

DOI: 10.5846/stxb202202210411

鲁奇, 李洁, 刘冠, 张艳如, 李国庆. 气候变化对物种脆弱性影响的多组分评估——以中国山杏为例. 生态学报, 2023, 43(8): 3181-3191.

Lu Q, Li J, Liu G, Zhang Y R, Li G Q. Multi-component assessment of the impact of climate change on species vulnerability: A case study of *Armeniaca sibirica* in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3181-3191.

气候变化对物种脆弱性影响的多组分评估 ——以中国山杏为例

鲁 奇^{1,2}, 李 洁³, 刘 冠^{1,2}, 张艳如⁴, 李国庆^{2,4,*}

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

3 南京大学生命科学院, 南京 210023

4 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 气候变化威胁着全球生物多样性, 评估物种脆弱性是研究气候变化对生物多样性影响的关键所在。目前多数研究主要通过物种适宜区面积变化来判断物种脆弱性, 这单一维度会忽略其它因素的影响。采用多组分评估框架, 将物种适宜区面积变化、生境破碎程度变化、受保护面积变化和人类干扰程度变化四个组分纳入物种总体脆弱性指数中, 以中国具有较高经济和生态价值的山杏 (*Armeniaca sibirica*) 作为研究对象, 评估未来 (2061—2080 年) 三种共享社会经济路径 (ssp) ssp126、ssp245、ssp585 下山杏物种脆弱性。研究结果表明: 未来山杏生境适宜区有向我国东北和西北方向扩张的趋势, 扩张区面积明显大于消失区, 这种差异化程度依赖于社会发展路径情景; 未来适宜区内的保护区面积将由当前 $6.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到 $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$ (三种气候变化情景下的平均值), 未来适宜生境破碎化程度将保持稳定, 生境适宜区内的人类干扰强度将下降; 各组分的比较中, 受保护面积变化对山杏总体脆弱性的贡献将超过山杏适宜生境面积变化和其它组分的贡献; 多组分评估下山杏脆弱性指数分别为 13.93、21.04、31.41, 说明未来气候变化将给山杏物种带来积极的影响。相较于单个指标评估, 多组分评估更全面评估了物种脆弱性, 特别强调自然保护区在多组分评估中的重要性应该引起重视。研究结果能为我国山杏应对气候变化的适应性管理提供科学依据, 也为更广泛尺度上研究气候变化下其它物种脆弱性提供案例支撑。

关键词: 生境破碎化; 生境适宜性; 人类干扰; 受保护面积; 物种脆弱性

Multi-component assessment of the impact of climate change on species vulnerability: A case study of *Armeniaca sibirica* in China

LU Qi^{1,2}, LI Jie³, LIU Guan^{1,2}, ZHANG Yanru⁴, LI Guoqing^{2,4,*}

1 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Climate change threatens global biodiversity, and assessing the vulnerability of species is the key to study the impact of climate change on biodiversity. At present, the vulnerability of species is mainly evaluated by the changes in suitable areas or habitat of species. However, this single dimension ignores the influence of other components. Here, the study adopted a multi-component assessment framework, which incorporated four components of vulnerability, including changes in suitable areas for species, habitat fragmentation, changes in protected area and human disturbance. Then, an

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971488, 31300407)

收稿日期: 2022-02-21; 网络出版日期: 2022-12-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liguoqing@nwsuaf.edu.cn

overall species vulnerability index was built based on the average vulnerability value of the four components. Such an evaluation procedure was applied to *Armeniaca sibirica* under climate change, a Chinese native tree species with higher economic and ecological value, to assess the species vulnerability under three shared socio-economic pathways (ssp126, ssp245, ssp585) in late 21st century (2061—2080). The results show that *A. sibirica* will mainly expand toward northeast and northwest of China, and the expansion areas are significantly larger than the disappearance areas. The degree of this difference depends on the social development pathways. The protected areas in suitable habitat will increase from the current $6.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ to $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$ across climate change scenarios. The fragmentation of the suitable habitat will remain stable. The intensity of human disturbance will decrease in the suitable habitat. Compared comprehensively, the contribution of the protected area change to the overall vulnerability will exceed the contribution of the suitable habitat area change and other components of the species. The value of overall vulnerability index is 13.93, 21.04 and 31.41 for the species, which show that future climate change will have a positive impact on *A. sibirica* in the late 21st century. Multi-component assessment could more comprehensively assesses the vulnerability of species than that for a single indicator assessment. The results highlight the importance of protected area in multi-component assessment. Our study can not only provides a scientific basis for the adaptive management of *A. sibirica* to deal with climate change, and also provides a case support for evaluation of the vulnerability of other species at the regional scale.

Key Words: habitat fragmentation; habitat suitability; human disturbance; protected area; species vulnerability

气候变化将严重威胁着全球生物多样性^[1-2]。全球气候变暖背景下,地球上的物种将面临高暴露风险,这可能会增加物种受到威胁的可能性,使物种变得脆弱^[3-4]。因此,研究未来气候变化可能对物种脆弱性造成的影响,对物种应对气候变化的适应性管理策略制定具有重要意义。物种脆弱性用于衡量物种抵御外界气候变化带来不利影响的能力,当物种越脆弱,其应对气候变化带来影响的能力就越低,维持种群生存的能力就越差,面临灭绝风险的可能就越大^[5]。目前物种脆弱性的评估方法主要有三种:脆弱性指数方法^[6-7]、适宜区面积变化方法^[8-9]、多组分评估方法^[10-11]。

