91
	RCP 4.5	29.89	8.27	9.02	25.47	27.35
	RCP 6.0	22.93	7.92	11.37	32.90	24.88
	RCP 8.5	37.36	6.28	7.42	21.05	27.89

3 结论与讨论

3.1 银杉适宜生境分析

本文通过 MaxEnt 模型预测了银杉的潜在分布,得到影响银杉的主导气候因子 6 个(图 3、表 1),分别为 bio 14、bio 2、bio 10、bio 9、bio 4 和 bio 12。其中最干月降水量(bio 14)单因子响应曲线(图 3A)显示,银杉的 分布概率随 bio 14 的增加而急速上升,到达 20 mm 时平稳增加,值越大越适宜,说明银杉的耐旱性并不强,因 而在人工培育过程中要注意不能缺水。平均日较差(bio 2)在 7.5℃以下,越小越适宜,表示银杉适合生长在 昼夜温差较小的区域^[30]。结合最热季平均温度(bio 10)和最干季平均温度(bio 9)最适宜值分别为 23℃和 6℃,显示银杉适宜生长在夏季凉爽、冬季温和的区域。年降水量(bio 12)的阈值为 1200—1700 mm,1300 mm 最适宜,表示银杉对降水量需求极高,生长区域应为降水量丰富的地方^[32]。

同时,本文预测的银杉高适宜生境主要有两个分区:I 区位于重庆东南境内的金佛山及周边地区,被东北部的大巴山、东南部的武陵山和西南部的大娄山环绕,是由地质构造运动造成的典型褶皱带地区,该区域以亚热带湿润季风气候为主,气候温和,降雨量丰富,年平均气温 9.6℃,夏季最高温 28℃,冬季最低温为零下7.2℃,年均降雨量 1431 mm 左右^[50];II 区位于黔桂湘三省交界处的越城岭一带以及云贵高原的东南段,气候类型属于中亚热带湿润季风气候类型,降雨量十分充沛,年平均气温 7℃,极端最高气温 23℃,极端最低气温 零下 19℃,年降水量 2100 mm 以上^[51]。综上可以得出,银杉适宜生长在夏季凉爽、冬季温和、降水量充沛的潮湿区域,这与文献记载的银杉生境特征相吻合^[30-32]。

3.2 气候变化情景下银杉生境空间转换特征及景观格局变化

未来气候变化情景下,银杉生境的空间转换特征从整体上看呈四周向中间聚集的趋势(图4),平均适宜 生境的面积与当前相比呈增加趋势(图5),其中2070s时期 RCP 4.5 和 RCP 6.0 情景不适合银杉的生长,新增 适宜面积小于其消失面积。

长期的气象观测数据表明未来气候变化下中国区域平均年降水量将有所增加(0—20%)^[52],而银杉适 宜生长在降水量充沛的区域,所以银杉适宜生境整体向南即较低纬度、降水量较高的方向移动,新适宜生境也 多分布于偏南的区域。此外,中国区域年平均地表气温上升 2.7—2.9℃,变暖主要表现为从南向北加强,青藏 高原及北部地区升温较大,平均 2.5℃以上,而南方地区升温较小,升高 1.8—2.5℃^[52],新适宜生境分布在武 陵山脉、浙闽丘陵等海拔较高的山地、丘陵区,与银杉不耐高温的生境特征一致^[30-32]。

3.3 气候变化情景下银杉适宜生境破碎化程度变化

生境破碎是生物多样性下降的主要原因之一^[46-47,53],目前对于生境破碎度的计量并没有统一的标准。生 境破碎化的表现形式主要有两种:(1)形态上的破碎化,是由于人类活动等使物种生境面积减少,边缘效应增 强,栖息地破碎化从而导致物种的生境破碎化;(2)生态功能上的破碎化,由于气候变化等使物种对栖息地适

11

应性降低而形成的破碎化^[54]。在计算方法上,有基于景观类型(如林地、草地、灌木林、建设用地等)破碎度 来计算^[13,55],有将破碎度等同于生境面积的减少^[56],有只选用斑块数量与斑块类型面积比来衡量破碎度^[57], 也有综合多个景观指标进行破碎度定性分析^[58-59]。本文利用移动窗口法及主成分分析法综合了多个景观指 标(表 2)得到银杉适宜生境的破碎化空间分布结果,相比单个指标的定量评价和多个指标的定性分析,更能 代表生境的实际破碎化程度。

