•研究报告•

未来气候变化下两种红景天植物的脆弱性

王文婷^{ID*}, 杨婷婷, 金磊, 蒋家民

西北民族大学数学与计算机科学学院, 兰州 730030

摘要: 气候变化对全球的物种多样性有深远影响, 尤其是对高山物种多样性。研究未来气候变化下物种的灭绝风险对生物多样性保护具有重要的意义。本文针对青藏高原的2种重要药用植物大花红景天(*Rhodiola crenulata*)和菊叶红景天(*R. chrysanthemifolia*), 利用气候生态位因子分析法研究了它们对气候变化的敏感性、暴露性和脆弱性, 讨论了2种“共享社会经济途径”(SSP2-45和SSP5-85)情景下的未来气候对这2个物种脆弱性的影响。同时计算了2种红景天的气候生态位的边缘性和特化性, 通过主成分分析法对其气候生态位进行了二维可视化, 并分析了它们的气候变化脆弱性与气候生态位之间的关系。结果表明, 未来气候变化情景下2种红景天在其分布区都显示出西部脆弱性高而东部脆弱性低的特征, 而脆弱性都表现为较低的横断山脉地区将成为其未来气候避难所。2种红景天在SSP5-85气候情景下的脆弱性高于SSP2-45, 资源和能源密集型社会经济途径(即SSP5-85)将会增大物种的灭绝风险。此外, 被《中国物种红色名录》评估为无危的菊叶红景天的气候变化脆弱性反而大于被评估为濒危的大花红景天。生态位因子分析结果表明大花红景天的生态位边缘性和特化性都低于菊叶红景天, 研究推断同地区不同物种的气候变化脆弱性主要由物种的气候生态位决定。

关键词: 气候变化; 脆弱性; 濒危物种保护; 红景天; 气候生态位因子分析法

王文婷, 杨婷婷, 金磊, 蒋家民 (2021) 未来气候变化下两种红景天植物的脆弱性. 生物多样性, 29, 1620–1628. doi: 10.17520/biods.2021209.

Wang WT, Yang TT, Jin L, Jiang JM (2021) Vulnerability of two *Rhodiola* species under climate change in the future. Biodiversity Science, 29, 1620–1628. doi: 10.17520/biods.2021209.

Vulnerability of two *Rhodiola* species under climate change in the future

Wenting Wang^{ID*}, Tingting Yang, Lei Jin, Jiamin Jiang

School of Mathematics and Computer Science, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030

ABSTRACT

Aims: Climate change has a profound impact on global species diversity, especially alpine species diversity. Furthermore, the number of species currently threatened by climate change may increase as climate change. Studying the extinction risk of species under future climate change is of great significance to biodiversity conservation. *Rhodiola crenulata* and *R. chrysanthemifolia* are two important medicinal plants distributed on the Qinghai-Tibet Plateau. However, the potential effects of climate change on each species have not been widely researched. In this study, we investigate the vulnerability of each species to climate change and discuss the relationship between species vulnerability and climatic niche. In addition, we test whether climate change will affect the threat ranking of species in red list.

Methods: In this study, we studied the vulnerability of *R. crenulata* and *R. chrysanthemifolia* to climate change using climate-niche factor analysis. We then discussed the influence of climate on the vulnerability of both species change in the context of two “Shared Socioeconomic Pathways” (i.e. SSP2-45 and SSP5-85). Next, we calculated the marginality and specialization of the two species. At the same time, we visualized the climate niches of each species using principal component analysis and analyzed the relationship between climate niches and vulnerabilities of both species.

Results: Our results indicate that the vulnerability of each species is high in the western region of their range, and low in the eastern region of their range. Both species have lower vulnerability to climate change in the Hengduan Mountains, which will serve as a climate refugium for the two species. The vulnerability of the two species under

收稿日期: 2021-05-24; 接受日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(31560127)、西北民族大学中央高校基本科研业务费(31920190053; 31920200037)、民族大学智能计算与动力系统分析及其应用创新团队资助项目和教育部人文社会科学研究基金(0XJAZH006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: iamwwt1983@163.com

SSP5-85 is higher than that under SSP2-45, and the resource- and energy-intensive socioeconomic pathways (i.e. SSP5-85) will increase the extinction risk of both species in the future. *Rhodiola chrysanthemifolia*, which is classified as Least Concern on China Species Red List, is more vulnerable to climate change than *R. crenulata*, which is classified as Endangered. Niche analysis demonstrates that niche marginality and specialization of *R. crenulata* were lower than that of *R. chrysanthemifolia*.

Conclusions: Our results suggest that the vulnerability of different species to climate change inhabiting the same region is primarily determined by the climate niche of each species. Climate change may affect the threat ranking of species in red list. It is necessary to consider the impact of climate change when assessing threats to species.