脆弱性指数方法指基于大量观察与物种脆弱性相关的指标,依据专家打分来评判物种的总体脆弱性^[7];适宜区面积变化方法是基于物种生态位保守性原理,预测物种在当前及未来气候条件下适宜区的面积变化来判断物种脆弱程度^[12];多组分评估是在物种分布模型的基础上,量化脆弱性指数的相关指标,能从多个维度对物种脆弱性进行总体评估^[11]。其中,第一种方法主要用来刻画当前物种脆弱性,例如濒危物种等级的划分^[13];后两种方法主要用来刻画未来气候变化下物种脆弱性^[8-9, 11]。目前国内对物种脆弱性的研究主要采用适宜区面积变化的方法,较少考虑多组分评估^[9]。适宜区面积变化方法较注重物种分布范围面积的大小,而忽略了分布范围生境质量对物种脆弱性的影响。实际上,物种适宜区面积的变化仅仅是物种脆弱性的单一维度,物种生境质量所代表的多维度在物种脆弱性评估中不可忽略,即物种生境面积增加对物种脆弱性带来的正向影响可能会被物种生境质量下降导致的负面影响所抵消。

物种生境质量包括很多方面,如生境分布形状、生境受到保护状态、生境受到破坏状态^[14-15]等。Cianfrani 等^[11]用生境破碎化、人类干扰、保护区面积等指标刻画了生境质量的维度,认为这些要素对物种脆弱性的影响与面积变化具有同等重要的作用。Li 等^[16]采用这种方法,研究表明在气候变化对山杨脆弱性的影响中,自然保护区面积的作用将大于生境面积变化的作用。因此,同时考虑生境面积变化和生境质量的变化将能从多个维度全面刻画物种脆弱性,优于单一维度的生境面积变化的评估,能够为物种适应性管理提供更科学的决策信息。

山杏 (*Armeniaca sibirica*) 隶属于蔷薇科 (Rosaceae), 它适应性强、耐寒、耐旱、耐贫瘠, 是防风固沙、水土保持的重要树种。我国山杏资源较为丰富, 其分布总面积在 2017 年达到 226.6 万公顷^[17], 整体上呈东北-西南走向的宽条形。目前国内在山杏种源引种^[17-18] 生理生态^[19-21] 等方面的研究报道较多。在山杏地理分布的

研究方面,王利兵^[22]第一次报道了我国山杏的地理分布范围;张家琛等^[23]对阜平县北流河区的山杏适宜区进行了规划研究。以“山杏+气候变化”为关键词在中国知网、Web of science 和 Google scholar 上检索,尚未发现有相关报道,这限制了对山杏适应未来气候变化策略的制定。由于山杏在全国多年的引种栽培实践,使得影响山杏分布的物种扩散和竞争因素可能不是限制其分布的主要因子。基于此,本文通过物种分布模型模拟并预测山杏当前气候和未来气候条件下的生境适宜区面积变化,并采用人类干扰指数、保护区面积和生境破碎化 3 个指标刻画生境质量维度,综合评估山杏物种脆弱性,从而为山杏的管理保护和开发利用提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

本研究通过物种分布模型预测当前和未来气候条件下山杏的适宜区面积变化,并计算山杏生境破碎化程度、受保护面积变化和人类干扰程度 4 个组分上的暴露风险,研究气候变化对山杏脆弱性的影响。具体研究石方法体系见图 1。

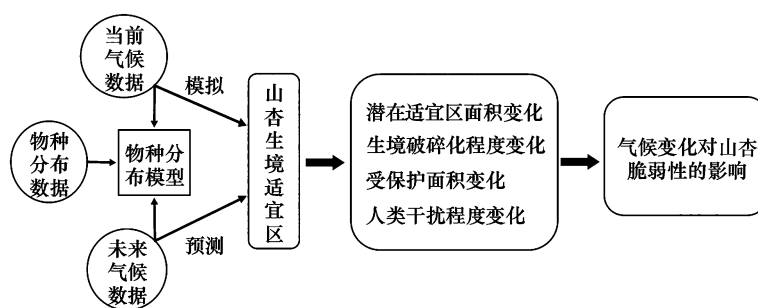


图 1 气候变化下山杏物种脆弱性多组分评估方法体系

Fig.1 The multi-component assessment method system for the vulnerability of *Armeniaca sibirica* species to climate change

1.1 物种数据

山杏 (*Armeniaca sibirica*) 的存在数据主要来源于中国植物智网站 (<http://www.iplant.cn/>) 和中国数字植物标本馆 (<https://www.cvh.ac.cn/>), 其中山杏馆藏标本 367 份, 中国植物智搜集到 65 个分点。这 2 个数据库集成了全国的标本数据, 是研究物种多样性地理分布格局的重要数据源。对于只有地名的点数据, 通过百度拾取坐标系 (<http://api.map.baidu.com/>) 得到具体经纬度信息。将这些出现数据分配到 10 分的中国地图栅格上, 筛选后得到 120 个有效分布点, 具体见图 2。

1.2 气候变量

当前气候数据 (1971—2000 年) 和未来气候数据 (2061—2080 年) 从世界气候数据库 (<https://www.worldclim.org/>) 上获取, 空间分辨率为 10 分。使用这个分辨率的原因有 2 点: (1) 植物标本采集在地理空间上的位置信息较为粗糙, 使用较大分辨率的环境图层将使得匹配更为合理; (2) 能够刻画山杏物种地理分布的一般特征, 而不受到局部地形等随机因素的影响。

该数据库共包括 19 个生物气候变量。利比希最小因子定律认为极端温度、极端降雨是限制物种分布边界的主要驱动因子^[24]。因此, 本文选取其中 8 个变量, 用于表征物种的水热需求的平均状态以及限制物种分

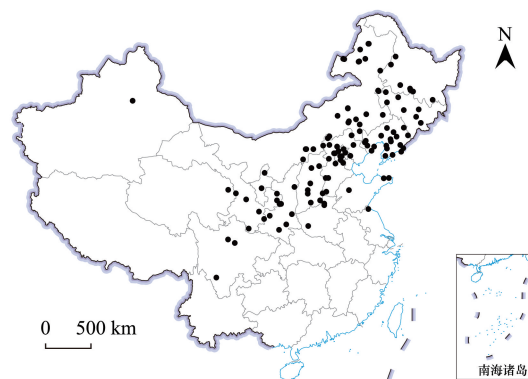


图 2 山杏分布点图

Fig.2 Distribution records of *Armeniaca sibirica* in China

布的极端气候变量^[25](见表1)。只选择气候因素而不选择土壤、植被和地形等变量的原因主要有3点:(1)土壤和植被因素在未来条件下的数据不可获得,从而使得未来数据缺失,导致无法预测;(2)埃尔顿噪声假说认为纳入土壤和植被等因素,将混淆气候的作用^[26];(3)地形因素不是影响物种分布的直接因素(无直接生物学意义机制和过程等),它的作用主要是温度等因素的代理指标。

