

基于优化的 Maxent 模型预测桔梗在中国的潜在适生区

张玉洁^{1,2}, 余函纹^{1,2}, 郑昭焕^{1,2}, 蒋超³, 刘娟³, 查良平^{1,2*}, 池秀莲^{3*}, 桂双英^{1,2}

(1. 安徽中医药大学药学院, 安徽 合肥 230012; 2. 安徽中医药大学, 新安医学与中医药现代化研究所, 安徽 合肥 230012; 3. 中国中医科学院中药资源中心, 道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室, 北京 100700)

摘要: 桔梗 *Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC. 作为最常用的大宗药材, 在药用、食用和化妆品领域中都具有重要价值, 市场需求量逐年增多, 具有良好的开发前景。本研究以中国境内桔梗为研究对象, 基于 403 条分布点和 8 个环境因子变量, 运用参数优化后的 Maxent 模型探究未来气候条件下桔梗的适生分布情况。研究表明 Maxent 参数在特征组合 (feature combination, FC) 为 LQPH (L: 线性特征; Q: 二次型特征; P: 片段化特征; H: 乘积型特征), 调控倍频 (regularization multiplier, RM) 为 2.1 时, 模型模拟效果最佳, 受试者曲线下面积 (area under curve, AUC) 为 0.901; 模型预测显示在当前气候条件下, 桔梗广泛分布于中国的 28 个省份, 适生区面积达 2 337 419.98 km²; 在未来气候变化影响下, 桔梗的适生区面积呈现降低趋势, 分布中心整体呈现向北和向东偏移的趋势; 当前三大主产区内的桔梗的分布面积受气候变化影响的变化趋势不同, 总体表现为在内蒙古赤峰的未来适生分布面积增加, 而在共享社会经济路径 5-8.5 (shared socioeconomic pathways, SSP) 排放情景下山东淄博和安徽亳州、太和县的未来适生分布面积减少甚至消失。建议维持和保护好适宜桔梗生长的保留区的生态环境和种质资源, 增加在桔梗扩增区中的栽培研究, 为后续拓展桔梗种植打下基础, 由此促进桔梗资源的保护和可持续发展。

关键词: 桔梗; Maxent 模型; 参数优化; 气候变化; 适生区变化

中图分类号: R931 文献标识码: A 文章编号: 0513-4870(2024)09-2625-09

Predicting the potential suitable areas of *Platycodon grandiflorum* in China using the optimized Maxent model

ZHANG Yu-jie^{1,2}, YU Han-wen^{1,2}, ZHENG Zhao-huan^{1,2}, JIANG Chao³, LIU Juan³,
ZHA Liang-ping^{1,2*}, CHI Xiu-lian^{3*}, GUI Shuang-ying^{1,2}

(1. College of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China; 2. Center for Xin'an Medicine and Modernization of Traditional Chinese Medicine of IHM, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China; 3. State Key Laboratory for Quality Ensurance and Sustainable Use of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

Abstract: *Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC is one of the most commonly used bulk medicinal herbs. It has important value in the fields of medicine, food and cosmetics, and its market demand is increasing year by year, and it has a good development prospect. In this study, based on 403 distribution records and 8 environmental variables, we used Maxent model to predict the potential distribution of *P. grandiflorum* under climate change. The results showed that the model simulation effect was the best when the Maxent parameter was FC (feature combination) = LQPH (L: linear features; Q: quadratic features; P: product features; H: hinge features) and RM (regularization multiplier) = 2.1, AUC (area under curve) = 0.901, and the model prediction showed that

收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金区域联合基金项目 (U21A20406); 中国中医科学院科技创新工程项目 (CI2021A03908).

*通讯作者 E-mail: xiulian68@126.com; zlp_ahtem@126.com

DOI: 10.16438/j.0513-4870.2024-0175

P. grandiflorum was widely distributed in 28 provinces of China under the current climate conditions, with a suitable area of 2 337 419.98 km². Under the influence of climate change in the future, the area of suitable habitat of *P. grandiflorum* showed a decreasing trend, and the distribution center as a whole showed a trend of northward and eastward shift. The distribution area of *P. grandiflorum* in the three main producing areas is affected by climate change, and the overall trend is that the future suitable distribution area of Chifeng in Inner Mongolia increases, while the future suitable distribution area of Zibo in Shandong and Taihe, Bozhou in Anhui decreases or even disappears under the SSP5-8.5 scenario (shared socioeconomic pathways). It is suggested to maintain and protect the ecological environment and germplasm resources of the reserved area suitable for the growth of *P. grandiflorum*, and increase the cultivation research in the expansion area of *P. grandiflorum*, so as to lay a foundation for the subsequent expansion of *P. grandiflorum* planting and to promote the protection and sustainable development of *P. grandiflorum* resources.

Key words: *Platycodon grandiflorum*; Maxent; optimizing parameter; climate change; suitable areas change

全球气候变化被认为是对自然生态系统的最大威胁之一,在一定程度上影响物种的地理分布和丰度以及种群的变化和稳定性^[1]。生态位模型通过物种的现实分布和相关环境因子的关系对其潜在分布区进行预测^[2]。应用生态位模型预测未来气候条件下植物的潜在分布,不仅有助于人们充分认识不同生态类型区的特征和发展趋势,而且对未来气候变化下相应物种的分布、迁移和扩散趋势提供重要研究价值^[3]。国内外学者已通过采用不同的算法开发了DO-MAIN、GARP、GAM、GLM、ENFA、Bioclim和Maxent等常用的生态位模型^[4]。其中,Maxent模型是一种基于最大熵原理来预测物种分布的模型,可以处理非线性关系的环境因子,具有结果稳定、算法多样、运行时间短和预测准确度高特性^[5],是目前应用最普遍的物种分布模型^[6],常被用于指导物种保护和管理的决策制定^[7]。例如,Maxent已被广泛应用于冬虫夏草^[8]、人参^[9]、三七^[10]、杜仲^[11]和麻黄^[12]等药用植物的生长区划和对气候变化的响应研究中,为药用植物资源的保护、种植和可持续发展提供了重要的科学依据。尽管如此,Maxent模型预测精度也可能受模型复杂度^[13]和大气环流模型^[14]等影响,优化模型构建方法以降低模型不确定性因此也成为研究焦点之一。