Key words: climate change; vulnerability; endangered species protection; *Rhodiola*; climate-niche factor analysis

气候变化被认为是导致物种多样性丧失的最重要因素之一(Araújo & Rahbek, 2006; Beaumont et al, 2007)。在气候变化的影响下, 物种向高纬度和高海拔地区扩散(Parmesan & Yohe, 2003; Welter et al, 2003), 并在未来气候持续变化的情况下, 物种甚至面临着巨大的灭绝风险(Alkemade et al, 2011; Urban, 2015)。特别是高山和亚高山分布的物种通常受到低温的限制, 对气候变化尤为敏感(Vanneste et al, 2017)。持续的气候变化使得高山物种面临着“无路可逃”的绝境(Chen et al, 2011)。研究未来气候变化情景下高山物种的灭绝风险, 对于高山物种多样性的管理和保护具有重要意义(Erasmus et al, 2002; Hughes, 2011; McMahon et al, 2011)。

自政府间气候变化专门委员会(IPCC)对气候变化进行第四次评估后, 物种的脆弱性被广泛用于量化与气候相关的物种灭绝风险(Wheatley et al, 2017; Leclerc et al, 2020)。物种的脆弱性可以认为是其敏感性、适应性和暴露性共同作用的结果(Pacifici et al, 2015)。其中, 敏感性是由物种固有的性状决定, 是对气候变化的容忍力; 适应性则是物种适应气候变化的内在能力; 暴露性即物种在栖息地经历气候变化的程度(Dawson et al, 2011; Pacifici et al, 2015)。近期, Rinnan和Lawler (2019)修正了生态位因子分析法(ecological-niche factor analysis, ENFA)中边缘性和特化性的算法(Hirzel et al, 2002), 并在此基础上构建了预测气候变化的敏感性、暴露性和脆弱性的气候生态位因子分析法(climate-niche factor analysis, CNFA)。此方法可基于物种分布数据和环境气候变量预测物种的气候变化脆弱性, 同时也可进行物种间气候变化脆弱性的直接比较。Wang等(2021)通过气候生态位因子分析法研究发现, 西藏-喜马拉雅地区的一些被《中国物种红色名录》(汪松和解焱, 2004)评估为无危(LC)的绿绒蒿(*Meconopsis* spp.)物

种的脆弱性高于被评估为近危(NT)的绿绒蒿, 并预测未来气候变化下绿绒蒿的一些无危物种的潜在灭绝风险高于近危物种。因此, 物种当前受威胁的程度在未来气候变化影响下有可能发生改变, 完全按照红色名录评估的保护等级进行物种的优先保护可能会存在保护方向上的偏差。

大花红景天(*Rhodiola crenulata*)和菊叶红景天(*R. chrysanthemifolia*)属于景天科红景天属植物, 均生长在高海拔山地沙土中, 分布范围狭窄(文检等, 2016)。其中, 大花红景天在我国主要分布在西藏、云南西北部、四川西部等地区(文检等, 2016); 菊叶红景天是我国特有植物, 分布于云南西北部及四川西南部等地(陈伟球等, 1984)。近年来, 随着对红景天药用和保健价值的开发, 市场对红景天的需求迅速增加(刘明成和张得钧, 2013)。特别是大花红景天被《中华人民共和国药典(2015版)》(国家药典委员会, 2015)和《藏药标准》(西藏、青海、四川、甘肃、云南、新疆卫生局, 1979)定为收载品种, 是红景天药材商品的主流(文检等, 2016)。为此, 红景天的野生资源遭遇了地毯式采挖, 且采挖后难以恢复, 面临着种源灭绝的危机。《中国物种红色名录》(汪松和解焱, 2004)已将大花红景天列为濒危(EN)物种, 但菊叶红景天尚为无危物种(王强等, 2007; 文检等, 2016)。

本文以大花红景天和菊叶红景天为研究对象, 首先通过气候生态位因子分析法对比分析了2种“共享社会经济途径”(SSP2-45和SSP5-85)情景下这2种红景天植物的脆弱性, 确定其随气候变化的空间脆弱性分布, 并提出相应的物种保护措施。接着, 对比分析2种红景天的气候变化脆弱性, 并检验气候变化是否会改变这2种红景天当前受威胁的程度。最后, 量化及可视化这2种红景天的气候生态位, 并探讨其气候变化脆弱性与气候生态位之间

的关系, 以期为大花红景天和菊叶红景天的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样本数据

本研究利用全球生物多样性信息网络(Global Biodiversity Information Facility, GBIF; <http://www.gbif.org/>)共收集到380条大花红景天和468条菊叶红景天的样本记录(Occdownload GBIF.org, 2021)。首先, 利用R软件包“CoordinateCleaner”去除信息不完整的、重复的及城市中心的样本记录。为了避免空间自相关性引起的过拟合问题, 采用最近邻体距离法筛选样本数据, 即在2.5 km内只保留一个点。最后用于建模的大花红景天和菊叶红景天的样本数据分别为77和113条。样本记录主要分布在青藏高原的中南和东南部(25°–34° N, 80°–103° E), 将此区域向外延伸2°作为研究区, 即研究区范围为23°–36° N, 78°–105° E (图1)。

