

文章编号:1001—7380(2024)05—0001—08

## 独花兰潜在地理分布及其对 植被指数时空变化的响应

郑孙元<sup>1</sup>,王明强<sup>1</sup>,腊孟珂<sup>1</sup>,孙小燕<sup>2</sup>,芦 昱<sup>1</sup>,柳絮飞<sup>1\*</sup>

(1. 南京大学环境规划设计研究院集团股份有限公司,江苏 南京 210093; 2. 国营东台市林场,江苏 东台 224200)

**摘要:**该研究基于地理信息系统(GIS)和MaxEnt模型,利用独花兰72个有效样本数据(含气候、土壤、海拔、土地利用类型、植被类型、NDVI等32个环境因子数据),预测独花兰潜在适宜分布区,并基于1998年以来的NDVI及土地利用类型变化,分析20 a来独花兰潜在分布面积对归一化植被指数(NDVI)和人为活动的响应。结果表明:独花兰总适生区面积为18.5463万km<sup>2</sup>,最适区域为2.3797万km<sup>2</sup>。独花兰潜在适生分布区域离散狭小,斑块状分布显著。通过模型预测,湖北恩施州与安徽六安市为独花兰种质资源保护的核心区域。影响独花兰分布的环境因子中,NDVI对其影响最大,贡献率最大为25.97%。1998—2023年间独花兰潜在分布区域总体变化不大,随着NDVI与土地利用类型变化而波动变化,从历年土地利用类型与NDVI的贡献率看,土地利用类型的贡献率呈现逐年下降趋势;而NDVI因子贡献率则呈现逐年上升趋势,因此NDVI因子对独花兰分布存在较强影响,以土地利用类型空间分布数据代表的人为干扰活动对独花兰的影响逐渐减少。

**关键词:**独花兰;MaxEnt模型;预测;潜在分布;环境因子

中图分类号:Q948.2;Q949.71+8.430.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.05.001

## Prediction of potential geographic distribution of *Changnienia amoena* based on MaxEnt model and its response to spatiotemporal variation of vegetation index

Zheng Sunyuan<sup>1</sup>, Wang Mingqiang<sup>1</sup>, La Mengke<sup>1</sup>,  
Sun Xiaoyan<sup>2</sup>, Lu Yu<sup>1</sup>, Liu Xufei<sup>1\*</sup>

(1. Academy of Environmental Planning Design, Co., Ltd. Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. State-owned Dongtai City Forest Farm, Dongtai 224200, China)

**Abstract:**Based on geographic information system (GIS) and MaxEnt model, with 72 valid sample data of *Changnienia amoena*, including 32 environmental factors (7 types), e. g. climate, soil, altitude, land use type, vegetation type, normalized difference vegetation index (NDVI), the potential suitable distribution area was predicted. And based on the changes of NDVI and land use type since 1998, the response of the potential distribution area to NDVI and human activities in the past over 20 years was also analyzed. The results showed that the total suitable area was 185 463 km<sup>2</sup>, with the most suitable area of 2 379 km<sup>2</sup>, characteristic of being scattered, narrow and obviously patchy at present. Enshi Prefecture, Hubei Province and Lu'an City, Anhui Province are predicted as the core areas for the protection of the germplasm resources. The prediction results of the MaxEnt model showed that the top 7 environmental factors NDVI, precipitation of the driest month, minimum temperature of the coldest month, seasonal variation of temperature, altitude, land use types and preprecipitation of the wettest month, with the cumulative contribution rate totally reaching 93.71%, among which NDVI getting the maximum of

收稿日期:2024-07-29;修回日期:2024-08-24

基金项目:南京绿化园林局项目“南京市野生植物资源调查和监测评估”

作者简介:郑孙元(1992-),男,福建宁德人,工程师,硕士。主要从事生物多样性保护研究。E-mail:syzhen@njuae.cn;Tel:18752021292

\*通信作者:柳絮飞(1992-),男,甘肃兰州人,工程师,硕士。主要从事野生动物生态学研究。E-mail:liu1564423@163.com。

Tel:13218029501

25.97%。And from 1998 to 2023, the overall potential distribution area had a little change, and fluctuated with changes in NDVI and land use type. Judged from the contribution rate of land use types and NDVI year by year, the contribution rate of land use type has shown a downward trend while the contribution rate of NDVI has shown an upward trend. Therefore, we regard that NDVI has a strong influence on the potential distribution area. The impact of human disturbance represented by land use type on *C. amoena* is gradually reduced.

