西北植物学报，2023，43(4)：0708－0716
Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.

doi：10.7606/j.issn.1000-4025.2023.04.0708 http://xbzwxb.alljournal.net

气候变化下青藏高原全缘叶绿绒蒿的潜在分布变迁

郭雯雯，王文婷*

（西北民族大学 数学与计算机科学学院，兰州 730030）

摘　要：青藏高原物种丰富且属于气候变化敏感区，研究气候变化对青藏高原物种的潜在分布影响，对于该区域物种多样性保护具有重要意义。该研究以一级濒危藏药植物全缘叶绿绒蒿为研究对象，利用加权平均算法（weighted average algorithm，WAA）构建随机森林（RF）、灵活判别分析（FDA）及人工神经网络（ANN）的集成模型，同时对比分析了 WAA 模型和不同生态位模型的预测精度。最后利用 WAA 模型预测了全缘叶绿绒蒿在当前（1970～2000 年平均）和未来（2041～2060 年平均）气候情景下的潜在分布，其中未来气候考虑了 2 种“共享社会经济路径”（SSP2-45 和 SSP5-85）。结果显示：（1）WAA 模型的预测表明，基于 RF、FDA 和 ANN 的集成模型的 AUC 值为 0.926，在 AUC 值最高 RF 模型的基础上提高了 3%，在 FDA 和 ANN 模型的 AUC 值的基础上均提高了 5%。（2）WAA 模型确定，全缘叶绿绒蒿的潜在分布对年降水量和最暖季降水量最为敏感，其次是最热月份最高气温，同时对最湿月份降水量以及等温性表现出较低的敏感性。（3）当前全缘叶绿绒蒿潜在分布区主要分布在甘肃西南部、青海东部至南部、四川西部和西北部、云南西北部和东北部、西藏东部。（4）未来气候变化下青藏高原全缘叶绿绒蒿潜在分布预测表明，在 2050 年 SSP2-45 情景下，全缘叶绿绒蒿的潜在分布区大小与当前潜在分布区大小基本相同，但整体向西北方向高海拔高纬度地区迁移；在 SSP5-85 情景下，全缘叶绿绒蒿的潜在分布区明显收缩，且向西北高纬度高海拔地区延伸的趋势更加明显。

关键词：RF 模型；FDA 模型；ANN 模型；加权平均算法；气候变化；全缘叶绿绒蒿

中图分类号：Q948.112；Q949.748.1　　**文献标志码**：A

Potential Distribution of *Meconopsis integrifolia* on the Qinghai-Tibet Plateau under Climate Change

GUO Wenwen，WANG Wenting*

（School of Mathematics and Computer Science，Northwest Minzu University，Lanzhou 730030，China）

Abstract：Qinghai-Tibet Plateau is rich in species，and belongs to the climate change sensitive area. Studying the impact of climate change on the potential distribution of species on Qinghai-Tibet Plateau is of great significance for the biodiversity conservation. In this study，we selected the endangered Tibetan medicinal plant *Meconopsis integrifolia* as the research object，and constructed an ensemble model of Random Forest（RF），Flexible Discriminant Analysis（FDA）and Artificial Neural Network（ANN）using the weighted average algorithm（WAA）. At the same time，we also compared the prediction accuracy of the

收稿日期：2022-03-15；**修改稿收到日期**：2023-04-07

基金项目：国家自然科学基金（31560127）；甘肃省自然科学基金（21JR11RA023）；西北民族大学中央高校基本科研业务费（31920220061）；西北民族大学智能计算与动力系统分析及其应用创新团队资助项目

作者简介：郭雯雯（1997－），女，硕士生研究生，主要从事数学生态研究。E-mail：xiaowzye@163.com

＊通信作者：王文婷，副教授，硕士导师，研究方向为生态数据挖掘。E-mail：iamwwt1983@163.com

WAA model and different ecological niche models. Finally, we used the WAA model to predict the potential distributions of *M. integrifolia* under current (averaged 1970－2000) and future (averaged 2041－2060) climate scenarios. For the uncertainty of future climate, we chose two "Shared Socioeconomic Pathways" (SSP2-45 and SSP5-85). The results showed that: (1) the WAA model predictions showed that the AUC of the ensemble model based on RF, FDA and ANN was 0.926, which was 3% higher than that of the RF model with the highest AUC value, and 5% higher than the AUC value for both FDA and ANN models. (2) The WAA model determined that the potential distribution of *M. integrifolia* was most sensitive to annual precipitation and precipitation of warmest quarter, followed by max temperature of warmest month, and showed lower sensitivity to precipitation of wettest month and isothermality. (3) The current potential distribution areas of *M. integrifolia* were mainly distributed in southwestern Gansu, eastern and southern Qinghai, western and northwestern Sichuan, northwestern and northeastern Yunnan, and eastern Tibet. (4) The prediction of potential distribution of *M. integrifolia* on the Qinghai-Tibet Plateau under future climate change showed that under the SSP2-45 scenario in 2050, the size of potential distribution of *M. integrifolia* was basically the same as that of current, but the potential distribution would spread to the high altitudes and latitudes in the northwest. However, under the SSP5-85 scenario, the size of potential distribution of *M. integrifolia* would shrink significantly, and the trend of spreading to the northwest high-altitude and -altitude areas was more obvious.

