



## 海南热带雨林特有兰科植物华石斛潜在适宜生境预测

宁瑶, 昌秋霞, 张哲, 赵莹

### 引用本文:

宁瑶, 昌秋霞, 张哲, 赵莹. 海南热带雨林特有兰科植物华石斛潜在适宜生境预测[J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(6): 779–788.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4649>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 未来气候变化对广布种麻栎地理分布的影响和主导气候因子分析

Effect of Climate Change in Future on Geographical Distribution of Widespread *Quercus acutissima* and Analysis of Dominant Climatic Factors

*热带亚热带植物学报*. 2018, 26(6): 661–668 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3898>

#### 全球气候变化下贵州省青冈林的潜在生境动态

Dynamics of Potential Distribution of *Cyclobalanopsis* Forest in Guizhou Province of China under Global Climate Change

*热带亚热带植物学报*. 2020, 28(2): 145–152 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4158>

#### 中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征

Potential Distribution and Ecological Characteristic of Chinese Endemic Species *Cerasus xueluoensis*

*热带亚热带植物学报*. 2020, 28(2): 136–144 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4102>

#### 滇黄精的潜在分布与气候适宜性分析

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

*热带亚热带植物学报*. 2018, 26(5): 439–448 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3874>

#### 基于Maxent模型的假臭草潜在分布区预测

Prediction of Potential Distribution Area of *Praxelis clematidea* Based on Maxent Model

*热带亚热带植物学报*. 2019, 27(3): 250–260 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3977>

向下翻页, 浏览PDF全文

# 海南热带雨林特有兰科植物华石斛潜在适宜生境预测

宁瑶<sup>1,2</sup>, 昌秋霞<sup>1</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 赵莹<sup>1\*</sup>

(1. 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室, 海南省热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南大学林学院, 海口 570228; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006)

**摘要:** 为探明华石斛(*Dendrobium sinense*)潜在适宜分布范围, 运用地理信息系统 GIS 技术和 MaxEnt 模型, 基于 25 个野外调查的分布数据, 以气候变量和地形变量为环境预测因子, 对华石斛当前及未来时期的适宜生境进行预测。结果表明, 华石斛在海南岛内的潜在适宜生境面积约为 403.4 km<sup>2</sup>, 占海南岛总面积的 1.1%, 主要分布于海南热带雨林国家公园霸王岭分局、鹦哥岭分局、尖峰岭分局、吊罗山分局以及五指山分局管辖区域, 零星分布于黎母山分局管辖区、五指山市南部、琼中县、万宁市、保亭县和三亚市等地。华石斛适宜分布区域极其狭窄, 适宜生境斑块化, 呈现较为严重的破碎化。海拔、降水量季节性变异系数、最湿季降水量及最暖月最高温是影响华石斛种群分布格局的主要环境因子, 华石斛的最适宜生境条件为海拔 1 070~1 600 m, 降水量季节性变异系数 0.80~0.88, 最湿季降水量 1 700~2 266 mm, 最暖月最高温 18 °C~25 °C。相比于当前, 2050 年在 RCP4.5、RCP8.5 气候情景下, 华石斛的潜在适宜生境分别减少 19.1%和 19.5%, 2070 年减少 19.7%和 19.8%。预测模型的 3 个评估指标(AUC=0.997±0.003, Kappa 系数=0.990±0.03, TSS=0.990±0.03)表明该模型具有较好的预测能力。目前华石斛种群主要分布于海南热带雨林国家公园内, 需加强就地保护, 同时兼顾对其附生宿主树的保护; 猕猴岭东北部及南部、鹦哥岭南部存在大片非常适宜和高度适宜生境, 可作为华石斛未知种群调查的重点区域。

**关键词:** 最大熵模型; 适生区预测; 特有种; 华石斛; 附生植物

doi: 10.11926/jtsb.4649

## Prediction of Potential Suitable Habitat of *Dendrobium sinense*, an Endemic Orchid Species in Hainan Tropical Rainforest

NING Yao<sup>1,2</sup>, CHANG Qiuxia<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plant, Ministry of Education, Key Laboratory of Germplasm Resources Biology of Tropical Special Ornamental Plants of Hainan, Forestry College of Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China)

**Abstract:** To explore the potential suitable distribution range of *Dendrobium sinense*, its current and future suitable habitat based on the distribution data of 25 field surveys, with climate variables and topographic variables as environmental predictors were predicted by using GIS technology and MaxEnt model. The results showed that the potential suitable habitat area of *D. sinense* in Hainan Island was approximately 403.4 km<sup>2</sup>, accounting for 1.1% of the total area of Hainan Island. It was mainly distributed in the jurisdiction of Bawangling Branch, Yinggeling Branch, Jianfengling Branch, Diaoluoshan Branch and Wuzhishan Branch of Hainan Tropical

收稿日期: 2022-04-02 接受日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160400); 海南省自然科学基金青年基金项目(322QN229)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 32160400), and the Project for Youth of Natural Sciences in Hainan (Grant No. 322QN229).

作者简介: 宁瑶(1992年生), 女, 硕士, 主要从事植物与传粉者互作研究。E-mail: ningyao2014@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoying3732@163.com

Rainforest National Park, with scattered distribution in the jurisdiction of Limushan Branch, the southern part of Wuzhishan City, Qiongzong County, Wanning City, Baoting County, and Sanya City. The suitable distribution area of *D. sinense* was extremely narrow, and the suitable habitat was patchy, showing more serious fragmentation. Altitude, coefficient of variation of precipitation seasonality, precipitation in the wettest quarter and maximum temperature in the warmest month were the main environment factors affecting the population distribution pattern of *D. sinense*. The most suitable habitat for *D. sinense* was at an altitude of 1 070–1 600 m, with the coefficient of variation of precipitation seasonality of 0.80–0.88, precipitation in the wettest quarter of 1 700–2 266 mm, and the maximum temperature of 18 °C–25 °C in the warmest month. Compared with the current, the potential suitable habitat under RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios of *D. sinense* decreased by 19.1% and 19.5% in 2050, and 19.7% and 19.8% in 2070, respectively. From three evaluation indexes (AUC=0.997±0.003, Kappa coefficient=0.990±0.03, TSS=0.990±0.03), the prediction model had good prediction ability. At present, *Dendrobium sinense* populations are mainly distributed in Hainan Tropical Rainforest National Park, so it is necessary to strengthen *in situ* conservation and epiphytic host tree protection. There are large areas of highly suitable habitat in the northeast and south of Mihouling, as well as south of Yinggeling, making them as focus region for investigating unknown *D. sinense* populations.

