

未来气候变化对石蒜分布的影响

陈秋婷

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2024年3月12日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

石蒜(*Lycoris radiata*)又名曼珠沙华, 是典型的多年生草本鳞茎植物, 具有独特的观赏和药用价值。我国是石蒜的主要分布区, 探究未来气候变化对石蒜适生区的影响, 对保护和利用石蒜种质资源有重要意义。本研究基于我国554个石蒜分布点和4种环境因子(气温、降水、海拔和土壤pH)数据, 通过最大熵模型(MaxEnt)预测石蒜的当前潜在适生区, 及其在2070年不同气候变化情景下(SSP1-2.6和SSP5-8.5)适生区面积的变化。结果表明: 影响石蒜分布的主要环境因子是最干燥季度降水量、年降水量和气温季节性, 累计贡献率超过80%; 当前气候下石蒜适生区广布于我国南方各省, 浙江、江西与湖南省是高适生区; 而在人类以消极态度面对气候变化时, 石蒜在中、低适生区如江苏、安徽、湖北、四川和两广地区的分布面积将大幅缩减22%以上。建议做好目前中、低适生区石蒜种质资源的优先保护与迁地保护工作, 并根据适生区变化调整栽培种植选地规划。

关键词

最大熵模型, 石蒜, 未来气候变化, 物种分布, 降水

Effects of Future Climate Change on *Lycoris radiata* Distribution

Qiuting Chen

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Mar. 12th, 2024; accepted: Apr. 5th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

Lycoris radiata, also known as red spider lily, is a typical perennial bulbous perennial herb with unique ornamental and medicinal value. China is the main distribution area of *L. radiata*, so it is of great significance to study the influence of climate change on the suitable area of *L. radiata* in China. Based on 554 distribution sites and four environmental factors (temperature, precipitation, eleva-

文章引用: 陈秋婷. 未来气候变化对石蒜分布的影响[J]. 林业世界, 2024, 13(2): 118-127.

DOI: 10.12677/wjf.2024.132018

tion and soil pH), the maximum entropy model (MaxEnt) was used to predict the changes in current and future suitable areas of *L. radiata* under two climate change backgrounds (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) in 2070s. The results showed that precipitation in the driest season, annual precipitation and temperature seasonality were the main environmental factors affecting the distribution of *L. radiata*, with a cumulative contribution of more than 80%. Under the current climate, the suitable areas of *L. radiata* are widely distributed in the south of China, and Zhejiang, Jiangxi and Hunan provinces are highly suitable areas. However, when humans face climate change with a negative attitude, the distribution area of *L. radiata* in the middle and low suitable areas, such as Jiangsu, Anhui, Hubei, Sichuan, Guangxi and Guangdong, will be drastically reduced by more than 22%. It is recommended to implement the prioritization schemes and relocation protection of the germplasm resources of *L. radiata* in the middle and low suitable areas, and the cultivation site selection planning should be adjusted according to the changes of suitability areas under climate changes.

Keywords

Maximum Entropy Model, *Lycoris radiata*, Future Climate Change, Species Distribution, Precipitation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

了解特有物种的地理分布对于本土生物多样性保护和开发利用至关重要[1] [2]。物种分布受到气候、土壤和地形等诸多因素影响，其中气候被认为是影响植物地理分布格局的关键因子[3] [4] [5]。未来全球气候变化将对植物的潜在分布区发生影响[6] [7]，预测植物潜在适生区的变化也越来越受到人们的关注。

石蒜(*Lycoris radiata*)隶属石蒜科(Amaryllidaceae)，又名曼珠沙华、彼岸花，是一种具有地下鳞茎的草本植物。石蒜花叶优美奇特，药用成分丰富，具有广泛的观赏、医药和生态等价值，在我国有悠久的栽培历史，其野生资源主要分布于中国南部，还分布于日本、朝鲜及尼泊尔等地[8]。前人使用 114 个分布点对当前气候下中国大陆的石蒜分局与气候因子进行了模拟预测，发现最冷季度平均温这种低温因素对石蒜潜在分布影响最大[9]。然而，石蒜在夏季高温时有短暂的休眠期[10] [11]，但秋季展叶后叶片可露地过冬[12] [13]，这说明石蒜对温度变化有灵活多变的生态适应性，可能其他环境因子如土壤、降水等对石蒜的分布有重要影响。另外，与众多植物不同的是，石蒜具有地下鳞茎，能储存大量碳水化合物，躲避冻害和干旱，并维持植物无性繁殖，石蒜对气候等环境因子的响应机制可能会灵活多变。前研究人也揭示秦岭-淮河以南及附近地区是石蒜的集中分布区[9]，而未来气候变化下，石蒜的适生分布区仍然未知。近年来，随着石蒜分布数据的增多，对石蒜潜在适生区以及未来变化进行预测，显得尤为重要。