Key words: RF model; FDA model; ANN model; weighted average algorithm; climate change; *Meconopsis integrifolia*

气候变化对生物多样性具有深远的影响[1-3]。众多研究表明植物随着温度的升高将向高海拔和高纬度地区迁移[4-6]。例如，中国秤锤树[7]、刺梨[8]随着温度的上升均有向高纬度地区迁移的趋势。特别是高山植物对气候变化更为敏感[9]，气候变化下高山植物向高维度高海拔地区迁移将面临着"无路可逃"的困境[4,10]。但不是所有植物都如此，Zhao等[11]研究发现象牙参属植物在喜马拉雅山脉地区出现了从高海拔向低海拔的分化，发生了反方向的迁移。此外，还有研究表明气候变化导致物种分布范围的收缩或扩张[12]。例如，孟艺宏等[13]研究发现末次盛冰期以来，双花木属植物分布区面积收缩了45%，在未来高碳排放的气候场景下，双花木属植物潜在分布区将大面积收缩。而李垚等[14]研究发现未来气候变化下小叶栎的适生区有所扩张。因此，研究未来气候变化下物种的潜在分布变化及迁移方向对生物多样性保护具有重要的意义。

随着数字信息化的发展和计算机性能的提高，生态位模型(ecological niche models，ENM)广泛应用于全球气候变化对物种分布的影响[15-16]。生态位模型是在生态位保守性的假设下，利用物种的已知分布数据及其相关的环境变量，根据一定的算法推算物种的生态需求，将其运算结果投射至不同的空间和时间中去预测物种的潜在分布[17-20]。随着生态位理论逐步完善，机器学习和地理信息系统进一步强大生态位模型的模拟方法也层出不穷，如广义线性模型(generalize linear model，GLM)[21-22]、预设规则的遗传算法(genetic algorithm for rule-set production，GARP)[23]、最大熵(maximum entropy，MaxEnt)[22]、灵活判别分析(flexible discriminant analysis，FDA)[22]、人工神经网路(artificial neural network，ANN)[22,24]和随机森林(random forest，RF)[22,25]等已得到广泛应用。张海娟等[26]利用GARP和MaxEnt对薇甘菊在中国适生区进行预测，结果表明MaxEnt模型要优于GARP模型。由于模型自身具有不确定性，导致多种模型的结果差异比较大[27]，因此，生态位建模方法的选择是导致预测结果不确定性的主要因素[28]。曾有研究表明生态位模型的集成算法无论从理论还是实践上都较单一模型有更好的效果[29-30]。赵泽芳[28]研究发现应用集成模型对羌活适生区的预测结果要优于单一模型，且减少了单一模型预测的不确定性，提高了预测能力。近年来集成算法，如多个模型的推理和平均，被用于降低生态位模型结果的不确定性，并提高了生态位预测的可靠性[30-32]。

全缘叶绿绒蒿(*Meconopsis integrifolia*)属罂粟科绿绒蒿属，一年至多年生草本植物。全缘叶绿绒蒿生长于海拔2 700～5 100 m的灌木丛或者树林下，不仅分布在云南西北部碧江、丽江以北，还分布在甘肃西南部、青海东部至南部、四川西部和西北部、云南西北部和东北部、西藏东部[33-34]。全缘叶绿绒蒿被列为一级濒危藏药[35]，它具有抗疲劳、抗氧化、止痛和保

肝作用,还可以治疗皮肤病[36-37]。除具有药用价值外,全缘叶绿绒蒿还因其花色泽艳丽具有较高的观赏性,是一种具有较高经济价值的高山植物[38]。

本研究以全缘叶绿绒蒿为研究对象,首先应用随机森林、灵活判别分析和人工神经网络 3 种生态位模型进行建模,对比分析了不同生态位模型结果的预测精度,并通过加权平均算法集成预测了全缘叶绿绒蒿在当前气候情景和未来(21 世纪 50 年代)气候情景下的潜在分布区,以期降低模型不同导致预测结果的不确定性,最终为物种应对气候变化的保育策略提供更可靠的参考信息。对于未来气候的不确定性,本研究考虑了两种“共享社会经济途径”(shared socio-economic pathways, SSPs)下的未来气候情景[39-40]:中间路径 SSP2-45 和传统化石燃料为主的路径 SSP5-85,其中 SSP 后的数字代表把二氧化碳的增温效果换算为同等瓦数的辐射增量。SSP2-45 是 CMIP5 中 RCP4.5 的更新版本,属于中等社会脆弱性和中等辐射强迫情景,在 2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W/m^2。SSP5-85 是 CMIP5 中 RCP8.5 的更新版本,至 2100 年排放高至 8.5 W/m^2 的路径。

1 材料和方法

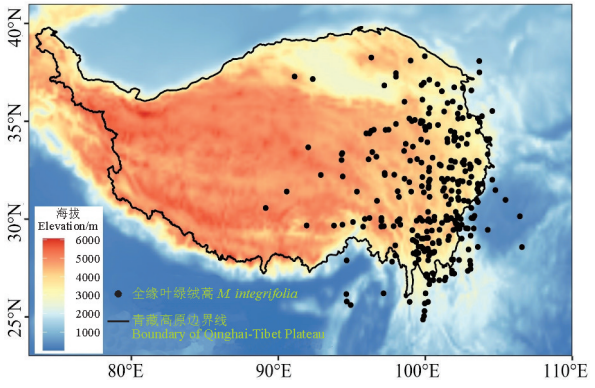
1.1 数据获取

本研究通过中国数字植物标本馆(https://www.cvh.ac.cn/)和全球生物多样性信息网络(https://www.gbif.org/es/)收集的发生青藏高原数据总共 741 条记录,首先,利用 R 软件包“CoordinateCleaner”去除信息不完整的、重复的及城市中心的样本记录。避免样本数据的空间自相关造成过拟合问题,采用最近邻体距离法筛选样本数据,即在 2.5 km 内只保留 1 个点,最后筛选出 283 个全缘叶绿绒蒿的样本数据(图 1)用于模型的构建。样本记录主要分布在青藏高原的中南和东南部(24°～39°N,86°～108°E),将此区域向外延伸 2°作为研究区,即研究区范围为 22°～41°N,84°～110°E。

1.2 气候数据的获取和筛选

首先从 WorldClim 数据库(https://worldclim.org/)中下载空间分辨率为 2.5′的当前(1970－2000 年的平均值)和 21 世纪 50 年代(2041－2060 年平均值)气候数据。针对未来气候的不确定性,笔者采用了全球气候模型(GCMs)中 BCC-CSM2-MR 模式下 2050 年的气候数据。此外,未来气候数据包括辐射强迫分别为 4.5 W/m^2 和 8.5 W/m^2 的 2 种温室气体排放情景,其“共享社会经济路径”(SSPs)分别为 SSP2-45 和 SSP5-85。当前和未来时期所使用的气候数据包括了与降水量和温度相关的 19 个变量(表 1)。

