

滇黄精的潜在分布与气候适宜性分析

姚馨¹, 张金渝³, 万清清¹, 李云蓉¹, 沈涛^{2*}

(1. 玉溪师范学院地理与国土工程学院, 云南 玉溪 653100; 2. 玉溪师范学院化学生物与环境学院, 云南 玉溪 653100; 3. 云南省农业科学院药用植物研究所, 昆明 650200)

摘要: 为了解滇黄精(*Polygonatum kingianum*)的适宜生长区, 运用 Maxent 模型模拟其潜在分布区, 探讨其引种栽培的适宜气候条件。结果表明, 预测模型的 AUC 值为 0.974~0.980, 表明模型具有良好的预测能力。滇黄精主要适生区位于我国西南地区, 适生面积约 $81.34 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国适生区面积的 88.24%。云南的高度适生区面积最大($19.96 \times 10^4 \text{ km}^2$); 四川次之($5.49 \times 10^4 \text{ km}^2$)。75% 的高度适生区分布于海拔 2 492 m 以下的地区, 3 400 m 以上的地区不适宜于滇黄精生长。最冷月最低温度、7 月最低温度、5-8 月太阳辐射、最干月降水量、4 月和 9-11 月平均降水量是限制滇黄精分布的主要气候变量。因此, 海拔 1 400~2 100 m 的亚热带地区是滇黄精最适宜的生长区。

关键词: 滇黄精; 潜在适生区; 气候因子; Maxent 模型

doi: 10.11926/jtsb.3874

Potential Geographical Distribution of *Polygonatum kingianum* and Its Climatic Suitability Analysis

YAO Xin¹, ZHANG Jin-yu³, WAN Qing-qing¹, LI Yun-rong¹, SHEN Tao^{2*}

(1. College of Geography and Land Resource Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, Yunnan, China; 2. College of Chemistry, Biological and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, Yunnan, China; 3. Institute of Medicinal Plant, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650200, China)

Abstract: In order to understand the suitable distribution zone of *Polygonatum kingianum*, the potential geographic distribution of *P. kingianum* under current conditions in China was simulated by using Maxent model, and the suitable climatic condition for introduction and cultivation was analyzed. The results showed that the AUC of prediction model ranged from 0.974 to 0.980, showing Maxent model had good predictive ability. The potential suitable distribution zone of *P. kingianum* was mainly located in Southwest China. The high suitable area was about $81.34 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 88.24% of distribution area in China. The largest high suitable region was in Yunnan with $19.96 \times 10^4 \text{ km}^2$, following Sichuan with $5.49 \times 10^4 \text{ km}^2$. The altitude distribution of 75% suitable region was under 2 492 m, and the altitude above 3 400 m was not suitable for growing of *P. kingianum*. Based on cumulative contribution rate of model and Jackknife analysis, the main climatic factors inhibiting the distribution of *P. kingianum* were minimum temperature of the coldest month, minimum temperature in July, solar radiation from March to August, precipitation of the driest month, precipitation of April and precipitation from September to November. Therefore, it was suggested that subtropical zones with altitude from 1 400 to 2 100 m were the most suitable areas for *P. kingianum*.

收稿日期: 2017-12-29 接受日期: 2018-03-26

基金项目: 云南省应用基础研究计划项目(2017FH001-028); 云南省大学生创新训练计划项目(2017A06); 云南省科技惠民计划(2015RA076)资助
The work was supported by the Projects for Applied Basic Research in Yunnan (Grant No. 2017FH001-028), the Undergraduate Innovation Training Program in Yunnan (Grant No. 2017A06), and the Project of People-Benefit with Science and Technology (Grant No. 2015RA076).

作者简介: 姚馨(1996~), 女, 本科, 主要研究方向为植物地理学。E-mail: dcld123@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: st_yxnu@126.com

Key words: *Polygonatum kingianum*; Potential suitable area; Climate factor; Maxent model

滇黄精 (*Polygonatum kingianum*) 为百合科 (Liliaceae) 黄精属植物, 在云南、贵州、四川等地均有分布^[1]。其肥厚肉质的根状茎是中国传统中药“黄精”的主要植物来源^[2-3], 具补气养阴、润肺、健脾等功效^[2]。此外, 滇黄精富含多糖、三萜、皂苷、黄酮等活性成分^[4-6], 可作为潜在的功能食品开发原料, 用于酿制保健酒、加工保健饮料等^[3,6]。随着大健康产业的发展, 市场对黄精药材的需求持续增长, 相关深加工产品不断涌现, 野生资源难以满足市场需求^[3]。目前, 栽培黄精药材主要以黄精 (*P. sibiricum*) 和多花黄精 (*P. cyrtoneura*) 为主, 滇黄精仍长期依赖野生资源, 过度采挖导致资源萎缩, 人工种植与资源保护亟待开展^[3]。

适宜的气候条件是药材成功栽培驯化的关键^[7]。生境的适宜性分析关系到药材生产的合理布局与科学引种, 对扩大产区具有重要指导意义^[7-8]。野生滇黄精多分布于高山和高原, 地貌复杂, 生境气候条件多变, 种植区气候适宜性研究薄弱, 不利于优质药材原料种植基地的建设。深入研究滇黄精适宜的生境条件, 探讨野生药材产地气候特征, 有助于滇黄精种植基地的科学选址, 为其资源保育和种植推广提供科学方法与理论支持。

物种分布模型 (species distribution models, SDMs) 是近年预测植物潜在分布, 探讨植物-环境关系及其适应性的重要工具^[9-11], 通常利用物种分布数据及环境数据, 依据特定算法估计、预测其可能的分布范围, 并以概率形式反映其对特定生境的偏好程度^[12-13]。根据模型算法不同, 物种分布模型又分为广义线性模型 (generalized linear model, GLM)、广义推进模型 (generalized boosting models, GBM)、随机森林模型 (random forest, RF)、规则集遗传算法模型 (genetic algorithm for rule-set prediction, GARP) 和最大熵模型 (maximum entropy, Maxent) 等^[13-14], 其中 Maxent 模型在近 10 年来报道和研究较多^[13]。与其他模型相比, Maxent 模型预测结果较保守, 但模型性能表现良好, 在物种分布数据有限时, 也能得到较准确的预测结果, 因此在保护生物学、生物地理学等领域被广泛应用^[13,16-20]。Qin 等^[18]利用 Maxent 模型模拟珍稀濒危植物岩柏 (*Thuja sutchuenensis*) 适宜生长的气候条件, 进而探讨气候变化对该物种分布的影响作用; Wu 等^[19]利用该模型探讨

