#### DOI: 10.5846/stxb202205171396

张彦静,陈菁,王晨彬,斯琴,谢锐,马方舟.气候变化条件下曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区预测.生态学报,2023,43(14):5850-5862. Zhang Y J, Chen J, Wang C B, Si Q, Xie R, Ma F Z.Prediction of the potential geographical distribution of *Chilades pandava* in China under climate change.Acta Ecologica Sinica,2023,43(14):5850-5862.

# 气候变化条件下曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区预测

张彦静',陈 菁',王晨彬',斯 琴',谢 锐2,马方舟<sup>1,\*</sup>

1 生态环境部南京环境科学研究所国家环境保护生物安全重点实验室,南京 210042

2 华南农业大学植物保护学院,广州 510642

摘要:曲纹紫灰蝶(Chilades pandava)是一种以幼虫危害苏铁(Cycas revolute)嫩枝嫩叶的园林害虫,对苏铁的生长繁殖、生产者的经济效益以及城市园林的美观造成严重影响。基于曲纹紫灰蝶和苏铁的现存分布点,利用最大熵模型(MaxEnt)、ArcGIS、R软件对当前和未来气候条件下曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区分布及当前气候条件下寄主苏铁在中国的潜在适生区分布进行了预测,其中当前气候数据基于1970—2000年的历史数据,未来气候数据(2021—2040年、2041—2060年和2061—2080年)选择第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中中国北京气候中心中等分辨率气候系统模式(BCC-CSM2-MR)下的3种共享社会经济路径(SSP126(属于低强迫情景),SSP370(属于中等至高等强迫情景),SSP585(属于高强迫情景))。结果表明:(1)模型预测结果非常好,各组模型的受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)值均高于0.95,昼夜温差月均值(bio2)、等温性(bio3)、最热季平均温度(bio1)、最湿月份降水量(bio1)是影响曲纹紫灰蝶分布的主导气候因子;(2)当前气候条件下曲纹紫灰蝶的适生区面积占国土面积的29.7%,其中高适生区主要分布于长江以南,如海南、广东、广西、香港、江西、湖南、福建、中国台湾、四川东南部、重庆北部、安徽南部、上海、江苏、浙江等区域;(3)曲纹紫灰蝶与其寄主苏铁的适生重叠区占国土面积的25.9%;(4)未来气候变化条件下曲纹紫灰蝶的总适生区面积均比当前气候条件下的总适生区面积大,尤其是山东、河北、河南、天津、北京等高适生区面积扩增明显,其中2061—2080年SSP585情景下的曲纹紫灰蝶总适生面积最大,占国土面积的41.33%,比当前气候条件下预测的多出111.57万km<sup>2</sup>。构建的MaxEnt模型预测结果可信度高,可以为制定防治曲纹紫灰蝶相关检疫措施以及保护中国苏铁资源提供理论依据。

关键词:曲纹紫灰蝶;最大熵模型(MaxEnt)模型;适生区预测;苏铁;气候变化

# Prediction of the potential geographical distribution of *Chilades pandava* in China under climate change

ZHANG Yanjing<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>, WANG Chenbin<sup>1</sup>, SI Qin<sup>1</sup>, XIE Rui<sup>2</sup>, MA Fangzhou<sup>1,\*</sup>
1 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecological Environment, Nanjing 210042, China
2 College of Plant protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

**Abstract**: Butterfly, *Chilades pandava* (Horsfield) is a garden pest whose larvae harm the young leaves of the Sago Palm *Cycas revoluta* (Thunb). It has a serious impact on the growth and reproduction of *Cycas revoluta*, the economic prospects of growers, and the beauty of urban gardens. In this study, based on the existing distribution points of *Chilades pandava* and *Cycas revoluta*, we used MaxEnt, ArcGIS, and R software to predict the potential geographical distribution of *Cycas revoluta* in China under current and future climate conditions and the potential geographical distribution of *Cycas revoluta* in China under the current climate condition. The current climate data used here were based on historical data from 1970 to

收稿日期:2022-05-17; 网络出版日期:2023-03-23

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

http://www.ecologica.cn

基金项目:重点研发计划项目(2021YFC2600400);生态环境部生物多样性保护专项;全球环境基金(GEF)减少外来入侵物种对中国具有全球重要意义的农业生物多样性和农业生态系统威胁的综合防控体系建设项目海南省外来入侵物种对生物多样性影响的风险评估(FECO/LY2/S/21/267)

2000. The future data (2021-2040, 2041-2060, and 2061-2080) were derived from three representative concentration pathways (SSP126, SSP370, and SSP585) under BCC-CSM2-MR in CMIP6. The results showed that: (1) the area under the curve (AUC) of the test subject working characteristic (ROC) of each model was higher than 0.95, suggesting that the accuracy of the models was very good. The mean diurnal range (bio2), isothermality (bio3), mean temperature of the warmest quarter (bio10), and precipitation of the wettest month (bio13) were the main climatic factors affecting the potential distribution of Chilades pandava. (2) Under the current climatic conditions, the total areas of suitable habitats of Chilades pandava were found to account for 29.7% of the national land area, and highly suitable habitats were mainly distributed in the south of the Yangtze River, including Hainan, Guangdong, Guangxi, Hong Kong, Jiangxi, Hunan, Fujian, Taiwan, southeast Sichuan, northern Chongqing, southern Anhui, Shanghai, Jiangsu, and Zhejiang. (3) The overlapping suitable areas of Chilades pandava and Cycas revoluta accounted for 25.9% of the national area. (4) Under each of the future climate change scenario, the total suitable area for Chilades pandava growth would be greater than the total suitable area under the current climate conditions. In particular, the total area of highly suitable habitats increased significantly, including locations in Shandong, Hebei, Henan, Tianjin, and Beijing. The total area of suitable habitat for Chilades pandava under the scenario SSP585 in 2061-2080 was found to be the largest, accounting for 41.33% of the national area, 1.1157 million km<sup>2</sup> more than in the current climate. The study can provide a theoretical basis for the prevention and control of Chilades pandava and the protection of Cycas revoluta resources in China.