1.2 气候数据

首先从WorldClim v2.1 (<http://www.worldclim.org/>)中下载分辨率为2.5'的19个当前(代表1970–2000年的平均值)和未来(2050年, 代表2040–2060年的平均值)的气候数据。针对未来气候的不确定性, 我们采用了8个全球气候模型(GCMs): BCC-CSM2-MR、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、CanESM5、IPSL-CM6A-LR、MIROC-ES2L、MIROC6和MRI-ESM2-0的平均值作为2050年的气候数据。

此外, 还考虑了“共享社会经济途径”(shared socio-economic pathways, SSPs)下未来不同的气候情景。SSPs是政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告中的最新气候模型的结果(IPCC, 2021)。这些模型模拟了21世纪社会经济因素的变化, 包括人口、经济增长、教育、城市化和技术发展速度, 以及在不考虑气候管理政策的情况下世界可能发展的5种不同方式, 并与“代表性浓度途径”(representative concentration pathways, RCPs)的减排目标相结合来缓解不同程度的气候变化。本研究采用2种SSPs情景: SSP2-45和SSP5-85, 其中SSP2-45代表整个21世纪的社会、经济和技术趋势不会明显偏离历史发展的“中间道路”模式, 碳排放量在21世纪末继续增加, 达到65–85 Gt CO₂, 导致气温升高3.8–4.2°C; SSP5-85即经济和社会快速发展, 并在全世界采用资源和能源密集型的生活方式, 估计2100年碳排放量达到104–126 Gt CO₂, 导致气温升高4.7–5.1°C。随后对当前气候变量按照研究区进行裁剪, 并进行相关性分析。去除Pearson相关性大于0.7的气候变量, 最后确定用于建模的气候变量分别为平均日温差、等温性、最暖季平均气温、季节性降水量、最暖季降水量和最冷季降水量。

1.3 研究方法

1.3.1 气候生态位因子分析法

气候生态位因子分析法是在生态位保守性的假设下通过分析物种对气候变化的敏感性和暴露性来评估其气候变化脆弱性(Rinnan & Lawler,

图1 青藏高原及其邻近地区2种红景天植物的样本分布; 图中红框内区域为研究区。青藏高原的界限数据来源于国家科技基础设施条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

Fig. 1 Occurrence data for two *Rhodiola* species studied on the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas. The area in the red box is the study area. The boundary data of the Qinghai-Tibet Plateau is downloaded from National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China (<http://www.geodata.cn>).

2019)。其中敏感性由物种生态位的边缘性(即物种生态位重心与研究区生态空间重心的距离)和特化性(即研究区生态空间宽度与物种生态位宽度的比值)确定。对于多维生态空间, 边缘性因子(m)和特化性因子($u_1, u_2, \dots, u_{p-1}$)可通过组合边缘性因子和特化性因子, 标准化后得到敏感性因子的组分 $W = (w_1, w_2, \dots, w_p)$, 继而获得敏感性因子 $s = W\rho$, 其中 ρ 指每个组分对应的特征值。敏感性的总体指标为

$$S = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p s_j^2}, \text{ 物种的气候敏感性越高, 其对气候变}$$

化的脆弱性越高。对于物种对气候变化的暴露性, 首先计算多维空间的气候偏离性因子 $d = |H - K|$, 其中 H 为未来物种栖息地的气候, K 为当前物种栖息

地的气候。暴露性的总体指标为 $D = \sqrt{\sum_{j=1}^p d_j^2}$, 物种

的气候暴露性越高, 其栖息地从当前气候向未来气候的偏离度就越大。物种对气候变化的脆弱性为其敏感性和暴露性的相互作用, 即脆弱性因子为

$v_j = ((1 + d_j)^m s_j^n)^{\frac{1}{m+n}}$, 其中 n 和 m 分别表示敏感性和暴露性的相对权重。脆弱性的总体指标为

$$V = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p v_j^2}。 \text{ 以上气候生态位因子分析法的计算}$$

过程可通过R软件中的CENFA程序包实现(Rinnan, 2020)。

1.3.2 物种对气候变化的敏感性、暴露性和脆弱性分析

第一步, 基于过滤后的物种分布数据和气候变量, 通过R软件CENFA程序包中的“cnfa”函数实现物种在气候变化情景下的敏感性分析, 计算出物种对每个气候变量的边缘性因子和特化性因子, 继而得出敏感性因子及敏感性的总体指标。同时利用CENFA程序包中的“predict”函数估计物种的空间敏感性。第二步, 根据只依赖物种发生样本点的地理空模型方法, 通过R软件中的函数“geoIDW”估计物种的范围, 并将这个范围近似地代替物种的栖息地(Colwell et al, 2008), 通过CENFA程序包中的“departure”函数计算物种在每个气候变量上的偏离性因子及暴露性的总体指标。第三步, 使用“predict”

