

DOI: 10.5846/stxb201403230523

沈阳,于晶,郭水良.不同气候变化情境下中国木灵藓属和蓑藓属植物的潜在分布格局.生态学报,2015,35(19): - .

Shen Y, Yu J, Guo S L. *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): - .

# 不同气候变化情境下中国木灵藓属和蓑藓属植物的潜在分布格局

沈 阳, 于 晶, 郭水良\*

上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234

**摘要:** 蓑藓属 (*Macromitrium*) 和木灵藓属 (*Orthotrichum*) 是木灵藓科 (Orthotrichaceae) 的两个最大的属, 前者呈现泛热带分布式样, 后者呈偏温带性分布式样。本文应用当前和基于 RCP4.5 (Medium-Low Representative Concentration Pathways) 二氧化碳排放情景下 2050 和 2070 的 11 个生物气候变量, 以及木灵藓属 (*Orthotrichum*) 66 个、蓑藓属 (*Macromitrium*) 131 个国内分布记录, 应用最大熵模型 (MaxEnt), 预测了气候变暖背景下这两属植物在我国 38 个自然保护区潜在分布范围的变化。11 个生物气候变量包括昼夜温差月均值、年温度变化范围、温度季节变化、最热月份最高温、最干季度平均温度和最冷季度平均温度、最湿月份雨量、最干月份雨量、雨量变化方差和最暖季度平均雨量。选择了 10% 的遗漏错误对应的累积值作为分布预测阈值, 为了更好地展示气候变化下这两个属的潜在分布区变化, 选择了我国境内的 38 个自然保护区并计算了不同气候条件下两种藓类植物属在这些自然保护区的综合气候适应指数。38 个自然保护区包括福建武夷山、甘肃祁连山、广东南岭、广西花坪、广西十万大山、贵州梵净山、贵州雷公山、海南尖峰岭、河北五台山、河南鸡公山、河南小秦岭、湖北神农架、湖北星斗山、吉林长白山、江西庐山、辽宁白石砬子、辽宁医巫闾山、内蒙古大黑山、宁夏贺兰山、青海三江源、山东云台山、山西历山、山西芦芽山、陕西佛坪、陕西太白山、四川贡嘎山、四川卧龙、云南哀牢山、云南大围山、云南纳板河、浙江凤阳山、浙江古田山、浙江九龙山、浙江普陀山、浙江清凉峰、浙江天目山、浙江乌岩岭和重庆大巴山。结果表明, 随着气候变暖, 蓑藓属和木灵藓属在我国的适生面积都将减少, 蓑藓属植物在我国的潜在分布区面积从当前的 31.5% 下降到 12.23%, 木灵藓属的从当前的 65.81% 下降到 44.94%, 气候变化对蓑藓属植物分布的影响要大于木灵藓属。对于蓑藓属植物, 当前气候条件下的 38 个自然保护区中, 除了宁夏贺兰山和甘肃祁连山外, 其他的 36 个保护区都有适合于蓑藓属植物分布的气候条件。到了 2070, 河南鸡公山、山东云台山、浙江普陀山、浙江九龙山、浙江古田山、内蒙古大黑山、山西芦芽山、江西庐山、辽宁医巫闾山、广西花坪、辽宁白石砬子、河北五台山、山西历山、河南小秦岭、陕西佛坪、吉林长白山、贵州梵净山、贵州雷公山和福建武夷山这 19 个自然保护区不再或几乎不再适合于蓑藓属的分布。对于木灵藓属植物, 在当前的气候条件下, 38 个自然保护区中, 除了海南尖峰岭保护区, 其余的 37 个保护区均处于木灵藓属植物潜在分布范围之内。与当前气候条件相比, 2070 年 38 个保护区的气候条件均变得不利于木灵藓属分布, 其中广西花坪、江西庐山、云南纳板河、广西十万大山、河南鸡公山、山东云台山、浙江普陀山、浙江天目山、浙江古田山、浙江九龙山、福建武夷山、贵州梵净山、辽宁医巫闾山、河南小秦岭和陕西佛坪等 15 个保护区已不在木灵藓属的潜在分布范围。

**关键词:** 蓑藓属; 木灵藓属; MaxEnt; 气候变暖; 地理分布; 预测

## *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China

SHEN Yang, YU Jing, GUO Shuiliang

College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

**基金项目:** 国家自然科学基金 (31370233, 30970184), 上海市科委重点项目 (12490502700) 和 Bilateral cooperation project of University of Ostrava and Ostrava town, Czech republic (Taxonomical revision of Chinese *Orthotrichum*, no: 00955/RRC/2015)