了高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 在青藏高原的空间分布特征; Yan 等^[20]基于 Maxent 模型分析不同气候情景下, 西藏冬虫夏草 (*Ophiocordy cepssinensis*) 资源的分布变化, 为资源保护提出科学建议。在药用植物研究方面, 运用 Maxent 模型对山茱萸 (*Cornus officinalis*)、苍术 (*Atractylodes lancea*)、大花红景天 (*Rhodiola crenulata*)、川贝母 (*Fritillaria cirrhosa*) 等物种的潜在适生区和资源分布展开研究, 探讨气候因子对药材分布的限制作用^[21-24]。Maxent 模型可将物种分布数据与不同类型的生态因子进行融合分析, 定性描述药材地理分布范围, 同时定量分析适宜环境与药材分布间的相互关系, 研究结果为药用植物适宜生长环境筛选及种植区划提供更加客观的评价依据。本研究运用 Maxent 模型结合野生滇黄精分布点数据和产地气候信息, 预测其潜在适宜分布区, 分析影响滇黄精生长的主要气候因子, 研究产地气候特征, 为滇黄精的生态适应、人工驯化与资源可持续利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 野生滇黄精分布点数据

查阅《中国植物志》、《云南药用植物资源名录》等文献, 初步确定滇黄精在我国的分布区和海拔分布范围^[1]。通过中国国家标本资源平台 (<http://www.nsii.org.cn>) 所属植物标本、保护区标本和教学标本子平台搜集、整理保存于中国科学院植物研究所、中国科学院昆明植物研究所、中国科学院华南植物园、四川大学标本馆、重庆市药物种植研究所药用植物标本馆等单位野生滇黄精分布记录 442 条。利用百度地图对分布点地理坐标信息进行校对。考虑到研究用气候数据精度为 30", 利用 ArcGIS 软件建立 30"×30" 网格, 每一网格中只保留离网格中心最近的分布点^[25], 最终筛选有效物种分布点 151 个 (图 1), 保存为 CSV 格式文件, 供后续建模分析使用。

1.2 气候变量

气候数据均下载自 WorldClim 数据库 (<http://www.worldclim.org/>), 数据版本为 Version 2.0。该数据集以 1970 年至 2000 年全球气象站点数据为基础, 经插值法生成气候数据。数据包括年平均温度、

昼夜温差月均值、等温性、温度季节性变化方差等 19 个生物气候变量及 1-12 月的月均最高温度、月均最低温度、月均温度、月均降水量和月均太阳辐射(表 1)。利用 ArcGIS 10 软件 Spatial Analyst 工具对下载的气候数据掩模提取, 获取中国境内气候数据。上述图层作为 Maxent 所需环境变量图层。

提取滇黄精 151 个物种分布点对应气候变量值, 导入 SPSS (Version 20.0)软件进行标准化处理, 利用相关性分析和皮尔逊相关系数(r)对 79 个气候变

量进行共线性分析。当两个变量相关系数大于 0.80 时, 表明变量间相关性很高, 只选择其中 1 个与物种分布关系紧密, 对建模贡献较大的变量用于建模分析^[25]。最终确定昼夜温差月均值、最暖月最高温度、最冷月最低温度、最湿月降水量、最干月降水量、降水量变异系数、4、5、6、9、10、11 月平均降水量、5、6、8 月太阳辐射和 7 月最低温度, 共计 16 个变量用于滇黄精潜在分布的预测。所有数据分析前均转换为 ASCII 格式。

表 1 研究用气候变量

Table 1 Climatic variables used in the study

代码 Code	气候变量 Climatic variable	代码 Code	气候变量 Climatic variable
bio01	年平均温度 Annual mean temperature	bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
bio02	昼夜温差月均值 Mean diurnal range	bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month
bio03	昼夜温差与年温差比值 Isothermality	bio15	降水量变异系数 Precipitation seasonality
bio04	温度季节性变化方差 Temperature seasonality	bio16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter
bio05	最暖月最高温度 Max temperature of the warmest month	bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter
bio06	最冷月最低温度 Min temperature of the coldest month	bio18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter
bio07	年均温度变化范围 Temperature annual range	bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter
bio08	最湿季度平均温度 Temperature of the wettest quarter	t _{avg} 01~12	1-12 月平均温度 Average temperature of 1-12
bio09	最干季度平均温度 Temperature of the driest quarter	t _{max} 01~12	1-12 月最高温度 Maximum temperature in 1-12
bio10	最暖季度平均温度 Temperature of the warmest quarter	t _{min} 01~12	1-12 月最低温度 Minimum temperature in 1-12
bio11	最冷季度平均温度 Temperature of the coldest quarter	prec01~12	1-12 月平均降水量 Precipitation of 1-12
bio12	年均降水量 Annual precipitation	S _{rad} 01~12	1-12 月太阳辐射 Solar radiation of 1-12

1.3 模型预测与准确性评估

将 151 个物种分布点数据和 16 个气候变量分别导入 Maxent 模型软件(version 3.4.1)的“Samples”模块和“Environmental layers”模块中进行分布区模拟运算。勾选“Create response curves”选项用于绘制响应曲线; “Do jackknife to measure variable importance”测量各气候变量建模过程中的重要性; 其他参数使用默认选项; 数据输出形式选取 Cloglog^[13]。选取 75% 的分布数据为训练集(train set), 剩余 25% 为测试集(test set), 用自助法(bootstrap)抽取测试样本, 重复运算 10 次取平均值并以 ASCII 格式输出模型模拟结果。受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析法被用于模型精度的检验。以特异度(1-specificity)为横坐标, 灵敏度(sensitivity)为纵坐标绘制 ROC 曲线, 曲线下面积(areas under the receiver operating characteristic curves, AUC)用于描述模型模拟的准确性。AUC 取值范围[0, 1], AUC 值在 0.7~0.8 表明预测结果较准确; 0.8~0.9 为很准确; 大于 0.9 为极准确^[25]。