为了降低气候因子间的相关性,首先将样本点对应的 19 个的气候因子数据导入 R 软件中;接着,利用方差膨胀系数(VIF)对 19 个气候因子进行多重



图中黑点代表全缘叶绿绒蒿的样本记录点,青藏高原边界限数据源于全球变化科学研究数据出版系统(http://www.geodoi.ac.cn/)

图 1 青藏高原全缘叶绿绒蒿样本点的分布

The black dots in the figure represent the sample record points of *M. integrifolia*. The polygon data of the Qinghai-Tibet Plateau is obtained through the Global Change Research Data Publishing & Repository(http://www.geodoi.ac.cn/)

Fig. 1 The distribution of sample points of *M. integrifolia* on the Qinghai-Tibet Plateau

表 1 19 个生物气候变量的含义

Table 1 Meaning of 19 bioclimatic variables

符号 Symbol	气候变量 Bioclimatic variable
bio01	年平均气温 Annual mean temperature/℃
bio02	月平均气温范围 Mean monthly temperature range/℃
bio03	等温性 Isothermality
bio04	气温的季节性 Temperature seasonality
bio05	最热月份最高气温 Max temperature of warmest month/℃
bio06	最冷月份最低气温 Min temperature of coldest month/℃
bio07	年气温变化范围 Annual temperature range/℃
bio08	最湿季平均气温 Mean temperature of wettest quarter/℃
bio09	最干季平均气温 Mean temperature of driest quarter/℃
bio10	最暖季平均气温 Mean temperature of warmest quarter/℃
bio11	最冷季平均气温 Mean temperature of coldest quarter/℃
bio12	年降水量 Annual precipitation/mm
bio13	最湿月份降水量 Precipitation of wettest month/mm
bio14	最干月份降水量 Precipitation of driest month/mm
bio15	降水的季节性 Precipitation seasonality
bio16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter/mm
bio17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter/mm
bio18	最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter/mm
bio19	最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter/mm

共线性检查，然后逐步剔除多重共线性高的变量；最后筛选出来 5 个变量用于模型的构建（表 1），这些变量分别是等温性（bio03）、最热月份最高温度（bio05）、最湿月份降水量（bio13）、最干月份降水量（bio14）和最暖季降水量（bio18）。

1.3　生态位模型与检验

1.3.1　随机森林（random forest，RF）　随机森林（RF）是通过自助法（bootstrap）重采样技术，从原始训练集有放回的重复抽取样本作为树预测器的训练样本集，并采用集成学习算法对树预测器进行组合[41-42]。RF 在数据集上表现良好，其随机性体现在每棵树的训练样本是随机的，树中每个节点的分裂属性集合也是随机选择确定的，这两个随机性的引入，使得它不会陷入过拟合[22,28]。

1.3.2　灵活判别分析（flexible discriminant analysis，FDA）　灵活判别分析（FDA）是一种广义线性判别分析，在数据处理中，不同于其他线性判别分析使用的线性参数算法，FDA 采用更加灵活的非参数算法进行多元素的分类，在进行生态位建模时，FDA 假设参与构建模型的气候因子数据（预测变量）符合高斯分布[22,28]。与传统的线性判别分析相比，FDA 可以处理不同标准类别的数据。

1.3.3　人工神经网络（artificial neural network，ANN）　人工神经网络（ANN）是传统的机器学习模型，通过模拟生物神经系统运作原理，构建大量的神经元（节点和刺激函数），并利用正向和反向传递误差来调整节点间的权重，使得模拟的结果更加逼近真实值。ANN 具有非线性特征，可以处理因变量为任意分布的建模问题，同时具有自适应、自学习能力，能够产生精度较高的模拟结果，避免过拟合的问题[22,28,43]。作为一种机器学习算法，ANN 被越来越多地用于研究生态问题[19,44]。

1.3.4　模型检验　物种的分布状态分为存在和不存在两种情况，一般用数字“0”表示不存在，“1”表示存在。因此预测结果就变成了[0,1]之间连续变化的值，数值越高就代表物种适应度越高，该区域越有可能存在此物种，数值越低，则正好相反。模型的评价指标采用受试者工作曲线（receiver operating characteristic，ROC）下的面积（AUC），其取值范围为[0,1]。AUC 值越高，表示模型判断力越强，结果可信度越高。AUC 值在 0.5～0.6 为失败，0.6～0.7 为较差，0.7～0.8 为一般，0.8～0.9 为好，0.9～1.0 为非常好[29]。

1.4　加权平均算法（weighted average algorithm，WAA）

为了降低由于模型选择导致的物种分布预测结果的不确定性，本研究采用加权平均算法实现生态位模型的集成预测，具体步骤如下[22,28]：

Step1：采用 R 软件包 Biomod2 中 randomForest 函数实现 RF 算法，其中分类树的数目设置为 1 000，节点大小为默认。由于 FDA 是在通过 mda 包中 fda 函数实现的，只需指定 MARS 作为拟合方法，不需其他参数。对于 ANN 算法采用 R 软件包 nnet 中 nnet 函数实现，其中设置了 20 个隐藏层和 1 个 5e-4 值。