**Key words:** MaxEnt; Suitable habitat prediction; Endemic species; *Dendrobium sinense*; Epiphytes

自 18 世纪工业革命以来, 社会经济快速发展、人类无节制地开发自然资源等, 大气中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等温室气体含量迅速增长, 全球气候呈现变暖趋势。全球气候变暖是 21 世纪生物多样性保护的巨大挑战之一<sup>[1]</sup>。气候变暖可能带来物种的分布格局<sup>[2]</sup>和物候期<sup>[3]</sup>改变、物种丰富度减少<sup>[4]</sup>、增加外来植物入侵风险<sup>[5]</sup>、物种灭绝或加速灭绝<sup>[6]</sup>等不利影响。研究在气候变化背景下的物种潜在地理分布对揭示物种分布格局的形成、迁移以及制定生物多样性保护策略具有非常重要的意义<sup>[7]</sup>。

物种分布模型(species distribution models, SDMs) 是利用某一特定物种的地理分布数据、气候数据及地形数据等相关数据, 通过回归、分类、机器学习等多种算法对物种的生态位进行度量<sup>[8–11]</sup>, 再将模型投影至当前或未来的环境情景中, 以分布概率的形式反映特定生境对于该物种的适宜程度, 可以解读为物种出现的概率或生境对物种的适宜度<sup>[6]</sup>。SDMs 在保护生物多样性<sup>[12–14]</sup>、入侵生物预警机制构建<sup>[15]</sup>、探究环境变化对生物的影响<sup>[16–17]</sup>等方面具有重要的应用价值。在众多模型中, 最大熵(MaxEnt)模型具有操作简易, 样本量对模拟结果影响小, 且在大多数情况下模拟精度高于其他模型的特点, 成为物种分布预测研究中应用最广泛的模型之一<sup>[18–19]</sup>。MaxEnt 模型已成功应用于珍稀濒危物种, 如岛杨梅(*Canacomyrica monticola*)<sup>[17]</sup>、双色万代兰(*Vanda bicolor*)<sup>[20]</sup>、青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)<sup>[21]</sup>、蒙古扁

桃(*Amygdalus mongolica*)<sup>[22]</sup>等生境分布预测研究中, 并取得较好效果。当研究物种的分布点数据很少(<10)时, MaxEnt 仍然能够产生较高精度的结果<sup>[18,20]</sup>。目前, 虽然物种分布模型已广泛用于动植物的潜在生境预测和分布格局变化研究中, 但大多集中于广布种或分布点数据较多的物种, 而对于具有明显狭域性和地域性的特有种, 尤其是单一生境或分布点较少的特有种鲜有报道<sup>[23]</sup>。因此, 开展对于狭域种、特有种的适生区预测及影响其分布格局的主要环境因子的研究, 不仅有利于探明物种适应单一生境的机制, 而且对于物种分布模型的发展具有推动作用。

华石斛(*Dendrobium sinense*)隶属兰科(Orchidaceae)石斛属, 是多年生草本花卉, 热带雨林特有兰科植物, 目前发现其仅分布于海南岛热带雨林国家公园内海拔 1 000 m 以上的山地常绿林或高山矮林的乔灌木树干或树梢上<sup>[24–25]</sup>, 分布范围极其狭窄。华石斛具有较高的药用价值和观赏价值, 是海南重要的传统黎药, 此外它还是优良的培育长花品种的育种材料, 常作盆栽观赏<sup>[24,26]</sup>。作为典型的附生植物, 华石斛通常附生在离地面 2.5–10.0 m 的树干或一级树杈上, 生长所需水分及矿物质主要来源于空气中, 表明华石斛对于气候与环境具有较高的依赖性<sup>[24]</sup>。此外, 持续高温会抑制华石斛正常的生理代谢, 导致叶片萎蔫、失绿、掉落等, 推测其对持续高温或极端高温抵御能力差<sup>[26]</sup>。目前华石斛的研究主要集中在组织培养<sup>[27]</sup>、菌根生物学<sup>[28–29]</sup>、

种群动态<sup>[30-31]</sup>、遗传多样性<sup>[32]</sup>、种子活力<sup>[33]</sup>、化学成分<sup>[34]</sup>、高温胁迫<sup>[26]</sup>等方面, 而华石斛种群响应气候变化的研究鲜见报道<sup>[35]</sup>。明确华石斛的潜在适宜生境分布, 以及限制其分布的主导环境因子成为华石斛保育工作和资源可持续利用的关键。为此, 本研究利用野外实地调查分布数据, 选取气候数据及地形数据作为预测因子, 基于 MaxEnt 模型和 GIS 技术, 估测当前、2050 和 2070 年 3 个时期气候情景下华石斛在海南岛的潜在分布范围, 探究华石斛对气候变化的响应, 同时探讨影响该物种分布格局的主要环境因素, 旨在为华石斛种质资源的保护与合理利用、人工引种栽培及重引入工作提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 数据来源与预处理

**分布数据来源** 华石斛的 25 个分布点数据全部来自海南岛(18°10'~20°10' N, 108°37'~111°03' E)野外实地调查, 利用 GPS (global positioning system) 全球定位系统获取经纬度, 主要分布于海南热带雨林国家公园霸王岭、尖峰岭、鹦哥岭、五指山、吊罗山、黎母山及佳西分局内(图 1)。将所有分布点的经度、纬度、海拔、编号及地名输入 Excel 表格并保存为“.CSV”格式, 以便 MaxEnt 模型读取数据。