1.4 分布区适生等级划分

将 Maxent 模型计算结果(ASCII 数据)导入 ArcGIS 10.0 软件中, 通过 ArcToolbox 的转换工具转为栅格数据, 每个栅格的数值是以逻辑值形式给出的存在概率。依据李焱等^[25]的方法对栅格数据进行分类, 当某一地区存在概率为模型输出最高逻辑值的 80%~100%时, 为高度适生区; 60%~80%为中度适生区; 40%~60%为一般适生区; 20%~40%为低度适生区; 低于 20%为不适生区。

1.5 数据处理

滇黄精适生区海拔数据的分布规律采用频度分析进行描述; 不同海拔范围滇黄精适宜性的比较采用单因素方差分析和 Scheffe 法检验。上述分析由软件 IBM SPSS Statistics (Version 20.0)完成。适生区划分结果的可视化由 ArcGIS (Version 10.0) 3D Analyst 模块完成; 区域分析(zonal statistics)用于计算适生区面积; 栅格计算器用于栅格图层间的逻辑运算, 以上分析均在 ArcGIS Spatial Analyst 模块中

完成。

2 结果和分析

2.1 模型的准确性评估

采用 Maxent 模型结合昼夜温差月均值(bio02)、最暖月最高温度(bio05)、最冷月最低温度(bio06)、最湿月降水量(bio13)、最干月降水量(bio14)、降水量变异系数(bio15)、7月最低气温($t_{min}07$)、4-6月平均降水量(prec04~06)等 16 个气候变量进行 10 次重复训练, 建立滇黄精潜在分布预测模型的 AUC 值最大为 0.980, 最小为 0.974, 平均值为 0.977 ± 0.02 , 表明模型能较好的拟合滇黄精物种分布数据, 预测结果准确, 可用于后续研究。

2.2 滇黄精潜在分布区预测

Maxent 模型预测结果表明, 西南地区(云南、贵州、四川、重庆和广西)是滇黄精的主要潜在分布区; 此外, 在西藏、湖南、广东和海南的少数地区也可能适宜于滇黄精的生长。依据模型计算的存在概率值对潜在分布区进行适生等级划分(图 1), 可见, 高度适生区(存在概率 0.99~0.79)涵盖了云南大部(滇中、滇西、滇南、东南及滇东南局部)、贵州西部(滇黔交界处的乌蒙山区)和四川的西南部(川西南山区)与中部地区(四川盆地西缘); 中度适生区(存在概率 0.79~0.59)主要位于云南滇西北局部(泸水-大理-永仁一线地区)、滇东南大部(云南文山地区)、滇东北大部(云南昭通地区), 贵州西部及四川西南部(主要为西昌周边地区); 一般适生区(存在概