Step2：采用人工受试者工作曲线得到 3 种单一模型的评价指标，即 AUC 值；

Step3：首先对 3 种单一模型的 AUC 值进行归一化处理，然后计算该模型在组合模型中所占的权重，权重计算公式为：

$$w_i = r_i / \sum_{i=1}^{3} r_i, i = 1,2,3$$

式中：w_i 为第 i 个模型的权重；r_i 为第 i 个模型的 AUC 值。

物种的潜在分布概率的集成模型为：

$$\mathrm{mod} = \sum_{i=1}^{3} (w_i \cdot x_i), i = 1,2,3$$

式中：w_i 为第 i 个模型的权重；x_i 为第 i 个模型的预测概率。

1.5　当前和未来潜在分布的预测

首先，按照存在和缺失数据为 1∶3 的比例在研究区随机生成全缘叶绿绒蒿的伪缺失数据[28]；接着，提取存在点和伪缺失点对应的气候因子数据，并将数据分为 75％的训练集和 25％的测试集；随后，分别训练和验证 RF、FDA 和 ANN 模型获得 AUC 值和物种潜在分布概率，并利用 AUC 值计算公式得到各模型的权重；最后，将 RF、FDA 和 ANN 模型的权重和预测概率代入集成模型公式得到 3 种模型加权平均算法的预测结果，并采用 R 软件中的 ROC 函数得到集成模型的 AUC 值。对未来两种气候情景下，利用加权平均算法进行预测，得到关于 SSP2-45 和 SSP5-85 情景下的潜在分布区分布。

1.6　未来气候变化下全缘叶绿绒蒿潜在分布的变化

首先，基于集成模型预测的预测值，通过 R 软件 ecospat 包中 ecospat. max. kappa 函数，并设置 0.01 增量计算最大 Kappa 值对应的阈值为 0.46。根据阈值将加权平均算法预测的当前气候场景下的物种潜在分布概率转化为 0 和 1 数据，其中大于 0.46 的值转化为 1，小于 0.46 的值转化为 0；对于加权平均算法预测的未来 SSP2-45 和 SSP5-85 两种气候情景下的物种潜在分布，按照相同阈值转化为

0 和 1 数据。最后将转化为 0 和 1 数据的当前(current)和未来(future)的物种分布按照[current+2·(future+1)]−2 计算,计算结果有 4 种情况:0 表示当前和未来都是缺失;1 表示未来气候变化下失去的分布;2 表示未来气候变化下将获得的分布;3 表示当前和未来气候变化下稳定的分布。

2 结果与分析

2.1 模型的精度检验与重要的气候变量分析

由表 2 可以看出,基于 bio03(等温性)、bio05(最热月份最高气温)、bio13(最湿月份降水量)、bio14(最干月份降水量)和 bio18(最暖季降水量)5 个气候变量构建的 RF、FDA 和 ANN 模型的 AUC 值都大于 0.85,预测结果准确性和可信度高。基于 RF、FDA 和 ANN 模型的加权平均算法的 AUC 值为 0.926,在 AUC 值最高 RF 模型基础上提高了 3%,在 FDA 和 ANN 模型的 AUC 值的基础上都提高了 5%。

结合图 2,并根据 RF、FDA 和 ANN 模型的 5 个气候变量重要性排名(表 3),利用各模型的权重值得出加权平均算法的 5 个气候变量对物种潜在分布区的影响,研究表明,降水对全缘叶绿绒蒿地理分布的影响远高于气温,全缘叶绿绒蒿对最暖季降水量最为敏感,其次是最热月份最高气温;同时全缘叶绿绒蒿对最湿月份降水量以及等温性表现出低敏感性。

表 2 3 种生态位模型及加权平均算法的 AUC 值

Table 2 AUC values of the three ecological models and the weighted average algorithm

模型 Model	人工受试者测试值 AUC
随机森林 RF	0.902
灵活判别分析 FDA	0.884
人工神经网络 ANN	0.886
加权平均算法 WAA	0.926

2.2 当前和未来气候变化下全缘叶绿绒蒿的潜在分布区变化

基于 3 种生态位模型(RF、FDA 和 ANN)的加权平均模型,预测了全缘叶绿绒蒿当前和未来 2 种气候情景下的潜在分布区范围。加权平均算法预测的结果显示,在当前气候环境下,全缘叶绿绒蒿的潜在分布区主要位于青藏高原东南部(图 3,A),高适生区主要位于云南西北部、甘肃、青海、西藏、四川盆地西部的横断山地区。全缘叶绿绒蒿当前的潜在分布范围基本上覆盖了实际样本分布,这表明采用加权平均模型预测全缘叶绿绒蒿的潜在分布具有较高的可靠性。与当前相比,未来气候情景下全缘叶绿绒蒿的潜在分布区分布范围总体呈现向高纬度地区和西部扩延的趋势(图 3,B、C;图 4)。这表明气候变暖对全缘叶绿绒蒿的分布具有一定负面影响。

未来气候 SSP2-45 和 SSP5-85 情景相比,全缘

表 3 5 个生物气候变量的重要性

Table 3 Importance of five bioclimatic variables

模型 Model	气候变量的重要性 Importance of climate variable				
	bio03	bio05	bio12	bio13	bio18
随机森林 RF	0.063	0.222	0.196	0.084	0.318
灵活判别分析 FDA	0.038	0.250	0.801	0.406	0.508
人工神经网络 ANN	0.101	0.721	0.565	0.063	0.631
加权平均算法 WAA	0.067	0.397	0.518	0.183	0.485