函数估计物种的空间暴露性。最后, 基于以上物种的气候变化敏感性和暴露性, 应用CENFA程序包中的“vulnerability”函数计算物种在每个气候变量上的脆弱性因子及脆弱性的总体指标, 并使用“predict”函数预测物种的空间脆弱性。通过ArcGIS 10.2对物种的空间敏感性、暴露性和脆弱性进行可视化处理。

1.3.3 物种的气候生态位分析

物种的气候生态位通过2个指标量化, 即边缘性和特化性。物种的总体边缘性为

$$M = \sqrt{\sum_{i=1}^p m_i^2} / 1.96, \text{ 其中 } p \text{ 为环境变量正交旋转后}$$

变量空间的维数, m_i 是边缘性因子, 即边缘性在多维空间的第 i 个分量(Hirzel et al, 2002)。 M 值介于0-1之间, 值越大表明物种的气候生态位重心越偏离研究区气候生态空间重心, 且与研究区的气候差异也

越大。物种的总体特化性为 $S = \sqrt{\sum_{i=1}^p \lambda_i^2} / p$, 其中 λ_i

是特化性因子总量, 即特化性在多维空间的第 i 个分量的总量(Hirzel et al, 2002)。 S 的范围为1到无穷大, 越大表示物种的气候生态位宽度相对于研究区的气候生态空间的宽度越窄。其中边缘性因子 m_i 和特化性因子总量 λ_i 可在利用“cnfa”函数计算气候变化敏感性时一并获得。

物种的气候生态位二维可视化通过气候变量的主成分分析实现。首先从当前气候数据提取研究区的平均日温差、等温性、最暖季平均气温、季节性降水量、最暖季降水量和最冷季降水量6个气候变量代表其气候生态空间, 并利用主成分分析进行气候生态空间的降维。然后用前2个成分代表降维后的研究区的气候生态空间, 并分别用大花红景天和菊叶红景天的样本点在降维后研究区的生态位空间的位置表示2个物种的气候生态位。最后采用R软件中的函数“ecospat.plot.niche.dyn”实现研究区大花红景天和菊叶红景天气候生态位的二维可视化。

2 结果

2.1 物种的敏感性、暴露性和脆弱性

气候生态位因子分析结果表明, 大花红景天和菊叶红景天对最暖季降水量最为敏感, 其次是最暖

季平均温度;同时,2个物种都对平均日温差和最冷季降水量表现出低敏感性(表1),但菊叶红景天对于气候变化敏感性的总体指标要高于大花红景天(表2)。未来,大花红景天和菊叶红景天在最暖季平均温度上将经历较高的暴露性,而在最冷季降水量上的暴露性相对较低(表1),但2个物种的气候暴露性的总体指标相差不大(表2)。可见,大花红景天和菊叶红景天对气候因子的脆弱性与敏感性表现出相同的特征,即在最暖季降水量和最暖季平均温度上脆弱性高,而在最冷季降水量上脆弱性低(表1)。此外,菊叶红景天对气候变化脆弱性的总体指标高于大花红景天(表2)。大花红景天和菊叶红景天在SSP5-85下的暴露性明显高于SSP2-45(表1,2)。因此,与SSP2-45相比,2个物种在SSP5-85下表现出更高的气候变化脆弱性(表1,2)。

大花红景天和菊叶红景天位于喜马拉雅山脉和横断山脉南缘区域的栖息地表现出较高的气候变化敏感性,而位于横断山脉中北部区域的气候变化敏感性较低。此外,菊叶红景天的空间敏感性整体高于大花红景天(图2)。未来气候变化情景下,位于喜马拉雅山脉东部以及横断山脉中南部的栖息地的气候暴露性较低,而2个物种栖息地的西北部

的气候暴露性较高(图3a, b)。SSP5-85与SSP2-45情景相比,2个物种栖息地的暴露性从东南到西北方向呈现递增的趋势,SSP2-45情景下的高暴露性区域在SSP5-85情景下更高(图3c, d)。大花红景天和菊叶红景天的空间脆弱性都呈现出西部高东部低的特征,2个物种在横断山脉都表现出较低的气候变化脆弱性(图4a, b)。同样,菊叶红景天的空间脆弱性整体高于大花红景天(图4)。对不同的SSPs情景来说,SSP2-45情景下的高脆弱性区域在SSP5-85情景下的脆弱性也会更高(图4c, d)。

2.2 物种的气候生态位分析

大花红景天总体的边缘性和特化性都低于菊叶红景天(表2)。与菊叶红景天相比,边缘性指标表明大花红景天的气候生态位重心距离研究区的气候生态空间的重心更近,而特化性指标表明大花红景天的生态位宽度大于菊叶红景天的生态位宽度。通过主成分分析将六维气候生态空间降至二维,提取的2个成分可代表原气候生态空间的64.6%。在二维气候生态平面上大花红景天和菊叶红景天的气候生态位重叠较高,且两者的气候生态位都偏离研究区生态平面的中心位置,但菊叶红景天的气候生态位小于大花红景天的气候生态位(图5)。

表1 大花红景天和菊叶红景天的敏感性因子以及不同“共享社会经济途径”(SSPs)情景下的偏离性因子和脆弱性因子。粗体表示每列中2个幅度最大的系数。

Table 1 Sensitivity factors of *Rhodiola crenulata* and *R. chrysanthemifolia*, as well as departure factors and vulnerability factors under different shared socioeconomic pathways (SSPs). The two widest coefficients in each column are shown in bold.