收稿日期: 2014-03-23; 修订日期: 2014-11-26

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

**Abstract:** *Macromitrium* and *Orthotrichum* are two largest genera in the Orthotrichaceae (Bryopsida) family. *Macromitrium* are distributed across tropical zones, while *Orthotrichum* are distributed throughout temperate zones. Based on eleven bioclimatic variables modeled under recent (1950—2000), 2050, and 2070 RCP45CO<sub>2</sub> emission scenarios, 66 geographical records of *Orthotrichum*, and 131 records of *Macromitrium* in China, this paper used the algorithm of maximum entropy (Maxent) to predict the potential Chinese distributions of these two genera in 2050 and 2070. The eleven bioclimatic variables are: mean diurnal temperature range; temperature seasonality; annual temperature range; the highest temperature of the warmest month; mean temperatures of the driest quarter and coldest quarter; precipitations of the wettest month, driest month, warmest quarter, and coldest quarter; and precipitation seasonality. Thirty-eight nature reserves were selected and an integrated climate suitability index was calculated for each of them under different climate conditions. These 38 reserves are: Wuyishan (Fujian); Qilianshan (Gansu); Nanling (Guangdong); Huaping and Shiwandashan (Guangxi); Fanjingshan and Leigongshan (Guizhou); Jianfengling (Hainan); Wutaishan (Hebei); Jigongshan and Xiaoqinling (Henan); Shennongjia and Xingdoushan (Hubei); Changbaishan (Jilin); Lushan (Jiangxi); Baishilizi and Yiwulvshan (Liaoning); Daheishan (Inner Mongolia); Helanshan (Ningxia); Sanjiangyuan (Qinghai); Yuntaishan (Shandong); Lishan, Luyashan, Foping, and Taibaishan (Shaanxi); Gonggashan and Wolong (Sichuan); Ailaoshan, Daweishan, and Nabanhe (Yunnan); Fengyangshan, Gutianshan, Jiulongshan, Putuoshan, Qingliangfeng, Xitianmushan, and Wuyanling (Zhejiang); and Dabashan (Chongqing). The corresponding cumulative value for an omission error of 10% was selected as a distribution threshold. The primary results were: (1) The suitable bioclimatic habitats for *Macromitrium* and *Orthotrichum* would shrink considerably with predicted climate warming. The potential distribution ranges for *Macromitrium* and *Orthotrichum* in China would decline by 31.5% and 65.81% under the recent climatic condition by 12.23% and 44.94% in 2070, respectively. The negative effects of climatic warming on the potential distribution would be greater for *Macromitrium* than for *Orthotrichum*; (2) All of the nature reserves, except for Helanshan and Qilianshan, had suitable niches for *Macromitrium* under the recent climatic scenario. Under the 2070 predicted climate scenario, the potential distribution of *Macromitrium* would not include Jigongshan, Yuntaishan, Putuoshan, Jiulongshan, Gutianshan, Daheishan, Luyashan, Lushan, Yiwulvshan, Huaping, Baishilazi, Wutai, Lishan, Xiaoqinling, Foping, Changbaishan, Fanjingshan, Leigongshan, and Wuyishan (half of the 38 nature reserves in this study); and (3) All of the nature Reserves, except Jianfengling, had suitable niches for *Orthotrichum* under the recent climate scenario. By 2070, the weather adaptation indices for *Orthotrichum* in all of the 38 reserves would be lower than those under the current conditions. According to our predictions for 2070, *Orthotrichum* would be excluded from the reserves in Huaping, Lushan, Shiwandashan, Jigongshan, Taishan, Putuoshan, Xitianmushan, Gutianshan, Jiulongshan, Wuyishan, Fanjingshan, Yiwulvshan, Xiaoqinlingshan, and Foping.

**Key Words:** *Macromitrium*; *Orthotrichum*; Maxent; Climate warming; Geographical distribution; Prediction

全球气候变暖将严重影响物种的生理生态特性和地理分布,多数物种地理分布格局将发生深刻地变化<sup>[1]</sup>。气候变暖条件下,欧洲西南部比利牛斯山脉的高山和亚高山植被随着 21 世纪气候的变暖其潜在生境将强烈地减少<sup>[2]</sup>。Lyons 等研究了气候变暖对美国威斯康新溪流中 50 种鱼类分布的影响,随着气候变暖,所研究的 3 种冷水鱼类、16 种凉水鱼类和 4 种暖水鱼类的分布区将缩小,另外有 4 种暖水鱼类的分布区维持不变,其余的 23 种暖水鱼类的分布区将扩大<sup>[3]</sup>。Hagen 等研究发现,气候变暖将使喜冷性蛾类趋于分布于更高的海拔<sup>[4]</sup>。