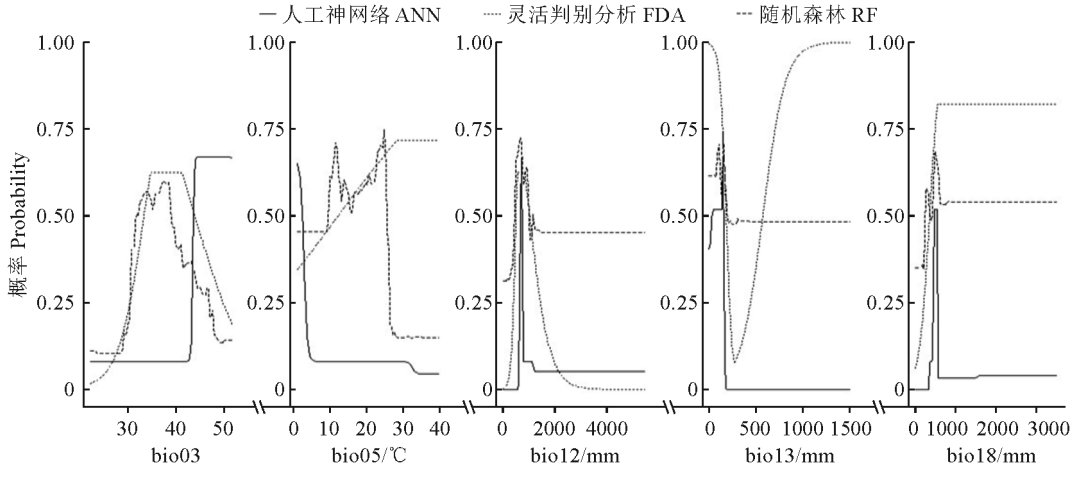
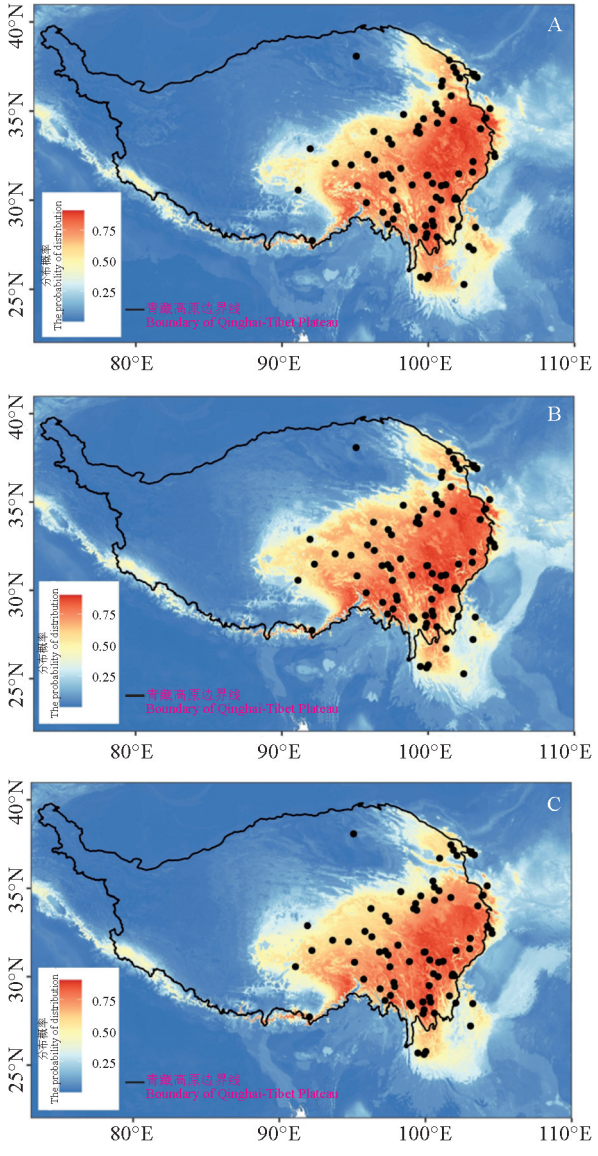


图 2 3 种生态位模型模拟青藏高原全缘叶绿绒蒿发生的概率随生物气候变量的变化

Fig. 2 Three ecological niche models simulate the probability of *M. integrifolia* occurrence as a function of bioclimatic variables on the Qinghai-Tibet Plateau

叶绿绒蒿潜在分布区从青藏高原及边界东南到西北呈现递增趋势，但 SSP5-85 情景下全缘叶绿绒蒿的高适生区明显收缩。SSP2-45 情景下的预测结果表明，未来全缘叶绿绒蒿潜在分布区的面积略有增加，增加区域主要在四川盆地西部的横断山脉地区；而高适生区将向高纬度地区迁移（图 3，B），且未来全缘叶绿绒蒿总体分布有向高纬度地区和西部迁移的趋势。在未来气候 SSP5-85 的影响下的预测结果（图 3，C）表明，全缘叶绿绒蒿潜在分布区的面积略有收缩，高适生区显著收缩（图 3，C 中红色区域），其中，在甘肃、青海的面积略有缩小。潜在分布区向高纬度地区和西部迁移（图 3，C 中黄色区域）面积略有增加。在未来气候 SSP5-85 的影响下全缘叶绿绒蒿总体分布明显收缩，并且总体向高纬度地区和西部迁移。



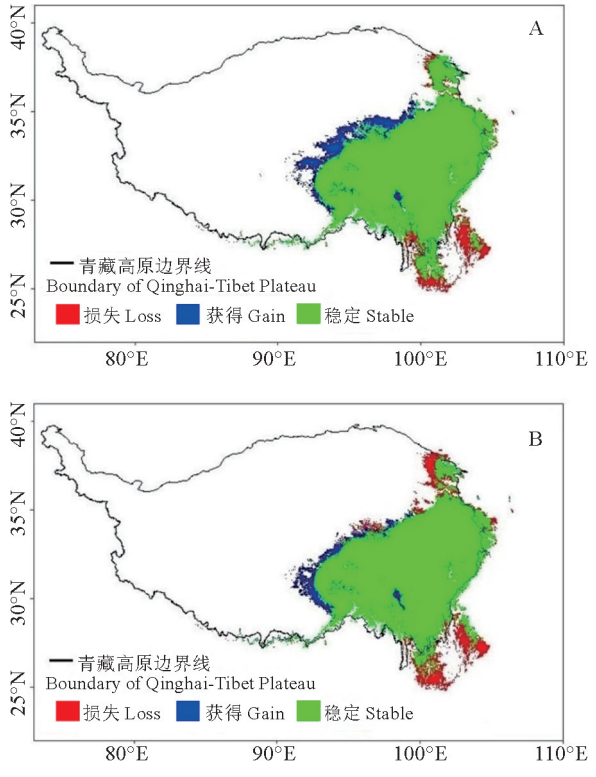
A. 当前气候下的潜在分布；B. SSP2-45 情景下的潜在分布；C. SSP5-85 情景下的潜在分布