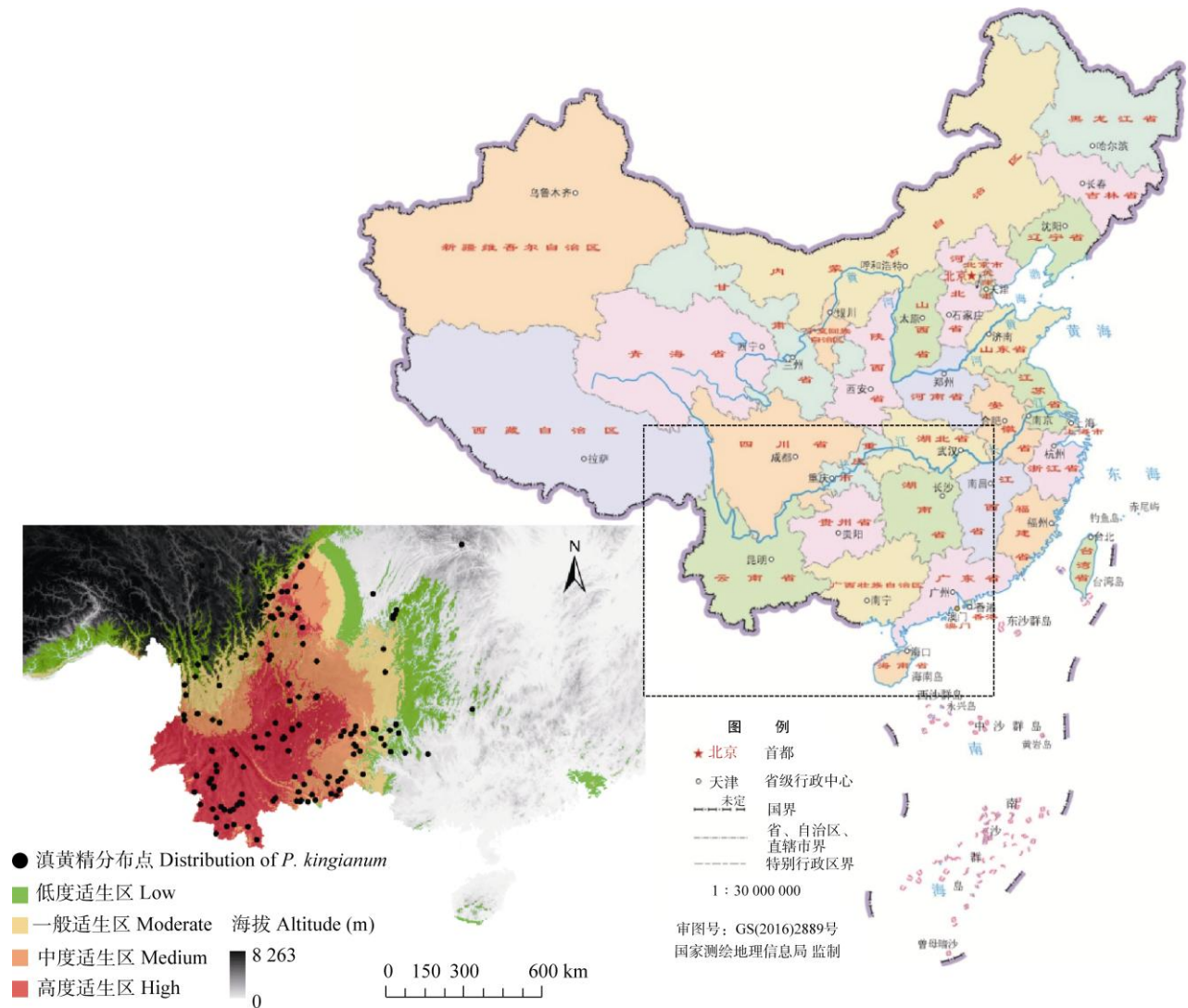


图 1 滇黄精潜在分布区

Fig. 1 Distribution region of wild *Polygonatum kingianum* predicted by Maxent model

率 0.59~0.40)包括了云南滇西北大部(丽江及与之相邻的怒江地区),川西南局部(四川盐源-木里一线地区),贵州中部及广西西部;低度适生区(存在概率 0.40~0.20)主要分布于滇西北横断山区,四川局部(主要为横断山区东部边缘地区),贵州黔东南大部及与之相邻的重庆、广西局部。

我国滇黄精适生区总面积约 $92.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,西南地区适生区面积约 $81.34 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国适生区面积的 88.24%。西南各省中以云南的高度适生区面积最大($19.96 \times 10^4 \text{ km}^2$),四川次之($5.49 \times 10^4 \text{ km}^2$)。西南地区中度适生区面积约 $17.95 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中 95.46%的地区位于云南、四川和贵州省境内,少数位于广西省境内。滇黄精的一般适生区和低度适生

区主要分布于四川和贵州两地,面积合计 $23.01 \times 10^4 \text{ km}^2$;相比其他地区,云南、重庆和广西境内一般适生区和低度适生区面积较小,分别为 5.84×10^4 、 4.03×10^4 和 $4.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2.3 滇黄精适生区海拔分布特征

提取不同等级适生区对应海拔数据进行频度分析(表 2),结果表明,低度适生区和一般适生区的平均海拔均为 2 150 m,中度适生区为 2 141 m,高度适生区为 1 897 m。可见,高度适生区的海拔较低,75%的高度适生区海拔位于 2 492 m 以下,75%中度适生区位于 2 861 m 以下;而低度和一般适生区在 700~3 600 m 内均有分布。

表 2 适生区海拔的频度分析

Table 2 Frequency analysis of altitude in different suitable regions

	低度适生区 (m) Low suitable region	一般适生区 (m) Moderate suitable region	中适生区 (m) Medium suitable region	高度适生区 (m) High suitable region
平均值 Mean	2 150	2 150	2 141	1 897
标准差 SD	838	838	833	695
极小值 Min	700	700	700	700
极大值 Mix	3 600	3 600	3 599	3 364
第 25 个百分位数 P ₂₅	1 425	1 425	1 420	1 297
第 50 个百分位数 P ₅₀	2 150	2 150	2 141	1 895
第 75 个百分位数 P ₇₅	2 876	2 876	2 861	2 492

以 100 m 为间隔,将滇黄精潜在分布区分为 30 个海拔区,对不同海拔区滇黄精存在概率进行单因素方差分析(图 2),结果表明,高海拔地区(3 300 m 以上)的存在概率值最低,海拔 1 600~1 900 m 的地区的存在概率值最高,与高海拔地区差异显著。在

1 400~2 100 m 海拔区的滇黄精存在概率值差异不显著,整体呈现较高的适宜度。

2.4 影响滇黄精分布的气候变量

采用贡献率和刀切法检验评估气候变量对滇

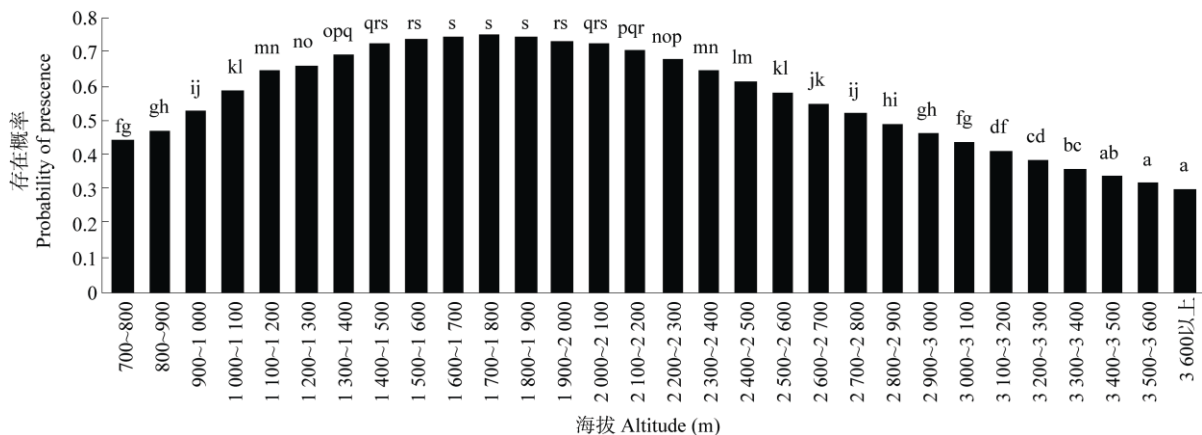


图 2 不同海拔范围滇黄精适宜性的单因素方差分析。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 ANOVA analysis of suitability of *Polygonatum kingianum* among different altitude range. Different letters indicate significant difference at 0.05 level.