Key Words: Chilades pandava; MaxEnt; prediction of suitable habitats; Cycas revoluta; climate change

曲纹紫灰蝶(*Chilades pandava*)隶属鳞翅目(Lepidoptera)灰蝶科(Lycaenidae)紫灰蝶属(*Chilades Moore*), 是幼虫危害寄主苏铁的一种多化害虫,在中国一年发生4—10代,从卵到成蝶只需20—30d<sup>[1-4]</sup>。苏铁(*Cycas revoluta*)是现存最古老的裸子植物类群之一,常作为草药、食物和装饰品<sup>[1]</sup>。由于人们大量的野外采集以及 城市化进程加快,导致苏铁的自然栖息地减少,现处于濒危状态,所有现存的苏铁都被列入《濒危野生动植物 种国际贸易公约》(CITES)<sup>[5]</sup>。

苏铁(*Cycas revolute*)受曲纹紫灰蝶危害严重,危害的部位主要是幼叶和球花<sup>[4]</sup>。当曲纹紫灰蝶危害苏铁 幼叶时,幼虫啃食苏铁新发幼叶,严重时苏铁幼叶整片被危害只剩干枯叶柄<sup>[4]</sup>,如果苏铁幼叶变得过于坚硬 使曲纹紫灰蝶幼虫无法取食时,成虫就会分散为下一代寻找新的苏铁资源继续产生危害<sup>[3]</sup>;当曲纹紫灰蝶危 害苏铁球花时,啃噬苏铁球花,严重时蛀空柱心,导致苏铁胚珠、花粉不能正常发育<sup>[4]</sup>。当遇到土壤湿度较大 时,苏铁被危害的部位还会产生琥珀色流胶,叶片和头茎上会发现大量的虫粪和破絮状残积物<sup>[4]</sup>。如果一棵 苏铁植株被曲纹紫灰蝶连续危害 2 次以上,则这棵植株生长会变的极缓慢或枯死<sup>[6]</sup>。由此可知,曲纹紫灰蝶 严重影响苏铁的生长繁殖,同时也影响生产者的经济效益和城市园林的美观。

全球曲纹紫灰蝶有 4 个公认的亚种:中国台湾亚种,东南亚亚种、菲律宾亚种、斯里兰卡亚种,在中国分布 的是中国台湾亚种,其他三种在中国没有分布<sup>[1]</sup>,在现有的研究中,除了个别指明亚种外,其余均为曲纹紫灰 蝶<sup>[7]</sup>。全球公认的这 4 个亚种自然种群原来主要分布于华莱士线周围的亚热带区域,包括中国南大陆、东南 亚、印度、斯里兰卡<sup>[2]</sup>,但因世界各地把苏铁作为观赏性植物引进,目前曲纹紫灰蝶在相对偏远的地区都有发 生,如马达加斯加<sup>[2]</sup>、关岛<sup>[8]</sup>、埃及<sup>[9—11]</sup>等,甚至在温带也有发生,如日本<sup>[12]</sup>、朝鲜等<sup>[13]</sup>。中国曲纹紫灰蝶原 分布于台湾省台东地区,于 1997 年 4 月 14 日,在由中国台湾省引入深圳市的苏铁植株中被发现,之后迅速发 生于福建、上海、北京、贵州、广西、广东、浙江、湖南、四川、江西、陕西等地<sup>[4,6]</sup>,给中国的苏铁资源造成了严重 的危害。目前苏铁在世界各地被广泛种植,曲纹紫灰蝶正迅速成为全球不受欢迎的外来种<sup>[1—2]</sup>。

MaxEnt 生态位模型是物种分布模型中精确度较高的预测模型之一,其基于最大熵理论以物种分布点信息和气候变量为基础,通过数学模型模拟物种潜在的地理分布范围<sup>[14]</sup>。MaxEnt 生态位模型有受样本数量影响小、运算速度快、运行效率高等多种优点,被广泛应用于外来入侵物种潜在适生区预测研究中,如马樱丹

(Lantana camara)<sup>[15]</sup>、舞毒蛾(Lymantria dispar)<sup>[16]</sup>、双药芒(Miscanthus nudipes)<sup>[17]</sup>、埃及吹绵蚧(Icerya aegyptiaca)<sup>[18]</sup>、互花米草(Spartina alterniflora)<sup>[19]</sup>、克氏原螯虾(Procambarus clarkii)<sup>[20]</sup>、刺槐叶瘿蚊(Obolodiplosis robiniae)<sup>[21]</sup>等。