图 3　当前和未来气候情景下青藏高原全缘叶绿绒蒿的潜在区分布

A. Potential distribution under current climate; B. Potential distribution under SSP2-45 scenario; C. Potential distribution under SSP5-85 scenario

Fig. 3　Potential distribution of *M. integrifolia* under current and future climate scenarios on the Qinghai-Tibet Plateau

未来 SSP2-45 气候情景下全缘叶绿绒蒿稳定的潜在分布区主要在青藏高原东南方向，分布范围较为集中，主要在云南西北部、甘肃、青海、西藏、四川盆地西部的横断山区等地区（图 4，A 中绿色区域）；新增的潜在分布区显著向西北方向延伸（图 4，A 中蓝色区域），而东南方向的潜在分布区发生了退化（图 4，A 中红色区域），其中新增的潜在分布区与失



A. 与当前相比 SSP2-45 情景下潜在分布区的变化；B. 与当前相比 SSP5-85 情景下潜在分布区的变化

图 4　未来气候变化下青藏高原全缘叶绿绒蒿的潜在分布区变化

A. Changes of potential distribution areas under the SSP2-45 scenario compared with the current; B. Changes of the potential distribution areas under the SSP5-85 scenarios compared with the current

Fig. 4　Changes of potential distribution of *M. integrifolia* areas under future climate change on the Qinghai-Tibet Plateau

去的区域基本持平。未来 SSP5-85 气候情景下全缘叶绿绒蒿稳定潜在分布区与 SSP2-45 气候情景下的分布基本相同（图 4,B 中绿色区域），获得的潜在分布区也显著向西北方向延伸（图 4,B 中蓝色区域），但与 SSP2-45 气候情景下相比其迁移的范围较小；相比未来 SSP2-45 气候情景下全缘叶绿绒蒿潜在分布区不仅东南方向发生了退化，还在最北部发生了退化（图 4,B 中红色区域），很明显失去的潜在分布区范围比得到的潜在分布区多，所以，在该情景下物种的潜在分布区范围总体缩小。

3 讨 论

研究基于 RF、FDA 和 ANN 构建了加权平均模型得到的全缘叶绿绒蒿潜在分布区的预测结果可靠，且精度较单一生态位模型有明显的提高。由于 RF、FDA 和 ANN 3 种生态位模型在其算法上存在差异，对于同一物种的分布预测，即使 3 种生态位模型的预测结果的统计学检验都令人满意，但是单一生态位模型预测结果表现出来的不确定性却无法避免[45-46]。而集成模型解决了这一问题，其优势之一就是避免对单一模型进行选择，从而消除（或减少）模型选择导致的结果偏差，并使所有参与建模的模型发挥自身的优势，进而提高集成模型的预测性能[28]。因此，基于多个单一模型进行集成建模将是未来物种分布预测的趋势之一。

物种对气候变化的响应通常为迁移到新的适生区、就地适应或者灭绝[47]。本研究结果表明全缘叶绿绒蒿的当前潜在分布区主要位于甘肃西南部、青海东部至南部、四川西部和西北部、云南西北部和东北部、西藏东部。未来气候变化下，其潜在分布区向西北方向延伸而东南部发生了退化。此结果与 He 等[48]利用 Maxent 预测全缘叶绿绒蒿对于未来气候变化的响应基本一致。未来气候变化下全缘叶绿绒蒿由青藏高原向西北方向延伸，与青藏高原地区的其他植被分布对气候变化的响应[49-50]一致。青藏高原地区地理环境独特，海拔从东向西逐渐升高，物种向高海拔和高纬度迁移的同时经度也会向西移动[49]。此外，气候变暖情景可能导致中高纬度地区降水强度和中低纬度地区干旱天数增加[51]，进而使得全缘叶绿绒蒿潜在适生区向高纬度地区迁移。在当前气候环境下，全缘叶绿绒蒿的适宜生境面积是有限的，随着气候变化带来的负面影响越来越多，全缘叶绿绒蒿的适宜生境会面临严峻的挑战。全缘叶绿绒蒿的很多适宜生境可能退化为较适宜生境或不适宜生境，但极少有不适宜生境发展为较适宜或适宜生境，而一些较适宜生境转化为适宜生境的情况偶有发生。其原因主要是，近年来气候变暖导致全国各地区极端高温指数显著增加，进而影响全缘叶绿绒蒿的分布[52]。

此外，全缘叶绿绒蒿在 SSP5-85 情景下潜在分布区的收缩面积明显高于 SSP2-45 情景下，与 He 等[48]研究中、高碳排放场景（即 RCP4.5 和 RCP8.5）下未来气候对全缘叶绿绒蒿潜在分布的影响一致。未来 SSP2-45 情景下，未来潜在分布区的面积与当前潜在分布区面积基本持平。相比未来 SSP2-45 气候情景，SSP5-85 情景下全缘叶绿绒蒿退化的潜在分布区比新增的多，潜在分布区范围总体缩小，这表明采用资源和能源密集型的生活方式将会增加全缘叶绿绒蒿的灭绝风险[53]。因此，加强节能减排，发展低碳能源和可再生能源，改善能源结构，是降低全球气候变化对人类社会影响的必要途径。当然，除了气候变化外，人为干扰也是影响植被地理分布的重要因素[8,54]。近年来由于对绿绒蒿属植物的过度开采，绿绒蒿整体种质资源不断缩减，大多数种已处于濒危状态。其中，全缘叶绿绒蒿由于其药用及观赏价值被大规模的采挖导致其迅速减少。为了更好地保护绿绒蒿属濒危植物，需慎重考察濒危原因，提出相应的保护对策[54]。对于全缘叶绿绒蒿的保护需要加大宣传力度，减少人为破坏，增强保护意识；此外，可以根据全缘叶绿绒蒿的潜在分布区变迁特征推动人工栽培，扩大全缘叶绿绒蒿种质资源分布。

参考文献：

[1] 王 绮，樊保国，赵光华. 气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测[J]. 生态学杂志，2020，**39**(11)：3 774-3 784.
WANG Q，FAN B G，ZHAO G H. Prediction of potential distribution area of *Corylus mandshurica* in China under climate change[J]. *Chinese Journal of Ecology*，2020，**39**(11)：3 774-3 784.