本研究将运用石蒜在中国大陆的 554 个分布点数据，及其对应的气候、土壤与海拔变量，构建 MaxEnt 模型，分析未来气候情景下石蒜适生区范围变化，探究影响石蒜分布的主要环境因子，为石蒜植物资源的保护与开发提供科学支持。

2. 材料与方法

2.1. 物种分布数据收集

在全球生物多样性信息网络(GBIF)、中国自然标本馆(CFH)、中国数字植物标本馆(CVH)和国家标本

资源共享平台(NSII), 下载中国大陆范围内具有经纬度坐标信息的所有石蒜数据。另外, 野外调查对石蒜野外分布点数据进行补充, 共得到 3080 个石蒜的分布点信息。为确保石蒜分布点是处于野生状态, 对植物园、学校以及温室的数据进行剔除。为保证数据密度均匀性, 避免 MaxEnt 运行时过度拟合, 在 ArcGIS10.8 中的每个 2.5' 栅格内, 每个物种仅保留一个分布点信息。最终保留 554 个石蒜分布点(见图 1)。

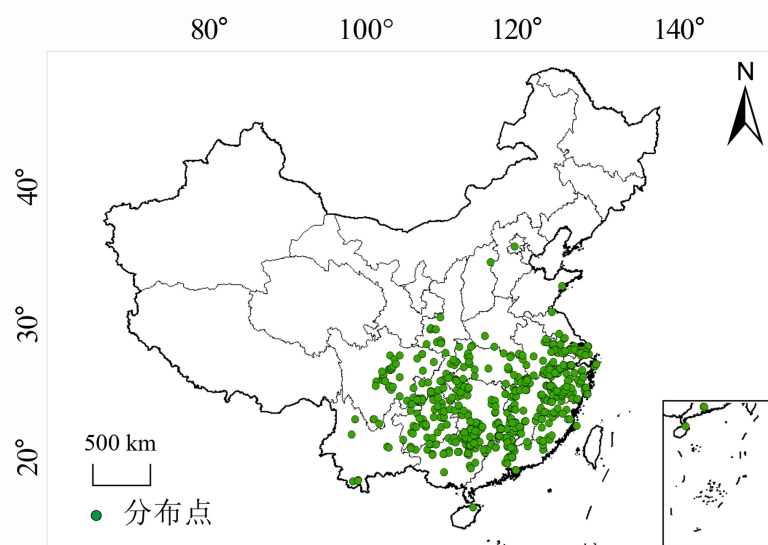


Figure 1. Geographic distribution points of *Lycoris radiata* in mainland China
图 1. 石蒜在中国大陆的地理分布点

2.2. 环境数据

2.2.1. 气候数据

Table 1. The 21 environmental factors and the 7 environmental factors selected

表 1. 21 个环境因子与所选择的 7 个环境因子

变量	英文名	中文名
Bio1*	Annual Mean Temperature	年平均气温
Bio2*	Mean Diurnal Range	平均温度日较差
Bio3	Isothermality	等温性
Bio4*	Temperature Seasonality	气温季节性
Bio5	Max Temperature of Warmest Month	最暖月最高温
Bio6	Max Temperature of Warmest Month	最冷月最低温
Bio7	Temperature Annual Range (Bio5-Bio6)	气温年变化
Bio8*	Mean Temperature of Wettest Quarter	最潮湿季度平均气温
Bio9	Mean Temperature of Driest Quarter	最干燥季度平均气温
Bio10	Mean Temperature of Warmest Quarter	最暖季度平均气温
Bio11	Mean Temperature of Coldest Quarter	最冷季度平均气温
Bio12*	Annual Precipitation	年降水量
Bio13	Precipitation of Wettest Month	最潮湿月降水量

续表

Bio14	Precipitation of Driest Month	最干燥月降水量
Bio15*	Precipitation Seasonality	降水季节性
Bio16	Precipitation of Wettest Quarter	最潮湿季度降水量
Bio17*	Precipitation of Driest Quarter	最干燥季度降水量
Bio18	Precipitation of Warmest Quarter	最热季度降水量
Bio19	Precipitation of Coldest Quarter	最冷季度降水量
Elevation*	Elevation	海拔
pH*	Soil-pH	土壤 pH