未来气候变化对研究区内银杉生境的景观指数影响主要表现在斑块数量增多、斑块密度增加、面积加权 平均形状指数变大,导致银杉生境破碎化程度增加,但对银杉分离度与聚散性影响较小。通过对银杉生境多 景观指标的综合 PCA 分析显示,银杉适宜生境的破碎化程度呈现两极分化现象,即极低和极高破碎度等级面 积比例较多,低、中、高破碎度等级面积比例较少。这种两极分化现象随着气候变化有一定的减弱,主要表现 在两极破碎度等级面积比例减少,中间破碎度等级面积比例增加。

通过比较气候变化下银杉适宜生境破碎度空间分布格局(图 6)与当前银杉潜在适宜生境分布(图 2),发 现银杉当前高适宜生境区域在未来气候变化情景下大部分为极低破碎度等级和低破碎度等级,次适宜生境区 域的内部主要为中破碎度和高破碎度等级,其边缘部分则处于高破碎度等级或极高破碎度等级。说明银杉生 境的适宜等级越高,受气候变化的影响越小,生境破碎化程度则越低;反之,适宜等级越低,表明银杉适宜生长 环境越脆弱,受气候变化的影响越大,生境破碎化程度越高。

比较气候变化下银杉适宜生境破碎度空间分布格局(图 6)与适宜生境空间转换特征(图 4)显示,银杉适 宜生境保持不变的区域基本为破碎度等级较低的区域,而新增适宜生境或消失的适宜生境区域的破碎度等级 都偏高。说明银杉生境适宜性变化较小的区域,生境相对比较稳定,受到气候变化的影响也较小,而适宜性变 化较大的区域(新增适宜生境和消失的适宜生境)受气候变化的影响较大,大多处于银杉适宜生境的边缘 地区。

3.4 保护区建议

本文通过对银杉适宜生境潜在分布的模拟与预测,得到银杉潜在适宜生境分布图,结果显示当前气候下 银杉适宜生境面积约354986 km²,仅占研究区总面积的2.40%,比例较小,银杉处于濒危状态,因此必须采取 措施对银杉的生境进行保护。当前,国家已经建立了银杉的专门保护区共九个,包括六个国家级保护区(湖 南炎陵桃源洞保护区、湖南舜皇钟保护区、湖南八面山保护区、广西花坪保护区、广西大瑶山保护区、重庆金佛 山保护区);一个省级保护区(顶辽银杉保护区);两个县级保护区(沙角洞保护区和大沙河保护区)。保护区 面积约169.13 km²,仅占当前适宜面积的0.0048%,说明对银杉生境的保护力度还远远不够。

对银杉的保护建议主要有 3 个方面:(1)本文已经对当前气候下的银杉潜在分布进行了模拟,针对银杉 的适宜生境特别是高适宜生境建立专门的保护区,可以对银杉的核心生长区域进行保护:(2)本文针对未来 气候变化情景下,银杉生境容易发生变化的区域进行了预测,可以针对性地对这些区域进行跟踪监测,有效削 减加剧其生境衰退的干扰因素;(3)目前对银杉生态学特性、人工繁殖方式、遗传特性及改良、濒危状况等系 统研究进展缓慢,对该物种的种植区划、良种培育等研究较少^[60],必须加强银杉种质资源的系统研究,从根本 上改变银杉濒危的现状。

参考文献(References):

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. Climate Change 2013: the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535-1533.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes//Field C B, Barros V R, Dokken D J, Mach K J, Mastrandrea M D, Bilir T E, Chatterjee M, Ebi K L, Estrada Y O, Genova R C, Girma B, Kisse E S, Levy A N, MacCracken S, Mastrandrea P R, White L L, eds. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: World Meteorological Organization,

2014: 190-190.