桔梗 *Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC. 为桔梗科桔梗属多年生草本植物,有宣肺化痰、利咽排脓的功效^[15],在医药、食品、化妆品等行业均有应用,具有很高的药用、食用和经济价值。现代临床研究表明桔梗作为治疗肺系疾病的常用中药,具有丰富的药用价值^[16];此外,作为药食同源的品种之一,我国桔梗常出口韩国、日本及东南亚等地区,加工成泡菜食用。人工栽培桔梗始于20世纪60年代末山东淄博池上镇地区,目前已形成山东淄博、内蒙古赤峰及安徽亳州、太和三大主产区。一方面由于气候的改变,如温度升高和降

水减少会导致桔梗的适生区缩减^[17],另一方面,随着桔梗需求量的增大和人们的过度采挖,我国的野生桔梗资源已经在逐年减少,早已不能满足市场需要,桔梗的大规模种植已成必然^[18]。因此,基于Maxent探究适宜桔梗生长的关键环境因子及其对桔梗适生分布的影响对桔梗资源的保护、栽培和未来可持续发展具有重要意义。

本研究以中国为研究范围,收集并整理基于野外实地调查及前人标本记录的桔梗的分布信息,结合气候、地形、土壤等环境因子,通过Kuenm包分析设置Maxent模型最优参数,整合不同大气环流模型未来气候数据,来模拟并预测当前及未来气候变化影响下桔梗适生分布情况,借助ArcGIS分析并显示桔梗适生分布区大小及分布核心的变化格局,以期为桔梗资源的保护、栽培提供科学参考。

材料与方法

桔梗分布数据的收集与处理 桔梗的分布数据来自GBIF (<https://www.gbif.org/>)、中国国家标本平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn/>)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)、教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)及相关研究文献。本研究仅保留桔梗在2000年及之后的有关数据,将有明确经纬度记载的分布位点结合百度卫星地图(<https://bajiu.cn/ditu/>)进行核对并补充部分缺失地理坐标信息的分布数据,剔除位置信息和地理坐标信息均缺失或者描述不清无法精准定位的数据,剔除地理坐标信息与行政地名记录明显偏离的分布数据,同时利用Excel软件去除经纬度相同的重复位点,利用ENMTools软件剔除冗余的数据点,最终得到有效分布位点403个。将所得数据仅保留经纬度及物种名,保存为csv格式,用作建立Maxent模型中分布数据的来源。

气候数据的来源与处理 现代及未来气候数据来源于WorldClim数据库 (<https://www.worldclim.org/>), 包含19个生物气候变量(Bio1~Bio19), 1~12月月降水量、月最高温、月最低温、月均温。3个地形因子(海拔、坡度、坡向)由DEM数据提取。土壤质地类型数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)。未来气候数据(2041~2060年、2061~2080年、2081~2100年)选用BCC-CSM2-MR、HadGEM3-GC31-LL、IPSL-CM6A-LR、MRI-ESM2-0共4种大气环流模式, 整合分析SSP1-2.6和SSP5-8.5两种极端模式下的共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSP)排放情景, 以生物气候数据为标准, 统一87个环境因子的分辨率为2.5'。

通过以下步骤从以上87个环境变量中筛选关键环境变量用于建模: ① 将87个环境变量联合403个分布位点加入Maxent中, 得出所有变量对模型的贡献率; ② 利用ArcGIS10.4.1提取403条有效分布位点记录下87个变量的属性值, 通过SPSS软件计算任意两个变量之间的Pearson相关系数 $|r|$; ③ 选择 $|r| < 0.85$ 的变量, 同时根据其在初始模型中的贡献率, 保留贡献率较高的环境因子。根据以上条件最终保留了7月降水量(Prec07)、海拔(Alt)、1月最高温(Tmax01)、坡度(Slope)等8个环境变量用于后续模型的建立、优化和评估(表1)。

Table 1 The contribution rate of environmental variables

Variable	Description	Percentage contribution/%
Prec07	Precipitation in July/mm	53.3
Alt	Elevation/m	18.3
Tmax01	Average maximum temperature in January/°C	16.5
Slope	Slope/°	5.4
Tmax11	Average maximum temperature in November/°C	2.5
Bio15	Precipitation seasonality/%	2.1
Prec04	Precipitation in April/mm	1.2
Prec09	Precipitation in September/mm	0.6

模型建立、优化和评估 将处理好的分布数据及筛选后用于建模的环境因子应用于Maxent中。初始模型的参数设置为: 25%分布点作为模型中的测试集(random test percentage), 采用Subsample方法, 默认最大背景点数量为10 000, 勾选随机数(random seed), 确保模型可以重复运行, 设定重复次数(replicates)为10次, 输出方式(output format)为逻辑值(logistic), 其他设置为默认参数, 最终输出结果为10次运行结果的平均值。