*表示最终保留的用来进行 MaxEnt 模型模拟的气候因子。

从世界气候数据网站(<https://www.worldclim.org/>)下载分辨率为 2.5' 的当前(Current, 1970~2000 年)、未来(2060~2080 年)的 19 个生物气候变量与海拔数据(见表 1)。未来气候变化情景选取 IPCC 第六次评估报告(AR6, 2021)中 CMIP6 计划的大气环流模型(BBC-CSM2-MR)中两个温室气体排放的极端情况, 即 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5。其中, SSP1-2.6 情景表示人类采用更加积极的方式应对未来气候变化, 温室气体的排放水平在未来先上升后下降, 到 2100 年平均气温增幅低于 2.0°C, 辐射强度为 4 种情景中最低。SSP5-8.5 情景表示假定能源消费结构改善比较缓慢, 没有减排措施, 温室气体将持续保持较高速率排放, 到 2100 年平均气温增加约 5.0°C, 辐射强度为 4 种情景中最高, 气候变化最剧烈[14]。

用 Pearson 相关分析 19 个生物气候变量间的共线性, 将变量间相关系数 $|r| > 0.8$ 的变量分为一组, 从每组变量中选择与石蒜植物生长密切相关的一个变量。最终选取 7 个生物气候变量, 包括年平均气温(Bio1)、平均气温日较差(Bio2)、气温季节性(Bio4)、最潮湿季节平均气温(Bio8)、年降水量(Bio12)、降水季节性(Bio15)和最干燥季度降水(Bio17)。

2.2.2. 土壤 pH 值

土壤 pH 值数据从世界土壤数据库(HWSD)下载, 分辨率为 30"。用 ArcGIS10.8 将土壤 pH 数据按照研究区域裁剪, 并重采样为栅格数据, 分辨率为 2.5'。

2.3. 物种潜在分布区的预测

使用最大熵模型(MaxEnt)进行分布区预测, 即根据物种实际分布信息及其对应的环境变量, 通过 MaxEnt 构建生态位预测模型, 再利用预测模型计算该物种在预测地区的可能分布情况[15]。本研究中, 根据石蒜实际分布数据和当前及未来气候图层数据, 使用 MaxEnt 进行生态位模拟, 构建石蒜当前和未来不同气候情境下的分布模型。为准确评估模型有效性, 随机抽取 75% 的数据作为训练数据建立模型, 剩余数据作为测试数据以验证模型, 建模过程迭代运行 10 次。以受试者工作特征曲线(ROC)下的面积(AUC)来量化模拟结果的可靠性, AUC 值介于 0~1.0, 当 AUC 值为 0.9~1 时认为模拟结果优秀; 0.8~0.9 时模拟结果良好; 0.7~0.8 时模拟结果一般; 小于 0.7 时结果不可信[16]。基于 MaxEnt 3.4.4 软件自动生成的气候变量贡献率。

采用自然间断分级法将当前适生区分成低适生区(0.12~0.27)、中适生区(0.37~0.62)和高适生区(0.03~0.97), 为对比石蒜未来适生区总面积与当前的差异, 本研究在进行模型运算时采用了 10% 的训练存在阈值(10th percentile training presence threshold), 以获取石蒜的二元分布图像(仅指示适生与非适生两种状态), 基于分布点的空间集群设置最小凸多边形缓冲区限制植物过远距离的传播, 再通过栅格叠加计算每个类群的适生区总面积。以上分析皆在 ArcGIS10.8 中完成。

3. 结果

3.1. 模型评价

据 MaxEnt 模型模拟结果显示, 石蒜的模拟曲线 AUC 值均大于 0.9, 表明 MaxEnt 模型预测结果可靠(见表 2)。

Table 2. AUC values of the MaxEnt model for *Lycoris radiata* under different climate scenarios