目前中国对曲纹紫灰蝶的研究主要集中在发生危害<sup>[22-27]</sup>、生物防治<sup>[23-29]</sup>、形态特征<sup>[6,30]</sup>、生物学特性<sup>[6,31]</sup>等方面,而曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区分布以及曲纹紫灰蝶与寄主苏铁在中国的潜在适生区分布关系还未有研究。本研究基于曲纹紫灰蝶及其寄主苏铁的现存分布点经纬度信息,利用 MaxEnt 生态位模型预测曲纹紫灰蝶与苏铁在当前气候条件下在中国的潜在适生分布情况以及未来气候条件下曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生分布变化情况,同时筛选出限制两个物种分布的主导气候因子。当前气候数据基于历史数据 1970—2000年预测,未来数据选择第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中中国北京气候中心中等分辨率 气候系统模式(BCC-CSM2-MR)下的3种共享社会经济路径(SSP126、SSP370、SSP585),并选择了2021—2040 年、2041—2060年、2061—2080年3个时间段,其中SSP126情景(2100年辐射强迫稳定在2.6W/m<sup>2</sup>)代表低脆弱性、低减缓压力和低辐射强迫的综合影响;SSP370情景(2100年辐射强迫稳定在8.5W/m<sup>2</sup>)代表高强迫情 量<sup>[32]</sup>。本研究以期为曲纹紫灰蝶的早期预警与防控以及中国苏铁资源的保护提供理论基础。

#### 1 实验方法

#### 1.1 分布点数据的获取及处理

曲纹紫灰蝶分布点数据共收集到 355 个,其中野外调查收集 52 个、文献查阅收集 38 个,共享数据库(http://www.GBIF.org)收集 265 个。物种分布点存在采样偏差会影响模型预测的精准度,为了降低采样偏差的影响,采用 ArcGIS 对收集的物种分布点进行三步筛选<sup>[33]</sup>:删除空间分辨率为 2.5arc-minutes 的栅格内重复的物种分布点;删除不在陆地上的分布点;删除记录有误的分布点。寄主苏铁分布点数据下载于(http://www.GBIF.org)网站,筛选方法同曲纹紫灰蝶一致。中国地理地图来源于自然资源部标准地图服务系统(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/),审图号: GS(2022)1873。

#### 1.2 气候变量的筛选

本研究所用的气候变量均来源于世界气象数据库(https://www.worldclim.org/),当前气候是基于 1970—2000 年历史数据,包含 19 个生物气候变量,版本为 2020 年 3 月更新的 2.1 版;未来气候数据选择 3 个时间 段,分别是 2021—2040 年、2041—2060 年和 2061—2080 年,以上气候变量的空间分辨率均为 2.5arc-minutes。采用模式选择(CMIP6)中(BCC-CSM2-MR)下的 SSP126、SSP370 和 SSP585 三种共享社会经济路径情景。

为了避免过多的气候变量增加生态空间维度,本研究利用 AreGIS 提取筛选的曲纹紫灰蝶和苏铁分布点的气候变量数值,调用 R 软件包中的 ENMTools 工具,并结合 Jackknife 刀切法对 19 个气候变量进行相关性分析,去除相关系数 | r | ≥0.80 且对模型的贡献率较小的气候变量,筛选出用于模型构建的影响曲纹紫灰蝶和苏铁分布的气候变量。

#### 1.3 MaxEnt 模型的参数设置

MaxEnt 模型对采样偏差敏感且易产生过度拟合,直接运行 MaxEnt 模型的默认参数预测结果不可靠<sup>[14]</sup>, 故本研究对 MaxEnt 模型参数进行了优化。调控倍率(RM)和特征组合(FC)是影响 MaxEnt 模型复杂度的重 要因素<sup>[34—35]</sup>。MaxEnt 模型的特征包括:线性(L)、二次(Q)、片段化(H)、乘积型(P)和阈值(T)。为获 得优化的 MaxEnt 模型参数,本研究通过调用 R 软件中的 ENMeval 数据包调整 RM 和 FC 参数<sup>[35]</sup>,将 RM 从 0.5—4 设置 8 个梯度,每个梯度增加 0.5,采用 8 个特征组合,即:L、LQ、LQH、LQHP、LQHPT、QHP、QHPT、 HPT,使用"棋盘 2"法和 Akaike 信息量准则(AIC)法计算 Akaike 信息标准系数(AICc),并将最小的 delta AICc 分数应用于最终优化的 MaxEnt 模型<sup>[36]</sup>。MaxEnt 软件默认条件下调控倍率(RM)为1,特征组合(FC) 为 LQHP。

#### 1.4 适生区预测

当前气候条件下曲纹紫灰蝶及其寄主苏铁的模型预测参数设置如下:输出格式选择"Cloglog"<sup>[37]</sup>,文件类型选择"asc",选用 25%的分布点作为测试集,重复迭代方式选择"Subsample"<sup>[16]</sup>,选中随机种子,即每次运行将使用不同的随机种子。重复次数设置为 10 次,以便削减异常值带来的不确定性。最多迭代次数为 5000,防止模型预测出现偏低或偏高的情况,并选择调整优化后的模型参数。曲纹紫灰蝶优化参数 RM 为 2.5,FC 为 LQH;苏铁优化参数 RM 为 1,FC 为 LQHPT(图 1)。





AICc: Akaike 信息标准系数 The akaike information criterion standard coefficient; L: 线性; Q: 二次; H: 片段化; P: 乘积型; T: 阈值; L、LQ、 LQP、LQH、LQHP、QHPT、LQHPT 为不同的特征组合

未来气候条件下(2021—2040年、2041—2060年和2061—2080年)的曲纹紫灰蝶的模型预测参数,除了将SSP126、SSP370和SSP585的相应气候图层数据导入到 MaxEnt 模型的投影图层目录中,其余参数与当前 气候条件的设置—致。