**Key words:** *Changnienia amoena*; MaxEnt model; Prediction; Potential distribution; Environmental factor

2019 年生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台 (IPBES) 在法国巴黎发布的《生物多样性和生态系统服务全球评估报告》显示,过去 50 a 来造成前所未有的生物多样性和生态系统变化,其中以人为侵扰与气候变化尤为关键。目前生物多样性以惊人的速度丧失<sup>[1]</sup>,物种群落分布更替也表明了这场生态环境变化的深远影响<sup>[2]</sup>。

物种分布模型 (Species Distribution Models) 是将物种的分布信息与分布环境变量信息进行关联分析得出环境变量与物种的分布关系,并基于该关系推广于所研究的区域,对该物种的分布进行建模评估<sup>[3]</sup>。目前,模拟物种分布已成为保护生态学、生物地理学、物种入侵控制及野生动物管理研究的重要工具<sup>[4]</sup>。MaxEnt 是基于 GIS 平台的物种潜在分布预测模型,它以研究区所有单元作为构成最大熵的可能分布空间,以已知物种分布点的单元作为样点,根据样点单元环境因子找出物种分布的限制条件,并寻找与物种分布点环境特征相似的单元,据此预测物种在目标区的分布<sup>[5]</sup>。该模型的优点是在物种分布数据部分缺失时,对物种潜在分布预测精度要高于其他模型<sup>[6-7]</sup>。

独花兰 (*Changnienia amoena*) 隶属于兰科 (Orchidaceae) 布袋兰亚族 (Calypsoinae),为我国特有的单种属国家 II 级重点保护野生植物,在 IUCN 濒危物种红色名录中被评估为濒危等级 (EN)。作为多年生草本,独花兰一花一叶,花色艳丽,集观赏与药用为一体,在兰科系统演化上具有重要的学术价值<sup>[8]</sup>。独花兰多生于疏林腐殖质丰富的区域,对生境条件要求较为严格。受生态环境日渐恶化和人类活动的干扰,独花兰分布区面积日渐缩小,种群数量逐渐减少。目前独花兰相关研究主要在生物学<sup>[9]</sup>、物候生态学<sup>[10]</sup>、生殖生态学<sup>[11]</sup>、基因组<sup>[12]</sup>和遗传多样性<sup>[13]</sup>等方向,有关独花兰种群分布格局深入研究未见诸多报道。本研究基于 MaxEnt 模型和地理信息系统 (GIS),对独花兰潜在适宜分布区开展系统研究,以期确定独花兰在我国的潜在分布区;同时,基于 1998 年以来的归一化植被指数

(NDVI) 与土地利用类型变化,探讨 20 a 来独花兰潜在分布变化对 NDVI 指数和人为活动干预的响应,以评价 20 a 来独花兰栖息地保护成效,为独花兰野生种质资源保护与利用政策提供科学依据。

## 1 研究与方法

### 1.1 样本数据

通过查阅文献,并在国家植物标本资源库 (<http://www.cvh.ac.cn/>)、教学标本资源共享平台 (<http://mnh.scu.edu.cn/main.aspx/>) 与全球生物多样性信息数据库 (<https://www.gbif.org/>) 等标本信息平台检索相关文献报道<sup>[8-9,14-15]</sup>,确定样本数据。

### 1.2 地图数据

地图数据源于国家基础地理信息系统网 (<http://www.nfgis.nsdi.gov.cn/>) 所提供的 1:400 万中国地图和中国行政区划图。

### 1.3 环境数据

对植物生长有影响作用的主要环境因子有气候、土壤和海拔<sup>[16]</sup>。本研究综合考虑了独花兰生长区的上述环境特点与自身生长特性,以及人为活动干扰等现象形成目前的分布格局,使用了 7 个类型的 32 个环境因子 (见表 1),分别是 11 个温度相关环境变量 (Bio1—Bio11)、8 个降水量相关环境变量 (Bio12—Bio19)、8 个土壤因子 (T-BS、T-ESP、T-pH-H<sub>2</sub>O、T-REF-BULK、T-SAND、T-USDA-TEX USDA、T-ECE、T\_OC)、1 个海拔数据、1 个全球夜间灯光分布数据、1 个土地利用类型数据、1 个植被指数数据、1 个植被类型空间分布数据。

其中,气候数据来自世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org/>),分辨率为 2.5 弧分;土壤因子来自寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>);海拔数据采集自采样点数据,全球夜间灯光分布来自全球类夜灯数据的扩展时间序列 (<https://dataverse.harvard.edu/>);土地利用类型来自中国土地利用覆盖和变化数据集 (<http://www.nesdc.org.cn/>);植被指数来源于植被指数遥感影像数据 (<https://www.forestdata.cn/>);中国 100