另外, 考虑到Maxent模型复杂度与预测结果密切相关, 而模型的复杂度与其调控倍频(regularization multiplier, RM)和特征组合(feature combination, FC)等参数设置相关, 本研究在R 3.6.3^[19]中使用Kuenm数据包^[20]对Maxent模型参数开展优化分析。Maxent模型共有5种特征参数, 包括线性特征(L)、二次型特征(Q)、片段化特征(P)、乘积型特征(T)和阈值型特征(H), 在默认条件下FC = LQPH, 共涉及31种特征组合设置。调控倍频设置区间为0.1~4, 间隔为0.1, 共涉及40种调控倍频。利用Kuenm包将上述共1 240种(31×40)参数组合进行测试, 以75%的数据作为训练集, 依据统计显著性(ROC曲线, receiver operating characteristic curve)、预测能力(数据遗漏率, omission rate)和复杂性(AICc值, Akaike information criterion corrected)进行模型优劣比较。选择满足统计显著、数据遗漏率低(< 5%)、复杂性低($\Delta AICc < 2$)的模型为最优模型, 将所得参数应用到Maxent中确立出最终模型。

根据受试者曲线下面积(area under curve, AUC)判定模型构建的准确性。AUC值范围为0~1, 值越高代表模型拟合效果越好、构建的准确性越高、可信性越高。AUC值为0.5~0.6表明模型构建失败、0.6~0.7表明模拟效果差、0.7~0.8表明模拟效果一般、0.8~0.9表明模拟效果良好、0.9~1表明模拟效果极好。Maxent模型运算的平均值结果代表了桔梗存在概率(P), 即适宜性指数, 范围为0~1。由于测试灵敏度加特异性阈值(maximum test sensitivity plus specificity, MTSPS)是通过Maxent直接计算出数值, 综合模型的灵敏性和特异性对适宜区进行划分的方式^[21], 因此选用此方式对桔梗适生区进行划分。将Maxent模型运算的平均值结果中asc格式的文件导入ArcGIS10.4.1, 通过其中的Spatial Analyst工具的重分类技术, 将其划分为非适宜区 $P < MTSPS$ 、适宜区 $P \geq MTSPS$, 再通过ArcGIS10.4.1中不同适生区域栅格的数量计算得适生区的分布面积。

模型结果的整合 考虑不同大气环流模型的不确定性, 本研究采用整合思想^[22], 将BCC-CSM2-MR、HadGEM3-GC31-LL、IPSL-CM6A-LR、MRI-ESM2-0共4种大气环流模型进行整合以预测桔梗未来的适宜区分布。将通过Maxent运行得到的数据导入ArcGIS中, 采用像元统计数据进行处理。例如, 将预测得到的2050s, SSP1-2.6情景下的四个大气环流模型的数据导入像元统计数据工具, 使用工具中的叠加统计, 选择MEDIAN(中位数), 以所得到的四个大气环流模型预测概率的中位数为标准整合得出桔梗在2050s, SSP1-

2.6 情景下的适宜区分布, 同此方法得出其他时期桔梗的适宜区分布。

结果

1 模型优化及准确性表达

在参数保持默认条件, 即初始模型, 参数为 $FC = LQPH$, $RM = 1$ 时, $\Delta AICc = 135.43$ 。运用 Kuenm 数据包对模型进行优化, 优化后的参数为 $FC = LQPH$, $RM = 2.1$ 时, $\Delta AICc = 0$ 。 $\Delta AICc$ 显著低于在默认参数下所得的结果, 表明优化参数对模型的建立有着积极的作用, 即可以有效降低模型的拟合度和复杂度。因此, 本研究选择 $FC = LQPH$, $RM = 2.1$ 作为桔梗最终分布模型建立和预测的参数条件 (图 1)。对初始模型和最终模型进行十倍交叉验证后发现在该参数条件下, Maxent 模型的 AUC 值由初始模型的 0.898 提升为 0.901, 表明模型模拟效果较好。

2 桔梗在当前气候条件下的适宜分布

根据 Maxent 分析结果将当前气候条件下桔梗的适宜区划分为两个适生等级, 即分布概率 $P < 0.2372$ 划分为非适宜区, $P \geq 0.2372$ 划分为适宜区。结果显示, 桔梗适宜分布广泛, 在内蒙古、安徽、山东、黑龙江、甘肃、云南、广西等 28 个省份均有分布, 全国范围内桔梗适生区总面积为 $2\,337\,419.98\text{ km}^2$ (表 2)。主要集中在内蒙古东部、吉林中部、湖北北部及东西部、河北中部、贵州各地、辽宁北部及东西部等地区, 共有 12 个省份适生面积达 $100\,000\text{ km}^2$ 以上 (表 2)。其中, 据文

献^[23]记载内蒙古赤峰, 山东淄博, 安徽亳州、太和是当前桔梗的三大主产区, 现有栽培面积占到桔梗总种植面积的 75% 左右, 而模型预测所得适生区面积总和为 $85\,858.74\text{ km}^2$, 占全国的 3.67%。桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布, 适生面积共 $75\,443.20\text{ km}^2$, 占全国的 3.23%, 其中克什克腾旗分布较少。山东淄博各区均有分布, 适生面积共 $5\,068.89\text{ km}^2$, 占全国桔梗分布面积的 0.22%, 其中高青县、桓台县分布较少。在安徽亳州、太和适生面积仅 $5\,346.64\text{ km}^2$, 占全国分布的 0.23% (表 3)。

3 桔梗未来适生区的预测

基于 Maxent 对 2041~2060、2061~2080、2081~2100 年三个未来时期对应下的两种排放模式进行预测, 得到桔梗在中国的未来适生区分布及经过 MTSPS 划分后的不同适生等级面积 (表 2)。在未来气候变化影响下, 桔梗的潜在适生区面积呈现逐渐缩减的趋势, 且 SSP5-8.5 情景下面积缩减程度比 SSP1-2.6 严重 (表 2)。