黄精地理分布的影响作用。从表 3 可见，6 月太阳辐射(s_{rad06})、10 月平均降水量($prec10$)、8 月太阳辐射(s_{rad08})、7 月最低温度(t_{min07})、最冷月最低温度($bio06$)、4 月平均降水量($prec04$)和 11 月平均降水

量($prec11$)的累计贡献率达 92.00%。刀切法分析表明(图 3)，仅使用单独变量时，模型正则化训练增益最高的 3 个变量依次为 6 月太阳辐射(s_{rad06})、最冷月最低温度($bio06$)和 9 月降水量($prec09$)；测试

表 3 气候变量建模贡献率

Table 3 Percent contribution and threshold value of climatic variables

序号 No.	变量 Variable	贡献率 / % Contribution rate	累计贡献 / % Cumulative contribution rate	适宜值域 Threshold value	单位 Unit
1	s_{rad06}	29.80	29.80	14 969 ~ 17 968	$\text{kJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$
2	$prec10$	28.40	58.20	0 ~ 246	mm
3	s_{rad08}	15.50	73.70	13 256 ~ 17 453	$\text{kJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$
4	t_{min07}	7.90	81.60	13.43 ~ 22.86	$^{\circ}\text{C}$
5	$bio06$	5.00	86.60	-5.0 ~ 22.9	$^{\circ}\text{C}$
6	$prec04$	3.60	90.20	23 ~ 175	mm
7	$prec11$	2.40	92.60	30 ~ 289	mm
8	s_{rad05}	1.90	94.50	14 686 ~ 18 194	$\text{kJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$
9	$prec06$	1.30	95.80	150 ~ 450	mm
10	$bio15$	1.10	96.90	> 65	—
11	$bio13$	1.00	97.90	> 100	mm
12	$bio02$	0.90	98.80	4 ~ 22	$^{\circ}\text{C}$
13	$bio05$	0.60	99.40	-5 ~ 45	$^{\circ}\text{C}$
14	$prec09$	0.30	99.70	0 ~ 312	mm
15	$prec05$	0.20	99.90	0 ~ 175	mm
16	$bio14$	0.10	100.00	0 ~ 56	mm

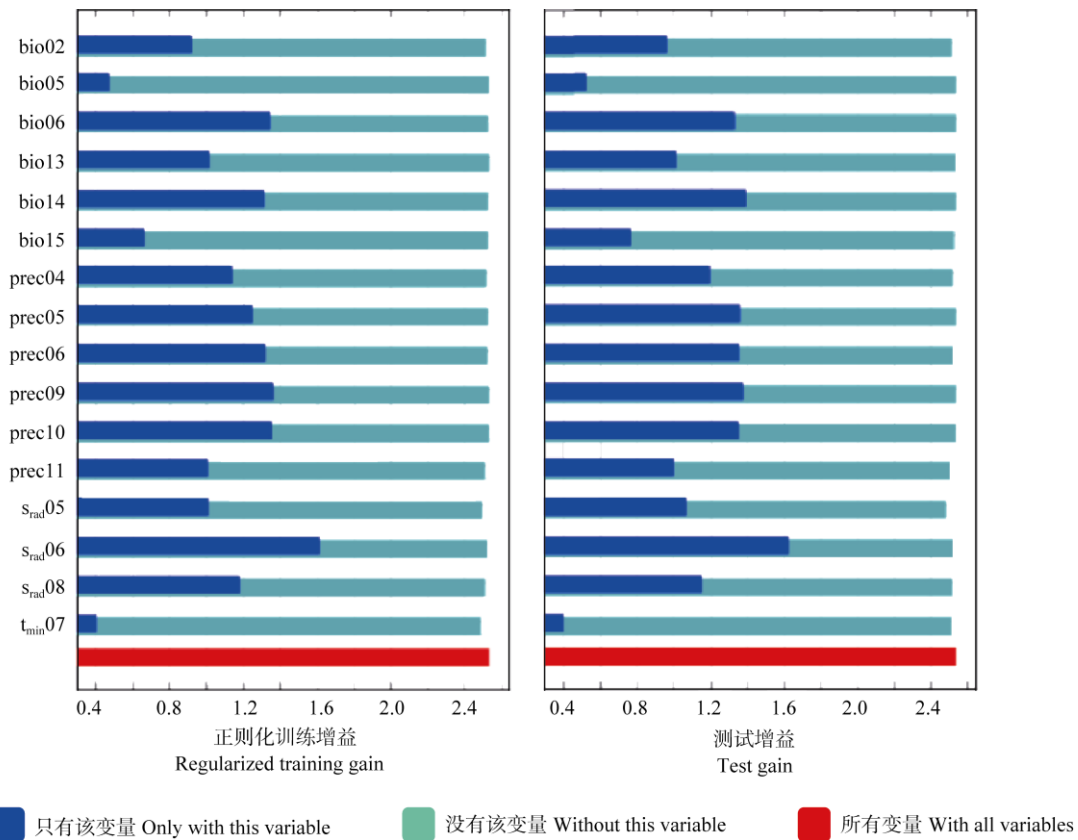


图 3 Maxent 模型刀切法分析结果

Fig. 3 Results of Jackknife test in Maxent model

增益最高的3个变量依次为6月太阳辐射(s_{rad06})、最干月降水量($bio14$)和9月平均降水量($prec09$); AUC值最高的3个变量依次为6月太阳辐射(s_{rad06})、最冷月最低温度($bio06$)和最干月降水量($bio14$)。综合累计贡献率和刀切法结果,我们认为最冷月最低温度($bio06$)、7月最低温度(t_{min07})、5、6、8月太阳辐射($s_{rad05, 06, 08}$)、最干月降水量($bio14$)、4和9~11月平均降水量($prec04, 09\sim 11$),共计10个变量,是影响滇黄精地理分布的主要气候变量。

依据建模结果,以存在概率为纵坐标,气候变量值为横坐标,绘制响应曲线,研究滇黄精适生区主要气候变量的适宜值范围(表3)。当存在概率 ≥ 0.79 时(高适生区),10个主要气候变量的最适宜