**环境数据来源** 参与模型模拟的环境变量包括地形因子和气候因子, 地形数据来源于中国科学院的地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

地形因子包含海拔、坡度和坡向 3 个变量, 空间分辨率为 90 m 的 DEM 数据。因获取的 DEM 数据是分幅的, 通过 Arcgis 数据管理工具中的“融合”工具(Mosaic To New Raster)拼接为一整幅栅格图层。其次, 通过 Arcgis 空间分析模块工具可将海南岛行政区划矢量图做掩膜, 裁剪得到海南岛海拔、坡度、坡向 3 个栅格图层。气候数据来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>), 版本为 2.0, 分辨率为 30" (约 1 km)。气候数据包中包含了 19 个生物气候变量, 如环境变量间出现多重共线性的情况, 会引起模型的过度拟合, 最终导致模型无法正常运行或预测结果不准确。因此, 需对所有气候变量进行 Pearson 相关性分析, 对于相关性较高( $|r|>0.8$ )的变量, 仅保留 1 个, 结果得到 bio2、bio3、bio5、bio7、bio12、bio15、bio16 及海拔、坡度、坡向参与模型模拟(表 1)。最后, 对所有环境图层进行标准化设置, 即统一坐标系为 WGS-84, 统一研究区域边界, 统一分辨率为 100 m。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 模型构建

预测物种潜在适宜生境, 需要针对不同的建模目标和物种的数据特征如物种分布样本量、空间分布特征进行选取预测性能较优的物种分布模型<sup>[36-37]</sup>。前人将 MaxEnt 模型成功应用于岛杨梅<sup>[17]</sup>、双色万代兰<sup>[20]</sup>、青钱柳<sup>[21]</sup>、蒙古扁桃<sup>[22]</sup>等珍稀濒危植物及海南凤仙花(*Impatiens hainanensis*)<sup>[23]</sup>等狭域植物的研究中, 并取得较好效果, 表明该模型输出结果稳

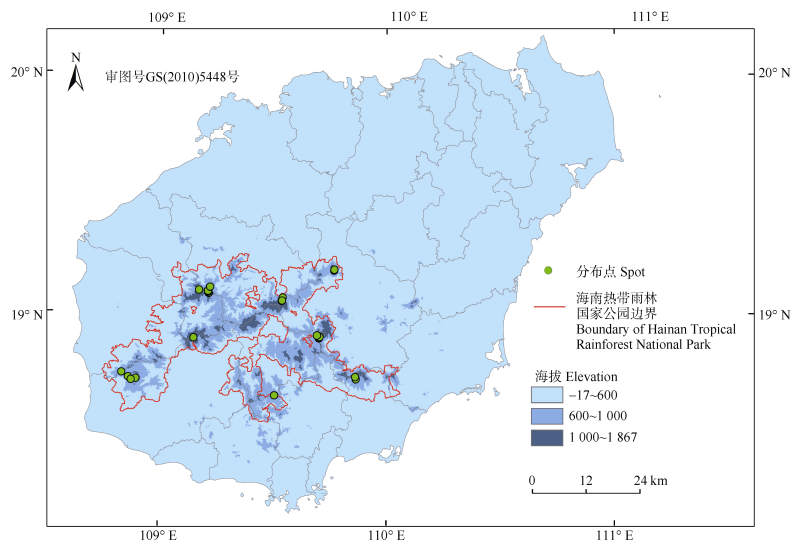


图 1 华石斛野外分布

Fig. 1 Distribution of *Dendrobium sinense*

表 1 用于模拟物种潜在适宜生境分布的 10 个环境变量

Table 1 Ten Environmental variables used for modeling species potential suitable habitat distribution

环境变量 Environment variable	编码 Code
昼夜温差月平均值 Mean diurnal range	bio2
等温性 Isothermality	bio3
最暖月最高温 Max temperature in the warmest month	bio5
温度年较差 Temperature annual range	bio7
年均降水量 Annual precipitation	bio12
降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	bio15
最湿季降水量 Precipitation in the wettest quarter	bio16
海拔 Elevation	ele
坡度 Slope	slo
坡向 Aspect	asp

定且可信度较高,因此,本研究选择 MaxEnt 模型用于华石斛的潜在适宜生境预测。

将华石斛的分布点数据和环境变量数据导入软件 MaxEnt 3.3.3k 中,选中“创建反应曲线”和“刀切法检验”,选择交叉验证法,随机抽取 60% 的样点作为训练数据用于建模,40% 的样点作为检验数据用于验证,模拟过程重复 10 次,其他参数选择默认设定,最终得到 10 套华石斛适宜生境预测模拟数据。模型将会生成 0~1 的估测值,0 表示物种出现的最低概率,即完全不适宜物种生长,1 代表物种出现的最高概率,即非常适宜物种生长。最后,在 Arcgis 10.2 平台中进行模型输出结果的可视化绘图与处理分析。

### 1.2.2 适宜生境重分类

将模型模拟结果导入 Arcgis 10.2 中转为栅格数据图层,再运用空间分析模块的“重分类工具”,采取自然间断点分级方法,将生境之于物种的适宜程度划分为 5 个等级:非常不适宜、低度适宜、中度适宜、高度适宜和非常适宜。在预测结果中剔除不可能适宜物种生存的土地类型区域,如农田、水域、城镇及农村居住区等。

所生成的适宜生境分布图坐标系为 WGS 1984,无法对各适宜区范围进行面积计算,可利用 Arcgis 中的数据管理工具的“投影变换”功能,打开适宜生境分布栅格图层的属性表,添加“面积”字段,利用“字段计算器”,一个栅格单元的面积大小与各等级生境所占栅格数量的乘积即为各适宜等级的生境总面积。