生物气候 Bioclimate	大花红景天 <i>R. crenulata</i>					菊叶红景天 <i>R. chrysanthemifolia</i>				
	敏感性	偏离性	Departure	脆弱性	Vulnerability	敏感性	偏离性	Departure	脆弱性	Vulnerability
	Sensitivity	SSP2-45	SSP5-85	SSP2-45	SSP5-85	Sensitivity	SSP2-45	SSP5-85	SSP2-45	SSP5-85
平均日温差 Mean diurnal range	2.4	0.24	0.33	1.7	1.79	2.43	0.22	0.3	1.7	1.8
等温性 Isothermality	3.6	0.17	0.23	2	2.1	4.78	0.17	0.2	2.4	2.4
最暖季平均气温 Mean temperature of warmest quarter	6.2	0.28	0.42	2.8	2.97	11.6	0.28	0.4	3.9	4
季节性降水量 Precipitation seasonality	2	0.09	0.12	1.5	1.5	2.65	0.07	0.1	1.7	1.7
最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	13	0.08	0.12	3.7	3.79	17.1	0.08	0.1	4.3	4.4
最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter	1.5	0.03	0.04	1.3	1.26	2.55	0.02	0	1.6	1.6

表2 大花红景天和菊叶红景天的特化性、边缘性和敏感性的总体指标以及不同“共享社会经济途径”(SSPs)情景下的暴露性和脆弱性的总体指标

Table 2 Total indices of specialization, marginality and sensitivity of *Rhodiola crenulata* and *R. chrysanthemifolia* as well as total indices of exposure and vulnerability under different shared socioeconomic pathways (SSPs) scenarios

物种 Species	边缘性	特化性	敏感性	暴露性	Exposure	脆弱性	Vulnerability
	Marginality	Specialization	Sensitivity	SSP2-45	SSP5-85	SSP2-45	SSP5-85
大花红景天 <i>R. crenulata</i>	0.84	1.34	2.18	0.42	0.61	1.47	1.45
菊叶红景天 <i>R. chrysanthemifolia</i>	1.01	1.60	2.62	0.41	0.58	1.61	1.63

图2 青藏高原及其邻近地区2种红景天植物的敏感性。图中黑点代表2种红景天的样本记录点的分布, 图例上的红绿色分界点代表物种空间敏感性的中位数。

Fig. 2 Sensitivity of two *Rhodiola* species on the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas. The black dots in figures represent sample distributions of two *Rhodiola* species, the demarcation point between red and green in the legend represents the median spatial sensitivity of the species.

图3 未来气候变化情景下(“共享社会经济途径” SSP2-45)青藏高原及其邻近地区大花红景天(a)和菊叶红景天(b)的暴露性; 以及2种“共享社会经济途径”(SSPs)情景下(SSP2-45和SSP5-85)大花红景天(c)和菊叶红景天(d)的暴露性增量。图中黑点代表2种红景天的样本记录点的分布, (a)和(b)中图例上的红绿色分界点代表物种空间暴露性的中位数。

Fig. 3 Exposure of two *Rhodiola* species on the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas under future climate change (shared socioeconomic pathway, SSP2-45): (a) *R. crenulata* and (b) *R. chrysanthemifolia*; and the increment of exposure of two *Rhodiola* species under two SSPs scenarios (SSP2-45 and SSP5-85): (c) *R. crenulata* and (d) *R. chrysanthemifolia*. The black dots in figures represent sample distributions of two *Rhodiola* species. The demarcation point between red and green in the legend of (a) and (b) represent the median spatial exposure of the species.

3 讨论

物种对快速气候变化的响应通常表现为扩散到新的适应区、就地适应或灭绝(Christmas et al, 2016)。然而, 大多数高山植物的长距离扩散能力有限(Herrmann et al, 2016; Morgan & Venn, 2017)。同时物种生态位进化的速度远低于气候变化的速度, 短时间内难以适应新的气候环境(Quintero & Wiens,

2013)。大花红景天和菊叶红景天的栖息地都位于青藏高原的东南部, 未来气候变化情景下, 2个物种在其栖息地都表现出西部脆弱性高而东部脆弱性低的特征。因此, 对于分布在气候变化脆弱性较低区域的这2种红景天可实施就地保护, 而进行自然保护区建设可能是生物多样性保护最有效的措施(Grenyer et al, 2006)。但对于气候变化引起的“注定灭绝”的物种来说, 就地保护的作用微乎其微