将 MaxEnt 模型运行结果导入 ArcGIS 中进行显示分析。为便于划分这 2 个物种的预测适生区分布状况,选择曲纹紫灰蝶的最低存在阈值(the owest presence threshold, LPT)来定义适生区类型<sup>[14]</sup>。利用 ArcGIS 软件中的重分类功能将适生区划分为 4 类:非适生区(0.0—LPT)、低适生区(LPT—0.4)、中适生区(0.4—0.6)和高适生区(0.6—1.0)<sup>[38—39]</sup>,并用栅格图层属性表计算不同适生区占比,最终计算出不同适生区的面积大小。

## 1.5 模型精度评价

采用遗漏率和受试者工作特征(ROC)曲线的线下面积 AUC 值对 MaxEnt 模型预测结果准确性进行检验。如果测试遗漏率与理论遗漏率越接近,则表明构建的模型精度越高,如果测试遗漏率高于或者低于理论遗漏 率,则说明建模数据存在空间自相关<sup>[40]</sup>。采用 ROC 曲线下面积 AUC 值对 MaxEnt 模型预测结果进行评价 时,除了对比 AUC 值的大小外,曲线形状也很重要,如果 ROC 曲线向左上方伸展,表明模型预测灵敏度比较高,结果更加准确<sup>[18,35]</sup>。AUC 值取值范围为 0—1,利用 AUC 值评估 MaxEnt 模型预测结果精度的标准:当0.0 <AUC ≤0.6,预测结果失败;0.6 <AUC ≤0.7 时,预测结果为较差;当0.7 < AUC ≤0.8 时,预测结果为一般;0.8 < AUC ≤0.9 时,预测结果为较好;当0.9 <AUC ≤1.0 时,预测结果为非常好<sup>[40]</sup>。

#### 2 结果

### 2.1 筛选点位分布与环境因子确定

本研究筛选得到分布点 124 个,气候变量 8 个,用于曲纹紫灰蝶的 MaxEnt 模型构建;筛选得到分布点 349 个,气候变量 10 个,用于苏铁的 MaxEnt 模型构建(图 2,表 1)。气候变量相关性分析结果如图 3 所示,图中蓝 色圆圈越大颜色越深,表明两个气候变量之间正相关性越大,红色圆圈越大颜色越深,表明两个气候因子之间

负相关性越大。



#### 图 2 曲纹紫灰蝶和苏铁的全球筛选点位分布图

Fig.2 Screened geographical distribution points of Chilades pandava and Cycas revolute in the global

表1 筛选的影响曲纹紫灰蝶和苏铁分布的气候3	变量
------------------------	----

Table 1	Screened clima	tic variables affecting	the distribution	of Chilades	pandava and Cycas revol	ute
I abit I	Servenca emma	ac variables affecting	, the unstribution	or chinanes	punduru und Cycus reron	~~~

代码 Code	描述 Description	单位 Unit	是否用于曲纹紫灰蝶建模 Weather to use <i>Chilades</i> pandava for Modeling	是否用于苏铁建模 Weather to use Chilades revolute for Modeling
bio1	年平均气温	°C	否	否
bio2	平均气温日较差	°C	是	是
bio3	等温性	°C	是	否
bio4	温度季节性变化	/	否	否
bio5	最暖月最高温度	/	否	否
bio6	最冷月最低温度	°C	否	否
bio7	年均温度变化范围	°C	否	否
bio8	最湿季度平均温度	°C	是	是
bio9	最干季度平均温度	°C	否	是
bio10	最暖季度平均温度	°C	是	是
bio11	最冷季度平均温度	°C	否	是
bio12	年均降水量	mm	否	是
bio13	最湿月降水量	mm	是	否
bio14	最干月降水量	mm	是	否
bio15	降水量季节性变化	/	否	是
bio16	最湿季降水量	mm	否	是
bio17	最干季度降水量	mm	否	是
bio18	最暖季度降水量	mm	是	是
bio19	最冷季度降水量	mm	是	是

## 2.2 当前气候条件下曲纹紫灰蝶与苏铁在中国的潜在适生区预测结果

当前气候条件下曲纹紫灰蝶的 MaxEnt 预测模型在中国的潜在适生区分布如图 4 所示,高适生区主要分 布于海南、深圳、香港、广东、广西、江西、湖南、湖北南部、福建西北部及沿海、中国台湾沿海、上海、四川东部、 重庆西南部、河南南部、安徽、江苏、浙江等;中适生区主要分布在高适生区周边区域;低适生区主要分布于黑 龙江和吉林部分区域、辽宁、北京、天津、河北南部、山东、河南、陕西南部、湖北西北部、西藏西南角、云南南部、

贵州西部、四川部分区域、福建零星区域、中国台湾中部等;剩余区域为非适生区。 当前气候条件下苏铁的 MaxEnt 预测模型在中国的潜在适生区分布如图 4 所示,高适生区主要分布于广 西、广东、湖南、江西、福建、中国台湾、浙江、湖北南部、安徽南部等;中适生区主要分布于高适生区周围;低适



张彦静 等:气候变化条件下曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区预测

http://www.ecologica.cn

![](_page_6_Figure_2.jpeg)

生区主要分布于海南、云南、四川东部、陕西南部、湖北西北部、河南、山东、江苏等;其余区域为非适生区。

图 4 当前气候条件下曲纹紫灰蝶和苏铁在中国的潜在适生区分布范围 Fig.4 Potential distribution of *Chilades pandava* and *Cycas revolute* in China under the current climate condition