万植被类型空间分布数据来自国家科技资源共享服务平台 (<http://www.ncdc.ac.cn/>)。

表 1 用于 MaxEnt 模型的环境变量

序号	环境变量	变量描述
1	Bio1	年平均温度/℃
2	Bio2	昼夜温度差月均值/℃
3	Bio3	昼夜温度差与年温度差比值
4	Bio4	温度季节性变异系数
5	Bio5	最热月最高温度/℃
6	Bio6	最冷月最低温度/℃
7	Bio7	年温度变化范围/℃
8	Bio8	最湿季度平均温度/℃
9	Bio9	最干季度平均温度/℃
10	Bio10	最暖季度平均温度/℃
11	Bio11	最冷季度平均温度/℃
12	Bio12	年平均降水量/mm
13	Bio13	最湿月份降水量/mm
14	Bio14	最干月份降水量/mm
15	Bio15	降水量季节性变异系数
16	Bio16	最湿季度降水量/mm
17	Bio17	最干季度降水量/mm
18	Bio18	最暖季度平均降水量/mm
19	Bio19	最冷季度平均降水量/mm
20	DEM	海拔/m
21	Dmsp	全球夜间灯光分布
22	Lucc	土地利用类型
23	NDVI	植被指数
24	T-BS	土壤基本饱和度/Sr
25	T-ESP	可交换钠盐/%
26	T-pH-H <sub>2</sub> O	酸碱度 pH
27	T-REF-BULK	土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> )
28	T-SAND	含沙量/%
29	T-USDA-TEX USDA	土壤粒度分类
30	T_ECE	电导率/(μS/cm)
31	T_OC	有机碳含量/%
32	ZBLX	中国 100 万植被类型空间分布数据

1.4 MaxEnt 模型参数

将独花兰的分布点数据 (csv 格式) 和环境变量数据分别导入到 MaxEnt 软件中,进行建模运算,参数设置:测试集为分布点的 25%<sup>[17]</sup>,训练集为分布点的 75%,采用刀切法检验权重,设置受试者工作特征曲线 (receive operating characteristic curve, ROC) 作为试验准确度评价指标<sup>[18-19]</sup>,其余选项采用模型默认设置。将上述模型重复运行 10 次,选取 AUC 值 (Area Under Curve, ROC 曲线下与坐标轴围成的面积) 最大的一组作为最终预测结果。

1.5 主环境因子选择

由于环境变量之间存在一定的相关性,变量过多干扰试验结果的准确性<sup>[20]</sup>,因此需要对环境变量进行相关性分析后才能用于 MaxEnt 模型。将全部 32 项环境因子导入 MaxEnt 模型运算 3 次,删除贡献率为 0 的生态因子;其次,选取所有贡献率大于 0 的环境因子进行 Spearman24.0 相关分析,当 2 项环境因子的相关系数≥0.8 时,舍去贡献率较小的环境因子,将最终筛选出的 19 个环境因子利用 MaxEnt 模型进行计算分析,从而得到独花兰全国潜在分布图。

1.6 历年植被覆盖与潜在分布关系

独花兰现存生境分布数据表明,其分布不仅同大环境地理气候数据有关,而且与植被覆盖与人为活动有关<sup>[21]</sup>。因此本研究选择 NDVI 代表植被覆盖数据;选择土地利用类型空间分布数据代表人类活动强度数据,以 5 a 为 1 个阶段,预测 20 a 来植被覆盖与土地利用类型变化对独花兰潜在分布的影响。

2 结果与分析

2.1 样本数据与预测精确度评价

数据显示,目前独花兰在国内有 72 个有效分布点 (如图 1),主要位于长江流域的省界线处。MaxEnt 软件是基于最大熵原理,以物种分布变量和环境变量为基础,利用数学模型统计分析熵最大时物种的分布状态。根据 MaxEnt 模型预测结果 (如图 2),本研究 ROC 曲线法训练集的 AUC 为 0.988,测试集的 AUC 为 0.988。表明基于 MaxEnt 模型预测独花兰国内分布的模型模拟效果好,由模型运算得出的独花兰生长适宜度具有很高的可信度和准确度。

2.2 独花兰分布区的环境因子分析

MaxEnt 的刀切法分析工具能对每一个环境变量进行分析,可以判断不同因子对独花兰潜在分布的影响 (如图 3),从中可以看出最冷月最低温度、昼夜温度差月均值、NDVI、土地利用类型、最干月降水量、最湿月降水量及季节性温度差 7 个因子具有信息更多,而全球夜间灯光数据提供信息为 0。从主导环境因子与独花兰存在概率关系 (如图 4) 可以看出,NDVI 指数在 0—0.6 之间独花兰存在概率很低,在 0.78 以上独花兰存在概率大于 0.33,在 0.88 以上大于 0.66;Bio14 (最干月份降水量) 大于 0 mm 独