随着气候变化问题的加剧,人们也开始应用生物分布模型,结合地理信息系统来预测气候变化下生物分布区变化<sup>[5]</sup>,其中最大熵模型(最 Maximum Entropy Model,简称 Maxent)应用得非常广泛。例如,李明阳等预测了气候变暖情况下外来有害生物美国南方松大小蠹在气候变化下的生境变化<sup>[1]</sup>。于晶等<sup>[6]</sup>和麻亚鸿等<sup>[7]</sup>

用这一方法来预测部分苔藓植物的潜在分布区,胡理乐等应用运用 Maxent 软件,基于 21 个环境因子,预测了不同气候变化情景下 21 世纪 50 和 80 年代中国五味子分布范围<sup>[8]</sup>。Kumar 基于 19 个生物气候变量,应用 MaxEnt 软件预测发现,喜马拉雅锡金地区杜鹃花属植物在气候变暖条件下的分布区会剧烈地收缩<sup>[9]</sup>。

苔藓植物结构简单,表面积大,是变水植物,对温度和降水的变化的响应更为敏感<sup>[10-11]</sup>,全球气候的变化肯定会影响到苔藓植物的分布格局<sup>[12]</sup>。藓属(*Macromitrium*)和木灵藓属(*Orthotrichum*)是藓类植物中的两个大属<sup>[13-15]</sup>,多数是树附生类群,其中藓属植物具有泛热带分布特点,木灵藓属有偏温带的分布式样<sup>[14]</sup>。麻亚鸿等基于这两个属在我国当前的地理分布数据,应用 MaxEnt 和地理信息系统,预测了当前气候条件下两属植物的潜在分布范围<sup>[7]</sup>。

本文的目的是基于当前气候数据和 2050 和 2070 的预测气候数据,应用 MaxEnt 3.3.2 和 ArcGis 9.3 软件,根据木灵藓属和藓属的现代地理分布信息,预测气候变化下藓属和木灵藓属在中国的地理分布格局的变化,通过这两个属的研究,使人们更好地认识气候变化对不同气候适应特点的苔藓植物分布的影响。

## 1 方法

### 1.1 数据来源

地图资料:ArcGIS 9.3 中需要的地图数据从国家基础地理信息系统 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>) 下载的 1:400 万的中国行政区划。

分布数据:藓属和木灵藓属是分类上的困难类群。在野外,它们在“属”这一级上的分别鉴别相对容易,但是鉴定到种比较困难,该科植物相对权威的分类学专著“中国藓类植物志”第五卷英文版 2013 年才出版,因此在此之前的分类鉴定中肯定错误不少。考虑到这两属植物是比较稳定的分类单位,同一属植物往往有相对稳定的地理分布格局,因此本文选择属的水平上开展预测研究。藓属和木灵藓属在中国的地理分布见麻亚鸿等的文献<sup>[7]</sup>。

气候数据:从世界气候数据网站下载当前条件(1950—2000)、2050、2070 三个时间段上的 19 个生物气象数据变量 (<http://www.worldclim.org>),数据的空间分辨率为 2—5 arc-minutes,即每一栅格大致相当于 22 km<sup>2</sup> 范围。2050 和 2070 的数据为北京气候中心发展的气候系统模式 1.1 版本(BCC-CSM1.1)基于 RCP45 排放模型下模拟得到的。RCP45 假设了一个全球协调一致的缓解举措,2100 预计 CO<sub>2</sub> 浓度高达 542 ppm 的状态,这是一个中等标准的预期排放量<sup>[16-17]</sup>。为了避免高度相关的气候数据对预测结果的影响,计算了中国境内 19 个气候因子的相关性,选择相关系数小于 0.7 的因子参与分布区预测,本文中选择了 11 个气候变量(表 1)。

### 1.2 软件来源

从国家基础地理信息系统网站 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>) 下载中国地图。ArcGis 9.3 为美国 ESRI 公司开发的地理信息系统平台,MaxEnt 3.3.2 下载自普林斯顿大学网站 ([www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/](http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/))。

表 1 参与木灵藓属和藓属植物在中国分布区预测的 11 个气候因子

Table 1 11 climatic variables used in distribution prediction of *Orthotrichum* and *Macromitrium*

气候变量 Variables	气候变量 Variables
昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-mintemp))	最湿月份雨量 Precipitation of Wettest Month
温度季节变化 Temperature Seasonality	最干月份雨量 Precipitation of Driest Month
最热月份最高温 Max Temperature of Warmest Month	雨量变化方差 Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
年温度变化范围 Temperature Annual Range	最暖季度平均雨量 Precipitation of Warmest quarter
最干季度平均温度 Mean Temperature of Driest Quarter	最冷季度平均雨量 Precipitation of Coldest Quarter
最冷季度平均温度 Mean Temperature of Coldest Quarter	