在 2050s, SSP1-2.6 情景下, 桔梗总适生区面积为 $2\,250\,623.85\text{ km}^2$, 主要集中于内蒙古东部、黑龙江中部及南部、吉林中部、河北中部、辽宁北部及东西部等地区, 共有 10 个省份的适生面积达 $100\,000\text{ km}^2$ 以上 (表 2)。其中, 桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布, 分布面积共达 $86\,535.75\text{ km}^2$, 与当前情景下桔梗的适宜区分布面积相比有所增加; 在山东淄博分布面积共达 $5\,120.97\text{ km}^2$, 相较于当前分布面积有所增加; 在安徽亳州、太和分布面积达 $1\,597.05\text{ km}^2$, 与当前分布面积

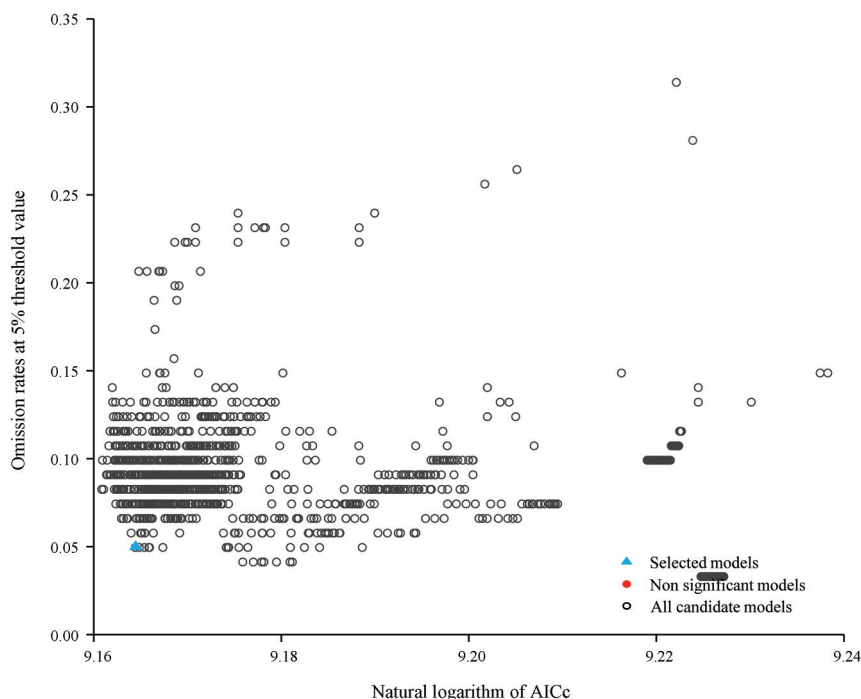


Figure 1 The results of model optimization. AICc: Akaike information criterion corrected

Table 2 Suitable areas for *Platycodon grandiflorum* under current and future climates in different provinces in China. SSP: Shared socioeconomic pathways. The units in the table are all in km²

Province	Current	2050s		2070s		2090s	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Anhui	107 505.70	72 162.31	33 937.29	72 474.77	5 971.57	58 500.60	260.39
Beijing	17 393.95	17 393.95	17 393.95	17 393.95	17 376.59	17 393.95	15 744.82
Fujian	25 448.63	3 228.82	1 527.61	2 117.83	138.87	2 898.99	0.00
Gansu	12 620.16	5 988.93	15 345.56	10 137.79	9 217.75	12 602.80	11 092.55
Guangdong	5 190.41	1 475.53	451.34	694.37	34.72	1 110.99	0.00
Guangxi	52 893.57	17 775.85	11 960.51	14 130.41	3 194.10	16 647.50	173.59
Guizhou	148 473.47	126 531.41	95 909.73	120 976.46	29 944.67	120 247.37	1 267.22
Hebei	155 556.04	172 047.30	171 509.17	172 047.30	159 513.94	172 116.74	118 233.70
Henan	139 672.34	117 782.36	85 685.15	121 774.98	40 412.28	110 543.56	11 804.27
Heilongjiang	84 209.61	224 593.69	302 484.54	217 962.46	349 215.58	203 380.71	448 892.26
Hubei	156 354.56	131 096.89	101 881.31	132 121.08	56 417.49	126 635.56	16 751.65
Hunan	103 756.10	80 425.30	45 186.07	87 507.87	13 991.54	81 640.45	798.52
Jilin	180 223.50	199 822.07	204 838.88	202 165.56	208 189.22	202 182.92	209 577.95
Jiangsu	34 614.30	21 456.01	6 683.30	22 567.00	416.62	18 869.48	0.00
Jiangxi	56 000.87	25 188.24	10 120.43	21 056.74	2 638.60	17 914.72	69.44
Liaoning	143 456.66	140 870.13	142 033.20	140 002.17	141 425.63	141 911.68	134 134.75
Inner Mongolia	292 173.16	356 541.17	420 023.87	367 720.52	476 007.38	355 777.37	571 656.72
Shandong	125 576.65	117 730.28	99 832.92	119 848.11	62 632.09	111 099.06	8 974.72
Shanxi	104 085.93	140 818.05	155 035.26	148 213.08	153 420.85	149 428.23	146 425.08
Shaanxi	81 397.42	85 876.10	127 503.53	104 589.35	107 714.01	101 933.38	107 123.79
Shanghai	86.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sichuan	127 173.70	69 506.35	58 986.66	60 878.81	35 725.29	57 771.51	11 057.83
Taiwan	1 683.85	347.18	659.65	624.93	52.08	590.21	0.00
Tianjin	10 537.05	10 398.18	8 592.82	10 033.63	6 943.69	9 773.25	1 110.99
Tibet	3 940.54	6 197.24	3 749.59	4 270.37	1 024.19	4 426.60	295.11
Yunnan	30 135.62	23 348.16	19 424.98	21 525.44	11 873.71	21 508.08	1 822.72
Zhejiang	62 666.81	28 260.82	12 203.54	25 049.37	1 058.91	19 598.57	17.36
Chongqing	74 592.60	53 761.53	43 554.30	48 119.78	26 143.00	49 196.05	10 311.38
Total	2 337 419.98	2 250 623.85	2 196 515.14	2 266 004.12	1 920 694.37	2 185 700.34	1 827 596.83