表 2. 不同气候情景下石蒜 MaxEnt 模型 AUC 值

气候情景	AUC 值
当前	0.906
2070s SSP1-2.6	0.908
2070s SSP5-8.5	0.908

3.2. 影响石蒜植物分布的主要环境因子

石蒜适生区分布主要受到气候因子的影响, 海拔、土壤 pH 值对石蒜分布的影响不大(见图 2)。

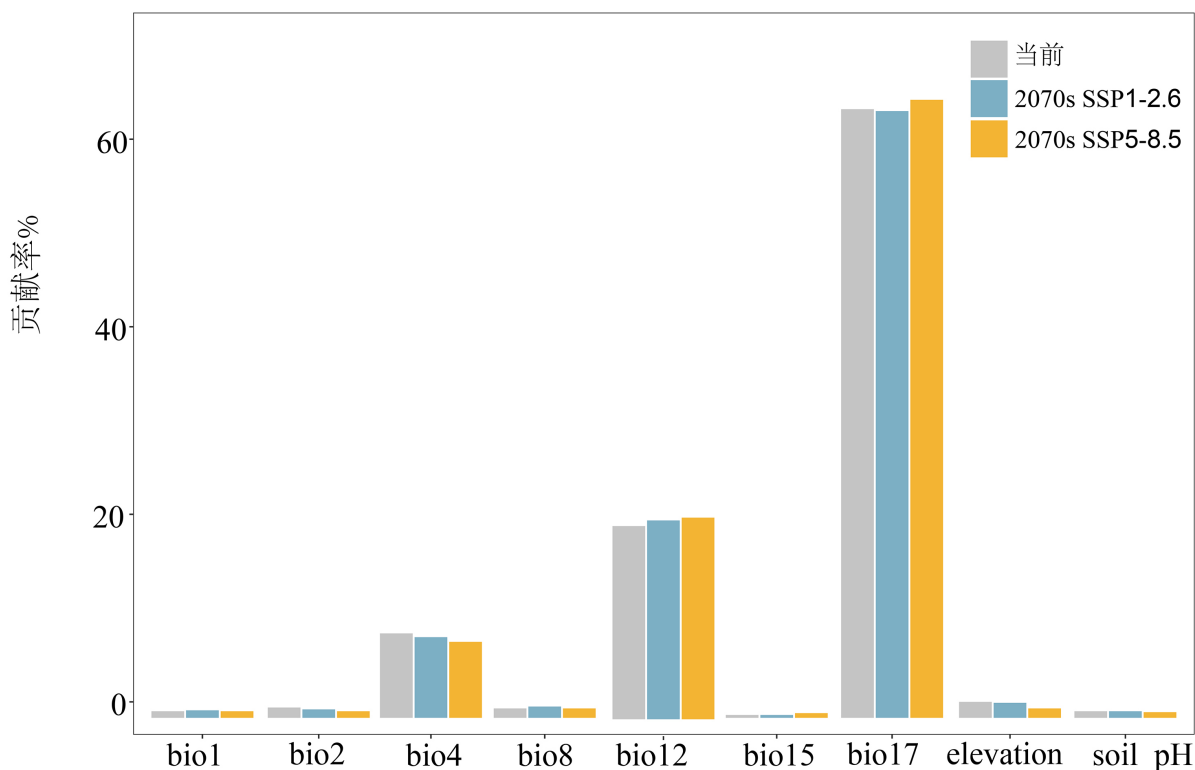


Figure 2. Contribution of environmental factors to the modeling of *Lycoris radiata* suitable areas under different climates

图 2. 环境因子在不同气候下对石蒜适生区模型的贡献率

根据模型结果, 不管是当前还是未来气候变化下, 降水是影响石蒜分布的主要因子, 累计贡献率为 85.8% (当前)、86.2% (SSP1-2.6)和 87.9% (SSP5-8.5)。且随着未来气候变化, 降水的累计贡献率逐渐上升。贡献率最大的因子为最干燥季度降水量(Bio17), 其次为年降水量(Bio12)。气温季节性(Bio4)也是比较重要的气候因子之一(见表 3)。

Table 3. Influence factor analysis of *Lycoris radiata* suitable areas under different climate scenarios
表 3. 不同气候情景下石蒜适生区的影响因子分析

气候变量	AUC 值		
	当前	2070 s SSP1-2.6	2070 s SSP5-8.5
Bio17	64.9	64.7	65.9
Bio12	20.6	21.2	21.5
Bio4	9	8.6	8.1
elevation	1.7	1.6	1
Bio2	1.1	1.2	1
Bio8	1	0.9	0.7
pH	0.7	0.8	0.7
Bio1	0.7	0.7	0.6
Bio15	0.3	0.3	0.5

3.3. 当前气候下石蒜适生区空间格局

当前气候下,石蒜的适生区广泛分布在我国南方各省。其中高适生区主要分布在北纬 20°~27°范围内的浙江、江西和湖南省的大部分地区;中适生区和低适生区依次往外扩展,低适生区的北界基本在北纬 30°以下,位于江苏、安徽、河南和陕西的中部,但最北可沿海岸至山东半岛地区,往西在青藏高原的林芝和横断山区也存在低适生区的分布(见图 3)。