# 2.3 未来气候条件下曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区变化情况

未来气候条件下曲纹紫灰蝶的 MaxEnt 预测模型在中国的潜在适生区如图 5。与当前气候条件下预测结 果相比,曲纹紫灰蝶总适生区面积均在增大,其中辽宁、山东、河南、河北等地高适生面积增加明显;低适生区 边界有比较明显的向北偏移趋势,尤其是黑龙江、吉林、辽宁三省的偏移趋势明显。当前气候条件下预测的曲 纹紫灰蝶总适生区面积达到 285.17×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,占国土面积的 29.7%,而 2061—2080 年 SSP585 情况下总适生区 面积增加的最多,达到 396.74×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,占国土面积的 41.33%。当前条件下预测的曲纹紫灰蝶高适生区面积 达到 285.17×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,未来不同气候条件下高适生区面积不断上涨,其中 2061—2080 年 SSP585 情况下高适生 区面积最大为 218.98×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>;当前条件下中适生区面积为 38.67×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,而未来不同气候条件下中适生区 面积不断下降,2061—2080 年 SSP585 情况下减少最多为 16.96×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>;当前气候条件下低适生区面积为 109.16×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,而未来不同气候条件下,除了 2041—2060 年 SSP126 和 2021—2040 年 SSP370 两种情景的低 适生区面积略微减少外,其余情景下低适生区面积均在增加(表 2)。

Tuble 2	Comparison	or suitabl	c urcus or	ennuues pe	maara m	ciinia ana	er current	unu rutur	e emmatic s	contantions	
适生区	对比指标	当前		SSP126			SSP370			SSP585	
Suitable habitats	comparison indicator	2021—2040	2041—2060	2061—2080	2021—2040	2041—2060	2061—2080	2021—2040	2041—2060	2061—2080	
高适生区	面积	137.34	160.36	180.95	190.35	168.56	191.42	206.68	172.62	204.69	219.98
High-suitable habitats	面积变化	/	23.02	43.61	53.01	31.22	54.08	69.34	35.28	67.35	82.64
	占比/%	14.3	16.7	18.8	19.8	17.6	2	21.5	18	21.32	22.91
中适生区	面积	38.67	33.75	31.86	27.82	37.98	25.57	20.70	33.15	21.58	16.96
Middle-suitable habitats	面积变化	/	-4.92	-6.81	-10.85	-0.69	-13.1	-17.97	-5.52	-17.09	-21.71
	占比/%	4	3.52	3.3	2.9	3.96	2.7	2.2	3.4	2.25	1.77
低适生区	面积	109.16	125.01	108.45	127.28	109.11	140.34	148.22	112.12	124.48	159.79
Low-suitable habitats	面积变化	/	15.85	-0.71	18.12	-0.05	31.18	39.06	2.96	15.32	50.63
	占比/%	11.3	13.02	11.3	13.3	11.37	14.61	15.4	11.7	12.97	16.64
总适生区	面积	285.17	319.12	321.26	345.44	315.66	357.33	375.59	317.89	350.74	396.74
Total-suitable habitats	面积变化	/	33.95	36.09	60.27	30.49	72.16	90.42	32.72	65.57	111.57
	占比/%	29.7	33.2	33.5	35.98	33.89	37.22	39.12	33.11	36.54	41.33

表 2 曲纹紫灰蝶在当前和未来气候条件下在中国的适生区面积比较 $/(\times 10^4 \text{ km}^2)$ 

Table 2 Comparison of suitable areas of Chilades pandava in China under current and future climatic conditions

"-":表示与当前气候条件下相比减少的面积,占比指各类适生区占总面积的比例;SSP:共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathways

#### 2.4 模型精度的验证

曲纹紫灰蝶和苏铁的预测遗漏率与测试样本基本吻合(图 6),这表明模型预测效果好。当前气候条件下

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

图 5 未来气候条件下(2021—2040年、2041—2060年、2061—2080年)曲纹紫灰蝶在中国的潜在适生区分布范围变化图/(×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>) Fig.5 Variation map of the distribution range of the potential suitable areas of *Chilades pandava* in China under future climatic conditions (2021—2040, 2041—2060, 2061—2080)

MaxEnt 模型预测的曲纹紫灰蝶与其寄主苏铁的 AUC 值均大于 0.95(图 6),未来不同气候条件下 MaxEnt 模型 预测的曲纹紫灰蝶 AUC 值均大于 0.97(表 3),依照 MaxEnt 模型预测结果精度标准,两个物种的预测结果均 达到"非常好"(0.9<AUC <1.0)的标准,从形状走势上看,各组 ROC 曲线均向左上方伸展(图 6、图 7),说明模 型预测的灵敏度较好。

Table 3         AUC values of <i>Chilades pandava</i> under the future climatic scenarios								
气候情景	年份	AUC 值	气候情景	年份	AUC 值			
Climate change scenario	Year	AUC value	Climate change scenario	Year	AUC value			
低强迫情景 SSP126	2021-2040	0.977	高等强迫情景 SSP585	2021-2040	0.975			
Low compulsion scenario SSP126	2041-2060	0.974	High compulsion scenario SSP585	2041-2060	0.974			
	2061—2080	0.977		2061-2080	0.972			
中等至高等强迫情景 SSP370	2021—2040	0.973						
Moderate compulsive scenario SSP370	2041-2060	0.976						
	2061—2080	0.973						

表 3 未来气候情景的曲纹紫灰蝶 AUC 值

AUC: 受试者工作特征曲线下面积 The area under the subject curve

![](_page_8_Figure_3.jpeg)