### 1.3 预测方法

首先在 MaxEnt 的 samples 窗口导入植物的地理分布数据,在 Environmental layer 窗口中导入当前的 11 个

气候变量,在 Projection layers directory 窗口中导入 2050 (或 2070)的 11 个相应气候变量。选择了启发式估测和刀切法,设置了 5 次重复,产生了 5 个预测随机模型,选择平均情况下的模型进行预测。

随机选取 25% 的分布点作为测试集,剩余的作为训练集,其它参数均为软件默认值,输出格式为 ASCII 栅格图层,最后导入 GIS 软件,得到不同气候条件下蕈藓属植物在中国潜在分布范围的预测图层,并执行重分类程序进行 10 个等级分类,分别输出当前和 2050 (或 2070)时蕈藓属植物在中国范围内的分布区预测重分类后的 Raster 文件。

目前还没有一个广泛接受的方法决定 Maxent 预测的分布阈值,即在此阈值上为预测种有可能分布,而此阈值下则不可能分布<sup>[18]</sup>。本文选择了 10% 的遗漏错误 (omission error, 即预测结果中,有 10% 的分布点不在预测范围内)为阈值,进一步生成阈值以上的蕈藓属植物在当前和气候变化下的分布预测图。

同样方法获取木灵藓属植物在不同气候条件下的分布预测图。

为了更精细地反映蕈藓属和木灵藓属在不同气候条件下在我国的潜在分布区变化情况,在我国不同地区选择了 38 个自然保护区,预测这两个属植物在当前和气候变暖条件下在这些保护区的潜在分布。这些保护区分别位于福建的武夷山、甘肃祁连山、广东南岭、广西的花坪和十万大山、贵州梵净山和雷公山、海南的尖峰岭、河北的五台山、河南鸡公山和小秦岭、湖北神农架和星斗山、吉林长白山、江西庐山、辽宁白石砬子和医巫闾山、内蒙古大黑山、宁夏贺兰山、青海三江源、山东云台山、山西历山和芦芽山、陕西佛坪和太白山、四川贡嘎山和卧龙、云南哀牢山、大围山和纳板河、浙江的凤阳山、古田山、九龙山、普陀山、清凉峰、西天目山和乌岩岭,和重庆大巴山(图 1)。

首先查取 38 个自然保护区的经度和纬度范围,按相应保护区的经纬度范围,作出封闭的长方形范围图代表这些保护区范围,应用 ArcGis 9.3,输出这些保护区的 shp 格式地图,再基于重分类后的预测文件,获取不同气候条件下蕈藓属和木灵藓属在相应保护区内各个预测等级下的面积百分数,进一步计算相应条件下的气候适宜性指数<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与分析

对蕈藓属和木灵藓属气候适宜性预测的平均 AUC 值 (Area Under roc Curve) 分别为 0.859 和 0.782, 表明预测效果可以接受。蕈藓属和木灵藓属在我国当前、2050 和 2070 年气候条件下分布区预测结果分别见图 2 和图 3。

当前气候条件下,蕈藓属在台湾山脉、黄山—天目山脉、武夷山脉、浙东—浙南山地、大别山、秦岭—大巴山、雪峰山、南岭等有很高的气候适应性(图 2);木灵藓属的潜在分布范围比蕈藓属更广(图 3)。与蕈藓属植物相比,木灵藓属更适合于偏北和更干燥的环境,特别是在华北、东北、西北地区和西南地区有较广泛的分布,而在华南地区的分布行范围小。

根据本文标准,蕈藓属植物在我国的气候适应阈值为 0.23。38 个自然保护区中,宁夏贺兰山和甘肃祁连山的气候适应指数在 0.23 以下,表明当前气候条件下这两个地区不在蕈藓属落在分布范围之内,其他的 36 个保护区都有适合于蕈藓属分布的气候条件。蕈藓属植物在浙江凤阳山、海南尖峰岭、浙江天目山、浙江清凉