图4 未来气候变化情景下(“共享社会经济途径” SSP2-45)青藏高原及其邻近地区的大花红景天(a)和菊叶红景天(b)的脆弱性;以及2种“共享社会经济途径”(SSPs)情景下(SSP2-45和SSP5-85)大花红景天(c)和菊叶红景天(d)的脆弱性增量。图中黑点代表2种红景天的样本记录点的分布,(a)和(b)中图例上的红紫色分界点代表物种空间脆弱性的中位数。

Fig. 4 Vulnerability of two *Rhodiola* species on the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas under future climate change (shared socioeconomic pathway, SSP2-45): (a) *R. crenulata* and (b) *R. chrysanthemifolia*; and the increment of vulnerability of two *Rhodiola* species under two shared SSPs scenarios (SSP2-45 and SSP5-85): (c) *R. crenulata* and (d) *R. chrysanthemifolia*. The black dots in figures represent sample distributions of two *Rhodiola* species. The demarcation point between red and purple in the legend of (a) and (b) represent the median spatial vulnerability of the species.

图5 青藏高原及其邻近地区大花红景天和菊叶红景天的气候生态位比较。红色和绿色分别表示大花红景天和菊叶红景天的气候生态位;蓝色表示2个物种气候生态位的重叠;红线包围区域表示研究区的气候生态位。

Fig. 5 Comparison of the climatic niches of *Rhodiola crenulata* and *R. chrysanthemifolia* distribution on the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas. Red showing the climatic niches of *R. crenulata* and green showing the climatic niches of *R. chrysanthemifolia*; the overlap of the climatic niches between the two species showed in blue. The area enclosed by the red line indicates the climatic niche of the study area.

(Schwartz et al, 2006)。因此,对于分布在气候变化高脆弱区域的这2种红景天可考虑迁地保护,将其人工移植到植物园等适合其生长的半自然环境中。此外,分布在横断山脉地区的这2种红景天都表现

出较低的气候变化脆弱性,因此,该地区可成为其应对气候变化的避难所。此结果验证了Wang等(2021)的推断:未来横断山脉地区将成为青藏高原物种最大的气候避难所。因此,优先保护横断山脉地区对于这2种红景天的存续具有重要意义。

《中国物种红色名录》(汪松和解焱,2004)评估的大花红景天受威胁程度明显高于菊叶红景天,但未来气候变化情景下大花红景天的脆弱性却比菊叶红景天低。《中国物种红色名录》(汪松和解焱,2004)是依据IUCN的评估标准评定,主要考虑了物种减少的当前驱动因素,如种群大小和人类活动对种群及其栖息地造成的压力等,没有充分识别潜在的未来风险,如气候变化带来的威胁(Akçakaya et al, 2014; Wheatley et al, 2017)。大花红景天和菊叶红景天的分布区域相似,未来经历的气候暴露性相近,因此其气候变化脆弱性主要由它们对气候变化的敏感性决定。虽然大花红景天和菊叶红景天对最暖季降水量和平均温度都表现出较高的敏感性,且其气候生态位重叠度高,但菊叶红景天较大花红景天的生态位宽度小。而生态位宽度在一定程度上反映

了物种对环境的适应性(Su et al, 2017), 因此, 菊叶红景天对未来气候变化的适应能力要低于大花红景天。此外, 菊叶红景天的生态位重心比大花红景天更为偏离研究区的生态重心, 未来气候变化情景下菊叶红景天需要扩散更远的距离才能寻找到适宜区, 因此, 与大花红景天比菊叶红景天的气候敏感性更高, 继而决定了其高脆弱性。因此, 未来对红景天的保护评估需要慎重考虑气候变化所带来的威胁, 有必要将未来气候变化的威胁纳入物种红色名录评估指标。

为了降低未来气候的不确定性对研究结果的影响, 我们采用了6个GCMs预测的未来气候的平均值。此外, 还考虑了2种SSPs (即SSP2-45和SSP5-85) 对大花红景天和菊叶红景天脆弱性的影响。研究表明2种红景天在SSP5-85情景下的气候暴露度明显高于SSP2-45, 且2种红景天在SSP5-85气候情景下也表现出了高水平的气候变化脆弱性。因此, 采用资源和能源密集型的生活方式将会给物种多样性带来更大灾难。加强节能减排是应对全球气候变化的迫切需要, 对于生物多样性保护具有重要意义。