Table 3 Suitable areas of *P. grandiflorum* under current and future climate conditions in the Chinese three largest producing regions. The units in the table are all in km²

Region	Current	2050s		2070s		2090s	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Chifeng	75 443.20	86 535.75	88 358.47	87 056.53	92 906.59	86 587.83	95 458.39
Zibo	5 068.89	5 120.97	4 582.84	5 398.72	3 471.85	4 982.10	260.39
Taihe, Bozhou	5 346.64	1 597.05	0.00	3 107.30	0.00	451.34	0.00

相比有所减少(表3)。

在2050s, SSP5-8.5情景下, 桔梗总适生区面积为2 196 515.14 km², 主要集中于内蒙古东部、黑龙江中部及南部、吉林中部、河北中部、山西中部及南部等地区, 共有8个省份适生面积达100 000 km²以上(表2)。其中, 桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布, 分布面积达88 358.47 km², 与当前情景下桔梗的适宜区分布相比分布面积增多; 在山东淄博分布面积达4 582.84 km², 与当前分布面积相比有所减少; 在安徽亳州、太和的适生分布区丧失(表3)。

在2070s, SSP1-2.6情景下, 桔梗总适生区面积为2 266 004.12 km², 主要集中分布于内蒙古东部、黑龙江中部及南部、吉林中部、河北中部、山西东部及西部等地区, 共有11个省份适生面积达100 000 km²以

上(表2)。其中, 桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布, 分布面积达87 056.53 km², 与当前情景下桔梗的适宜区分布面积相比有所增加; 在山东淄博分布面积达5 398.72 km²相较于当前分布面积有所增加; 在安徽亳州、太和分布面积达3 107.30 km², 与当前分布面积相比有所减少(表3)。

在2070s, SSP5-8.5情景下, 桔梗总适生区面积为1 920 694.37 km², 主要集中分布于内蒙古东部及北部、黑龙江中部及南部、吉林各区、河北中部及北部、山西东部及西部等地区, 共有7个省份适生面积达100 000 km²以上(表2)。其中, 桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布, 分布面积达92 906.59 km², 与当前情景下桔梗的适宜区分布面积相比有所增加; 在山东淄博分布面积达3 471.85 km², 与当前分布面积相比有所减

少;在安徽亳州、太和地区的适生分布区丧失(表3)。

在2090s, SSP1-2.6情景下,桔梗总适生区面积为2 185 700.34 km²,与2070s时期同种排放模式下相比适生区面积有所降低,主要集中分布于内蒙古东部、黑龙江中部及南部、吉林各区、河北中部及北部、山西东部及西部等地区,共有11个省份适生面积达100 000 km²以上(表2)。其中,桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布,分布面积达86 587.83 km²,与当前情景下桔梗的适宜区分布面积相比有所增加;在山东淄博分布面积达4 982.10 km²,与当前分布面积相比有所减少;在安徽亳州、太和分布面积达451.34 km²,与当前分布面积相比有所减少(表3)。

在2090s, SSP5-8.5情景下,桔梗总适生区面积为1 827 596.83 km²,与2070s时期同种排放模式下相比适生区面积有所减少,主要集中分布于内蒙古东部及北部、黑龙江各区、吉林各区、河北北部、山西东部及西部等地区,共有7个省份面积达100 000 km²以上(表2)。其中,桔梗在内蒙古赤峰各区均有分布,分布面积达95 458.39 km²,与当前情景下桔梗的适宜区分布面积相比有所增加;在山东淄博分布面积达260.39 km²,与当前分布面积相比有所减少;在安徽亳州、太和地区的适生分布区丧失(表3)。

4 桔梗未来潜在适生区空间变化格局

将6种未来不同气候情景下的桔梗适生区分布分别与当前情景下桔梗适生区进行比较。可以看出,无论在SSP1-2.6情景还是SSP5-8.5情景,在相同气候情景下,2050s到2090s未来桔梗适生区面积的丧失率呈现递增趋势,保留率呈递减趋势,扩增率呈现递增趋势(图2)。尽管丧失率与扩增率均呈现递增趋势,但由于保留率的降低以及扩增率不及丧失率高,因此在未来情景下桔梗总的分布面积呈现递减趋势。

从图2可以看出,2090s, SSP5-8.5排放情景下,桔梗适生区面积有最明显的扩增,扩增面积为

699 768.84 km²,扩增率达29.91%,扩增区域主要分布在黑龙江北部及中部、内蒙古北部及中部、山西西部、陕西东部、甘肃东南部等零星地区。在该时期下,桔梗适生区保留面积与其他时期相比最低,为935 145.63 km²,保留率为39.97%;丧失面积最多,为1 396 394.93 km²,丧失率达59.68%,主要丧失区域为分布区南部,包含河北、山东、河南、安徽、江苏、湖北、重庆、四川、贵州、湖南、江西、台湾等省份的大部分地区。

2050s, SSP1-2.6排放情景下,扩增区面积最小,主要分布于黑龙江中部及南部、内蒙古北部及西部、山西西部、陕西北部以及河北、山东、河南、安徽、江苏等地的零星地区。保留区面积最高,保留率达78.40%;丧失区面积最低,丧失率为21.25%,主要丧失地区为重庆西部、四川东部、广西北部、贵州南部、福建北部以及河南、山东、安徽、浙江、台湾等零星地区。