### 1.2.3 模型精度评估

受试者工作特征曲线下面积(area under the

receiver operating characteristic curve, AUC)、Kappa 系数、真实技巧统计值(true skill statistic, TSS)及总体精度是 4 种常用于评估物种分布模型精度的检验指标<sup>[38]</sup>。AUC 是概率值,其值域为 0~1,通常  $AUC < 0.7$ ,模型预测效果很差; $0.7 < AUC < 0.8$ ,模型一般; $0.8 < AUC < 0.9$ ,模型较准确; $0.9 < AUC < 1$ ,模型准确度较高。KAPPA 系数是广泛应用于统计学模型的检验指标,主要用于一致性检验和衡量分类精度,取值-1~1,可解释为模型预测结果和实际分类结果的一致程度。TSS 是由 KAPPA 系数改良而来的,其值域与 KAPPA 系数相同,TSS 值越接近 1,模型精度越高,一般情况下,TSS>0.8 时,模型结果较为理想;TSS<0.4 时,模型结果较差。本研究选取这 3 个指标用于评估模型的精度。

## 2 结果和分析

### 2.1 当前潜在适宜生境预测

MaxEnt 模型基于 25 个实际分布点对华石斛进行了预测模拟,运用刀切法检验,3 个评估模型精度的指标分别为:AUC=0.997±0.003, Kappa=0.990±0.03, TSS=0.990±0.03,表明模型具有较高精度,预测结果的准确度较高。

从图 2 可见,华石斛在海南岛的总适宜生境面积为 403.4 km<sup>2</sup>,占海南岛总面积的 1.1%,其中非常适宜的生境面积为 50.9 km<sup>2</sup>,高度适宜为 46.5 km<sup>2</sup>,中度适宜为 75.9 km<sup>2</sup>,低度适宜为 230.1 km<sup>2</sup>和非常不适宜为 34 996.6 km<sup>2</sup>。华石斛的适宜生境呈现严重的生境斑块化,各斑块间地理隔离严重。华石斛的潜在适生区主要包括:横跨海南热带雨林国家公园霸王岭分局、鹦哥岭分局、尖峰岭分局、吊罗山分局以及五指山分局管辖区域。此外,黎母山分局管辖区、五指山市南部、琼中县、万宁市、保亭县和三亚市等地有零星分布。其中猕猴岭东北部及位于猕猴岭南部的毫肉岭、豪雷岭和鹦哥岭南部的蛙岭、白石岭及石板岭存在大片未被实地调查的非常适宜和高度适宜生境。

### 2.2 未来气候情景下华石斛分布变化分析

相比当前,未来 2050 和 2070 年在 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下,华石斛的潜在适宜生境明显减少(表 2,图 3),适宜生境分布区块呈现破碎化,连续性不高,分布格局呈现向分布区块中心缩减的趋势。非常适宜和高度适宜生境全都分布在海南热带

雨林国家公园边界内, 中度适宜生境和低度适宜生境除少部分零星散落外, 也几乎都分布在海南热带雨林国家公园边界内。这说明目前华石斛的适宜生境在保护区内能够得到有效保护, 应当重视已发现

种群及其潜在适宜生境的就地保护。从时间上来看, 从当前到 2050 年再到 2070 年, 当前华石斛的适宜生境面积最大, 2070 年适宜生境相比 2050 年基本保持不变。

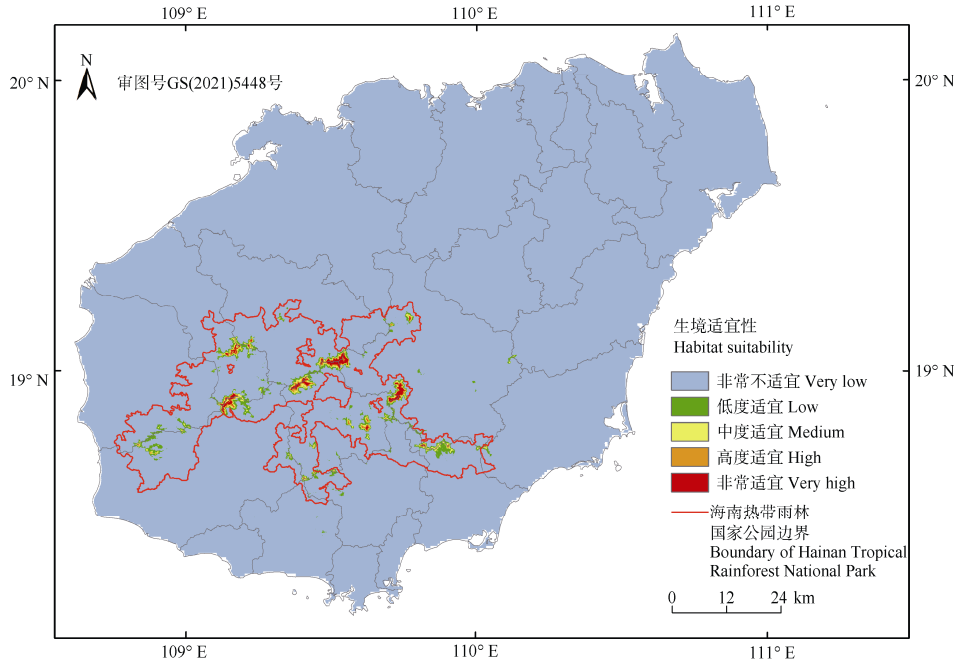


图 2 华石斛在海南岛的潜在适宜生境分布图

Fig. 2 Potential suitable habitat of *Dendrobium sinense* in Hainan Island

表 2 华石斛潜在适宜生境面积(km<sup>2</sup>)的变化

Table 2 Changes in potential suitable habitat area (km<sup>2</sup>) of *Dendrobium sinense*

气候情景 Climate scenario	非常适宜 Very suitable	高度适宜 High suitable	中度适宜 Moderate suitable	低度适宜 Low suitable	总计 Total	%
当前 Current	50.9	46.5	75.9	230.1	403.4	-
2050-RCP4.5	30.6	48.3	75.4	171.9	326.2	-19.1
2070-RCP4.5	30.9	48.4	75.3	169.2	323.8	-19.7
2050-RCP8.5	32.1	48.1	74.9	169.8	324.9	-19.5
2070-RCP8.5	30.3	48.5	75.4	169.5	323.7	-19.8