[2] WEISKOPF S R，RUBENSTEIN M A，CROZIER L G，*et al*. Climate change effects on biodiversity，ecosystems，ecosystem services，and natural resource management in the United States[J]. *Science of the Total Environment*，2020，**733**：137 782.

[3] HISANO M，SEARLE E B，CHEN H Y H. Biodiversity as a so-

lution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems[J]. *Biological Reviews*, 2018, **93**(1): 439-456.

[4] CHEN I C, HILL J K, OHLEMÜLLER R, *et al*. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. *Science*, 2011, **333**(6 045): 1 024-1 026.

[5] PAULI H, GOTTFRIED M, DULLINGER S, *et al*. Recent plant diversity changes on Europe's Mountain summits[J]. *Science*, 2012, **336**(6 079): 353-355.

[6] 阿　旺，张立荣，孙建平，等. 影响青藏高原高寒草地植物向高海拔或高纬度迁移的关键因素研究进展[J]. 生态学杂志，2021，**40**(5)：1 521-1 529.
AWANG, ZHANG L R, SUN J P, *et al*. Research advance on the key factors affecting the migration of alpine grassland plants to high altitude or high latitude in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(5): 1 521-1 529.

[7] 杨　腾，王世彤，魏新增，等. 中国特有属秤锤树属植物的潜在分布区预测[J]. 植物科学学报，2020，**38**(5)：627-635.
YANG T, WANG S T, WEI X Z, *et al*. Modeling potential distribution of an endangered genus(*Sinojackia*) endemic to China[J]. *Plant Science Journal*, 2020, **38**(5): 627-635.

[8] 樊　信，盘金文，何嵩涛. 气候变化背景下基于 MaxEnt 模型的刺梨潜在适生区分布预测[J]. 西北植物学报，2021，**41**(1)：159-167.
FAN X, PAN J W, HE S T. Prediction of the potential distribution of *Rosa roxburghii* under the background of climate change based on MaxEnt model[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(1): 159-167.

[9] VANNESTE T, MICHELSEN O, GRAAE B J, *et al*. Impact of climate change on alpine vegetation of mountain summits in Norway[J]. *Ecological Research*, 2017, **32**(4): 579-593.

[10] PAULI H, GOTTFRIED M, GRABHERR G. Effects of climate change on mountain ecosystems: Upward shifting of alpine plants[J]. *World Resource Review*, 1996, **8**(3): 382-390.

[11] ZHAO J L, PAUDEL B R, YU X Q, *et al*. Speciation along the elevation gradient: Divergence of *Roscoea* species within the south slope of the Himalayas[J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2021, **164**: 107 292.

[12] 周　润，慈秀芹，肖建华，等. 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估[J]. 生物多样性，2021，**29**(6)：697-711.
ZHOU R, CI X Q, XIAO J H, *et al*. Effects and conservation assessment of climate change on the dominant group: The genus *Cinnamomum* of subtropical evergreen broad-leaved forests[J]. *Biodiversity Science*, 2021, **29**(6): 697-711.

[13] 孟艺宏，徐　琎，姜小龙，等. 双花木属植物潜在分布区模拟与分析[J]. 生态学报，2019，**39**(8)：2 816-2 825.
MENG Y H, XU X, JIANG X L, *et al*. Potential distribution modeling and analysis of *Disanthus* Maxim.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2 816-2 825.

[14] 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)：1 164-1 178.
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]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(11): 1 164-1 178.

[15] ASASE A, PETERSON A T. Predicted impacts of global climate change on the geographic distribution of an invaluable African medicinal plant resource, *Alstonia boonei* De Wild [J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2019, **14**: 100 206.

[16] GILANI H, ARIF GOHEER M, AHMAD H, *et al*. Under predicted climate change: Distribution and ecological niche modelling of six native tree species in Gilgit-Baltistan, Pakistan[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **111**: 106 049.

[17] PETERSON A T. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling[J]. *The Condor*, 2001, **103**(3): 599-605.

[18] 朱耿平，刘国卿，卜文俊，等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性，2013，**21**(1)：90-98.
ZHU G P, LIU G Q, BU W J, *et al*. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation[J]. *Biodiversity Science*, 2013, **21**(1): 90-98.

[19] 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.
QIAO H J, HU J H, HUANG J H. Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models [J]. *Scientia Sinica* (Vitae), 2013, **43**(11): 915-927.

[20] SIMOES M, ROMERO-ALVAREZ D, NUÑEZ-PENICHET C, *et al*. General theory and good practices in ecological niche modeling: A basic guide[J]. *Biodiversity Informatics*, 2020, **15**(2): 67-68.

[21] Hounye Alphonse Houssou. 广义线性混合模型中的通信有效分布式统计计算[D]. 南昌：江西财经大学，2020.

[22] GUISAN A, THUILLER W, ZIMMERMANN N E. Habitat Suitability and Distribution Models, with Applications in R[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2017.

[23] RODRÍGUEZ M, ESCALANTE D M, PEREGRÍN A. Efficient distributed genetic algorithm for rule extraction[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, **11**(1): 733-743.

[24] 朱大奇，史　慧. 人工神经网络原理及应用[M]. 北京：科学出版社，2006.

[25] 方匡南，吴见彬，朱建平，等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛，2011，**26**(3)：32-38.
FANG K N, WU J B, ZHU J P, *et al*. A review of technologies on random forests[J]. *Statistics & Information Forum*, 2011, **26**(3): 32-38.