在其他4种排放情景中,2070s, SSP5-8.5排放情景的扩增区、丧失区面积较高,扩增率达23.14%,丧失率为46.91%。2050s, SSP5-8.5排放情景下,扩增区、丧失区面积均较2070s, SSP1-2.6、2090s, SSP1-2.6高,分别为500 204.20 km²、741 663.73 km²,扩增率为21.38%,丧失率为31.70%;保留区较2070s, SSP1-2.6、2090s, SSP1-2.6低,保留区面积达1 589 876.83 km²,保留率为67.95%。在2070s、2090s对应的不同排放情景下,扩增区均主要位于黑龙江东部及北部、内蒙古东部及南部、山西西部及陕西东部;丧失区均位于分布区南部,主要为河南、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广西、台湾等省的大部分地区。

未来气候变化影响下,桔梗分布中心有向北和向东偏移的趋势(图3)。在当前环境条件下,桔梗的适宜区分布中心位于山东西南部(115.665°E, 35.748°N)。在SSP1-2.6排放情景下,2041~2060年间,适宜区分布中心转移至山东西北部(117.099°E, 37.829°N),向北迁移264.30 km;在2061~2080年间适宜区分布中心

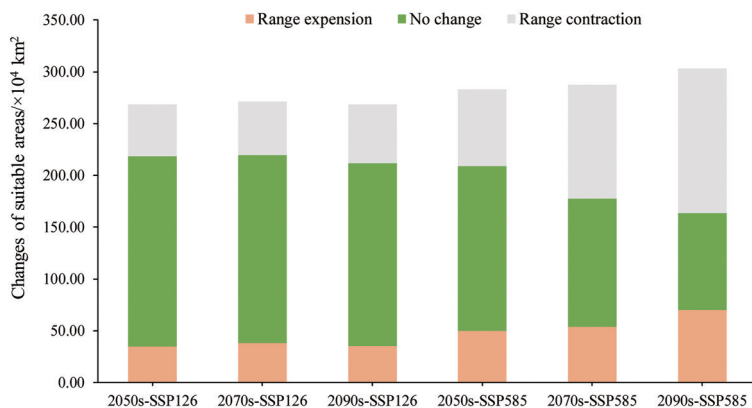


Figure 2 Changes of suitable areas

转移至河北盐山县 (117.099°E, 37.942°N), 与 2041~2060 年分布中心相比继续向北转移 12.54 km; 等到 2081~2100 年间, 分布中心转移至河北南皮县 (116.965°E, 37.954°N), 继续转移 11.82 km。在 SSP5-8.5 排放情景下, 2041~2060 年间, 适宜区分布中心转移至天津 (117.817°E, 39.385°N), 转移 446.64 km; 在 2061~2080 年间适宜区分布中心转移至内蒙古宁城县 (119.228°E, 41.469°N), 继续转移 260.69 km; 于 2081~2100 年间, 分布中心转移至内蒙古阿鲁科尔沁旗 (120.677°E, 43.595°N), 继续转移 264.53 km。

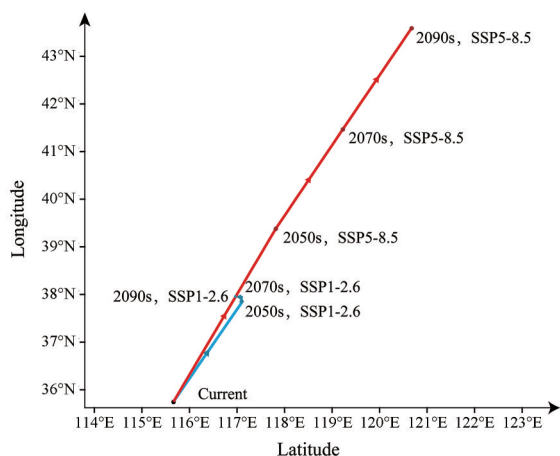


Figure 3 Centroid shift

讨论

生态位模型是根据一定的算法推算物种需求, 来预测物种的潜在分布, 因此提高模型预测的准确度对于生态位模型的构建起着重要作用^[24]。Kuenm包作为用于 Maxent 模型优化参数的 R 包, 它依据统计显著性、预测准确性、模型复杂性筛选出最佳建模参数, 与其他类似的 R 包相比, 它有着更严谨的模型评估过程, 并且会自动选择最佳模型; 可用于测试不同的环境变量集; 与以往的生态位模型相比更加的智能, 可结合多个外推选项确定最终模型^[20]。这些特性使得 Maxent 构建出更为准确且稳定的生态位模型。

本研究基于 Kuenm 包优化参数设置的 Maxent 模型对桔梗的潜在适生区分布进行了预测, 模型 AUC 值达 0.901, 具有较高的模拟精度。预测结果表明: 桔梗的分布主要受到气温、地形、降水因子的影响。Chen^[25]研究指出桔梗具有喜光、喜湿、耐寒、适应性广的特点, 栽培时多选择海拔 1 200 m 以下, 播种地坡度一般不超过 25°, 以 5°~10°为宜。Li^[26]对二年生桔梗开展室外盆栽控水试验发现, 随着水分胁迫程度的加强, 桔梗地上、地下部分的生长均受到抑制, 可以看出降水量对桔梗的生长分布有着重要影响。同时, 海拔的变化会带

来包括温度、水分和土壤肥力等许多环境变量的剧烈变化, 由海拔梯度引起的环境异质性往往影响植物的垂直分布格局^[27]。这说明尽管气候因子对桔梗分布的影响占较高比例, 但海拔等地形因素对桔梗的分布也起到一定的限制作用。