![](_page_8_Figure_4.jpeg)

![](_page_8_Figure_5.jpeg)

# 2.5 曲纹紫灰蝶的分布与气候变量之间的关系

依据刀切法重要性比较,蓝色的条带越长,表明该变量对物种的分布重要性越大,绿色的条带越短,代表 该变量所含有的特有信息越多对物种分布的影响越大。bio13、bio10、bio2和 bio3 是影响曲纹紫灰蝶分布的 主导气候变量;bio2、bio11、bio10和 bio19 是影响苏铁分布的主导气候变量(图 8)。

结合已知的曲纹紫灰蝶现有分布点气候特征和气候变量的贡献率,选取并绘制 bio13、bio10、bio3、bio2 响应曲线(图9)。一般认为,当分布概率大于 0.5 时,其对应的生态因子值适宜物种的生长<sup>[26]</sup>。bio13 在 240— 1250mm 时适宜曲纹紫灰蝶分布;bio10 在 25—32℃时,适宜曲纹紫灰蝶分布;bio3 在 25—98 时适宜曲纹紫灰 蝶分布;bio2 在 4—11℃时,适宜曲纹紫灰蝶分布。由上可知,曲纹紫灰蝶更适宜分布在中国南方温热湿润的 区域,具有耐高温耐旱不耐涝的特点。

# 3 讨论

# 3.1 MaxEnt 优化模型预测结果可靠性分析

为降低采样偏差对模型预测的影响,对曲纹紫灰蝶和苏铁的分布点进行了筛选;为避免气候变量间的多 重线性问题,结合刀切法筛选出相关性绝对值小于 0.80 的气候变量;为避免 MaxEnt 模型产生过度拟合问题, 分别对曲纹紫灰蝶和苏铁的调控倍频和特征组合进行了优化。最终模型预测的检验结果均显示曲纹紫灰蝶 和苏铁的测试遗漏率与理论遗漏率基本吻合,这表明本研究选取的气候变量和物种分布点不存在空间自相 关。在当前和未来气候条件下,曲纹紫灰蝶和苏铁各组模型的 AUC 值均高于 0.95 且 ROC 曲线均向左上侧伸

![](_page_9_Figure_1.jpeg)

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

![](_page_9_Figure_3.jpeg)

![](_page_9_Figure_4.jpeg)

图 8 各项气候变量对预测曲纹紫灰蝶和苏铁适生区分布的重要度

Fig.8 Importance of environmental variables for predicting the distribution of *Chilades pandava* and *Cycas revolute* 

bio10:降水量季节性变化; bio13:最湿月降水量; bio14:最干月降水量; bio18:最暖季度降水量; bio19:最冷季度降水量; bio2:平均气温 日较差; bio3:等温性; bio8:最湿季度平均温度; bio11:最冷季度平均温度; bio12:年均降水量; bio15:降水量季节性变化; bio17:最干 季度降水量; bio9:最干季度平均温度

展,说明模型预测达到"非常好"的标准。因此本研究的预测结果准确可靠,可用于分析曲纹紫灰蝶和苏铁在 中国潜在适生区分布状况。

![](_page_10_Figure_1.jpeg)

图 9 曲纹紫灰蝶的存在概率和气候变量响应曲线

**Fig.9** Response curves between probability of presence and environmental variables for *Chilades pandava* 红色代表均值:蓝色代表标准差

# 3.2 重要气候因子的影响分析

研究结果表明曲纹紫灰蝶的分布主要限制于昼夜温差月均值(bio2)、等温性(bio3)、最暖季度平均温度(bio10)、最湿月降水量(bio13)这4个气候变量,其中有3个与温度有关,说明温度对曲纹紫灰蝶的分布影响较大。曲纹紫灰蝶生长发育适温为25—35℃<sup>[41]</sup>,一年可繁殖4—10多代,世代重叠,以卵、幼虫和蛹越冬,发

生代数和越冬虫态因地区而异,在气候温和的地区,如 广西赣州<sup>[4]</sup>,四川攀枝花<sup>[27]</sup>、广东广州<sup>[28]</sup>等,无明显的 越冬现象,在全国各地均表现为春季危害轻,夏季危害 严重,这与所选的温度变量响应曲线结果一致,说明曲 纹紫灰蝶喜温不喜冷,更适合在中国南方气候温暖的区 域生存。曲纹紫灰蝶的蛹在久旱无雨情况下仍能正常 羽化,但雨水过多表土过潮羽化率明显下降<sup>[7]</sup>,如遇暴 风雨成虫死亡率升高<sup>[42]</sup>,这与所选的降水变量响应曲 线一致。综上所述,曲纹紫灰蝶喜温耐旱不耐涝,不喜 低温和暴雨。

# 3.3 当前气候条件下曲纹紫灰蝶与苏铁适生区分布状况分析

本研究对当前气候条件下曲纹紫灰蝶与苏铁在中 国的潜在适生区分布情况进行了分析比较(图 10),其 中黄色区域表示曲纹紫灰蝶与苏铁适生重合区,占国土 面积的 25.9%;蓝色区域表示仅适宜苏铁的分布区,占

![](_page_10_Figure_9.jpeg)

图 10 当前气候条件下曲纹紫灰蝶与苏铁在中国潜在适生区分 布关系图

Fig.10 Distribution relationship between *Chilades pandava* and *Cycas revolute* in the potential suitable areas in my country under current climatic conditions