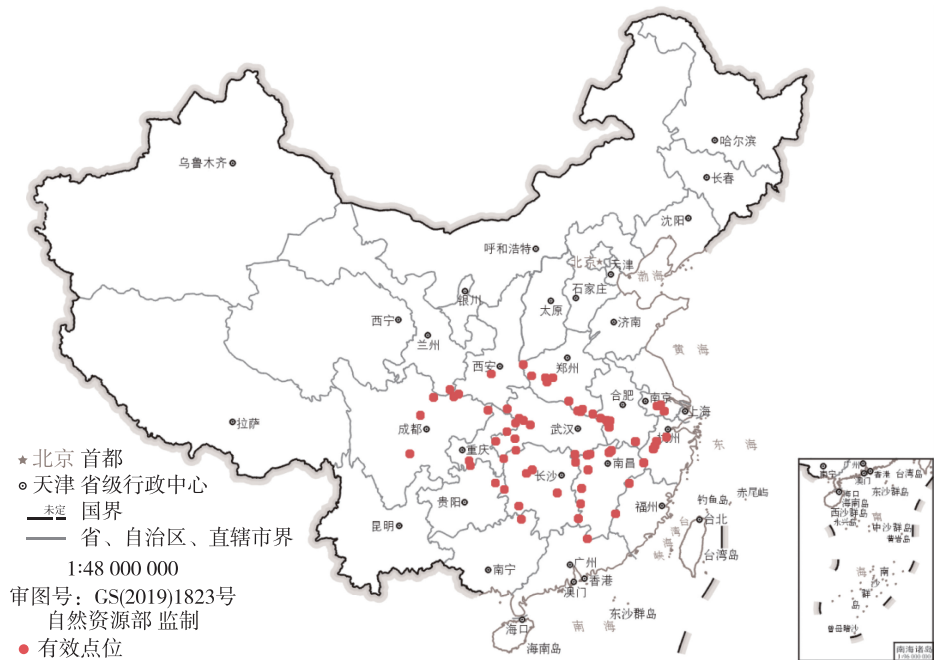


图 1 独花兰点位分布

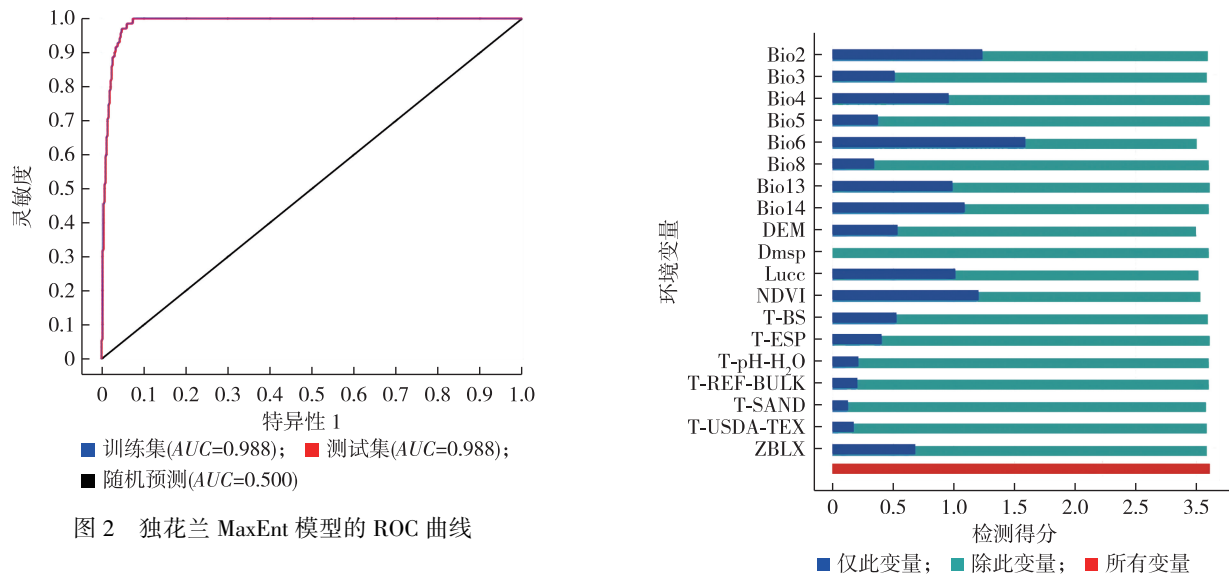


图 2 独花兰 MaxEnt 模型的 ROC 曲线

图 3 刀切法检验环境变量对独花兰分布影响的重要性

花兰的存在概率大于 0.5,在降水量 20 mm 以上独花兰存在概率大于 0.66;Bio6(最冷月最低温度)在 -20℃存在概率极低,在 -11.25℃开始概率大于 0.33,在 -6.50— -1.5℃之间概率大于 0.66;DEM(海拔因子)在 400—1 800 m 存在概率大于 0.33。Bio4(温度季节变化方差)大于 652 时发生概率大于 0.66;土地利用类型指数在 16—25 之间存在概率大于 0.66。

2.3 生态因子贡献率

MaxEnt 模型自动输出各个生态因子的贡献率,

其中贡献率较大的前 7 个生态因子从大到小的顺序为 NDVI、最干月份降水量、最冷月最低温度、温度季节变化方差、海拔、土地利用类型及最湿月份降水量,其累计贡献率达到 93.71%(见表 2),其中贡献率最大的是 NDVI 指数 25.97%,其后依次为最干月份降水量 22.28%、最冷月最低温度 16.07%、温度季节变化方差 10.19%、海拔 8.33%以及全国土地利用类型 5.98%、最湿月份降水量