- [3] CBD. Global Biodiversity Outlook 4: A Mid-Term Assessment of Progress Towards the Implementation of the Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020. Montréal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014.
- [4] Dawson T P, Jackson S T, House J I, Prentice I C, Mace G M. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. Science, 2011, 332(6025): 53-58.
- [5] 姜彤,李修仓,巢清尘,袁佳双,林而达.《气候变化 2014:影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知. 气候变化研究进展, 2014, 10
 (3):157-166.
- [6] Diversity S. Global Biodiversity Outlook 3. Global Biodiversity Outlook, 2010, 5(4): 267-284.
- [7] Williams J W, Jackson S T, Kutzbach J E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(14): 5738-5742.
- [8] Jiménez-Alfaro B, Draper D, Nogués-Bravo D. Modeling the potential area of occupancy at fine resolution may reduce uncertainty in species range estimates. Biological Conservation, 2012, 147(1): 190-196.
- [9] Liu J G, Linderman M, Ouyang Z Y, An L, Yang J, Zhang H M. Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. Science, 2001, 292(5514): 98-101.
- [10] 张镱锂, 胡忠俊, 祁威, 吴雪, 摆万奇, 李兰晖, 丁明军, 刘林山, 王兆锋, 郑度. 基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保 护成效分析. 地理学报, 2015, 70(7): 1027-1040.
- [11] 吴建国,王亮,杨永伟,代拴发,刘建泉,朱高.自然保护区还需面对气候变化挑战.环境保护,2011,(4):30-32.
- [12] Austin, M P, Van Niel K P. Improving species distribution models for climate change studies: variable selection and scale. Journal of Biogeography, 2011, 38(1): 1-8.
- [13] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎姗, 许通, 杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. 生态学报, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [14] 任芯雨,吕莹莹,巫颖伟,李明诗,李卫正.人工林与天然林破碎化过程差异对比——以美国华盛顿州和密西西比州为例.生态学报, 2017, 37(2):474-484.
- [15] 赵光, 邵国凡, 郝占庆, 吴文春. 长白山森林景观破碎的遥感探测. 生态学报, 2001, 21(9): 1393-1402.
- [16] 付刚,肖能文,乔梦萍,齐月,闫冰,刘高慧,高晓奇,李俊生.北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化.生态学报,2017,37(8): 2551-2562.
- [17] 刘世梁, 尹艺洁, 杨珏婕, 安南南, 王聪, 董世魁. 漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 619-627.
- [18] 赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3607-3615.
- [19] Hernandez, P A, Franke I, Herzog S K, Pacheco V, Paniagua L, Quintana H L, Soto A, Swenson J J, Tovar C, Valqui T H, Vargas J, Young B E. Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. Biodiversity and Conservation, 2008, 17(6); 1353-1366.
- [20] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudlk M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberon J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E, Araujo M. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography, 2006, 29(2): 129-151.
- [21] Faleiro F V, Machado R B, Loyola R D. Defining spatial conservation priorities in the face of land-use and climate change. Biological Conservation, 2013, 158; 248-257.
- [22] Bertrand R, Perez V, Gégout J C. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: the case of Quercus pubescens in France. Global Change Biology, 2012, 18(8): 2648-2660.
- [23] Gallagher R V, Hughe L, Leishman M R, Wilson P D. Predicted impact of exotic vines on an endangered ecological community under future climate change. Biological Invasions, 2010, 12(12): 4049-4063.
- [24] Lu C Y, Gu W, Dai A H, Wei H Y. Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: a case study of Schisandra sphenanthera, Rehd. et Wils. in Qinling Mountains, China. Ecological Modelling, 2012, 242: 105-115.
- [25] Guo Y L, Wei H Y, Lu C Y, Gao B, Gu W. Predictions of potential geographical distribution and quality of Schisandra sphenanthera under climate change. PeerJ, 2016, 4(10): e2554.
- [26] Li X H, Tian H D, Wang Y, Li R Q, Song Z M, Zhang F C, Xu M, Li D M. Vulnerability of 208 endemic or endangered species in China to the effects of climate change. Regional Environmental Change, 2013, 13(4): 843-852.
- [27] 高蓓,卫海燕,郭彦龙,顾蔚.应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843-852.
- [28] 傅立国,程树志.银杉的发现及命名.植物杂志,1981,(4):42-43.
- [29] 谢宗强,陈伟烈,刘正宇,江明喜,黄汉东.银杉种群的空间分布格局.植物学报,1999,41(1):95-101.