本研究采用气候生态位因子分析法研究了气候变化情景下2种红景天的脆弱性特征。尽管气候变化对物种影响的量化研究多数基于生态位模型(或称为物种分布模型), 通过预测物种分布变化继而估计物种的灭绝风险(Thomas et al, 2004; Urban, 2015; Zhang et al, 2017)。但生态位模型过于强调气候变化的程度即暴露性(Leclerc et al, 2020), 且对物种间灭绝风险的直接比较不确定因素较多, 如潜在分布的阈值选择(Jiménez-Valverde & Lobo, 2007; Liu et al, 2011)。气候生态位因子分析法的优势在于能够识别和描述物种对气候变化的敏感性, 再结合物种对气候变化的暴露性评估物种的脆弱性, 同时可直接进行物种间气候变化脆弱性的比较(Rinnan & Lawler, 2019)。此外, 气候生态位因子分析法还提供了物种栖息地的脆弱性格局, 可为物种保护区的设置提供可靠的信息。但是, 物种样本点的不足以及栖息地范围的不确定会造成气候生态位因子分析法对物种气候脆弱性评估的误差。本研究选用地理想模型方法估计了物种栖息地范围, 但未考虑其他估计栖息地的方法, 例如 α -hull方法(Rinnan & Lawler, 2019; Wang et al, 2021)。因此, 应用气候生态位因子分析法研究栖息地模拟方法不同对物种

气候变化脆弱性的影响将是未来关注的问题。

ORCID

王文婷 <https://orcid.org/0000-0001-7850-3597>

参考文献

- Akçakaya HR, Butchart SHM, Watson JEM, Pearson RG (2014) Preventing species extinctions resulting from climate change. *Nature Climate Change*, 4, 1048–1049.
- Alkemade R, Bakkenes M, Eickhout B (2011) Towards a general relationship between climate change and biodiversity: An example for plant species in Europe. *Regional Environmental Change*, 11, 143–150.
- Araújo MB, Rahbek C (2006) How does climate change affect biodiversity? *Science*, 313, 1396–1397.
- Beaumont NJ, Austen MC, Atkins JP, Burdon D, Degraer S, Dentine TP, Deros S, Holm P, Horton T, van Ierland E, Marboe AH, Starkey DJ, Townsend M, Zarzycki T (2007) Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin*, 54, 253–265.
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024–1026.
- Chen WQ, Ruan YZ, Fu SX, Fu KJ (1984) *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*, vol. 34. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈伟球, 阮云珍, 傅书遐, 傅坤俊 (1984) 中国植物志(第34卷). 科学出版社, 北京.]
- Christmas MJ, Breed MF, Lowe AJ (2016) Constraints to and conservation implications for climate change adaptation in plants. *Conservation Genetics*, 17, 305–320.
- Chinese Pharmacopoeia Commission (2015) *Pharmacopoeia of the People's Republic of China*. China Medical Science Press, Beijing. (in Chinese) [国家药典委员会 (2015) 中华人民共和国药典. 中国医药科技出版社, 北京.]
- Colwell RK, Brehm G, Cardelús CL, Gilman AC, Longino JT (2008) Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 322, 258–261.
- Dawson TP, Jackson ST, House JI, Prentice IC, Mace GM (2011) Beyond predictions: Biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332, 53–58.
- Erasmus BFN, van Jaarsveld AS, Chown SL, Kshatriya M, Wessels KJ (2002) Vulnerability of South African animal taxa to climate change. *Global Change Biology*, 8, 679–693.
- Grenyer R, Orme CDL, Jackson SF, Thomas GH, Davies RG, Davies TJ, Jones KE, Olson VA, Ridgely RS, Rasmussen PC, Ding TS, Bennett PM, Blackburn TM, Gaston KJ, Gittleman JL, Owens IPF (2006) Global distribution and conservation of rare and threatened vertebrates. *Nature*, 444, 93–96.
- Health Bureau of Tibet, Qinghai, Sichuan, Gansu, Yunnan, Xinjiang (1979) *Tibetan Medicine Standard*. Qinghai People's Publishing House Press, Xining. (in Chinese) [西藏、青海、四川、甘肃、云南、新疆卫生局 (1979) 藏药标准. 青海人民出版社, 西宁.]