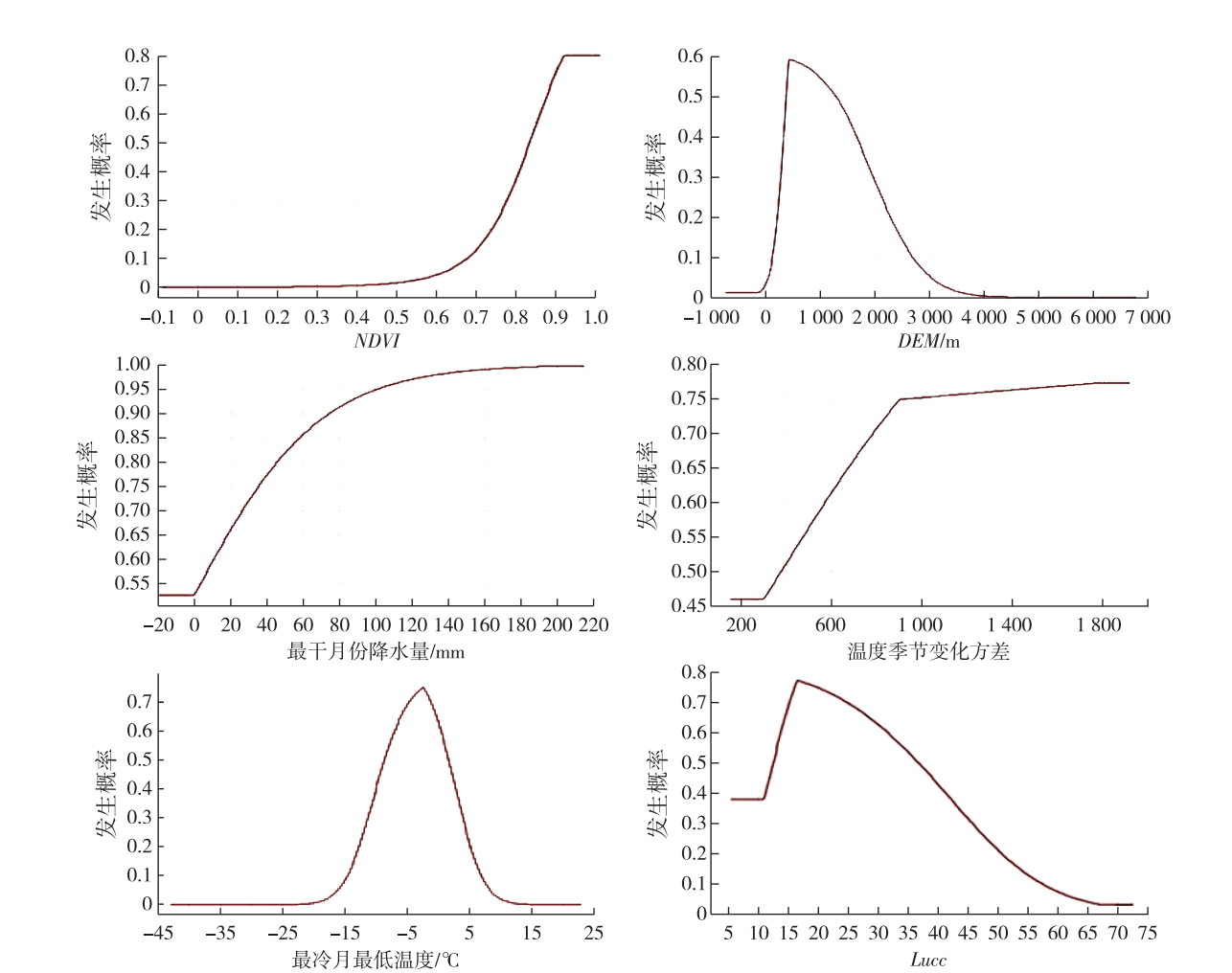


图 4 主导环境因子与独花兰存在概率关系

为 4.89%。表层土壤的各项因子贡献率则相对较小以至于忽略不计。NDVI 作为一种植被评价指标对独花兰分布有最大贡献率,而降水与温度的极端条件作为最大气候因素限制独花兰的潜在分布区。其中土壤因子贡献率几乎忽略不计,表明独花兰的潜在分布可能与土壤表层大环境相关性很小,但是与土壤微环境构成可能相关性较大,因为实地调查结果显示了独花兰对于腐殖质丰富且土层湿润的环境情有独钟。

表 2 用于模型预测的环境因子贡献率

环境因子	变量描述	贡献率/%
NDVI	植被指数	25.97
Bio14	最干月份降水量	22.28
Bio6	最冷月最低温度	16.07
Bio4	温度季节变化方差	10.19
DEM	海拔	8.33
Lucc	土地利用类型	5.98
Bio13	最湿月份降水量	4.89