### 2.3 环境因子的影响

从华石斛模型预测的环境因子贡献率(表 3, 图 4)来看, 海拔(48.0%)、降水量季节性变异系数(39.7%)、最湿季降水量(8.3%)、最暖月最高温(1.2%)的贡献率最大, 累积贡献率达 97.2%, 因此影响华石斛分布的主要环境变量是海拔、降水量季节性变异系数、最湿季降水量和最暖月最高温 4 个环境因子。为了阐述华石斛当前潜在适宜生境分布区的环境因子特征, 确定其适宜范围, 本研究选择这 4 个主导环境因子, 根据模型输出结果中的单因子响应曲线, 确定存在概率>0.3 的范围为该环境因子对华石

斛的相应适宜区间, 得到适宜海拔为 1 070~1 600 m, 降水量季节性变异系数为 0.8~0.88, 最湿季降水量为 1 700~2 266 mm, 最暖月最高温为 18 °C~25 °C。因此, 华石斛适宜生长在季节性降水变化大、较为凉爽、暖季气温不高且海拔在 1 000 m 以上的高山湿润环境。

## 3 结论和讨论

### 3.1 华石斛的适宜生境分布

华石斛的适宜生境分布在海南 10 个市县, 其



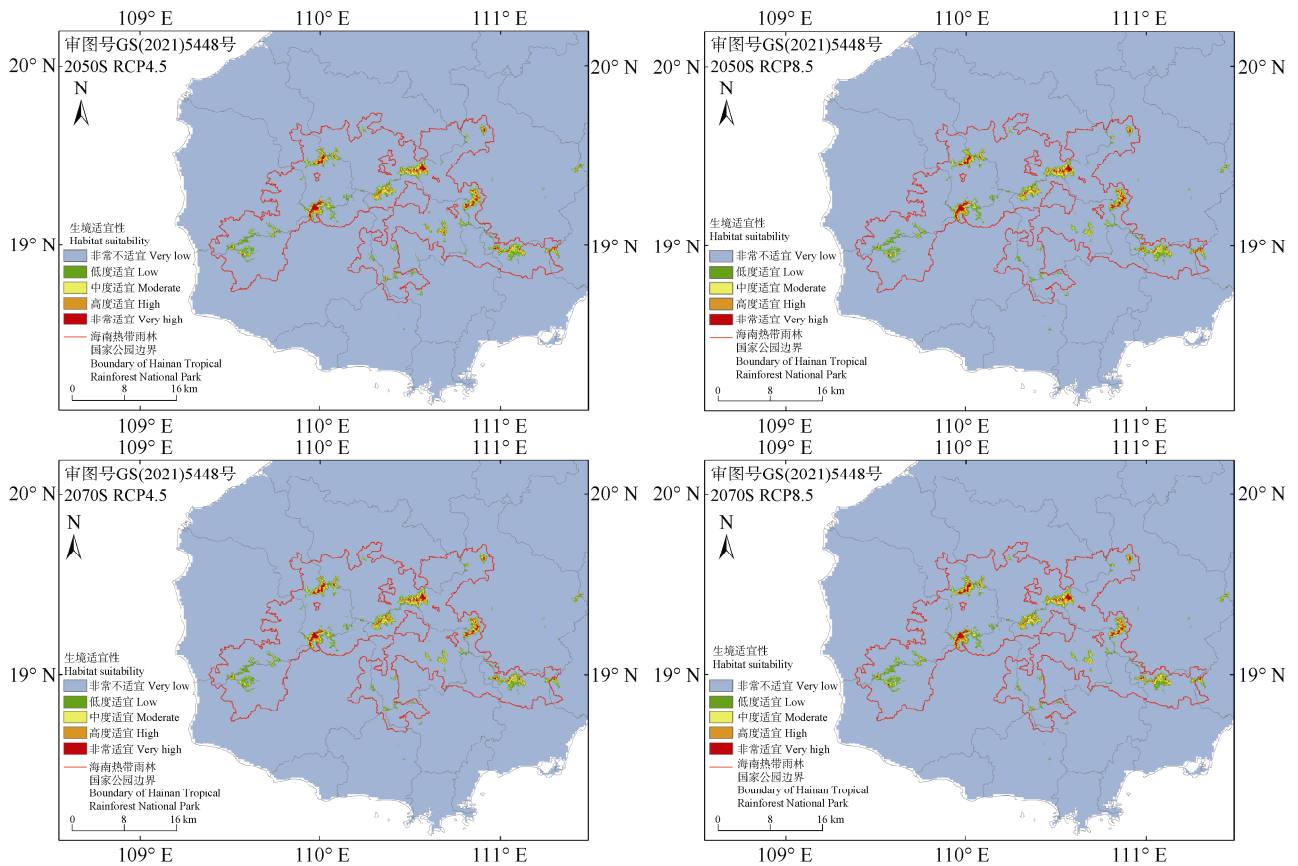


图 3 华石斛 2050s 和 2070s 在 2 种气候情景(RCP4.5 和 RCP8.5)下的适宜生境分布图

Fig. 3 Suitable habitat distribution of *Dendrobium sinense* under two climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) in 2050s and 2070s

表 3 MaxEnt 模型预测的华石斛环境变量贡献率

Table 3 Contribution rate of environment variables for *Dendrobium sinense* by MaxEnt

编码 Code	变量 Variable	贡献率 / % Contribution rate
ele	海拔 Elevation	48.0
bio15	降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	39.7
bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	8.3
bio5	最暖月最高温 Max. temperature of the warmest month	1.2
bio3	等温性 Isothermality	0.9
bio7	温度年较差 Temperature annual range	0.8
bio12	年均降水量 Annual precipitation	0.7
slo	坡度 Slope	0.2
bio2	昼夜温差气温月均值 Mean diurnal range	0.1
asp	坡向 Aspect	0.1

当前的潜在适宜生境主要位于海南热带雨林国家公园霸王岭、鹦哥岭、尖峰岭、吊罗山、五指山、黎母山等分局范围内，五指山市南部、琼中县、万宁市、保亭县和三亚市等非海南热带雨林国家公园区域也有零星分布，预测结果与杨琦<sup>[39]</sup>的研究结果基本一致。华石斛的潜在适宜分布区范围极其狭窄，并呈现破碎化状态，存在严重的地理隔离。未