值分别为:最冷月最低温度($bio06, -5.0^{\circ}\text{C}\sim 22.9^{\circ}\text{C}$)、7月最低温度($t_{min07, 13.43^{\circ}\text{C}\sim 22.86^{\circ}\text{C}$)、5月太阳辐射($s_{rad05, 14\ 686\sim 18\ 194\ \text{kJ}\ \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)、6月太阳辐射($s_{rad06, 14\ 969\sim 17\ 968\ \text{kJ}\ \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)和8月太阳辐射($s_{rad08, 13\ 256\sim 17\ 453\ \text{kJ}\ \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)、最干月降水量($bio14, 0\sim 56\ \text{mm}$)、4月平均降水量($prec04, 23\sim 175\ \text{mm}$)、9月平均降水量($prec09, 0\sim 132\ \text{mm}$)、10月平均降水量($prec10, 0\sim 246\ \text{mm}$)、11月平均降水量($prec11, 30\sim 289\ \text{mm}$)。

响应曲线还表明(图4),当存在概率达到最大值时,随产地5月太阳辐射量的增加和7月最低温度的升高,滇黄精存在概率迅速下降,表明滇黄精对上述两个气候变量的变化较敏感。

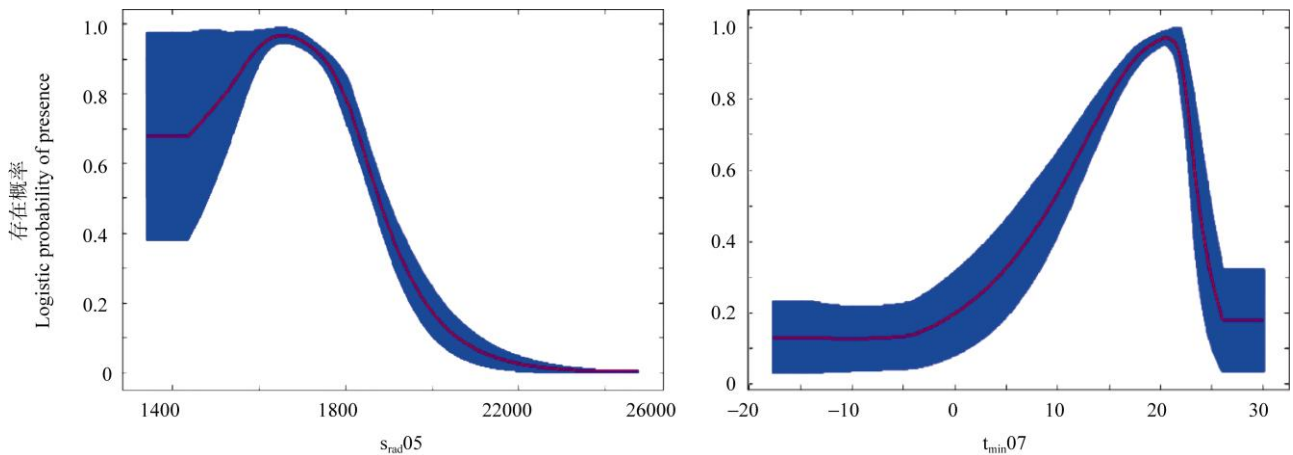


图4 5月太阳辐射及7月最低温度的响应曲线

Fig. 4 Response curves of solar radiation in May and minimum temperature in July

3 讨论

本文基于16个气候变量,运用Maxent模型建立滇黄精物种分布模型,对其潜在分布进行预测。模型AUC值均大于0.90,表明建立的模型较稳健,预测结果能客观反映滇黄精潜在分布范围。Maxent模型预测结果表明滇黄精的高度和中度适生区主要位于云南高原、贵州高原和川西南山区局部。此外,广东、海南和青藏高原喜马拉雅南翼高原山地可能有少量低等级适生区存在,目前上述地区尚未见滇黄精的分布记载。结合模型预测结果与滇黄精实际生长海拔^[1],不同适生区的海拔频度分析表明,700~3 360 m范围内均有高度适生区分布;其中海拔1 400~2 100 m地区的滇黄精适生度最高,3 400 m以上地区的适生度显著降低。将海拔数据与文献比

对,海拔1 400~2 100 m的分布区多为温暖湿润的季风气候,冬暖夏凉,年均温为 $15^{\circ}\text{C}\sim 22^{\circ}\text{C}$,虽然冬季相对干旱,但夏季有较充沛的降水,年降水量多在1 000 mm以上^[26]。随海拔增加,3 400 m以上地区为云贵高原、四川盆地与青藏高原东南部的过渡区,气候逐渐由温暖湿润向亚湿润过渡,年均温降至 $8^{\circ}\text{C}\sim 12^{\circ}\text{C}$,年降水量约600 mm左右^[26]。滇黄精适生度随海拔的变化,反映了高海拔地区温湿条件对其生长的限制作用。

通过建模贡献率和刀切法分析结果,产地太阳辐射变化与滇黄精地理分布关系密切,其中6月太阳辐射在建模贡献率和刀切法分析中均为最重要的气候变量。滇黄精适生区太阳辐射的变化受到分布区云量和日照时数的影响^[26]。滇黄精高度适生区年日照时数为2 200~1 800 h,而中度和低度适生区

(贵州中部、东部及四川盆地大部)属于我国云雾最多,日照时数最少的地区,年日照时数不足 1 500 h,尤其川西和黔北不足 1 200 h^[26],上述因素间接导致分布区太阳辐射量偏低,热量供给不足。6-10 月多为滇黄精的花、果期^[1,27],推测太阳辐射数值偏低可能影响滇黄精的开花与结实,限制植株在上述地区的生长与繁殖。