2.4 独花兰潜在分布区

基于联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告对物种存在概率的描述,划分<0.33 为不适生区、0.33—0.66 为适生区、>0.66 为最适生区,绘制出独花兰在当前环境因子下的适生地理分布图(如图 5)。从图 5 可以看出,独花兰潜在分布区域主要分布于 N25—35°之间,属于中国地理地势第二和第三阶梯,潜在的大部分区域位于长江流域境内,湖北恩施、宜昌,四川巴中,湖南怀化、衡阳,安徽六安、黄山,浙江临安、江山,江西庐山等地是其高适生分布地,其他地区偶有发现,统计总适生区面积为 18.546 3 万 km<sup>2</sup>,最适区域 2.379 7 万 km<sup>2</sup>,分别占全国总面积的 1.93%和 0.25%。相比于其他濒危物种,独花兰存在着潜在分布区广泛但适生区域斑块状显著、种群隔离现象严重、种群遗传分化程度高的特点。

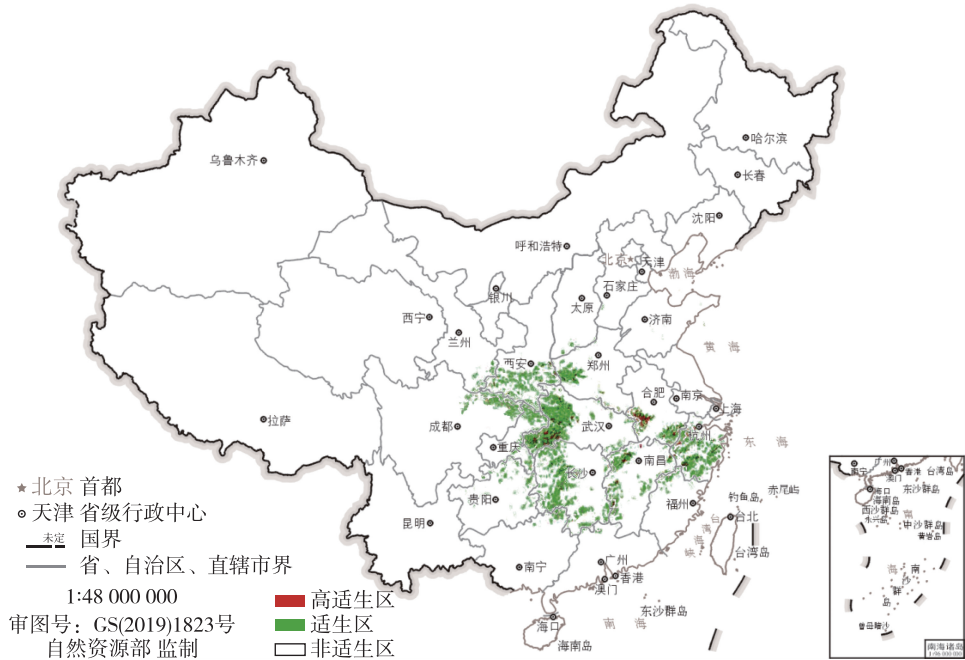


图 5 当前环境下独花兰潜在分布格局

2.5 历年植被覆盖与土地利用对独花兰潜在分布的影响

从独花兰潜在分布区域比值(如图 6)可以看出,从 1998—2023 年以来,独花兰潜在分布区域总面积整体变化不大,随着 NDVI 与土地利用类型数据波动变化,其中 2010 年存在区域面积最大,最小为 2005 年,最适分布区分布面积基本不变。适生区面积有部分波动,从历年土地利用类型数据与 NDVI 的贡献率(如图 7)看,土地利用类型的贡献率呈现总下降趋势,而 NDVI 贡献率则呈现上升趋势,其中 2010 年出现较大偏差,贡献率出现大幅度下降。因此综合以上结果表明独花兰潜在分布总面积较为稳定,但是构成稳定结果的各个主导因素存在更替,20 a 来 NDVI 逐渐成为首要因素,贡献率占比最高,因为 NDVI 能反映出植物冠层,对于林下植被独花兰具有较强影响;而土地利用类型空间分布数据贡献率在 20 a 内出现整体下降,其中 2010—2015 年下降趋势最大,表明近年来土地利用活动有利于独花兰的保护,土地利用类型由限制因素成为次末因素,而这种土地利用对独花兰的保护存在向好趋势。