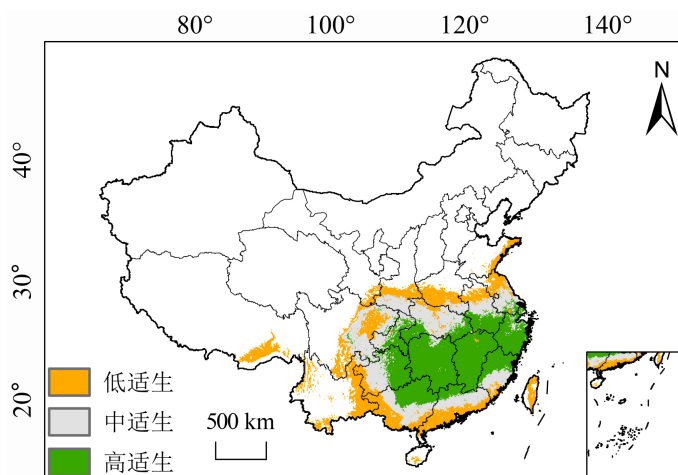


Figure 3. Distribution of suitable areas for *Lycoris radiata* under the current climate

图 3. 当前气候下石蒜适生区分布

3.4. 石蒜未来气候下适生区空间格局

在未来 2070 年 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下,石蒜适生区发生不同的扩张和收缩现象。石蒜适生区的扩张和收缩发生在适生区的边缘地带,尤其在 SSP5-8.5 情境下,大致呈现向西扩增、向南北方向收缩的现象(见图 4)。

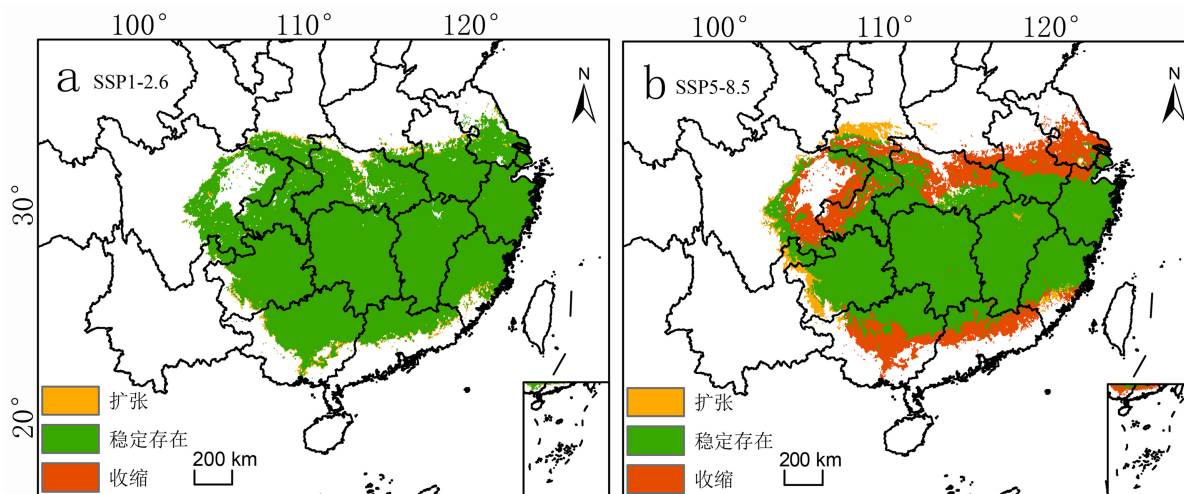


Figure 4. Distribution of suitable areas for *Lycoris radiata* under the future climate

图 4. 未来气候下石蒜适生区分布

SSP1-2.6 情景下, 石蒜的适生区面积仅有零星扩张(见图 4(a)), 扩增面积仅 $3.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ (见表 4); 而 SSP5-8.5 情景下, 石蒜的适生区面积则向西北方向小面积扩增, 而南北区域出现大面积收缩(见图 4(b)), 总面积变化率为-22.4% (见表 4)。

Table 4. Area and changes in the suitable area for *Lycoris radiata* under two current and future climate scenarios (unit: $\times 10^4 \text{ km}^2$)

表 4. 当前及未来两种气候情景石蒜适生区面积及变化(单位: $\times 10^4 \text{ km}^2$)

气候情景	总适生区	稳定存在	收缩	扩增	变化率(%)
当前	136.616				
SSP1-2.6	139.958	136.62	0	3.34	2.45
SSP5-8.5	106.063	100.5	36.11	5.56	-22.4