除太阳辐射,极端气温(最冷月最低温、7 月最低温度)也是影响滇黄精分布的重要因素。极端气候条件对陆生植物地理分布的限制作用已有较多报道^[28]。车乐等^[29]和王娟娟等^[30]报道百合科植物太白米(*Notholirion bulbuliferum*)、川贝母(*Fritillaria cirrhosa*)的分布受产地昼夜温差、冬季 1 月最低气温等因素的限制,并认为昼夜温差与百合科植物光合作用及夜间呼吸损耗关系紧密。研究还发现分布区最冷月最低温度过低时,可能造成百合鳞茎受损,导致来年出苗率低^[29]。从低海拔分布区至高海拔分布区,滇黄精也需适应不同的极端气候环境,海拔较低的分布区多属亚热带季风气候,自南部的北回归线附近至云南高原西北部,最冷月平均气温为 $-3.8^{\circ}\text{C} \sim 12^{\circ}\text{C}$,整体冬季较温暖,植物生长期较长^[26]。而高海拔地区多位于青藏高原东南部,年极端最低气温多在 -23°C 左右^[26],这样的极端气候条件可能进一步阻碍了滇黄精向更高海拔的分布。建模变量相关性分析显示,7 月最低温度与最暖季度平均温度(bio10)呈极显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.923$)。考虑到气候变量间的共线性关系,bio10 并未用于后续建模;但滇黄精存在概率对 7 月最低温度变化的敏感性(图 4)可能暗示最暖季度平均温度过高时,植株生长也将受到抑制,相关研究有待深入。

利用响应曲线研究降水变量与滇黄精分布区存在概率间的相互关系,与百合科其他植物^[31]相比,滇黄精对最干月份降水量的需求量较少。4 月和 11 月滇黄精适宜降水量最低值有所增加,推测这两个时期植株需水量较大。同属植物黄精的栽培研究表明,一年中植株对水分的需求主要集中于营养生长前期,5 月之后增加灌溉量对植株株高生长影响不显著^[32]。滇黄精的主要适生区滇中至川西一带地区干湿季分明,5-10 月为湿季,降水占了全年的 80%左右,11 月至次年 4 月为干季,降水稀少^[26],推测滇黄精分别在 4 月雨季之前和 11 月旱季之初对水分需求的增加是对产地气候条件长期适应的结果。

滇黄精高度适生区主要位于中亚热带,局部地

区(滇南)位于南亚热带,适生区气候特征冬季温暖,夏季凉爽,气候整体较湿润。Maxent 模型分析表明,产地太阳辐射、湿润程度与极端气温是限制滇黄精地理分布的重要因素。结合气候数据和 ArcGIS 空间分析,认为四川盆地和贵州中西部地区,太阳辐射值偏低,植物生长所需热量和光照条件不足;滇西北及相邻的横断山高海拔地区年平均温度和最冷月最低温度较低,均不利于滇黄精生长。云南高原中部、南部、东部和乌蒙山以东的贵州高原局部,具备适宜的水热条件,可用于规划滇黄精优质药材原料种植基地。

参考文献

- [1] Deletis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 15 [M]. Beijing: Science Press, 1978: 64-65.
中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第 15 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 64-65.
- [2] Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese Pharmacopoeia [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 306-307.
国家药典委员会. 中华人民共和国药典 [M]. 北京: 中国医药出版社, 2015: 306-307.
- [3] LIU W, LIN M Y, LIU J J, et al. Progress in study of *Polygonatum kingianum* and research status of *Polygonati rhizome* [J]. Chin J Exp Trad Med Formulae, 2017, 23(14): 226-234. doi: 10.13422/j.cnki.syfjx.2017140226.
柳威, 林懋怡, 刘晋杰, 等. 滇黄精研究进展及黄精研究现状 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(14): 226-234. doi: 10.13422/j.cnki.syfjx.2017140226.
- [4] LIU L, DONG Q, DONG X T, et al. Structural investigation of two neutral polysaccharides isolated from rhizome of *Polygonatum sibiricum* [J]. Carbohydr Polym, 2007, 70(3): 304-309. doi: 10.1016/j.carbpol.2007.04.012.
- [5] YU H S, MA B P, SONG X B, et al. Two new steroidal saponins from the processed *Polygonatum kingianum* [J]. Helv Chim Acta, 2010, 93(6): 1086-1092. doi: 10.1002/hlca.200900308.
- [6] ZHAO P, ZHAO C C, LI X, et al. The genus *Polygonatum*: A review of ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology [J]. J Ethnopharmacol, 2017, 214: 274-291. doi: 10.1016/j.jep.2017.12.006.
- [7] CHEN S L, SUN C Z, WEI J H, et al. Ecological Suitability Regionalization of Chinese Medicinal Materials [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-3.
陈士林, 孙成忠, 魏建和, 等. 中国药材产地生态适宜性区划 [M].