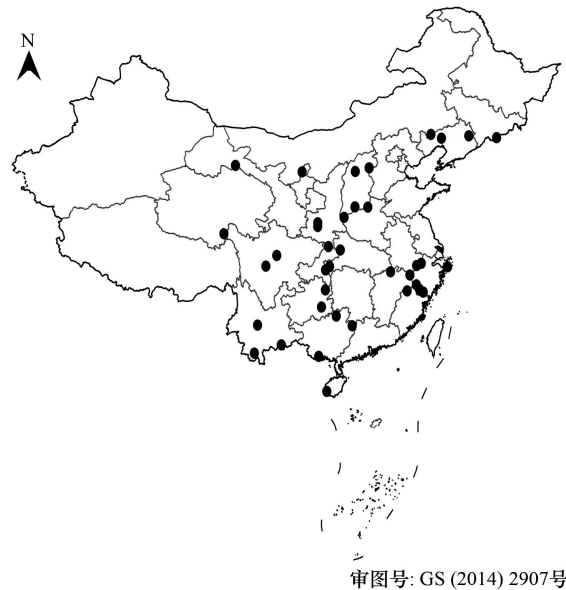
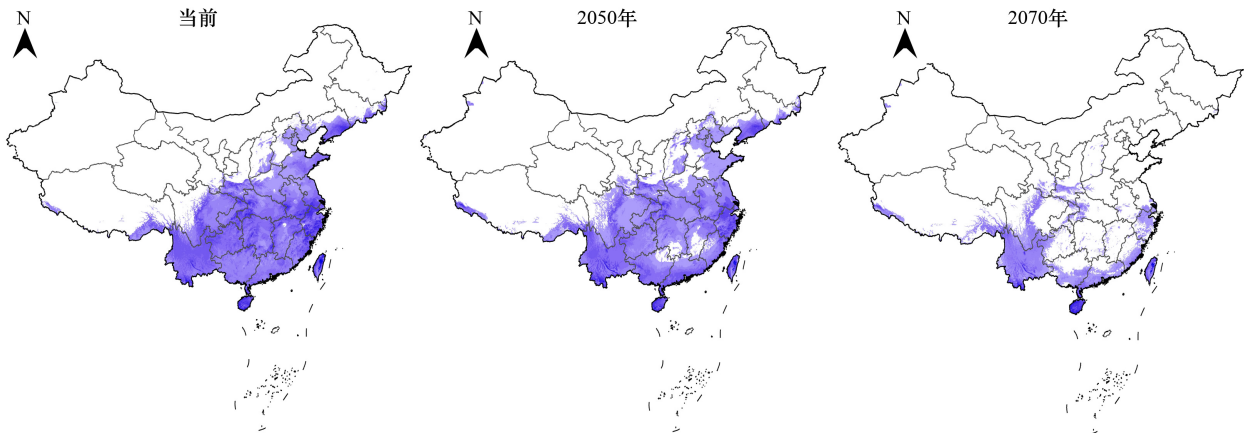


图 1 中国 38 个自然保护区的分布图  
Fig.1 Locations of 38 reserves in China

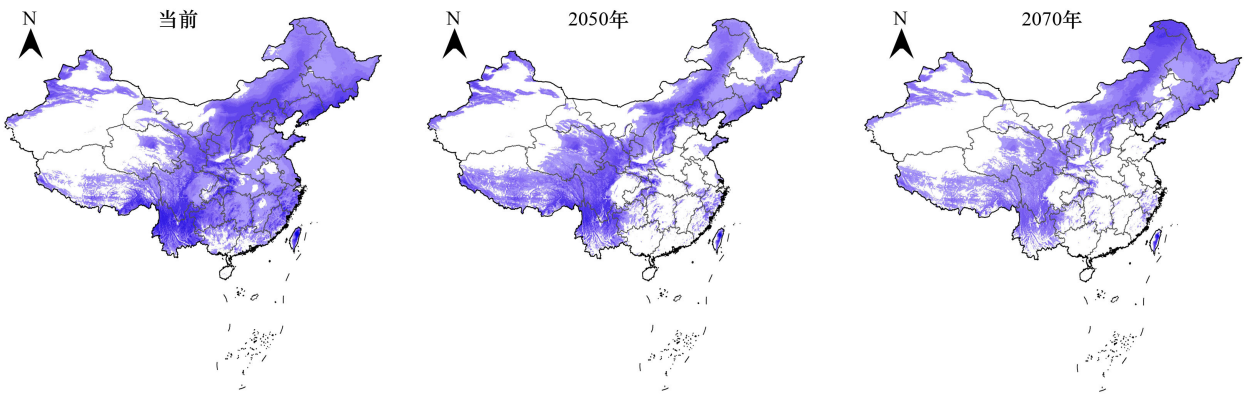


审图号: GS (2014) 2907号

图 2 藓属在当前、2050 和 2070 气候条件下在中国的分布区预测

Fig.2 Predicted distribution regions of *Macromitrium* in China under current, 2050 and 2070 weather conditions

阴影部分为气候适应阈值以上的预测区域



审图号: GS (2014) 2907号

图 3 木灵藓属在当前、2050 和 2070 气候条件下在中国的分布区预测

Fig.3 Predicted distribution regions of *Orthotrichum* in China under current, 2050 and 2070 weather conditions