4. 讨论

4.1. 石蒜适生区的主要影响因素

石蒜主要生活在我国秦岭-淮河以南地区, 而不适合生存在我国北方的干旱和半干旱地区, 本研究结果和中国植物志的调查结果以及前人结果较一致[8] [9] [17]。本研究还显示模型预测的适生区较石蒜实际分布区域宽泛, 这也表明针对石蒜植物栽培可利用的区域更多, 因此选择在适生区种植石蒜, 是提高产量、保护资源多样性与促进石蒜花卉种植产业发展的一条有效途径。

石蒜是喜阴植物, 且喜欢温暖湿润的气候[18] [19]。前人研究发现, 低温(最冷季度平均温)对石蒜潜在分布影响最大[9], 而近年随着野外调查的增多, 石蒜的分布数据日渐丰富, 本研究中发现石蒜的分布主要受降水(年降水量、最干燥季度降水量)的影响。前人研究发现, 高温会影响石蒜的根系活力、叶片含水量、叶片衰老和光合作用[20] [21], 日平均气温高于 24°C 将直接抑制石蒜叶芽生长, 而零下低温不影响石蒜的生长[10] [22] [23]。秋季出叶石蒜能露地过冬, 零下低温仍可生存[24]。这说明, 石蒜能够灵活地调整生活史策略, 来应对温度的变化。背后的机制可能与石蒜地下鳞茎的生态策略有关, 石蒜在极端高温环境下, 可进入休眠状态, 叶片枯萎, 而地下鳞茎储存大量养分可供植株度过休眠阶段。前人发现, 干旱会直接影响石蒜体内的抗氧化酶系统、脯氨酸含量等生理指标[25], 而石蒜的展叶期基本处于最干燥

季度秋季,因此,展叶期的最干燥季度降水量是影响石蒜生长和分布的关键影响因子。

尽管前人发现石蒜属植物适宜分布在偏酸性的土壤中[23] [26],然而本研究发现全国范围土壤 pH 对石蒜的分布贡献率远远小于气候因子。前人对茶(*Camellia sinensis*)、冬虫夏草(*Stachys geobombycis*)等的研究也显示土壤 pH 值等因子对分布的影响很小[27] [28]。这可能由于土壤 pH 对于植物分布上的影响主要体现在局域小尺度上。前人研究发现,土壤 pH 过高会影响石蒜的花芽分化以及植物体内生物碱的合成[29] [30],最终影响其生存和分布。本研究发现四川盆地大部分区域为石蒜的非适生区,前人对裸子植物的研究也发现了盆地植物匮乏[31],引起这个结果的原因可能就是盆地中心土壤碱性较强导致。

4.2. 未来气候变化对石蒜适生区的影响

未来气候变化,石蒜的适生区总面积变化存在差异。表现为在人类以积极态度面对气候变化下,适生区总面积增加,说明适当的增温增湿可能有益于石蒜对环境的适应;而人类以消极态度面对气候变化下,适生区面积将大面积骤减。

前人发现,气候变化可能会使植物向高纬度与高海拔方向迁移[32] [33] [34],而本研究发现石蒜的分布区并没有出现向高纬度迁移现象,且北部适生区域出现大幅收缩。产生本研究结果的原因可能是降水导致的。唐宝琪等关于华东地区旱涝研究发现近 55 年来淮河以北降水以减少趋势为主[35] [36],加之未来全球气温升高,并不适宜喜阴湿的石蒜生长和分布。

以往对于鳞茎植物的研究发现,该类型植物能够在鳞茎中储存大量的营养物质和水分保障植物的生长与存活,而且外被的鳞片能够缓解一定的外界干扰保护植物[37] [38]。石蒜作为喜阴喜湿植物,可以通过鳞茎的碳水储存优势带来的削减增全球增温或干旱带来的不利影响。然而,我们的研究发现当人类以消极态度面对气候变化时,石蒜分布区依旧出现了大面积缩减的现象,这暗示着即使鳞茎植物,也同样遭受着未来气候变化的影响。

未来 SSP5-8.5 气候情景下,石蒜适生区有向西部小幅扩张的趋势,但在四川盆地地区出现了大幅缩减。盆地中心土壤碱性不适于石蒜生长,未来气候变化下,随着土壤碱性的相应增强与人类活动的增多,石蒜在四川盆地的分布面积可能将继续收缩。当今环境下,人类活动影响着周围环境变化的同时,还会参与和改变物种的自然迁移[39] [40]。因此发现哪一个迁移方向对物种的生存更加重要,我们可以通过及时对该物种进行种质资源的采集和建立基因库的方式,应对气候变化对物种分布的影响,保护遗传多样性。