- Herrmann JD, Carlo TA, Brudvig LA, Damschen EI, Haddad NM, Levey DJ, Orrock JL, Tewksbury JJ (2016) Connectivity from a different perspective: Comparing seed dispersal kernels in connected vs. unfragmented landscapes. *Ecology*, 97, 1274–1282.
- Hirzel A, Hausser J, Chessel D, Perrin N (2002) Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 83, 2027–2036.
- Hughes C (2011) Changes and challenges in 20 years of research into the development of executive functions. *Infant and Child Development*, 20, 251–271.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B). Cambridge University Press, Cambridge.
- Jiménez-Valverde A, Lobo JM (2007) Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica*, 31, 361–369.
- Leclerc C, Courchamp F, Bellard C (2020) Future climate change vulnerability of endemic island mammals. *Nature Communications*, 11, 4943–4952.
- Liu CR, White M, Newell G (2011) Measuring and comparing the accuracy of species distribution models with presence-absence data. *Ecography*, 34, 232–243.
- Liu MC, Zhang DJ (2013) The progress of *Rhodiola rosea*'s pharmacological effects research. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, 9(6), 65–69. (in Chinese with English abstract) [刘明成, 张得钧 (2013) 红景天药理作用研究进展. 亚太传统医药, 9(6), 65–69.]
- McMahon SJ, Hyland WB, Muir MF, Coulter JA, Jain S, Butterworth KT, Schettino G, Dickson GR, Hounsell AR, O'Sullivan JM, Prise KM, Hirst DG, Currell FJ (2011) Biological consequences of nanoscale energy deposition near irradiated heavy atom nanoparticles. *Scientific Reports*, 1, 18.
- Morgan JW, Venn SE (2017) Alpine plant species have limited capacity for long-distance seed dispersal. *Plant Ecology*, 218, 813–819.
- Occdownload GBIF.org (2021) GBIF Occurrence Download <https://www.gbif.org/occurrence/download/0326595-200613084148143>. (accessed on 2021-07-19)
- Pacifici M, Foden WB, Visconti P, Watson JEM, Butchart SHM, Kovacs KM, Scheffers BR, Hole DG, Martin TG, Akçakaya HR, Corlett RT, Huntley B, Bickford D, Carr JA, Hoffmann AA, Midgley GF, Pearce-Kelly P, Pearson RG, Williams SE, Willis SG, Young B, Rondinini C (2015) Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5, 215–224.
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
- Quintero I, Wiens JJ (2013) Rates of projected climate change dramatically exceed past rates of climatic niche evolution among vertebrate species. *Ecology Letters*, 16, 1095–1103.
- Rinnan DS (2020) CENFA: Climate and ecological niche factor analysis. R Package Version 1.0.0. <https://CRAN.R-project.org/package=CENFA>. (accessed on 2020-10-16)
- Rinnan DS, Lawler J (2019) Climate-niche factor analysis: A spatial approach to quantifying species vulnerability to climate change. *Ecography*, 42, 1494–1503.
- Schwartz MW, Iverson LR, Prasad AM, Matthews SN, O'Connor RJ (2006) Predicting extinctions as a result of climate change. *Ecology*, 87, 1611–1615.
- Su JS, Zhao J, Jing GH, Wei L, Liu J, Cheng JM, Zhang JE (2017) Root pattern of *Stipa* plants in semiarid grassland after long-term grazing exclusion. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 6571–6580. (in Chinese with English abstract) [苏纪帅, 赵洁, 井光花, 魏琳, 刘建, 程积民, 张金娥 (2017) 半干旱草地长期封育进程中针茅植物根系格局变化特征. 生态学报, 37, 6571–6580.]
- Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BFN, de Siqueira MF, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld AS, Midgley GF, Miles L, Ortega-Huerta MA, Townsend Peterson A, Phillips OL, Williams SE (2004) Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145–148.
- Urban MC (2015) Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348, 571–573.
- Vanneste T, Michelsen O, Graae BJ, Kyrkjeeide MO, Holien H, Hassel K, Lindmo S, Kapás RE, De Frenne P (2017) Impact of climate change on alpine vegetation of mountain summits in Norway. *Ecological Research*, 32, 579–593.
- Wang Q, Ruan X, Li HD, Wang GJ (2007) Research status, questions and strategies of rare medicinal plant *Rhodiola* L. *Journal of Natural Resources*, 22, 880–889. (in Chinese with English abstract) [王强, 阮晓, 李荷迪, 王国军 (2007) 珍稀药用资源植物红景天研究现状、问题与对策. 自然资源学报, 22, 880–889.]
- Wang S, Xie Y (2004) China Species Red List (vol. 1). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [汪松, 解焱 (2004) 中国物种红色名录 (第一卷). 高等教育出版社, 北京.]
- Wang WT, Guo WY, Jarvie S, Svenning JC (2021) The fate of *Meconopsis* species in the Tibet-Himalayan region under future climate change. *Ecology and Evolution*, 11, 887–899.
- Welter S, Brunner K, Hofstraat JW, De Cola L (2003) Electroluminescent device with reversible switching between red and green emission. *Nature*, 421, 54–57.
- Wen J, Lü XM, Hong DX, Xie CX, Zhang J, Zhang Y (2016) Potential distribution of *Rhodiola crenulata* in Tibetan Plateau based on MaxEnt model. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 41, 3931–3936. (in Chinese with English abstract) [文检, 吕秀梅, 洪道鑫, 谢彩香, 张静, 张艺 (2016) 基于MaxEnt模型的青藏高原大花红景天生态适宜性分析. 中国中药杂志, 41, 3931–3936.]
- Wheatley CJ, Beale CM, Bradbury RB, Pearce-Higgins JW, Critchlow R, Thomas CD (2017) Climate change vulnerability for species—Assessing the assessments. *Global Change Biology*, 23, 3704–3715.
- Zhang J, Nielsen SE, Chen YH, Georges D, Qin YC, Wang SS, Svenning JC, Thuiller W (2017) Extinction risk of North American seed plants elevated by climate and land-use change. *Journal of Applied Ecology*, 54, 303–312.

(责任编辑: 张大勇 责任编辑: 黄祥忠)