阴影部分为阈值以上的预测区域

峰、辽宁白石砬子、浙江乌岩岭、湖北星斗山、湖北神农架和云南纳板河自然保护区的气候适应指数最高,它们是藓属最适宜分布的自然保护区。

2050 年气候条件下,38 个地区中有 12 个地区(包括云南纳板河、四川贡嘎山、广西十万大山、河北五台山、山西芦芽山、吉林长白山、云南哀牢山、青海三江源、四川卧龙、内蒙古大黑山、云南大围山和甘肃祁连山)的藓属植物气候适应综合指数高于当前气候条件(表 2 和图 4),说明这些区域总体上变得更适应于藓属的分布;其他的 26 个地区的气候总体上变得不适合于藓属植物的分布。如果按最高的气候适应指数来分析,当前环境下,甘肃祁连山和宁夏贺兰山不在藓属的潜在分布范围;到了 2050 年,除了以上两个地区外,广西花坪和内蒙古大黑山的气候条件也不再适合于藓属植物的分布。

按最合适气候指数,到了 2070,除三江源自然保护区外,其余的 37 个自然保护区的藓属气候适应指数均比现在的下降。其中,河南鸡公山、山东云台山、浙江普陀山、浙江九龙山、浙江古田山、内蒙古大黑山、山西芦芽山、江西庐山、宁夏贺兰山、辽宁医巫闾山、广西花坪和辽宁白石砬子、河北五台山、山西历山、河南小秦岭、陕西佛坪、吉林长白山、贵州梵净山、贵州雷公山和福建武夷山这 19 个自然保护区 2070 年的气候不再或几乎不再适合于藓属植物的分布,其余的 18 个自然保护区虽然气候条件变差,但是仍然适合于藓属植物

的分布(表2)。

表2 当前、2050和2070三个时间点上藓属植物在38个自然保护区的气候适应指数及其变化

Table 2 Climatic adaptation indices of *Macromitrium* and their changes in 38 Reserves under present, 2050 and 2070 climatic conditions