未来气候情景采用 BCC_CSM 1.1 大气环流模式(GCM),该模式是我国自主开发的气候模式(中国气象局北京气候中心)。由于中国的气候不仅受到东亚季风的影响,还受到世界屋脊青藏高原的强烈影响,BCC_CSM 1.1 能够合理的模拟中国特色的气候系统^[27],体现出了 BCC_CSM 1.1 的优越性。为了评估 CO₂ 排放浓度的不确定性,选择联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告中提出的共享社会经济路径(SSPs),其中 ssp126 代表 CO₂ 低排放浓度路径,属于可持续发展;ssp245 代表 CO₂ 中度排放浓度路径,属于中度发展;ssp585 代表 CO₂ 高浓度排放路径,属于基于化石燃料的发展^[28]。

表 1 研究使用的 8 个气候变量
Table 1 Eight climatic variables used in the study

气候变量 Climatic variables	缩写 Abbreviation	当前气候范围 Current climate range	未来气候变化 Future climate change
年均温 Annual mean temperature	AMT	-16.1—25.5℃	28%—67%
温度年较差 Annual range of temperature	ART	12.5—62.5℃	-1.1%—1.1%
最暖月最高温 Max temperature of warmest month	MTWM	1.5—42.0℃	9.9%—20.9%
最冷月最低温 Min temperature of coldest month	MCTM	-37.3—17.7℃	14.1%—34.5%
年降水量 Annual precipitation	AP	192—1231mm	4.5%—9.9%
最湿月降水量 Precipitation of wettest month	PWM	32—258mm	7.4%—16.7%
最干月降水量 Precipitation of driest month	PDM	0—27mm	-6.3%—2.8%
季节性降水量 Precipitation of seasonality	PSD	43.9—149.9mm	1.8%—3.6%

1.3 生境模拟过程

本研究选择最大熵模型(MaxEnt)模拟山杏当前和未来气候条件下潜在适宜区,它是 Phillips 等^[29]提出的物种生境适宜性建模方法,该模型只需要物种发生数据和气候数据^[30],是目前使用最为广泛的一种物种分布模型。

将山杏分布数据输入 MaxEnt 中进行建模,迭代设置 500 次,最大背景点为 10000 个,其它参数设为默认。采用默认值的原因主要有 2 点:(1)MaxEnt 模型默认参数是经过大量物种测试后,被保留的刻画物种对环境因子响应的一般规律,默认参数的使用更具有普遍性;(2)本研究的测试曲线下面积(AUC)指标已经达到了 0.91,模型已经非常准确。认为当 MaxEnt 模型模拟的 AUC 值较小时,物种可能不遵守 MaxEnt 默认参数的生态因子响应一般规律,可以考虑进行参数的优化^[31]。

本研究中采用十份交叉验证的方式评估模型的准确性,受试者工作特征曲线(ROC)下面积(AUC)作为模拟准确性的指标:AUC>0.90 为优秀;0.80—0.90 为较好;0.70—0.80 为正常;0.60—0.70 为较差;0.60>AUC 为失败^[32]。选择 AUC 的原因主要有 3 点:(1)MaxEnt 模型是一类模型(PO 模型),而不是二类模型(PA 模型,如 SVM、ANN、RF),因此 MaxEnt 模型的真实 Commission 误差不明确^[33];(2)MaxEnt 模型是通过背景点随机选择来刻画 Commission 误差,在机器学习领域的几十种评判标准中,AUC 值不依赖阈值的选择,因此成为 MaxEnt 软件中唯一的以测试模型表现的评估指标^[34];(3)虽然 AUC 的评判标准受到物种分布区的真实范围大小(真阳性率)的影响,可能会高估模型表现,但 AUC 目前仍然是主流的方法,因为自然界物种的真实阳性率暂时无法计算^[32]。

根据最大灵敏度和特异度之和确定物种最佳分布阈值(TH)。将 MaxEnt 得到未来三种气候情景(ssp126、ssp245、ssp585)的生境适宜度图转化成 0—1 图,0 代表小于最优阈值的位置,表示物种不适宜生境,1 代表大于最优阈值的位置,表示物种的适宜生境。最后,以 Huang 等^[35]提出的公式(1)将当前和未来的适

宜分布图进行地图运算:

$$\text{RCMAP}_i = 2 \times \text{FMAP}_i + \text{CMAP}_i \quad (1)$$

RCMAP_i 代表山杏适宜生境变化图; FMAP_i 为山杏未来生境 0—1 图; CMAP_i 为山杏当前生境 0—1 图; i 代表未来三种气候情景。最终得到山杏适宜区变化的栅格图, 其中不适宜区为 0、消失区为 1、扩张区为 2、稳定区为 3。

1.4 物种脆弱性四个组分的计算

1.4.1 适宜区面积变化(V_{AC})

适宜区面积变化(AC)表示未来生境适宜区面积相对于当前适宜区面积变化的比率, 计算公式如下:

$$AC = (A_f - A_c) / A_c \times 100 \quad (2)$$

A_f 代表山杏未来适宜区面积大小, A_c 代表山杏当前适宜区面积大小, 生境适宜区面积的增加会降低山杏脆弱性, 使其生存能力增强。认为物种脆弱性在适宜区面积变化组分上的大小为: $V_{AC} = AC$, 当 $AC > 100$ 时, 则 $V_{AC} = 100$ 。

1.4.2 生境破碎程度的变化(V_{Fr})