来 2050 年和 2070 年在 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下，相比当前，华石斛的潜在适宜生境明显减少。造成华石斛野外种群减少及其适宜生境破碎的可能原因有 3 个：一是人为因素，华石斛是海南传统黎药，能起到抗菌、抗肿瘤活性的作用<sup>[24]</sup>，同时具有较高的观赏价值，因此遭到大肆采摘，导致野生种群越来越少，此外，进入工业时代后，矿山开采、

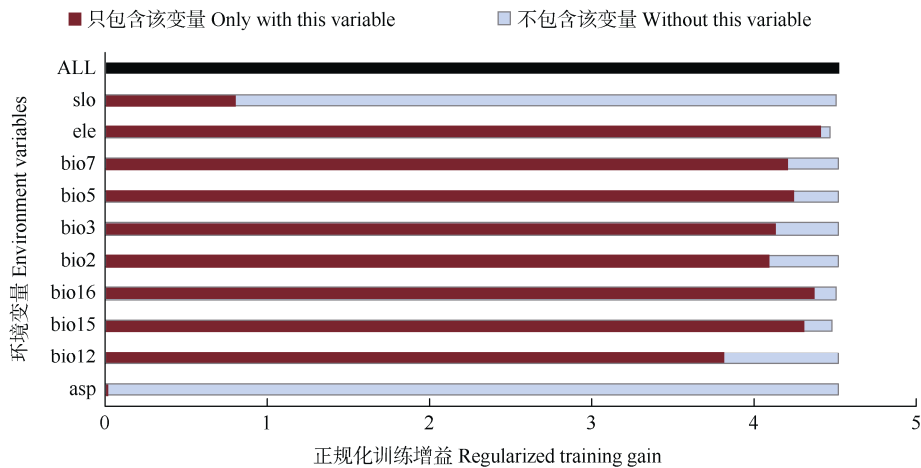


图 4 华石斛的预测变量相对重要性的刀切法检验。ALL: 包含所有变量; slo、ele、bio7、bio5、bio3、bio2、bio16、bio15、bio12、asp 见表 1。

Fig. 4 Results of jackknife evaluations of relative importance of predictor variables for *Dendrobium sinense* Maxent model. ALL: With all variables; slo, ele, bio7, bio5, bio3, bio2, bio16, bio15, bio12 and asp see Table 1.

经济林的生产活动也严重破坏了华石斛的适宜生境<sup>[39]</sup>; 二是环境因素, 华石斛所需生境条件较为苛刻, 对高温极为敏感, 对其附生树种也较为挑剔<sup>[26]</sup>, 预测其在海南岛的适宜生境面积大致为 403.4 km<sup>2</sup>, 仅占海南岛总面积的 1.1%, 其适宜生境面积狭窄, 各适宜分布区间存在严重的地理隔离, 使得华石斛的繁衍与扩散存在一定的困难; 三是自身因素, 华石斛受传粉者的影响, 结实率较低<sup>[30]</sup>, 幼苗在自然环境下萌发率不高, 繁殖能力弱, 生长缓慢<sup>[40]</sup>。

华石斛仅分布在海南岛中部和西部海拔 1 000 m 以上的高山上, 是兰科石斛属的典型附生植物, 对周围环境的变化有着较为敏感的反应<sup>[41]</sup>。若将华石斛引种栽培到低海拔高温地区, 持续高温会引起生长严重不适应, 植株易出现叶片枯萎、凋落、褐化甚至死亡的现象。此外, 华石斛在 30 °C 以上的持续高温下幼苗和植株的生理发生改变甚至死亡<sup>[26]</sup>。本研究结果也表明影响华石斛分布的 4 个主导环境因子是海拔、降水量季节性变异系数、最湿季降水量和最暖月最高温。这表明华石斛已经适应了高海拔地区的冷凉湿润生境, 而对高温环境较为敏感, 这也可能是华石斛未分布于低海拔地区或其他温度较高地区的主要原因。

### 3.2 华石斛的保护建议

华石斛目前已发现的种群主要分布于海南热带雨林国家公园内, 因此对华石斛的保护主要加强就地保护, 同时兼顾其附生宿主树的保护。华石斛具有珍贵的药用价值, 因此遭到人为挖采, 建议有关部门加强普及华石斛的相关保护知识, 提高民众

保护意识, 并维护种群的生境稳定。此外, 华石斛引种栽培时, 环境因子的控制可以参考主导环境因子适宜范围, 开展华石斛菌根一体化成苗技术体系<sup>[42]</sup>, 制定合理的重引入计划, 扩大种群数量。在我们预测的适宜分布区内, 都发现了华石斛新增种群分布点, 在各个保护区内存在的非常适宜、高度适宜和中度适宜生境区, 尤其是猕猴岭东北部及位于猕猴岭南部的毫肉岭、豪雷岭, 和鹦哥岭南部的蛙岭、白石岭及石板岭存在大片非常适宜和高度适宜生境, 这些区域至今还未有人去深入调查过, 可以作为今后进行野外调查以及华石斛再引入工作的重点目标, 不仅有利于指导开展野外调研工作, 同时也可以为海南热带雨林国家公园各分局管理工作提供一些科学的指导。

### 3.3 模型因子选择

本研究选取了来自世界气候数据库 19 个生物气候变量, 同时还将地形变量纳入模型中, 丰富了预测模型的模拟变量, 增加了预测结果的可靠性。有研究表明, 宿主树组成可能会对附生植物组合有显著影响<sup>[43-45]</sup>, 而华石斛对宿主树选择存在广泛的多样性, 其宿主树种类多达 25 科 46 属 71 种, 无宿主专一性<sup>[24]</sup>。研究宿主专一性附生植物的潜在适宜生境分布格局不仅需要了解区域气候, 还需要考虑其宿主树的分布以及附生植物所处空间内生物的相互作用。本研究选取的环境变量考虑了温度、水分等气候因子及地形因子, 而对于微生境、生物竞争、人为因素等其他因素未进行探讨, 对于结果的准确性存在一定影响。如何将人为因素、生物因素