- [30] 谢宗强,陈伟烈,江明喜,黄汉东,朱日光.八面山银杉林种群的初步研究.植物学报,1995,37(1):58-65.
- [31] 谢宗强,陈伟烈,路鹏,胡东. 濒危植物银杉的种群统计与年龄结构. 生态学报, 1999, 19(4): 523-528.
- [32] 祁承经,肖育檀.湖南省八面山银杉林的群落学分析.植物研究,1988,8(4):169-182.
- [33] 苏乐怡,赵万义,张记军,杨玉鹏,郭远飞,凡强,廖文波.湖南八面山银杉群落特征及其残遗性和保守性分析.植物资源与环境学报, 2016,25(4):76-86.
- [34] 谢宗强,陈伟烈.濒危植物银杉的群落特征及其演替趋势.植物生态学报,1999,23(1):48-55.
- [35] 张旺锋, 樊大勇, 谢宗强, 蒋晓晖. 濒危植物银杉幼树对生长光强的季节性光合响应. 生物多样性, 2005, 13(5): 387-397.
- [36] 谢宗强,李庆梅. 濒危植物银杉种子特性的研究. 植物生态学报, 2000, 24(1): 82-86.
- [37] 汪小全, 邹喻苹, 张大明, 洪德元, 刘正宇. 银杉遗传多样性的 RAPD 分析. 中国科学(C辑), 1996, 26(5): 436-441.
- [38] 王红卫.银杉遗传多态性及其谱系地理//全国系统与进化植物学研讨会暨第九届系统与进化植物学青年研讨会论文摘要集.陕西:全国 系统与进化植物学研讨会暨第九届系统与进化植物学青年研讨会,2006:83-83.
- [39] 葛颂,王海群,张灿明,洪德元.八面山银杉林的遗传多样性和群体分化.植物学报,1997,39(3):266-271.
- [40] Ranc N, Santini L, Rondinini C, Boitani L, Poitevin F, Angerbjörn A, Maiorano L. Performance tradeoffs in target-group bias correction for species distribution models. Ecography, 2017, 40(9): 1076-1087.
- [41] Kumar P. Assessment of impact of climate change on Rhododendrons in Sikkim Himalayas using MaxEnt modelling: limitations and challenges. Biodiversity and Conservation, 2012, 21(5): 1251-1266.
- [42] 吴统文,宋连春,李伟平,王在志,张华,辛晓歌,张艳武,张莉,李江龙,吴方华,刘一鸣,张芳,史学丽,储敏,张洁,房永杰,汪方, 路屹雄,刘向文,魏敏,刘茜霞,周文艳,董敏,赵其庚,季劲钧,LiL,周明煜.北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化 研究中的应用. 气象学报, 2014, 72(1): 12-29.
- [43] Slater H, Michael E. Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling. PLoS One, 2012, 7(2): e32202.
- [44] Jackson C R, Robertson M P. Predicting the potential distribution of an endangered cryptic subterranean mammal from few occurrence records. Journal for Nature Conservation, 2011, 19(2): 87-94.
- [45] Wilcove D S, McLellan C H, Dobson A P. Habitat fragmentation in the temperate zone//Soul'e M E, ed. Conservation Biology: the Science of Scarcity and Diversity. Sunderland: Sinauer Associates, 1986; 237-256.
- [46] 杨芳, 贺达汉. 生境破碎化对生物多样性的影响. 生态科学, 2006, 25(6): 564-567.
- [47] Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2003, 34: 487-515.
- [48] 邬建国.景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版).北京:高等教育出版社,2007.
- [49] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 赵清贺, 汤茜, 孔令华. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析. 生态学报, 2014, 34(12): 3414-3424.
- [50] 张祖荣, 唐建中. 重庆金佛山野生银杉人工繁殖技术初步研究. 四川林业科技, 2004, 25(3): 56-59.
- [51] 李林,魏识广,黄忠良,曹洪麟,莫德清. 猫儿山两种孑遗植物的更新状况和空间分布格局分析. 植物生态学报, 2012, 36(2): 144-150.
- [52] 姜大膀, 富元海. 2℃全球变暖背景下中国未来气候变化预估. 大气科学, 2012, 36(2): 234-246.
- [53] 安静,刘鸯,王海娟,王丹丹,张霞,吴玲.破碎化生境中粗柄独尾草种群大小对繁殖特性的影响.生态学报,2018,38(6):2074-2081.
- [54] 朱立敏. 生境破碎化条件下太行山区蜘蛛群落结构研究[D]. 保定: 河北大学, 2008.
- [55] 肖烨. 大熊猫生境适宜性评价和景观格局分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [56] Carlson A, Hartman G. Tropical forest fragmentation and nest predation-an experimental study in an Eastern Arc montane forest, Tanzania. Biodiversity & Conservation, 2001, 10(7): 1077-1085.
- [57] 巩杰,谢余初,高彦净,孙朋,钱大文. 1963-2009 年金塔绿洲变化对绿洲景观格局的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 603-612.
- [58] 徐凯健,曾宏达,任婕,谢锦升,杨玉盛.亚热带典型红壤侵蚀区人类活动对植被覆盖度及景观格局的影响.生态学报,2016,36(21): 6960-6968.
- [59] 李帅,马文超,顾艳文,魏虹,彭月,李昌晓.宁夏黄河流域景观破碎化时空变化特征.生态学报,2016,36(11):3312-3320.
- [60] 周盼. 银杉种质资源的保护与利用探讨. 现代农业科技, 2009, (11): 13-13, 15-15.