地区 Area	经度 Longitude	纬度 Latitude	当前 指数范围 Present Index range	当前 综合指数 present integrated index	2050 指数范围 Index range	2050 综合指数 integrated index	2070 指数范围 Index range	2070 综合指数 integrated index	2050—当前 综合指数 2050-present integrated index	2070—当前 综合指数 2070-present integrated index
重庆大巴山	109	31.83	0.3475—0.7446	0.5473	0.2468—0.7404	0.4632	0.1450—0.4347	0.2342	-0.0841	-0.3131
福建武夷山	117.84	27.82	0.2482—0.7446	0.4903	0.1481—0.4442	0.3403	0.0484—0.2416	0.1179	-0.15	-0.3724
甘肃祁连山	98.55	39.20	0—0.0993	0.0497	0.0494—0.1481	0.0507	0.0484—0.1450	0.0484	0.0011	-0.0012
广东南岭	111.67	24.66	0.2482—0.8438	0.416	0.0494—0.6417	0.2167	0.0484—0.4347	0.1367	-0.1993	-0.2793
广西花坪	109.88	25.54	0.2918—0.3990	0.3475	0.0988—0.1974	0.14810	—0.0967	0.0484	-0.1993	-0.2991
广西十万大山	107.91	21.88	0.3475—0.4468	0.3703	0.3455—0.5430	0.4188	0.1450—0.3381	0.1764	0.0485	-0.1939
贵州梵净山	108.65	27.91	0.3475—0.5461	0.4648	0.2468—0.3455	0.2872	0.1450—0.2416	0.1509	-0.1776	-0.3139
贵州雷公山	108.21	26.35	0.4468—0.6453	0.4923	0.3455—0.4442	0.3579	0.1450—0.2416	0.1571	-0.1344	-0.3352
海南尖峰岭	108.81	18.69	0.7446—0.9431	0.8217	0.7404—0.8391	0.8117	0.8692—0.9658	0.821	-0.0101	-0.0008
河北五台山	113.57	38.99	0.0497—0.4468	0.1852	0.1481—0.5430	0.2335	0.0484—0.2416	0.106	0.0483	-0.0792
河南鸡公山	108.67	29.71	0.2918—0.3990	0.3475	0.2918—0.3990	0.3455	0.0968—0.1933	0.145	-0.0019	-0.2024
河南小秦岭	110.76	34.48	0.2482—0.4468	0.3475	0.2468—0.3455	0.3032	0.1450—0.2416	0.1933	-0.0442	-0.1542
湖北神农架	110.33	31.52	0.2482—0.8438	0.6222	0.2468—0.8391	0.5482	0.1450—0.6278	0.3154	-0.074	-0.3068
湖北星斗山	109.13	30.03	0.6453—0.7446	0.6701	0.4442—0.5430	0.5183	0.2416—0.3381	0.2657	-0.1518	-0.4044
吉林长白山	127.9	41.72	0.1490—0.6453	0.3511	0.1481—0.7404	0.3814	0.0484—0.2416	0.1226	0.0303	-0.2285
江西庐山	115.98	29.56	0.4468—0.5461	0.5104	0.3455—0.6417	0.4189	0.0484—0.1450	0.09	-0.0915	-0.4204
辽宁白石砬子	124.78	41.89	0.3333—0.6667	0.7115	0.5923—0.6910	0.64170	—0.0967	0.0484	-0.0698	-0.6631
辽宁医巫闾山	121.71	41.66	0.1490—0.2482	0.1887	0.1481—0.2468	0.1580	—0.0967	0.0484	-0.0307	-0.1403
内蒙古大黑山	120.51	42.01	0.0497—0.2482	0.0577	0.0494—0.1481	0.0753	0.0484—0.1450	0.0499	0.0176	-0.0078
宁夏贺兰山	106.04	38.610	—0.0993	0.04970	—0.0987	0.04940	—0.0967	0.0484	-0.0003	-0.0013
青海三江源	97.25	33.01	0.0497—0.2482	0.0566	0.0494—0.3455	0.0818	0.0484—0.3381	0.0685	0.0251	0.0119
山东云台山	113.43	35.42	0.2978—0.3971	0.3475	0.2918—0.3990	0.3455	0.0968—0.1933	0.145	-0.0019	-0.2024
山西历山	111.98	35.44	0.0497—0.5461	0.2372	0.0494—0.4442	0.1865	0.0484—0.2416	0.1056	-0.0507	-0.1315
山西芦芽山	112.02	38.66	0.0497—0.2482	0.1222	0.0494—0.3455	0.1614	0.0484—0.1450	0.0639	0.0392	-0.0583
陕西佛坪	107.798	33.66	0.2482—0.5461	0.4137	0.2468—0.4442	0.3538	0.1452—0.2416	0.2014	-0.0599	-0.2123
陕西太白山	107.79	34	0.3475—0.6453	0.5517	0.3455—0.7404	0.5228	0.2416—0.5313	0.3239	-0.0289	-0.2278
四川贡嘎山	101.96	30.06	0.0497—0.6453	0.1757	0.0494—0.6417	0.2356	0.0484—0.5313	0.1599	0.0598	-0.0159
四川卧龙	103.18	31.03	0.1490—0.6453	0.4132	0.1481—0.6417	0.4349	0.0484—0.5313	0.2951	0.0217	-0.1181
云南哀牢山	101.03	24.71	0.4468—0.6453	0.4904	0.3455—0.7404	0.5163	0.2416—0.7244	0.3942	0.0259	-0.0963
云南大围山	103.7	22.91	0.3475—0.6453	0.4467	0.3455—0.8391	0.4576	0.1450—0.7244	0.3303	0.0108	-0.1164
云南纳板河	100.66	22.17	0.5461—0.6453	0.5791	0.6417—0.7404	0.7184	0.4347—0.6278	0.5313	0.1393	-0.0479
浙江凤阳山	119.23	27.94	0.7455—0.8438	0.8273	0.5430—0.6417	0.6252	0.2416—0.3381	0.306	-0.202	-0.5213
浙江古田山	118.16	29.26	0.4964—0.5957	0.5461	0.3455—0.4442	0.3949	0.0968—0.1933	0.145	-0.1512	-0.401
浙江九龙山	118.89	28.37	0.4964—0.5957	0.5461	0.3949—0.4936	0.4442	0.0968—0.1933	0.145	-0.1018	-0.401
浙江普陀山	122.39	30.01	0.3991—0.4964	0.4468	0.3455—0.4442	0.3784	0.0968—0.1933	0.145	-0.0683	-0.3017
浙江清凉峰	118.91	30.11	0.5461—0.9431	0.7351	0.3455—0.8391	0.637	0.1450—0.5313	0.2738	-0.0981	-0.4613
浙江天目山	119.43	30.32	0.6949—0.7942	0.7446	0.5923—0.6910	0.6417	0.2899—0.3864	0.3382	-0.1029	-0.4064
浙江乌岩岭	119.65	27.71	0.5461—0.8438	0.6784	0.4442—0.6417	0.5336	0.1450—0.3381	0.2094	-0.1448	-0.469