量化成预测变量纳入到物种分布模型中参与建模可能是未来的研究热点之一。

**致谢** 感谢海南热带雨林国家公园护林员王进强在野外调查过程中的协助, 郑希龙与我们共享华石斛的分布数据, 海南大学林学院邱梓轩老师、郝馨老师对本论文提出的修改建议。

## 参考文献

- [1] CECCARELLI S, GRANDO S. Evolutionary plant breeding as a response to the complexity of climate change [J]. *iScience*, 2020, 23(12): 101815. doi: 10.1016/j.isci.2020.101815.
- [2] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. *Ecol Lett*, 2012, 15(4): 365–377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x.
- [3] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, et al. Ecological responses to recent climate change [J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389–395. doi: 10.1038/416389a.
- [4] NIEDER J, LA MESA G, VACCHI M. Blenniidae along the Italian coasts of the Ligurian and the Tyrrhenian Sea: Community structure and new records of *Scartella cristata* for northern Italy [J]. *Cybio Int J Ichthyol*, 2000, 24(4): 359–369.
- [5] WALTHER G R. Climatic forcing on the dispersal of exotic species [J]. *Phytocoenologia*, 2000, 30(3/4): 409–430. doi: 10.1127/phyto/30/2000/409.
- [6] ERASMUS B F N, VAN JAARSVELD A S, CHOWN S L, et al. Vulnerability of South African animal taxa to climate change [J]. *Glob Change Biol*, 2002, 8(7): 679–693. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00502.x.
- [7] LI G Q, LIU C C, LIU Y G, et al. Advances in theoretical issues of species distribution models [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(16): 4827–4835. [李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827–4835. doi: 10.5846/stxb201212031735.]
- [8] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Modell*, 2006, 190(3/4): 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [9] O'HANLEY J R. NeuralEnsembles: A neural network based ensemble forecasting program for habitat and bioclimatic suitability analysis [J]. *Ecography*, 2009, 32(1): 89–93. doi: 10.1111/j.1600-0587.2008.05601.x.
- [10] TABOR K, WILLIAMS J W. Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change [J]. *Ecol Appl*, 2010, 20(2): 554–565. doi: 10.1890/09-0173.1.
- [11] FALK W, MELLERT K H. Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: Risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria [J]. *J Veget Sci*, 2011, 22(4): 621–634. doi: 10.1111/j.1654-1103.2011.01294.x.
- [12] BERTRAND R, PEREZ V, GÉGOUT J C. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: The case of *Quercus pubescens* in France [J]. *Glob Change Biol*, 2012, 18(8): 2648–2660. doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02679.x.
- [13] CRIMMINS S M, DOBROWSKI S Z, MYNSBERGE A R, et al. Can fire atlas data improve species distribution model projections? [J]. *Ecol Appl*, 2016, 24(5): 1057–1069. doi: 10.1890/13-0924.1.
- [14] ZENG Q, ZHANG Y M, SUN G Q, et al. Using species distribution model to estimate the wintering population size of the endangered scaly-sided merganser in China [J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0117307. doi: 10.1371/journal.pone.0117307.
- [15] AUSTIN M P, VAN NIEL K P. Improving species distribution models for climate change studies: Variable selection and scale [J]. *J Biogeogr*, 2011, 38(1): 1–8. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02416.x.
- [16] HAO Q, DE LAFONTAINE G, GUO D S, et al. The critical role of local refugia in postglacial colonization of Chinese pine: Joint inferences from DNA analyses, pollen records, and species distribution modeling [J]. *Ecography*, 2018, 41(4): 592–606. doi: 10.1111/ecog.03096.
- [17] KUMAR S, STOHLGREN T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia [J]. *J Ecol Nat Environ*, 2009, 1: 94–98.
- [18] HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. *Ecography*, 2006, 29(5): 773–785. doi: 10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x.
- [19] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter [J]. *Ecography*, 2013, 36(15): 1058–1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.
- [20] DEB C R, JAMIR N S, KIKON Z P. Distribution prediction model of a rare orchid species (*Vanda bicolor* Griff.) using small sample size [J]. *Am J Plant Sci*, 2017, 8(6): 1388–1398. doi: 10.4236/ajps.2017.86094.
- [21] LIU Q L, LI Y, FANG S Z. MaxEnt model-based identification of potential *Cyclocarya paliurus* cultivation regions [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2017, 41(4): 25–29. [刘清亮, 李珏, 方升佐. 基于 MaxEnt 模型的青钱柳潜在适宜栽培区预测 [J]. *南京林业大学学报*