国土面积的1.69%;红色区域表示仅适宜曲纹紫灰蝶的分布区,占国土面积的3.78%;白色的区域是两者均不 适宜的分布区,占国土面积的68.6%。黄色区域主要分布于长江以南区域,该区域以亚热带季风气候为主,夏 季高温多雨,冬季温和少雨,说明曲纹紫灰蝶和苏铁适生气候相似,更加适宜分布于温暖湿润的中国南方,并 且这些重合区与曲纹紫灰蝶和苏铁的实际发生情况基本一致(图1);依据曲纹紫灰蝶未来气候条件下的预测 结果,蓝色区域将扩增为曲纹紫灰蝶的潜在适生区(图5),说明未来重叠适生区范围将增大;红色区域当前气 候条件虽不适宜苏铁分布,但苏铁是观赏性高受大众喜爱的园林植物,在世界各地被广泛种植<sup>[1,2,6]</sup>,即使是 非适生区也有可能人为引进种植,并且苏铁不是曲纹紫灰蝶的唯一寄主,它的幼虫还会危害鹤眉豆<sup>[7]</sup>,成虫 的蜜源植物也较多,有鸡冠花、鸡冠苋、蟛蜞菊(Wedelia trilobata)等杂草以及其它园林植物<sup>[31]</sup>。此外,由于全 球气候变暖和气温升高,未来红色区域有可能成为苏铁的适生区。因此红色区域在未来发生曲纹紫灰蝶危害 可能性高,要加强对这些区域曲纹紫灰蝶的检疫检测。

# 3.4 未来气候条件下的曲纹紫灰蝶适生区分布状况分析

尽管未来不同气候情景下曲纹紫灰蝶适生区的变化特征不一致,但预测结果均表明海南、广西、广东、湖 南、湖北、江西、福建、浙江、江苏、安徽等区域始终是曲纹紫灰蝶的高适生区,这些区域经济发达有利于曲纹紫 灰蝶的扩散,因此未来要加强这些区域的风险监测与防控。其次,预测结果表明曲纹紫灰蝶的整体适生区有 一定程度向北扩增,尤其是东北三省的低适生区扩增明显,这些区域属于温带季风气候,夏季高温多雨,冬季 寒冷干燥,日本、朝鲜的气候特征与这些区域类似,有文献报道曲纹紫灰蝶在日本<sup>[12]</sup>、朝鲜<sup>[13]</sup>也有发生,原因 可能是全球气候变暖和气温升高促进了曲纹紫灰蝶繁殖和越冬范围的扩增。总之,未来曲纹紫灰蝶的潜在适 生区将会扩大,尤其是山东、河北、河南、天津、北京等高适生区增大明显,因此需要加强对这些区域引入的曲 纹紫灰蝶卵、幼虫、蛹的检疫。

## 4 结论

当前气候条件下,曲纹紫灰蝶的高适生区主要分布于中国长江以南,如海南、广东、广西、香港、江西、湖南、福建、中国台湾、四川东南部、重庆北部、安徽南部、上海、江苏、浙江等区域。在未来气候条件下,曲纹紫灰蝶的总适生区面积在扩大且边界范围整体向北移动,其中北京、天津、湖北、河南、河北、山东、福建、浙江等高适生区面积扩增明显,辽宁、吉林、黑龙江等低适生区面积向北偏移明显。气候变量中昼夜温差月均值(bio2)、等温性(bio3)、最暖季度平均温度(bio10)、最湿月降水量(bio13)是限制曲纹紫灰蝶分布的主导气候变量。为了保护中国的苏铁资源,相关政府部门应该紧急制定和实施有效的防控管理策略,防止曲纹紫灰蝶的传播和扩散。

#### 参考文献(References):

- [1] Wu L W, Lees D C, Hsu Y F. Tracing the origin of *Chilades pandava* (Lepidoptera, Lycaenidae) found at Kinmen Island using mitochondrial COI and COII genes. BioFormos, 2009, 44(2): 61-68.
- [2] Raju A J S. Nesting behaviour of the Baya Weaver bird, Ploceus philippinus (Ploceidae) and the life-cycle of the Plains Cupid butterfly, Chilades pandava (Lycaenidae) with the red-listed Cycas sphaerica and C. beddomei (Cycadaceae). Journal of Threatened Taxa, 2009, 1(8): 429-433.
- [3] Wu L W, Yen S H, Lees D C, Hsu Y F. Elucidating genetic signatures of native and introduced populations of the cycad blue, *Chilades pandava* to Taiwan: a threat both to sago palm and to native Cycas populations worldwide. Biological Invasions, 2010, 12(8): 2649-2669.
- [4] 郑婷,徐建峰,张益,周文贤,蔡平.苏铁害虫曲纹紫灰蝶的发生与防治研究进展.现代园艺,2018,(13):148-151.
- [5] Donaldson J S. Cycads: status survey and conservation action plan. [2009-04-21]. IUCN, SSC, Cycad Specialist Group. https://portals.iucn.org/ library/sites/library/files/documents/2003-010.pdf.
- [6] 司嘉怡,曹磊,袁准,曾爱平.曲纹紫灰蝶的形态特征和生物学特性研究.湖南农业科学, 2014, (8): 6-9.
- [7] 韦启元. 曲纹紫灰蝶指名亚种的生物学特性及防治. 昆虫知识, 2006, 43(6): 870-872.
- [8] Moore A, Marler T, Miller R H, Muniappan R. Biological control of cycad Aulacaspis scale on Guam. The Cycad Newsletter, 2005, 28: 6-8.
- [9] Fric Z, Dickinson R, Fetouh G, Larsen T B, Schön W, Wiemers M. First record of the cycad blue, *Chilades pandava*, in Egypt-a new invasive butterfly species in the Mediterranean region and on the African continent (Lepidoptera: Lycaenidae). African Entomology, 2014, 22(2):

315-319.