本研究基于参数优化的 Maxent 模型预测得到桔梗广泛分布于中国的 28 个省份, 适生区总面积达 2 337 419.98 km²。Gao 等^[28]通过对桔梗资源的研究发现, 现在皖西、皖北、豫西、豫南、川北、鄂东、鲁中、苏中、苏北、浙中、浙西、辽南、河北保定地区、吉林省长白山地区等均有桔梗种植, 这与本研究的预测结果相符合。Dong 等^[29]基于 214 个采样点 12 个环境变量运用未经参数优化的 Maxent 模型对桔梗的适宜性分布区划研究也得出了桔梗广泛分布在全国 28 个省份内, 但其适宜分布区的概率阈值按照正态分布理论和专家经验法确定为预测所得采样点的概率的平均值 0.407 进行划分, 远高于本研究所使用的测试灵敏度加特异性阈值 (MTSPS) 0.237 2, 因此, 其统计所得全国适宜区总面积仅为 379 363.67 km², 远小于本研究结果。本研究采用的 MTSPS 划分方式结合了模型的灵敏性与特异性, 与其他复杂的划分方式相比可以得到同等准确有效的结果, 与常用的自然分布断点法相比, 自然分布断点法仅依靠计算得出, 缺少与现实变化相结合的判断^[21], 在国内外研究中也常采用 MTSPS 方式对物种分布进行划分^[30-32]。

本研究发现受气候变化影响, 桔梗适生区面积总体呈现缩减趋势, 这与以往探讨气候变化会对药用植物分布产生影响这一结论相一致^[33,34]。如在不同未来气候变化情景下, 三七的分布面积均有不同程度的降低^[10]、牡丹的高适生区面积逐步降低^[34]、野生薤白的高适宜生境逐渐减少^[35]。另外, 桔梗未来分布中心呈现向北即向高纬度地区偏移的趋势, 这与以往多数研究结果也较为一致^[36]。如在气候变化影响下, Ouyang 等^[37]研究发现凌霄花的未来分布中心逐步向高纬度地区偏移, Huang 等^[34]研究发现牡丹的未来高适生区分布核心向东北有不同程度的偏移, Zhan 等^[10]研究表明三七的未来适宜生境逐步向东部高海拔地区迁移。

此外, 对于药用植物来说, 气候变化引起的适生分布区的变化可能带来的一个重要影响是可能引起道地产区的转移甚至是道地性的丧失, 因此现有道地产区受气候变化的影响尤为关键。本研究专门针对当前三大主产区区内桔梗的分布面积受气候变化影响展开分析, 发现三大产区区内桔梗适生区面积受气候变化影响产生的变化形势不同。未来气候条件下, 桔梗在内蒙古地区的适生分布面积是全国各省中最大的, 原有适

生区保留面积在内蒙古也是最大的,且受气候变化影响下在内蒙古境内有着向北扩增的趋势。山东地区作为桔梗主产区之一,在SSP1-2.6排放情景下,随着时间的推移保留区域几乎维持不变,但在SSP5-8.5排放情景下,桔梗的保留区域逐渐减少,直至2081~2100年桔梗在山东的保留区几近消失,且无明显扩增。安徽省作为桔梗的主产地之一,其中具有安徽桐城这一桔梗的道地产区,在未来气候条件下桔梗在安徽分布主要保留有西部、东部以及南部地区,但在两种排放模式下,随着时间的推移,桔梗在安徽的保留区都在逐渐减少,其扩增区域也仅零星分布于安徽北部。因此,对于分布保留区尤其是现在的道地产区一定要给予足够的重视,保护好区域内现有桔梗适生的野生和栽培环境,同时保护好区域内优良的桔梗种质资源。对于扩增区可以尝试进行栽培试验,以保障未来桔梗资源的可持续利用。

作者贡献: 张玉洁参与数据收集、数据分析、文章初稿撰写和修订;余函纹、郑昭焕、蒋超、刘娟参与数据收集、讨论和文章修订;查良平、池秀莲、桂双英参与研究方案设计、数据分析指导和文章修订。