3 讨论

预测结果显示,目前独花兰潜在分布于长江流域

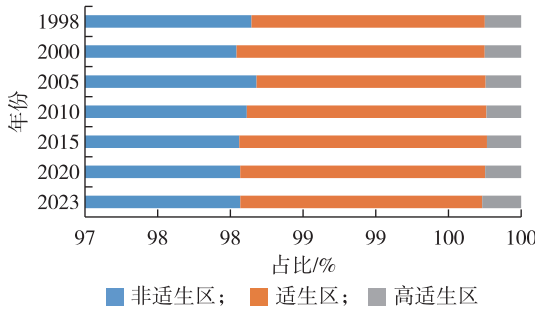


图 6 1998—2018 年独花兰潜在分布区域比值

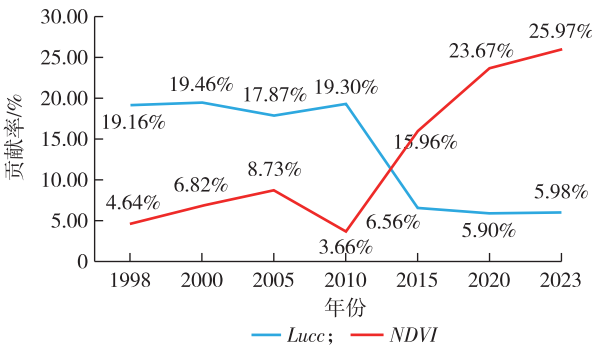


图 7 独花兰分布的主要因素贡献率随年份变化趋势

的山地,零散分布于岷山东部、秦巴山脉部分山系,伏牛山东部地区,大娄山、罗霄山脉及九岭—幕阜山脉部分地区,大别山余脉以及长江中下游平原部分山

丘。由此看出独花兰自身适应环境能力较强、分布较广,但是与目前濒危等级形成极大反差。海拔对独花兰分布具有较为重要的影响,《中国植物志》总结的独花兰分布海拔范围为400—1 100 (1 800) m,独花兰受气候因素影响存在自然限高,但是400 m以下基本不见踪影,主要原因在于海拔400 m以下基本不存在良好的森林栖息地。从行政区划看,湖北恩施、宜昌,四川巴中,湖南怀化、衡阳,安徽六安、黄山,浙江临安、江山,江西庐山等地为独花兰的高适生分布地,湖北恩施州与安徽六安市是独花兰种质资源保护的核心区域。独花兰总适生区与最适生区分别占比全国总面积1.93%和0.25%,潜在分布区域斑块状明显,因此该种群隔离现象严重,种间遗传分化程度高<sup>[22]</sup>。

环境因子贡献率分析结果表明,最干月份降水量和最冷月最低温度代表极端气候,限定了独花兰的最大分布范围,独花兰9月中下旬的芽萌动并开始展叶,次年3月中下旬开花,至5月上旬叶片逐渐枯死,因此极端气候的温度与降水贯穿独花兰整个生活史,温度季节变化方差在独花兰分布中贡献率较高显示独花兰对气温的变化较为敏感,因此,未来独花兰的分布将响应于气候的变化。土地利用类型空间分布数据的贡献率近年来不断下降,表明全国土地利用政策“退耕还林还草”改善了植被绿化<sup>[23]</sup>,并有利于激活独花兰潜在分布区域,对其潜在分布区域限制作用降低,也说明近年来的土地政策有利于独花兰的保护。但是目前独花兰最高潜在分布区域面积总体未发生很大的变化,主要原因由于独花兰分布生境较严格,分布区域已经归属于国家自然保护区范围,如近年来贵州梵净山国家级自然保护区与广西猫儿山自然保护区等发现独花兰新分布<sup>[21,24]</sup>都属于以上情况,但分布区域总面积相对有限。另一方面土地利用类型空间分布数据的贡献率逐年降低,大体上表明人为恶性干扰活动被遏制。

NDVI作为植被覆盖的表征,与气候因子的关系在不同的时空尺度上得到了广泛的研究<sup>[25-27]</sup>。在建立物种分布模型时,多数研究仅考虑气候变化对物种分布的影响,本研究表明20 a来首要贡献率由气候中的降水因子变为NDVI,表明植被覆盖对独花兰分布的影响贡献逐渐增大,作为一种林下喜好荫蔽的植物,在郁闭度高的林下植株个体数量更多<sup>[28]</sup>,NDVI对其贡献率最大有其现实的重要意义。

有研究表明森林冠层通过减弱和缓冲气候条件的变化,创造微气候<sup>[10]</sup>,因此对于林下植被而言,未来气候变化下林冠层的改变才是影响到其分布的首要因素。因此后续对于林下植被与气候环境因子的响应研究应该考虑林冠层的因素。

NDVI贡献率逐年上升,2010年显示偏离了总体趋势,是由于在2009—2010年的冬春季,中国西南部遭受了过去30 a来前所未有的2次严重干旱事件的袭击<sup>[29]</sup>,但是独花兰潜在分布面积并未发生明显变化,因此气候环境变化对物种分布影响不单纯为线性关系。有研究发现1982—2015年全国约70%的区域植被覆盖呈增加趋势,其中黄河中下游、长江中游及淮河流域的植被覆盖率增加较快<sup>[30]</sup>,该区域植被覆盖率增加有利于独花兰潜在分布区的储备,目前中国森林群落优势种的地理分布南边界随着气候的变化,有向高纬度或高海拔地区移动的趋势<sup>[31]</sup>,因此未来作为林下植被的独花兰分布也可能存在向高纬度或高海拔地区迁徙趋势。

兰科植物是被子植物中十分进化的类群,其花的结构与昆虫传粉高度适应<sup>[32]</sup>。独花兰作为兰科独属种植物,自身存在自交亲和、需要昆虫的欺骗性传粉但传粉效率低下的现象,因此面对目前独花兰分布区域碎片化,种群隔离现象严峻与种群遗传分化程度高的现状,对其种质资源的保护应该进一步提供有效的人工支持。