物种生境适宜区的生境破碎化用 4 个指标来刻画, 分别为总斑块边缘数(Ed)、周长面积比(Per_area_ratio)、形状指数(Shape index)、核心区面积指数(Core_area_index), 计算如下:

$$Ed = \sum (N_edges_per) \quad (3)$$

$$\text{Per_area_ratio} = \sum (\text{Per_per}) / \sum (\text{Area_per}) \quad (4)$$

$$\text{Shapeindex} = 0.25 \times \sum (\text{Per_per}) / \sqrt{\sum (\text{Area_per})} \quad (5)$$

$$\text{Core_area_index} = \sum (\text{Core_area}) / \sum (\text{Area_per}) \quad (6)$$

N_edgs_per 表示每个斑块的边界数量; Per_per 表示每个斑块的周长; Area_per 表示每个斑块的面积; Core_area 表示每个斑块的核心区指数。

由于这 4 个指标对物种脆弱性的影响各不相同, 若周长面积比和形状指数增大, 则破碎化程度加剧, 对物种产生负面影响; 反之, 核心区面积指数和总斑块边缘数增大, 破碎度减小, 对物种产生正面影响。因此, 破碎化程度变化对物种脆弱性计算公式如下:

$$C_{Fr} = (C_{\text{Core_area_index}} + C_{Ed} - C_{\text{Per_area_ratio}} - C_{\text{Shape index}}) / 4 \quad (7)$$

式中, C_{Fr} 表示生境适宜区破碎程度的变化; $C_{\text{Core_area_index}}$ 表示核心区面积指数的变化; C_{Ed} 表示总斑块边缘数变化; $C_{\text{Per_area_ratio}}$ 表示周长面积比变化; $C_{\text{Shape index}}$ 表示斑块形状指数变化。由于生境破碎化加剧会给物种造成不利影响^[36], 因此认为 $V_{Fr} = C_{Fr}$, 当 $V_{Fr} > 100$ 时, 取值 100。

1.4.3 受保护面积变化(V_{PA})

将山杏适宜区与自然保护区数据在 GIS 里进行叠加, 根据公式(8)计算当前和未来山杏生境适宜区内受保护面积的变化(PA):

$$PA = (P_f - P_c) / P_c \times 100 \quad (8)$$

式中, P_c 、 P_f 分别表示当前和未来生境适宜区内的保护区面积大小。适宜区内受保护面积的增加对物种起到积极作用, 会降低物种脆弱性, 所以认为 $V_{PA} = PA$, 当 $V_{PA} > 100$ 时, 取值 100。其中自然保护区边界数据来源中国自然保护区标本资源共享平台 (<http://www.papc.cn/>) (图 3)。

1.4.4 人类干扰程度的变化(V_{HF})

当前和未来气候变化条件下山杏的生境适宜区与人类足迹图(图 3)进行叠加分析(从 <http://sedac.ciesin.columbia.edu> 获取), 通过公式(9)计算当前和未来山杏适宜生境中人类干扰程度的变化(HF):

$$HF = (H_{Fr} - H_{Fc}) / H_{Fc} \times 100 \quad (9)$$

式中, H_{Fc} 、 H_{Fr} 分别表示当前和未来生境适宜区内的人类足迹的平均值。人类干扰一般情况下会对山杏种群

的生存带来不利影响,所以脆弱性刻化为: $V_{HF} = -HF$,当 $V_{HF} > 100$ 时,取值100。

1.4.5 总体脆弱性指数

本研究中物种脆弱性的总体指数是四个组分(适宜区面积变化、生境破碎化程度变化、受保护面积变化、人类干扰程度变化)的综合反映。Cianfrani 等^[11]对各组分进行了不同权重的敏感性分析,结果表明物种总体脆弱性指数对权重不敏感。基于此,本研究结合山杏特性,采用相同权重加权4项指标,计算总体脆弱性指数,范围为-100到100,数值越大表示物种抵御气候变化不利影响的能力越强,反之亦然。公式如下:

$$\text{总体脆弱性指数} = (V_{AC} + V_{Fr} + V_{PA} + V_{HF}) / 4 \quad (10)$$

式中, V_{AC} 表示山杏在适宜区面积变化组分上的脆弱性; V_{Fr} 表示在生境破碎化程度变化组分上的脆弱性; V_{PA} 表示在受保护面积变化组分上的脆弱性; V_{HF} 表示在人类干扰程度变化组分上的脆弱性。

2 结果与分析

2.1 气候变化下山杏的潜在分布区模拟

基于当前山杏的分布记录和当前气候条件 MaxEnt 的模拟结果表明,10次交叉验证中 AUC 变化范围为 0.876—0.943,平均值为 0.913,说明该模型的拟合效果达到了较高的准确度。根据最大灵敏度和特异性的阈值标准(10次重复的平均值为 0.249),确定最佳阈值为 0.25。

当前气候条件下,山杏适宜生境主要分布在我国东北、华北、西北,面积为 $2.29 \times 10^6 \text{ km}^2$,约占我国总面积的 23%。其中高适宜区(大于 0.6)面积为 $5.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、中适宜区(0.4—0.6)面积为 $9.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、低适宜区(0.25—0.4)面积为 $8.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,不适宜区为小于 0.25 的区域;高适宜区主要集中在我国辽宁、吉林、河北、北京、陕西、内蒙古 6 省的部分地区(图 4)。

在 ssp126、ssp245、ssp585 三种气候变化情景下,山杏的适宜生境面积分别是 $2.48 \times 10^6 \text{ km}^2$ 、 $2.46 \times 10^6 \text{ km}^2$ 、 $2.61 \times 10^6 \text{ km}^2$,面积增加比例分别为 25.83%、25.51%、27.07%。山杏适宜生境主要向东北方向和西部高海拔地区扩张,尤其是在内蒙古、黑龙江、甘肃祁连山以及青藏高原东部一带,未来三种气候情景下扩张面积分别为 $4.45 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $6.29 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $7.82 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。在河南、陕西南部及山东地区出现面积收缩,收缩面积分别为 $2.45 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $4.73 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、 $4.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。内蒙古、吉林、辽宁、北京、天津、河北、山西、甘肃东部和陕北一带最为稳定,基本不变。