利益冲突: 所有作者声明本论文不存在利益冲突。

References

- [1] Chen IC, Hill JK, Ohlemuller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming [J]. *Science*, 2011, 333: 1024-1026.
- [2] Yi YJ, Zhou Y, Cai YP, et al. The influence of climate change on an endangered riparian plant species: the root of riparian *Homonioia* [J]. *Ecol Indic*, 2017, 92: 40-50.
- [3] Warren R, Vanderwal J, Price J, et al. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss [J]. *Nat Clim Chang*, 2013, 3: 678-682.
- [4] Tian LX. The Effect of Microorganism and Climatic Factors on the Quality of *Panax quinquefolium* L. (微生物及气候因子对西洋参品质的影响) [D]. Beijing: Union Medical College Hospital, 2022.
- [5] Kumar S, Spaulding SA, Stohlgren TJ, et al. Potential habitat distribution for the freshwater diatom *Didymosphenia geminata* in the continental US [J]. *Front Ecol Environ*, 2009, 7: 415-420.
- [6] Merow C, Smith MJ, Silander JA. A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter [J]. *Ecography*, 2013, 36: 1058-1069.
- [7] Fordjour OA, Corcino GPS, Siqueira RSD, et al. Climate-induced range shifts of invasive species (*Diaphorina citri* Kuwayama) [J]. *Pest Manag Sci*, 2022, 78: 2534-2549.
- [8] Yu J, Cao GC, Rong ZL, et al. Prediction of potential distribution of *Ophiocordyceps sinensis* in China based on Maxent model [J]. *Ecol Sci (生态科学)*, 2023, 42: 202-210.
- [9] Zhang HH, Meng XX, Lin YL, et al. Prediction of global potential growth areas for *Panax ginseng* based on GMPGIS system and Maxent model [J]. *China J Chin Mater Med (中国中药杂志)*, 2023, 48: 4959-4966.
- [10] Zhan P, Wang F, Xia P, et al. Assessment of suitable cultivation region for *Panax notoginseng* under different climatic conditions using MaxEnt model and high-performance liquid chromatography in China [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 176: 1-12.
- [11] Liu PF, Wang L, Du QX, et al. Estimation of potential suitable distribution area and the ecological characteristics of *Eucommia ulmoides Oliv.* in China [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2020, 40: 5674-5684.
- [12] Rong WW, Huang X, Niu PX, et al. Potentially suitable areas for traditional Chinese medicinal material *Ephedra equisetina* based on Maxent model [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2023, 43: 8631-8646.
- [13] Che X. Prediction of Genuine Suitable Growth Area of *Polyporus umbellatus* in Changbai Mountain Area Based on Maxent Model and GIS Technology (基于Maxent模型及GIS技术对长白山区猪苓(鸡爪苓)道地性适生区的预测) [D]. Yanbian: Yanbian University, 2022.
- [14] Balaji V, Fleur C, Julie D, et al. Are general circulation models obsolete? [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2022, 119: e2202075119.
- [15] Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China, Vol I (中华人民共和国药典一部) [S]. Beijing: Chinese Medical Science Press, 2020: 320, 1601.
- [16] Yin XY, Fang XM. The effect of *Platycodon grandiflorum* and its historical change in the clinical application of Platycodonis Radix [J]. *Chin J Med Hist (中华医史杂志)*, 2021, 51: 167-176.
- [17] Pirovani DB, Pezzopane J, Xavier AC, et al. Climate change impacts on the aptitude area of forest species [J]. *Ecol Indic*, 2018, 95: 405-416.
- [18] Jiang T, Zu JX, Xiang H. Research progress in introduction and cultivation of medicinal and edible *Platycodon grandiflorum* [J]. *Chin Med Mod Distance Educ China (中国中医药现代远程教育)*, 2018, 16: 148-152.
- [19] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [CP]. Vienna, Austria, 2020. <https://www.R-project.org/>.
- [20] Cobos ME, Peterson AT, Barve N, et al. Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent [J]. *PeerJ*, 2019, 7: 6281-6296.
- [21] Liu C, Berry PM, Dawson TP, et al. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions [J]. *Ecography*, 2005, 28: 385-393.
- [22] Devendra K, Sandeep R, Rajesh J. Predicting the current and future suitable habitat distribution of the medicinal tree *Oroxylum indicum* (L.) Kurz in India [J]. *J Appl Res Med Aromat Plants*,

- 2021, 23: 100309.
- [23] Zhang Y, Wei JH, Jin Y, et al. Investigation and analysis of difference of cultivation technique of *Platycodon grandiflorum* in three main producing areas [J]. Mod Chin Med (中国现代中药), 2020, 22: 720-728.
- [24] Chen Y. The Study of Quality Evaluation and Regional Division of *Polygonum multiflorum* Thunb (何首乌质量评价及产地适宜区划研究) [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2013.
- [25] Chen YX. High-quality and high-yield cultivation technology of *Platycodon grandiflorum* [J]. Agric Sci Technol Inf (农业科技与信息), 2020, 599: 36-37.
- [26] Li M. Molecular Mechanism of Water Ecological Stress on Platycodon Biosynthesis in *Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC. (水分生态胁迫对桔梗皂苷生物合成的分子机制研究) [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.
- [27] Tang ZR, Fang JY. A review on the elevational patterns of plant species diversity [J]. Biodiversity Sci (生物多样性), 2004, 12: 20-28.
- [28] Gao J, Wang YJ, Chen Y, et al. Research on *Platycodon grandiflorum* resources [J]. Guide China Med (中国医药指南), 2012, 10: 421-423.
- [29] Dong G, He L, Cheng WX. Research on the suitability distribution zoning of *Platycodon grandiflorus* based on Maxent and GIS technology [J]. J Chin Med Mater (中药材), 2019, 42: 66-70.
- [30] Mahatara D, Acharya AK, Dhakal BP, et al. Maxent modelling for habitat suitability of vulnerable tree *Dalbergia latifolia* in Nepal [J]. Silva Fenn, 2021, 55: 1-17.
- [31] Zhang K, Yao L, Meng J, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change [J]. Sci Total Environ, 2018, 634: 1326-1334.
- [32] Fu ZW. Study on the Change of Suitable Area of Rare and Endangered Picea Plants in Qinba Mountain under the Background of Global Climate Change (全球气候变化背景下秦巴山地珍稀濒危云杉属植物适生区变化) [D]. Kaifeng: Henan University, 2023.
- [33] Brown CS, Wigley LMT, Otto-Bliessner LB, et al. Persistent quaternary climate refugia are hospices for biodiversity in the anthropocene [J]. Nat Clim Change, 2020, 10: 244-248.
- [34] Huang XM, Huang Y, Jia ZX, et al. Analysis on potential suitable distribution of endangered medicinal *Paeonia suffruticosa* species under climate change scenarios [J]. J Sichuan Fores Sci Technol (四川林业科技), 2023, 44: 23-31.
- [35] Mo ZM, Kang GP, Yu HY, et al. Prediction of potential suitable areas of wild *Allium macrostemon* in China under future climate [J]. J Chin Med Mater (中药材), 2023, 46: 1-7.
- [36] Lenoir J, Gégout CJ, Marquet AP, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century [J]. Science, 2008, 320: 1768-1771.
- [37] Ouyang X, Pan J, Wu Z, et al. Predicting the potential distribution of *Campsis grandiflora* in China under climate change [J]. Environ Sci Pollut R, 2022, 29: 63629-63639.