#### 参考文献:

- [1] FRANKLIN J. Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges [J]. *Diversity & Distributions*, 2016, 19(10): 1217-1223.
- [2] BRONDIIZIO E S, SETTELE J, DIAZ S, et al. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science policy platform on biodiversity and ecosystem services [M]. Bonn, Germany, IPBES secretariat, 2019.
- [3] JIANG W, YUAN L, WANG W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51(4): 117-126.
- [4] LI A, LUO Y B, XIONG Z T, et al. A preliminary study on conservation genetics of three endangered orchid species [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(2): 250-252.
- [5] LIU W, CAI T, JU C, et al. Assessing vegetation dynamics and their relationships with climatic variability in Heilongjiang Province northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2013-2024.
- [6] MORAITIS M L, VALAVANIS V D, KARAKASSIS I. Modelling the effects of climate change on the distribution of benthic indicator

- species in the Eastern Mediterranean Sea[J]. Science of the Total Environment, 2019, 667: 16-24.
- [7] MORENO R, ZAMORA R, JUAN R M, et al. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent) [J]. Ecological Informatics, 2011, 6(6): 364-370.
- [8] NAKAMURA A, KITCHING R L, CAO M, et al. Forests and their canopies: achievements and horizons in canopy science[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2017, 32(6): 438-451.
- [9] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [10] SONG L, LI Y, REN Y, et al. Divergent vegetation responses to extreme spring and summer droughts in Southwestern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019: 279.
- [11] SUN H, ALEXANDERSSON R, GE S. Positive effects of flower abundance and synchronous flowering on pollination success, and pollinia dispersal in rewardless *Changnienia amoena* (Orchidaceae) [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2010, 99(3): 477-488.
- [12] WILLIAMS S E, BOLITHO E E, FOX S. Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences, 2003, 270(1527): 1887-1892.
- [13] XU H, WANG X, YANG T. Trend shifts in satellite-derived vegetation growth in Central Eurasia, 1982-2013 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579(2): 1658-1674.
- [14] YANG X Q, KUSHWAHA S P S, SARAN S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant *Justicia adhatoda* L in Lesser Himalayan foothills [J]. Ecological Engineering, 2013, 51(2): 83-87.
- [15] XIAN G Y, MING Z L, LIN C, et al. The complete chloroplast genome of *Changnienia amoena* S. S. Chien (Orchidaceae) and its phylogenetic implication [J]. Mitochondrial DNA Part B, 2019, 5: 238-239.
- [16] YI Y J, ZHOU Y, CAI Y P, et al. The influence of climate change on an endangered riparian plant species: The root of riparian Homonoia [J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 40-50.
- [17] 班 玮, 郑晓明, 葛 颂, 等. 濒危植物独花兰的形态变异及其适应意义 [J]. 生物多样性, 2005, 13(5): 376-386.
- [18] 胡 秀, 郭 微, 吴福川, 等. MaxEnt 生态学模型在野生植物近自然林引种区划中的应用——以红姜花为例 [J]. 广西植物, 2015, 35(3): 325-330.
- [19] 胡 秀, 吴福川, 郭 微, 等. 基于 MaxEnt 生态学模型的檀香在中国的潜在种植区预测 [J]. 林业科学, 2014, 50(5): 27-33.
- [20] 金 凯. 中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [21] 孙海芹, 李 昂, 班 玮, 等. 濒危植物独花兰的形态变异及其适应意义 [J]. 生物多样性, 2005, 13(5): 376-386.
- [22] 李 昂, 罗毅波, 葛 颂. 采用空间自相关分析研究两种兰科植物的群体遗传结构 [J]. 生物多样性, 2002, 10(3): 249-257.
- [23] 覃 营, 邹春玉, 蒙 涛, 广西兰科植物二新记录属 [J]. 广西植物, 2018, 38(11): 1475-1479.
- [24] 孙海芹. 独花兰和扇脉杓兰的传粉生态学 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2005.
- [25] 李 昂. 三种兰科植物的保护遗传学研究 [D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2001.
- [26] 王春晶. 气候变化背景下中国野生植物地理分布格局及优先保护 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [27] 熊高明, 谢宗强, 熊小刚, 等. 神农架南坡珍稀植物独花兰的物候、繁殖及分布的群落特征 [J]. 生态学报, 2003, 23(1): 173-179.
- [28] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2013, 35(2): 557-567.
- [29] 杨玉珍, 胡如善, 孙天洲, 等. 宝天曼自然保护区几种珍稀濒危兰科植物调查研究 [J]. 植物科学学报, 2003, 21(5): 429-433.
- [30] 张 颖, 李 君, 林 蔚, 等. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 195-201.
- [31] 张玉武, 杨传东. 贵州兰科一新纪录属种(独花兰属: 独花兰) [J]. 种子, 2010, 29(4): 65-66.
- [32] 赵运林. 兰科植物传粉生物学研究概述 [J]. 植物学通报, 1994, 11(3): 27-33.