5. 结论

当前以及未来两种气候情景下,石蒜的适生区均分布在 20°~27° 北纬地区。降水是影响石蒜适生区分布的主要环境因子。人类以消极态度面对气候变化时,石蒜的适生区面积将大幅缩减。目前,对南部、北部以及四川盆地骤减区域的野生石蒜资源做好就地保护和迁地保护措施,对于保护石蒜种质资源多样性尤为重要。另外,石蒜种质资源产业基地的选址应优先考虑华东、华中等地。研究结果对指导石蒜资源的保护、引种和种植工作有积极的参考意义。

参考文献

- [1] Guisan, A. and Thuiller, W.J. (2005) Predicting Species Distribution: Offering More than Simple Habitat Models. *Ecology Letters*, **8**, 993-1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- [2] Zhao, Y., Deng, X., Xiang, W., et al. (2021) Predicting Potential Suitable Habitats of Chinese Fir under Current and Future Climatic Scenarios Based on Maxent Model. *Ecological Informatics*, **64**, Article 101393. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101393>
- [3] Anderson, R.P.A. (2013) Framework for Using Niche Models to Estimate Impacts of Climate Change on Species Dis-

- tributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1297**, 8-28. <https://doi.org/10.1111/nyas.12264>
- [4] Bergmann, F. (1978) The Allelic Distribution at an Acid Phosphatase Locus in Norway Spruce (*Picea abies*) Along Similar Climatic Gradients. *Theoretical and Applied Genetics*, **52**, 57-64. <https://doi.org/10.1007/BF00281317>
- [5] Lesica, P. (2014) Arctic-Alpine Plants Decline over Two Decades in Glacier National Park, Montana, USA. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, **46**, 327-332. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.2.327>
- [6] Li, J.J., Fan, G. and He, Y. (2020) Predicting the Current and Future Distribution of Three *Coptis* Herbs in China under Climate Change Conditions, Using the MaxEnt Model and Chemical Analysis. *Science of the Total Environment*, **698**, Article 134141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134141>
- [7] Olalla-Tarraga, M.A., McInnes, L., Bini, L.M., et al. (2011) Climatic Niche Conservatism and the Evolutionary Dynamics in Species Range Boundaries: Global Congruence across Mammals and Amphibians. *Journal of Biogeography*, **38**, 2237-2247. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02570.x>
- [8] 赵天荣, 施永泰, 蔡建岗, 等. 石蒜属植物的研究进展[J]. 北方园艺, 2008(4): 65-69.
- [9] 毛志远, 张兆金, 周坚. 基于生态位模型的石蒜适生区预测[J]. 林业科技开发, 2014, 28(6): 50-53.
- [10] Cai, J.H., Fan, J.J., Wei, X.Y., et al. (2019) A Three-Dimensional Analysis of Summer Dormancy in the Red Spider Lily (*Lycoris radiata*). *Hortscience*, **54**, 1459-1464. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14080-19>
- [11] Xu, J.X., Li, Q.Z., Yang, L.Y., et al. (2020) Changes in Starch Synthesis and Metabolism within Developing Bulbs of *Lycoris radiata* during the Vegetative Growth Stage. *Journal of Plant Growth Regulation*, **39**, 785-794. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10022-1>
- [12] 张露, 曹福亮. 石蒜属植物栽培技术研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2001, 23(3): 375-378.
- [13] Cai, J.H., Fan, J.J., Wei, X.Y., et al. (2020) Differences in Floral Development between *Lycoris radiata* and *Lycoris sprengeri*. *Science Asia*, **46**, 271-279. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2020.032>
- [14] 梁玉莲, 延晓冬. RCPs 情景下中国 21 世纪气候变化预估及不确定性分析[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 183-192.
- [15] Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. (2006) Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- [16] Elith, J.H., Graham, C.P., Anderson, R., et al. (2006) Novel Methods Improve Prediction of Species' Distributions from Occurrence Data. *Ecography*, **29**, 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- [17] 徐垠, 胡之璧, 黄秀兰. 石蒜属见[M]//裴鉴, 丁志遵, 主编. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1985: 18-27.
- [18] Lv, Y., Gao, Y.K., Cui, Y.X., et al. (2022) Interfamily Wide Hybridization between Daylily (*Hemerocallis*, Xanthorrhoeaceae) and *Lycoris* (*Lycoris*, Amaryllidaceae). *Plant Breeding*, **141**, 820-827. <https://doi.org/10.1111/pbr.13058>
- [19] 薛璟祺, 只艳玲, 王顺利, 等. 五种石蒜属植物的低温耐性研究[J]. 植物生理学报, 2015, 51(5): 721-728.
- [20] Boonyaritthongchai, P., Manuwong, S., Kanlayanarat, S., et al. (2008) Acceleration of Senescence by High Temperature Treatment in *Lycoris* (*L. traubii* × *L. sanguinea*) Leaf Sections. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, **77**, 431-439. <https://doi.org/10.2503/jjshs1.77.431>
- [21] Meng, P., Ge, Y., Cao, Q., et al. (2008) Growth and Photosynthetic Responses of Three *Lycoris* Species to Levels of Irradiance. *Hortscience*, **43**, 134-137. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.134>
- [22] Cai, J.H., Huang, Q.R., Cheng, Y.H., et al. (2012) Effects of Shading Level and Fertilization on the Yield and Quality of *Lycoris radiata* Cut Flower. *Acta Pedologica Sinica*, **49**, 1459-1464.
- [23] 沈明山, 陈睦传, 徐金森, 等. 石蒜的人工栽培[J]. 厦门科技, 1999(2): 21-22.
- [24] 金雅琴, 黄雪芳, 李冬林, 等. 中国石蒜叶生长规律研究[J]. 北方园艺, 2009(12): 184-186.
- [25] 蒋明敏, 徐晟, 夏冰, 等. 干旱胁迫下外源氯化钙、水杨酸和一氧化氮对石蒜抗旱性的影响[J]. 植物生理学报, 2012, 48(9): 909-916.
- [26] 于磊. 不同石蒜 (*Lycoris radiata*) 种源叶片解剖特征及物候特征的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
- [27] Yan, Y., Li, Y., Wang, W.J., et al. (2017) Range Shifts in Response to Climate Change of *Ophiocordyceps sinensis*, a Fungus Endemic to the Tibetan Plateau. *Biological Conservation*, **206**, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.023>
- [28] 张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 等. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响[J]. 生物多样性, 2019, 27(6): 595-606.
- [29] Quan, M. and Liang, J. (2017) The Influences of Four Types of Soil on the Growth, Physiological and Biochemical Characteristics of *Lycoris aurea* (L' Her.) Herb. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 43284.