2.2 山杏在四个组分上的脆弱性变化

本研究考虑了物种脆弱性的四个组分:生境适宜区面积的变化(V_{AC})、生境破碎程度的变化(V_{Fr})、受保护面积的变化(V_{PA})和人类干扰程度的变化(V_{HF}),各组分的计算结果如图 5 所示。

在生境适宜区面积变化组分上(V_{AC}),不同气候变化情景下山杏生境适宜面积变化均为正值,分别为 8.30、7.98、13.97,说明未来气候变化引起的生境适宜面积变化将会对山杏种群数量产生积极影响。

在生境破碎程度变化组分上(V_{Fr}),山杏核心区指数变化范围为-7.59—12.47;形状指数变化范围为-12.47—3.56;总斑块边缘数变化范围为-0.23—0.23;斑块周长面积比变化范围为-6.89—8.62(表 2)。三种气候变化情境下,山杏生境破碎化程度变化组分上的脆弱性指数分别为 0.78、0.33、-0.02,说明未来气候变化在该组分上对山杏脆弱性造成的影响较小。

在受保护面积变化组分上(V_{PA}),从当前保护区覆盖面积 $6.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 分别增加到 2080 年的 $9.25 \times 10^4 \text{ km}^2$

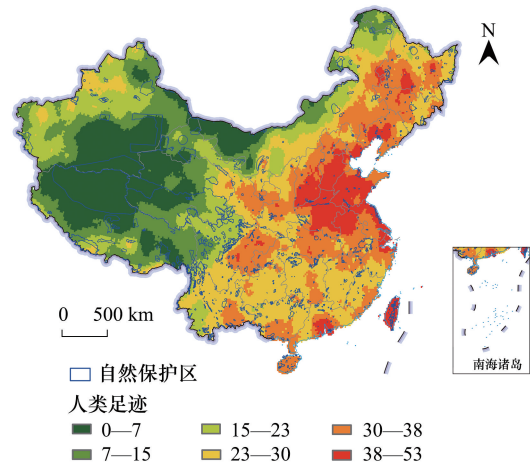


图 3 中国自然保护区分布图和人类足迹图

Fig. 3 Spatial distribution map of natural reserve and human footprint in China

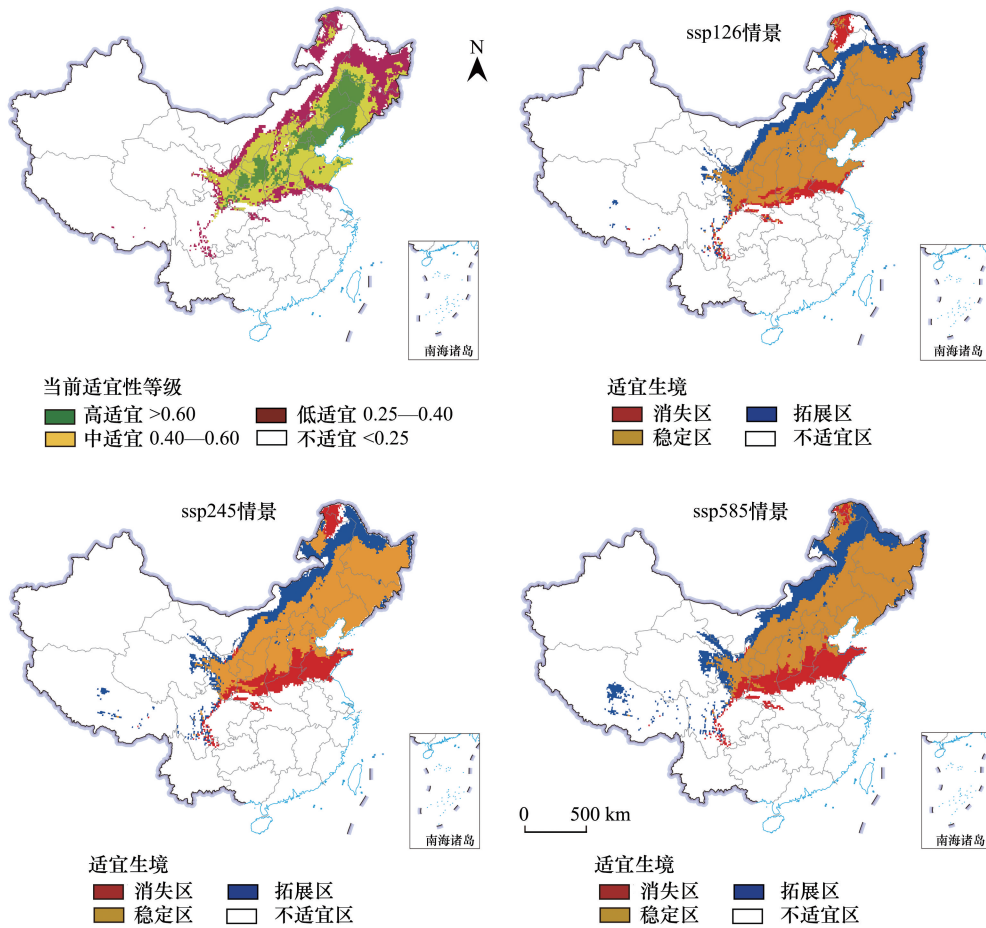


图4 山杏当前生境适宜性等级图及未来三种气候情景下生境适宜区变化图

Fig.4 Vulnerability of each component of *Armeniaca sibirica* under three climate change scenarios

ssp126 表示 CO₂低排放浓度的共享社会经济路径,ssp245 表示 CO₂中度排放浓度的共享社会经济路径,ssp585 表示 CO₂高排放浓度的共享社会经济路径