- (自然科学版), 2017, 41(4): 25–29. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.201608010.]
- [22] MA S M, NIE Y B, GENG Q L, et al. Impact of climate change on suitable distribution range and spatial pattern in *Amygdalus mongolica* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38(3): 262–269. [马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 等. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 262–269. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00023.]
- [23] NING Y, LEI J R, SONG X Q, et al. Modeling the potential suitable habitat of *Impatiens hainanensis*, a limestone-endemic plant [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2018, 42(9): 946–954. [宁瑶, 雷金睿, 宋希强, 等. 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟 [J]. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 946–954. doi: 10.17521/cjpe.2018.0066.]
- [24] SONG X Q. Study on germplasm resources of wild plants of *Dendrobium* in Hainan and conservation biology of *Dendrobium* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005. [宋希强. 海南石斛属野生植物种质资源及华石斛保育生物学研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2005.]
- [25] YANG F S. Conservation biology of endangered orchid *Dendrobium sinense* based on endomycorrhizal fungi [D]. Haikou: Hainan University, 2009. [杨福孙. 濒危兰科植物华石斛基于内生菌根真菌的保育生物学 [D]. 海口: 海南大学, 2009.]
- [26] WU S Y, MENG Q W, SONG X Q, et al. Effects of high temperature stress on the morphological and physiological parameters of *Dendrobium sinense* seedlings [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, 38(4): 646–651. [吴姝漪, 孟千万, 宋希强, 等. 高温胁迫对华石斛幼苗的形态和生理参数的影响 [J]. *热带作物学报*, 2017, 38(4): 646–651. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2017.04.010.]
- [27] YAO X J, SONG X Q, YANG F S. Selection and optimization of matrix for seedlings of *Dendrobium sinense* *in vitro* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2020, 41(11): 2226–2231. [姚肖健, 宋希强, 杨福孙. 华石斛组培苗炼苗基质的筛选与优化 [J]. *热带作物学报*, 2020, 41(11): 2226–2231. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2020.11.011.]
- [28] WANG X M. Micorrhiza biology of *Dendrobium sinense* (Orchidaceae), an endemic species in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2017. [王晓鸣. 海南特有种华石斛菌根生物学研究 [D]. 海口: 海南大学, 2017.]
- [29] CAI X L. Isolation, identification and anti-microbial activities of endophytes from *Dendrobium sinense* in Hainan [D]. Haikou: Hainan University, 2017. [柴晓蕾. 华石斛内生菌分离鉴定及拮抗菌株的筛选 [D]. 海口: 海南大学, 2017.]
- [30] WU H Z. Population ecology of *Dendrobium sinense* (Orchidaceae), an endemic species to Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2013. [武华周. 华石斛种群生态学研究 [D]. 海口: 海南大学, 2013.]
- [31] WANG T X, QI S J, SONG X Q, et al. Correlation analysis between population dynamics and reproduction strategies in *Dendrobium sinense* (Orchidaceae), an endemic orchid in Hainan Island [J]. *J Trop Biol*, 2018, 9(2): 189–197. [王童欣, 戚山江, 宋希强, 等. 华石斛种群动态与繁殖策略的相关性分析 [J]. *热带生物学报*, 2018, 9(2): 189–197. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.2018.02.010.]
- [32] ZHENG Y K, HU X Y, SONG X Q, et al. Optimized extraction method for genomic DNA from *Dendrobium* species (Orchidaceae) [J]. *J Trop Biol*, 2015, 6(2): 168–172. [郑云柯, 胡翔宇, 宋希强, 等. 石斛属植物基因组 DNA 提取方法的对比 [J]. *热带生物学报*, 2015, 6(2): 168–172. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.2015.02.011.]
- [33] BIAN Z X, YAN C Y, YAO X J, et al. Determination of seed viability in endangered orchid of *Dendrobium sinense* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, 38(3): 403–407. [边子星, 颜彩燕, 姚肖健, 等. 濒危华石斛种子活力测定方法研究 [J]. *热带作物学报*, 2017, 38(3): 403–407. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2017.03.003.]
- [34] CAI C H, TAN C Y, CHEN H Q, et al. Chemical constituents from *Dendrobium sinense* (II) [J]. *Guihaia*, 2020, 40(9): 1368–1374. [蔡彩虹, 谭彩银, 陈惠琴, 等. 华石斛化学成分研究(II) [J]. *广西植物*, 2020, 40(9): 1368–1374. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201907003.]
- [35] QI S J. Reproduction strategy of *Dendrobium sinense* (Orchidaceae), a species endemic to Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2017. [戚山江. 海南特有种华石斛繁殖策略研究 [D]. 海口: 海南大学, 2017.]
- [36] AGUIRRE-GUTIÉRREZ J, CARVALHEIRO L G, POLCE C, et al. Fit-for-purpose: Species distribution model performance depends on evaluation criteria: Dutch hoverflies as a case study [J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): e63708. doi: 10.1371/journal.pone.0063708.
- [37] JOPPA L N, MCINERNEY G, HARPER R, et al. Troubling trends in scientific software use [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 814–815. doi: 10.1126/science.1231535.
- [38] LÜ F N. Studies on the potential suitable distribution areas and constituents of the invasive plant *Solanum rostratum* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. [吕飞南. 外来入侵植物刺萼龙葵潜在分布区预测及化学成分研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.]
- [39] YANG Q. Predict by SVM and grade division of wild plant species with extremely small populations' reintroduction area in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2014. [杨琦. 海南岛极小种群野生植物种群重建区的 SVM 预测和等级划分 [D]. 海口: 海南大学, 2014.]
- [40] LI Y J, QI S J, SONG X Q, et al. Clonal growth characteristic of

- epiphytic orchid *Dendrobium sinense* [J]. *Mol Plant Breed*, 2021, 19(20): 6927–6932. [李奕佳, 戚山江, 宋希强, 等. 附生兰科植物华石斛的克隆生长特性 [J]. *分子植物育种*, 2021, 19(20): 6927–6932. doi: 10.13271/j.mpb.019.006927.]
- [41] SONG L, LIU W Y. Epiphytic plants: Their responses to global change and roles in bioindication [J]. *Chin J Ecol*, 2011, 30(1): 145–154. [宋亮, 刘文耀. 附生植物对全球变化的响应及其生物指示作用 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(1): 145–154. doi: 10.13292/j.1000-4890.2011.0016.]
- [42] BENAVIDES A M. Distribution and succession of vascular epiphytes in Colombian Amazonia [D]. Amsterdam: University of Amsterdam, 2010.
- [43] HSU R C C, TAMIS W L M, RAES N, et al. Simulating climate change impacts on forests and associated vascular epiphytes in a subtropical island of East Asia [J]. *Diver Distribut*, 2012, 18(4): 334–347. doi: 10.1111/j.1472-4642.2011.00819.x.
- [44] LEHMANN A, OVERTON J M, LEATHWICK J R. GRASP: Generalized regression analysis and spatial prediction [J]. *Ecol Modell*, 2003, 157(2/3): 165–183. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00354-X.
- [45] PRESTON K L, ROTENBERRY J T, REDAK R A, et al. Habitat shifts of endangered species under altered climate conditions: Importance of biotic interactions [J]. *Glob Change Biol*, 2008, 14(11): 2501–2515. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01671.