- [10] Batt M A E G, Hassan G M, El-Aassar M R. A study on infestation factors of Cycas and zamia palms with butterfly, *Chilades pandava* and its control in Egypt. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2019, 22(10): 477-485.
- [11] Batt M A, Abbas M K A, Batt A M. Zamia palm, a new host of cycad borer, *Chilades pandava* Horsfield (Lepidoptera: Lycaenidae) in Egypt. Minufiya Journal of Agricultural Research, 2016, 41(1): 195-201.
- [12] Hirai N. Records of the cycad blue butterfly, Chilades pandava, in Honshu and Shikoku, Japan. YADORIGA, 2009, 2009(220): 2-19.
- [13] Takeuchi T. A new record of *Chilades pandava* (Horsfield) (Lepidoptera, Lycaenidae) from Korea. Transactions of the Lepidopterological Society of Japan, 2006, 57(4): 325-326.
- [14] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [15] 张华纬,赵健, 阎波杰, 邹杰, 李志鹏. 基于 Maxent 模型和 GIS 的马缨丹在中国的适生区预测. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1420-1427.
- [16] 王艳君,高泰,石娟.基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析.北京林业大学学报,2021,43(9):59-69.
- [17] 廖剑锋,易自力,李世成,肖亮.基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究.生态学报, 2020, 40(22): 8297-8305.
- [18] 刘洋,石娟. 气候变化背景下埃及吹绵蚧在中国的适生区预测. 植物保护, 2020, 46(1): 108-117.
- [19] 陈思明. 互花米草(Spartina alterniflora)在中国沿海的潜在分布及其对气候变化的响应. 生态与农村环境学报, 2021, 37(12): 1575-1585.
- [20] 肖麒,章梦婷,吴翼,丁晖,雷军成,朱善良,张振华,陈炼.基于生态位模型的外来入侵种克氏原螯虾在中国的适生区预测.应用生态 学报,2020,31(1):309-318.
- [21] 赵佳强,石娟.基于新型最大熵模型预测刺槐叶瘿蚊(双翅目:瘿蚊科)在中国的适生区.林业科学,2019,55(2):118-127.
- [22] 黄月英, 江凡. 福建省发现为害苏铁害虫——曲纹紫灰蝶. 华东昆虫学报, 2000, (1): 104-105.
- [23] 雷艳梅,黄锋.广西南宁苏铁曲纹紫灰蝶的发生及防治.广西热带农业,2007,(5):50-51.
- [24] 薛德乾. 苏铁的一种新害虫——曲纹紫灰蝶及其防治对策研究. 江西农业学报, 2007, 19(1): 60-61, 64-64.
- [25] 龙正权,伍春艳.曲纹紫灰蝶在铜仁的发生及防治.安徽农业科学,2007,35(34):11072-11073.
- [26] 李梅辉,曹俐,李永坚.广东省近年危险性害虫的发生及传播.广东农业科学,2000,(6):38-40.
- [27] 余志祥,邓晓燕,杨永琼,潘晶,马书云,粱丽,郭晓祥,李贵能,王永刚.四川攀枝花苏铁国家级自然保护区曲纹紫灰蝶的危害及防治研究.现代农业科技,2017,(12):117-118,121-121.
- [28] 高泽正, 伍有声, 韦强, 吴伟坚. 苏铁曲纹紫灰蝶在广州严重发生的原因及防治对策. 中国植保导刊, 2005, 25(9): 24-25.
- [29] 严家声,魏开炬.曲纹紫灰蝶的发生与综合治理措施.特种经济动植物,2010,13(5):53-54.
- [30] 郭瑛, 胡奇勇. 曲纹紫灰蝶形态与习性的初步观察. 福建果树, 2001, (2): 64-65.
- [31] 刘光华,陆永跃,甘泳红,曾玲,傅明朗,潘倩.曲纹紫灰蝶的发生为害及生物学研究.仲恺农业技术学院学报,2003,16(4):34-37.
- [32] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525.
- [33] Anderson R P. Harnessing the world's biodiversity data: promise and peril in ecological niche modeling of species distributions. Annals of the New York Academy of Sciences, 2012, 1260(1): 66-80.
- [34] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [35] 朱耿平, 范靖宇, 王梦琳, 陈敏, 乔慧捷. ROC 曲线形状在生态位模型评价中的重要性——以美国白蛾为例. 生物安全学报, 2017, 26 (3): 184-190.
- [36] Muscarella R, Galante P J, Soley-Guardia M, Boria R A, Kass J M, Uriarte M, Anderson R P. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for MAXENT ecological niche models. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5 (11): 1198-1205.
- [37] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. Ecography, 2017, 40 (7): 887-893.
- [38] Liu Y, Shi J. Predicting the potential global geographical distribution of two Icerya species under climate change. Forests, 2020, 11(6): 684.
- [39] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Peterson A T. Original article: predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102-117.
- [40] Shcheglovitova M, Anderson R P. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. Ecological Modelling, 2013, 269: 9-17.
- [41] 罗佳,林丽玲.苏铁的危险性害虫——曲纹紫灰蝶.亚热带植物科学,2001,30(3):60-61.
- [42] 姚京都.苏铁虫害——苏铁灰蝶的危害及防治. 广东园林, 2002, (4): 45-46.