- <https://doi.org/10.1038/srep43284>
- [30] 王磊. 石蒜属植物花期调控技术及开花生理研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2004.
- [31] 李果, 沈泽昊, 应俊生. 中国裸子植物物种丰富度空间格局与多样性中心[J]. 生物多样性, 2009, 17(3): 272-279.
- [32] 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, 2020, 39(2): 600-613.
- [33] Kraemer, B.M., Chandra, S., Dell, A.I., *et al.* (2017) Global Patterns in Lake Ecosystem Responses to Warming Based on the Temperature Dependence of Metabolism. *Global Change Biology*, **23**, 1881-1890. <https://doi.org/10.1111/gcb.13459>
- [34] Chardon, N.I., Cornwell, W.K., Flint, L.E., *et al.* (2015) Topographic, Latitudinal and Climatic Distribution of *Pinus coulteri*: Geographic Range Limits Are not at the Edge of the Climate Envelope. *Ecography*, **38**, 590-601. <https://doi.org/10.1111/ecog.00780>
- [35] 唐宝琪, 延军平, 李双双, 等. 近 55 年来华东地区旱涝时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 497-505.
- [36] Shi, J., Cui, L.L. and Tian, Z. (2020) Spatial and Temporal Distribution and Trend in Flood and Drought Disasters in East China. *Environmental Research*, **185**, Article 109406. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109406>
- [37] Herben, T. and Klimešová, J. (2020) Evolution of Clonal Growth Forms in Angiosperms. *New Phytologist*, **225**, 999-1010. <https://doi.org/10.1111/nph.16188>
- [38] Ottaviani, G., Molina-Venegas, R., Charles-Dominique, T., *et al.* (2020) The Neglected Belowground Dimension of Plant Dominance. *Trends in Ecology & Evolution*, **35**, 763-766. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.008>
- [39] 李芮芝, 胡希军, 韦宝婧, 等. 气候变化下中国八种梧桐属树种潜在适生区模拟[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5937-5955.
- [40] Dawson, T.P., Jackson, S.T., House, J.I., *et al.* (2011) Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science*, **332**, 53-58. <https://doi.org/10.1126/science.1200303>