- 北京: 科学出版社, 2011: 1-3.
- [8] ZHU S D, ZHANG X B, HUANG L Q, et al. 20 Years of Chinese materia medica regionalization: From single herbal regionalization to regional regionalization [J]. *Mod Chin Med*, 2014, 16(2): 91-95,99. doi: 10.13313/j.issn.1673-4890.2014.02.001.
- 朱寿东, 张小波, 黄璐琦, 等. 中药材区划 20 年——从单品种区划到区域区划 [J]. *中国现代中药*, 2014, 16(2): 91-95,99. doi: 10.13313/j.issn.1673-4890.2014.02.001.
- [9] KRITICOS D J, SUTHERST R W, BROWN J R, et al. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp. *indica* in Australia [J]. *J Appl Ecol*, 2003, 40(1): 111-124. doi: 10.1046/j.1365-2664.2003.00777.x.
- [10] PETERSON A T, PAPES M, KLUZA D A. Predicting the potential invasive distributions of four alien plant species in North America [J]. *Weed Sci*, 2003, 51(6): 863-868. doi: 10.1614/P2002-081.
- [11] 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]. *Ecol Eng*, 2013, 51: 83-87. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.004.
- [12] QIAO H J, HU J H, HUANG J H. Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models [J]. *Sci Sin Vitae*, 2013, 43(11): 915-927. doi: 10.1360/052013-192.
- 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(11): 915-927. doi: 10.1360/052013-192.
- [13] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, DUD Ā M, et al. Opening the black box: An open-source release of Maxent [J]. *Ecography*, 2017, 40(7): 887-893. doi: 10.1111/ecog.03049.
- [14] FUKUDA S, DE BAETS B, WAEGEMAN W, et al. Habitat prediction and knowledge extraction for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) using a broad range of species distribution models [J]. *Environ Modell Softw*, 2013, 47: 1-6. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.04.005.
- [15] CUI X Y, WANG W J, YANG X Q, et al. Potential distribution of wild *Camellia oleifera* based on ecological niche modeling [J]. *Biodiv Sci*, 2016, 24(10): 1117-1128. doi: 10.17520/biods.2016164.
- 崔相艳, 王文娟, 杨小强, 等. 基于生态位模型预测野生油茶潜在分布 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1117-1128. doi: 10.17520/biods.2016164.
- [16] LU Z Q, CHEN P, BAI X T, et al. Initial diversification, glacial survival, and continuous range expansion of *Gentiana straminea* (Gentianaceae) in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2015, 62: 219-228. doi: 10.1016/j.bse.2015.09.005.
- [17] MATUSZAK S, FAVRE A, SCHNITZLER J, et al. Key innovations and climatic niche divergence as drivers of diversification in subtropical Gentianinae in southeastern and eastern Asia [J]. *Amer J Bot*, 2016, 103(5): 899-911. doi: 10.3732/ajb.1500352.
- [18] QIN A L, LIU B, GUO Q S, et al. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sichuanensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China [J]. *Global Ecol Conserv*, 2017, 10: 139-146. doi: 10.1016/j.gecco.2017.02.004.
- [19] WU L, WANG M, OUYANG H, et al. Spatial distribution modelling of *Kobresia pygmaea* (Cyperaceae) on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *J Resour Ecol*, 2017, 8(1): 20-29. doi: 10.5814/j.issn.1674-764x.2017.01.004.
- [20] YAN Y J, LI Y, WANG W J, et al. Range shifts in response to climate change of *Ophiocordyceps sinensis*, a fungus endemic to the Tibetan Plateau [J]. *Biol Conserv*, 2017, 206: 143-150. doi: 10.1016/j.biocon.2016.12.023.
- [21] CAO B, BAI C K, ZHANG L L, et al. Modeling habitat distribution of *Cornus officinalis* with Maxent modeling and fuzzy logics in China [J]. *J Plant Ecol*, 2016, 9(6): 742-751. doi: 10.1093/jpe/rtw009.
- [22] ZHU S D, PENG H S, GUO L P, et al. Regionalization of Chinese material medical quality based on maximum entropy model: A case study of *Atractylodes lancea* [J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 42417. doi: 10.1038/srep42417.
- [23] WEN J, LÜ X M, HONG D X, et al. Potential distribution of *Rhodiola crenulata* in Tibetan Plateau based on Maxent model [J]. *China J Chin Mat Med*, 2016, 41(21): 3931-3936. doi: 10.4268/cjcmm20162108.
- 文检, 吕秀梅, 洪道鑫, 等. 基于 Maxent 模型的青藏高原大花红景天生态适宜性分析 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(21): 3931-3936. doi: 10.4268/cjcmm20162108.
- [24] RANA S K, RANA H K, GHIMIRE S K, et al. Predicting the impact of climate change on the distribution of two threatened Himalayan medicinal plants of Liliaceae in Nepal [J]. *J Mount Sci*, 2017, 14(3): 558-570. doi: 10.1007/s11629-015-3822-1.
- [25] LI Y, ZHANG X W, FANG Y M. Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the Last Glacial Maximum [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40(11): 1164-1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.
- 李垚, 张兴旺, 方炎明. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1164-1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.
- [26] ZHENG D, YANG Q Y, WU S H, et al. Overview of Nature Geography in China [M]. Beijing: Science Press, 2015: 54-89.

- 郑度, 杨勤业, 吴绍洪, 等. 中国自然地理总论 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 54–89.
- [27] TIAN Q J, ZHAO Z, GU F G. The botany morphological characters of cultivated *Polygonatum* [J]. *J Mount Agric Biol*, 2008, 27(1): 72–75. doi: 10.3969/j.issn.1008–0457.2008.01.015.
- 田启建, 赵致, 谷甫刚. 栽培黄精的植物学形态特征 [J]. *山地农业生物学报*, 2008, 27(1): 72–75. doi: 10.3969/j.issn.1008–0457.2008.01.015.
- [28] BRADIE J, LEUNG B. A quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models [J]. *J Biogeogr*, 2017, 44(6): 1344–1361. doi: 10.1111/jbi.12894.
- [29] CHE L, CAO B, BAI C K, et al. Predictive distribution and habitat suitability assessment of *Notholirion bulbiferum* based on MaxEnt and ArcGIS [J]. *Chin J Ecol*, 2014, 33(6): 1623–1628. doi: 10.13292/j.1000–4890.20140327.001.
- 车乐, 曹博, 白成科, 等. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 对太白米的潜在分布预测及适宜性评价 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1623–1628. doi: 10.13292/j.1000–4890.20140327.001.
- [30] WANG J J, CAO B, BAI C K, et al. Potential distribution prediction and suitability evaluation of *Fritillaria cirrhosa* D. Don based on Maxent modeling and GIS [J]. *Bull Bot Res*, 2014, 34(5): 642–649. doi: 10.7525/j.issn.1673–5102.2014.05.009.
- 王娟娟, 曹博, 白成科, 等. 基于 Maxent 和 ArcGIS 预测川贝母潜在分布及适宜性评价 [J]. *植物研究*, 2014, 34(5): 642–649. doi: 10.7525/j.issn.1673–5102.2014.05.009.
- [31] SOURABH P, THAKUR J, UNIYAL P L, et al. Biology of *Lilium polyphyllum*: A threatened medicinal plant [J]. *Med Plants*, 2015, 7(2): 158–166. doi: 10.5958/0975-6892.2015.
- [32] ZHANG L G, YANG B, LI L, et al. Effects of different light and soil moisture on plant height of domestication cultivated *Polygonatum* [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2014(1): 108–109. doi: 10.3969/j.issn.1007–5739.2014.01.067.
- 张蕾光, 杨波, 李莉, 等. 不同光照和水分处理对驯化栽培黄精株高的影响 [J]. *现代农业科技*, 2014(1): 108–109. doi: 10.3969/j.issn.1007–5739.2014.01.067.