[26] 张海娟，陈　勇，黄烈健，等. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测[J]. 农业工程学报，2011，**27**(S1)：413-418.
ZHANG H J, CHEN Y, HUANG L J, *et al*. Predicting potential geographic distribution of *Mikania micrantha* planting based on ecological niche models in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(S1): 413-418.

[27] KOO K A, PARK S U, KONG W S, *et al*. Potential climate change effects on tree distributions in the Korean Peninsula: Understanding model & climate uncertainties[J]. *Ecological Modelling*, 2017, **353**: 17-27.

[28] 赵泽芳. 气候变化下物种分布模型建构与模型比较:以羌活为例[D]. 西安:陕西师范大学, 2018.

[29] ARAUJO M B, PEARSON R G, THUILLER W, *et al*. Validation of species-climate impact models under climate change[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(9): 1 504-1 513.

[30] DINIZ-FILHO J A F, MAURICIO BINI L, FERNANDO RANGEL T, *et al*. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change[J]. *Ecography*, 2009, **32**(6): 897-906.

[31] WENGER S J, SOM N A, DAUWALTER D C, *et al*. Probabilistic accounting of uncertainty in forecasts of species distributions under climate change[J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(11): 3 343-3 354.

[32] 沈江明, 雒 腾, 桂贝贝, 等. 基于分类问题的选择性集成算法研究[J]. 中国新通信, 2020, **22**(14): 7-8.
SHEN J M, LUO T, GUI B B, *et al*. Research on selective ensemble algorithm based on classification problem[J]. *China New Telecommunications*, 2020, **22**(14): 7-8.

[33] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草 8[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1999.

[34] 大丹增. 中国藏药材大全[M]. 北京:中国藏学出版社, 2016: 409.

[35] 拓广辉, 唐 楠, 唐道城. 青海东南部绿绒蒿叶片表观特征与海拔的相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(2): 40-42.
TUO G H, TANG N, TANG D C. Correlation analysis on leaf characters of *Meconopsis* genus and altitude in the southeast region of Qinghai Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(2): 40-42.

[36] 唐 楠, 李苗苗, 唐道城. 青藏高原不同海拔高度下全缘叶绿绒蒿叶表皮特征研究[J]. 植物研究, 2019, **39**(2): 161-168.
TANG N, LI M M, TANG D C. Characteristics of leaf epidermis of *Meconopsis integrifolia* under different altitudes in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2019, **39**(2): 161-168.

[37] 赵 凤, 张和新歌, 白睿峰, 等. 藏药多刺绿绒蒿的化学和药理学研究进展[J]. 中国中药杂志, 2017, **42**(19): 3 676-3 683.
ZHAO F, ZHANG H, BAI R F, *et al*. Advance of a representative traditional Tibetan medicine *Meconopsis horridula* on its phytochemical and pharmacological aspects[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2017, **42**(19): 3 676-3 683.

[38] 喻舞阳. 藏东南两种绿绒蒿幼苗的生态适应性及人工栽培技术研究[D]. 拉萨:西藏大学, 2021.

[39] VAN VUUREN D P, CARTER T R. Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: Reconciling the new with the old[J]. *Climatic Change*, 2014, **122**(3): 415-429.

[40] MEINSHAUSEN M, NICHOLLS Z R J, LEWIS J, *et al*. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, **13**(8): 3 571-3 605.

[41] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.

[42] TARROSO P, CARVALHO S B, BRITO J C. Simapse - simulation maps for ecological niche modelling[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, **3**(5): 787-791.

[43] 桑满杰. 环境变量对物种分布模型的影响与评价:以山茱萸潜在地理分布预测为例[D]. 西安:陕西师范大学, 2015.

[44] VENABLES W N, RIPLEY B D. Random and Mixed Effects [M]//Modern applied statistics with S. New York, NY: Springer New York, 2002: 271-300.

[45] THUILLER W. BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(10): 1 353-1 362.

[46] CHRISTMAS M J, BREED M F, LOWE A J. Constraints to and conservation implications for climate change adaptation in plants[J]. *Conservation Genetics*, 2016, **17**(2): 305-320.

[47] LIANG Q L, XU X T, MAO K S, *et al*. Shifts in plant distributions in response to climate warming in a biodiversity hotspot, the Hengduan Mountains[J]. *Journal of Biogeography*, 2018, **45**(6): 1 334-1 344.

[48] HE X, BURGESS K S, YANG X F, *et al*. Upward elevation and northwest range shifts for alpine *Meconopsis* species in the Himalaya-Hengduan Mountains region[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, **9**(7): 4 055-4 064.

[49] YOU J L, QIN X P, RANJITKAR S, *et al*. Response to climate change of montane herbaceous plants in the genus *Rhodiola* predicted by ecological niche modelling[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 5 879.

[50] XU C G, MCDOWELL N G, FISHER R A, *et al*. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2019, **9**(12): 948-953.

[51] 赵宗慈, 罗 勇, 江 滢, 等. 全球和中国降水、旱涝变化的检测评估[J]. 科技导报, 2008, **26**(6): 28-33.
ZHAO Z C, LUO Y, JIANG Y, *et al*. Assessment and prediction of precipitation and droughts/floods changes over the world and in China[J]. *Science & Technology Review*, 2008, **26**(6): 28-33.

[52] VISCONTI P, BAKKENES M, BAISERO D, *et al*. Projecting global biodiversity indicators under future development scenarios[J]. *Conservation Letters*, 2016, **9**(1): 5-13.

[53] XU D P, ZHUO Z H, WANG R L, *et al*. Modeling the distribution of *Zanthoxylum armatum* in China with MaxEnt modeling [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, **19**: e00691.

[54] 张光富, 熊天石, 孙 婷, 等. 江苏珍稀濒危植物的多样性、分布及保护[J]. 生物多样性, 2022, **30**(2): 31-40.
ZHANG G F, XIONG T S, SUN T, *et al*. Diversity, distribution, and conservation of rare and endangered plant species in Jiangsu Province[J]. *Biodiversity Science*, 2022, **30**(2): 31-40.

(编辑:潘新社)