(ssp126)、 $1.08 \times 10^5 \text{ km}^2$ (ssp245)、 $1.29 \times 10^5 \text{ km}^2$ (ssp585),受保护面积的增加将会加强山杏适应气候变化的能力,这使得山杏脆弱性在该组分上的值分别是 42.31、66.15、98.46。

在人类干扰程度变化组分上 (V_{HF}),山杏适宜生境的内部人类足迹的平均值从当前的 31.82,下降到未来三种排放浓度下的 30.44 (ssp126)、28.73 (ssp245)、27.62 (ssp585),表明山杏适宜生境内部人类干扰程度在下降。山杏脆弱性在该组份上的值分别为 4.34、9.71、13.19,意味着山杏将更加适应未来气候变化。

2.3 山杏的总体脆弱性指数

未来三种气候变化情境下,山杏的总体脆弱性指数分别为 13.93、21.04、31.41(图6)。其中,适宜区面积的扩张和受保护面积的增加将有利于山杏生存,生境破碎

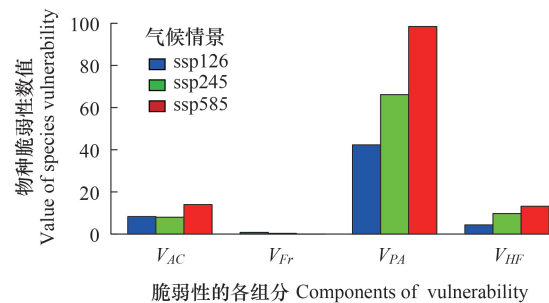


图5 未来三种气候变化情景下山杏各组分的脆弱性

Fig.5 Vulnerability of each component of *Armeniaca sibirica* under three climate change scenarios

V_{AC} , V_{Fr} , V_{PA} 和 V_{HF} 分别指在物种脆弱性的生境适宜区面积变化组分、生境破碎程度变化组分、受保护面积变化组分和人类干扰程度变化组分

化对山杏脆弱性产生较小的影响,同时生境适宜区内人类干扰程度降低有利于山杏的生存,所以山杏在未来气候变化下,其总体脆弱性指数为正且逐渐增大。

表 2 气候变化下山杏生境适宜区破碎化程度的变化

Table 2 Changes of fragmentation in suitable habitat of *Armeniaca sibirica* under climate change scenarios

气候情景 Climate scenario	核心区指数变化 Changes in core area index/%	形状指数变化 Changes in shape index/%	总斑块边缘数变化 Change in the total patch boundary number/%	周长面积比变化 Changes in perimeter area ratio/%	破碎化程度的变化 Changes in degree of fragmentation
ssp126	-7.59	-4.01	-0.23	-6.89	0.78
ssp245	-8.50	-2.65	0.00	-7.17	0.33
ssp585	-12.47	-3.56	0.23	-8.62	-0.02

表中的 ssp126 表示 CO₂ 低排放浓度的共享社会经济路径,ssp245 表示 CO₂ 中度排放浓度的共享社会经济路径,ssp585 表示 CO₂ 高排放浓度的共享社会经济路径

3 讨论

3.1 山杏脆弱性多组分评估

目前国内对物种气候变化的脆弱性评估通常是依据生境面积变化的方法(传统方法),以物种潜在分布范围扩大或缩小来断定其脆弱性程度,但这种方法忽略了其它维度的影响^[37—39]。不同于传统方法,本研究通过 4 个组分的分析,评估了未来气候变化下山杏的总体脆弱性。研究表明,未来气候变化不仅有利于山杏生境适宜区面积的扩大,而且这些生境适宜区受保护面积将会增加,生境适宜区内人类干扰程度将会降低,未来生境适宜区的破碎化程度将维持稳定。

然而,传统方法和多组分方法在物种脆弱性评估上存在不一致的地方。研究中评估物种脆弱性的四个组分按其贡献度大小排列为:受保护区面积(70.2%)>分布面积变化(20.7%)>人类干扰(7.8%)>破碎化(1.3%)。认为如果只利用生境面积变化来评估山杏的脆弱性,结果可能会严重偏小,这与 Levinsky 等^[40]对未来两种气候情景下欧洲 120 种哺乳动物的脆弱性评估结果相似。对于山杏脆弱性的低估主要是由于受保护面积变化被忽略导致的。相对而言,人类干扰变化和生境破碎化程度变化两个组分对未来山杏脆弱性贡献率较小。

山杏物种受保护面积的驱动力主要来自中国自然保护区。在中国自然保护网络空间布局条件下,山杏未来适宜生境的受保护面积从 $6.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 逐渐增加到 $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$ (三种气候变化情境下的平均值),受保护面积提升了 69%。涉及到的自然保护区包括甘肃祁连山自然保护区、色林错湿地自然保护区、青海湖鸟岛自然保护区、三江源国家自然保护区、锡林郭勒草原国家自然保护区以及黑龙江大沾河湿地自然保护区、翠北湿地自然保护区、红星湿地自然保护区等。

自然保护区的建立对生物多样性保护最有效的途径之一,有效减少人类对自然的干扰,维持生态平衡,使物种生长稳定^[41—42]。本研究与 Li 等^[16]对中国山杨树种脆弱性的研究结果相似,他们也发现山杨在未来气候下的生境适宜区将会受到更多保护。基于此,认为我国自然保护区网格在未来气候变化条件下将可能为更多物种带来积极保护作用^[43—44]。

3.2 研究不确定性与展望

预测未来气候变化下物种的脆弱性具有一定的不确定性。首先,将面临未来社会发展路径的不确定性^[28]。本研究采用 IPCC 第六次评估报告中提出的 3 种共享社会经济路径,来刻画未来社会发展的不确定性

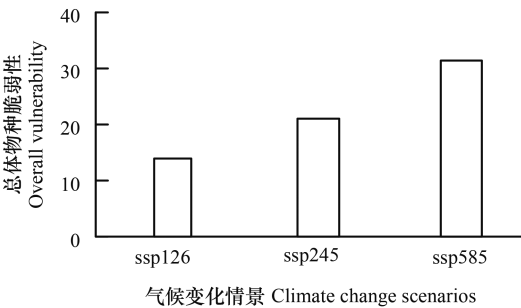


图 6 气候变化下山杏的总体脆弱性指数

Fig. 6 The overall vulnerability index of *Armeniaca sibirica* under climate change scenarios

(低排放、中排放、高排放路径)。对山杏的脆弱性评估结果表现出相似的效应,山杏总体脆弱性在 ssp126、ssp245、ssp585 三种气候情境下分别为 13.93、21.04、31.41。说明无论社会的发展路径如何,未来气候变化都将给山杏种群的生存带来的积极影响,但获益的程度有差异,依赖于社会经济路径的发展情况。

其次,GCMs 对气候变化预测的过程和机制也可能存在一定的不确定性^[45]。由于本研究的目标是评估物种的脆弱性,而不是评估 GCMs 的不确定性。因此,从众多的 GCMs 中选择了最有可能刻画中国气候变化的过程和机制的 BCC_CSM1.1 气候模式,该模式能够合理的模拟中国特色的气候系统(东亚季风和藏高原的效应),体现出了 BCC_CSM1.1 相对于其它 GCMs 的优越性^[46],该模式所模拟的气候变化数据被广泛用来评估中国植被和物种的脆弱性^[47]。即使如此,评估 GCMs 不确定性仍然需要进一步研究。

再次,在山杏物种脆弱性的多组分评估中,发现中国自然保护区的作用将超过生境适宜区面积变化的作用。这样的评估结果是基于未来中国自然保护区网络体系不变为假设条件的,而实际上中国自然保护区在未来几十年内可能会进行动态调整,使得山杏受保护的程度会有所改变。纳入未来中国自然保护地网络体系情景,更能准确评估物种的脆弱性。

因此,本研究所得到的结果是对未来气候变化下山杏脆弱性的一种最有可能的推测,这种推测的结果不能直接用来决定政府的决策,但可以为保护政策的制定提供理论依据。除此之外,本研究所采用的多组分评估方法体系具有广泛的适用性,优于仅仅通过生境面积变化的评估。该方法采用客观的评分标准,具有可靠的数据支撑,能从多个组分刻画物种脆弱性的维度,可以同时应用于多物种的评估,从而能够对物种脆弱性的高低进行排序,对气候变化下物种的优先保护提供技术支撑。

4 结论

(1) 未来气候变化下,山杏生境适宜区的面积将扩大、生境破碎化程度将保持稳定、受保护面积将增加、适宜区内的人类干扰程度将降低。

(2) 山杏总体脆弱性指数均值为 22.13(范围为 13.93—31.41),表明未来气候变化将给中国山杏种群带来积极影响,从而使其获益。

(3) 在各组分的比较中,受保护面积变化组分对山杏总体脆弱性的贡献将超过山杏适宜生境面积变化组分的贡献,表明物种受保护面积在评估气候变化下物种脆弱性的研究中应受到重视。

参考文献(References):

- [1] 马克平, 钱迎倩. 生物多样性保护及其研究进展. 应用与环境生物学报, 1998, 4(1): 96-100.
- [2] Lankford A J, Svancara L K, Lawler J J, Vierling K. Comparison of climate change vulnerability assessments for wildlife. Wildlife Society Bulletin, 2014, 38(2): 386-394.
- [3] 马瑞俊, 蒋志刚. 全球气候变化对野生动物的影响. 生态学报, 2005, 25(11): 3061-3066.
- [4] 彭少麟, 李勤奋, 任海. 全球气候变化对野生动物的影响. 生态学报, 2002, 22(7): 1153-1159.
- [5] 李洁. 未来气候变化对中国 6 种典型落叶阔叶树种脆弱性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [6] Ofori B Y, Stow A J, Baumgartner J B, Beaumont L J. Influence of adaptive capacity on the outcome of climate change vulnerability assessment. Scientific Reports, 2017, 7: 1-12.
- [7] Gardali T, Seavy N E, DiGaudio R T, Comrack L A. A climate change vulnerability assessment of California's at-risk birds. PLoS One, 2012, 7(3): 1-13.
- [8] Songer M, Delion M, Biggs A, Huang Q Y. Modeling impacts of climate change on giant Panda habitat. International Journal of Ecology, 2012, 2012: 1-12.
- [9] 李佳, 刘芳, 张宇, 薛亚东, 李迪强. 气候变化背景下野生动物脆弱性评估方法研究进展. 生态学报, 2017, 37(20): 6656-6667.
- [10] Willis S G, Foden W, Baker D J, Belle E, Burgess N D, Carr J A, Doswald N, Garcia R A, Hartley A, Hof C, Newbold T, Rahbek C, Smith R J, Visconti P, Young B E, Butchart S H M. Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. Biological Conservation, 2015, 190: 167-178.

- [11] Cianfrani C, Broennimann O, Loy A, Guisan A. More than range exposure: global otter vulnerability to climate change. *Biological Conservation*, 2018, 221: 103-113.
- [12] Birhane E, Asgedom K T, Tadesse T, Hishe H, Abrha H, Noulékoun F. Vulnerability of baobab (*Adansonia digitata* L.) to human disturbances and climate change in western Tigray, Ethiopia: conservation concerns and priorities. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: 1-14.
- [13] Kaplan K A, Montero-Serra I, Vaca-Pita E L, Sullivan P J, Suárez E, Vinuela L. Applying complementary species vulnerability assessments to improve conservation strategies in the Galapagos Marine Reserve. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(6): 1509-1528.
- [14] Crooks K R, Burdett C L, Theobald D M, King S R B, Di Marco M, Rondinini C, Boitani L. Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(29): 7635-7640.
- [15] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10): 891-904.
- [16] Li J, Liu G, Lu Q, Zhang Y R, Li G Q, Du S. Future climate change will have a positive effect on *Populus davidiana* in China. *Forests*, 2019, 10(12): 2-17.
- [17] 王利兵. 木本能源植物山杏的调查与研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [18] 余海滨. 不同地理种源山杏在辽西地区引种适应性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- [19] 张征坤, 张光灿, 刘顺生, 裴斌, 徐志强, 徐萍, 刘霞. 土壤水分对山杏光合作用日变化过程的影响. *中国水土保持科学*, 2012, 10(3): 99-104.
- [20] 吴芹, 张光灿, 裴斌, 徐志强, 赵瑜, 方立东. 不同土壤水分下山杏光合作用 CO₂ 响应过程及其模拟. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1517-1524.
- [21] 尤其明. 山杏生物生态学特性及在生态治理中的应用分析. *防护林科技*, 2020, (5): 57-58.
- [22] 王利兵. 我国 3 种杏的地理分布及其植物学性状. *林业科学研究*, 2010, 23(3): 435-439.
- [23] 张家琛, 党怡雯, 陈亚恒. 基于 GIS 的阜平县北流河区域山杏生态适宜性区划研究. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2021, 41(5): 98-104.
- [24] Arribas P, Abellán P, Velasco J, Bilton D T, Millán A, Sánchez-Fernández D. Evaluating drivers of vulnerability to climate change: a Guide for insect conservation strategies. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2135-2146.
- [25] Li G Q, Du S, Guo K. Evaluation of limiting climatic factors and simulation of a climatically suitable habitat for Chinese Sea buckthorn. *PLoS One*, 2015, 10(7): 1-18.
- [26] Fraterrigo J M, Wagner S, Warren R J. Local-scale biotic interactions embedded in macroscale climate drivers suggest Eltonian noise hypothesis distribution patterns for an invasive grass. *Ecology Letters*, 2014, 17(11): 1447-1454.
- [27] 魏麟骁, 辛晓歌, 程炳岩, 吴统文, 郭渠, 李永华. BCC_{CSM1.1} 气候模式年代际试验对中国气候的回报能力评估. *气候变化研究进展*, 2016, 12(4): 294-302.
- [28] Chen H P, Sun J Q, Lin W Q, Xu H W. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin*, 2020, 65(17): 1415-1418.
- [29] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [30] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 杨军, 张新时, 郭柯. 物种分布模型理论研究进展. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [31] 朱耿平, 原雪姣, 范靖宇, 王梦琳. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蝽为例. *生物安全学报*, 2018, 27(2): 118-123.
- [32] Jiménez-Valverde A. Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(4): 498-507.
- [33] Schank C J, Cove M V, Kelly M J, Mendoza E, O'Farrill G, Reyna-Hurtado R, Meyer N, Jordan C A, González-Maya J F, Lizcano D J, Moreno R, Dobbins M T, Montalvo V, Sáenz-Bolaños C, Jimenez E C, Estrada N, Cruz Díaz J C, Saenz J, Spínola M, Carver A, Fort J, Nielsen C K, Botello F, Pozo Montuy G, Rivero M, de la Torre J A, Brenes-Mora E, Godínez-Gómez O, Wood M A, Gilbert J, Miller J A. Using a novel model approach to assess the distribution and conservation status of the endangered Baird's tapir. *Diversity and Distributions*, 2017, 23(12): 1459-1471.
- [34] Jiménez-Valverde A. Threshold-dependence as a desirable attribute for discrimination assessment: implications for the evaluation of species distribution models. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(2): 369-385.

- [35] Huang J H, Li G Q, Li J, Zhang X Q, Yan M J, Du S. Projecting the range shifts in climatically suitable habitat for Chinese Sea buckthorn under climate change scenarios. *Forests*, 2017, 9(1): 1-11.
- [36] Foley J A, Defries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [37] Ewers R M, Didham R K. The effect of fragment shape and species' sensitivity to habitat edges on animal population size. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2007, 21(4): 926-936.
- [38] Li G Q, Liu C C, Liu Y G, Yang J, Zhang X S, Guo K. Effects of climate, disturbance and soil factors on the potential distribution of Liaotung oak (*Quercus wutaishanica* Mayr) in China. *Ecological Research*, 2012, 27(2): 427-436.
- [39] Dolgener N, Freudenberger L, Schneeweiss N, Ibisch P L, Tiedemann R. Projecting Current and potential future distribution of the Fire-bellied toad *Bombina bombina* under climate change in north-eastern Germany. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(3): 1063-1072.
- [40] Levinsky I, Skov F, Svenning J C, Rahbek C. Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16(13): 3803-3816.
- [41] Chape S, Harrison J, Spalding M, Lysenko I. Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2005, 360(1454): 443-455.
- [42] Le Saout S, Hoffmann M, Shi Y C, Hughes A, Bernard C, Brooks T M, Bertzky B, Butchart S H M, Stuart S N, Badman T, Rodrigues A S L. Conservation. Protected areas and effective biodiversity conservation. *Science*, 2013, 342(6160): 803-805.
- [43] 呼延佼奇, 肖静, 于博威, 徐卫华. 我国自然保护区功能分区研究进展. *生态学报*, 2014, 34(22): 6391-6396.
- [44] 蒋明康, 王智, 秦卫华, 贺昭和. 我国自然保护区内国家重点保护物种保护成效评价. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(4): 35-38, 102.
- [45] Chen D L, Achberger C, Räisänen J, Hellström C. Using statistical downscaling to quantify the GCM-related uncertainty in regional climate change scenarios: a case study of Swedish precipitation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(1): 54-60.
- [46] 吴昊旻, 黄安宁, 何清, 赵勇. 北京气候中心气候模式 1.1 版预估中亚地区未来 50 年地面气温时空变化特征. *气象学报*, 2013, 71(2): 261-274.
- [47] 周鑫, 李清泉, 孙秀博, 魏敏. BCC_{CSM}1.1 模式对我国气温的模拟和预估. *应用气象学报*, 2014, 25(1): 95-106.