图2直观地展示了随着气候变暖藓属植物气候适应阈值以上的潜在分布区变化情况。很明显,随着气候的变暖,藓属植物的潜在适宜分布区会萎缩,最适范围由当前的华东、华南、西南、华中和东北的辽东半岛等区域缩小至主要在华南和西南的部分地区。就全国范围来讲,当前、2050、2070年藓属的潜在分布区面积百分比分别为31.21%、31.5%和12.23%,即从当前气候到2050年,藓属的潜在分布区面积并无明显变

化,且部分自然保护区的气候条件更适合于藓属植物的分布,但是从 2050 年到 2070 年间,藓属植物的潜在分布区面积从 31.5% 下降到 12.23%,期间几乎所有的 38 个自然保护区的气候条件变更不适合于藓属植物的分布。全国范围来讲,随着气候变化,藓属的综合气候适应指数持续地变小,当前、2050 和 2070 状态下分别为 0.1715、0.1593 和 0.0995。

在当前的气候条件下,木灵藓属植物在 38 个自然保护区中,除了海南尖峰岭保护区,其余的保护区均处于木灵藓属植物潜在分布范围之内(图 3 和表 3)。

表 3 当前、2050 和 2070 三个时间点上木灵藓属植物在 38 个自然保护区的气候适应指数及其变化

Table 3 Climatic adaptation indices of *Orthotrichum* and their changes in 38 Reserves under present, 2050 and 2070 climatic conditions

地区 Area	经度 Longitude	纬度 Latitude	当前 指数范围 Present Index range	当前 综合指数 present integrated index	2050 指数范围 Index range	2050 综合指数 integrated index	2070 指数范围 Index range	2070 综合指数 integrated index	2050-当前 综合指数 2050-present integrated index	2070-当前 综合指数 2070-present integrated index
重庆大巴山	109	31.83	0.1425—0.8047	0.5512	0.0478—0.8080	0.3854	0.0456—0.5875	0.2809	-0.1658	-0.2703
福建武夷山	117.84	27.82	0.1425—0.6155	0.2695	0.0478—0.4281	0.1639	0.0456—0.2266	0.0679	-0.1055	-0.2016
甘肃祁连山	98.55	39.2	0.0476—0.6155	0.2505	0.0478—0.6181	0.2949	0.0456—0.4071	0.2008	0.0444	-0.0497
广东南岭	111.67	24.66	0.1425—0.8993	0.3279	0.0478—0.7130	0.109	0.0456—0.6778	0.0834	-0.2189	-0.2445
广西花坪	109.88	25.54	0.1898—0.2844	0.23710	—0.0956	0.04780	—0.0912	0.0456	-0.1893	-0.1915
广西十万大山	107.91	21.88	0.2371—0.6155	0.3194	0.0478—0.3331	0.1602	0.0456—0.1363	0.0533	-0.1592	-0.2661
贵州梵净山	108.65	27.91	0.2371—0.5209	0.3804	0.0478—0.2381	0.1604	0.0456—0.2266	0.1253	-0.2201	-0.2551
贵州雷公山	108.21	26.35	0.3317—0.7101	0.4776	0.2381—0.4281	0.115	0.1363—0.3168	0.1702	-0.3625	-0.3074
海南尖峰岭	108.81	18.690	—0.0952	0.04760	—0.0956	0.04780	—0.0912	0.0456	0.0002	-0.002
河北五台山	113.57	38.99	0.5209—0.7101	0.6319	0.3331—0.7130	0.5523	0.2266—0.4973	0.3567	-0.0796	-0.2752
河南鸡公山	108.67	29.71	0.1898—0.2844	0.2371	0.0956—0.1906	0.1431	0.0912—0.1815	0.1363	-0.094	-0.1008
河南小秦岭	110.76	34.48	0.4263—0.6155	0.5209	0.2381—0.4281	0.3263	0.1363—0.2266	0.2072	-0.1946	-0.3137
湖北神农架	110.33	31.52	0.1425—0.8047	0.6358	0.0478—0.8080	0.5055	0.0456—0.6778	0.3858	-0.1303	-0.25
湖北星斗山	109.13	30.03	0.6155—0.8047	0.7101	0.4281—0.5231	0.4874	0.3168—0.4071	0.3845	-0.2227	-0.3256
吉林长白山	127.9	41.72	0.5209—0.7101	0.6704	0.5231—0.7130	0.6738	0.4071—0.4973	0.47	0.0034	-0.2004
江西庐山	115.98	29.56	0.2371—0.4263	0.2662	0.0478—0.1431	0.1407	0.0456—0.1363	0.0712	-0.1255	-0.195
辽宁白石砬子	124.78	41.89	0.6628—0.7574	0.7101	0.4756—0.5706	0.5231	0.2266—0.3168	0.2867	-0.1871	-0.4234
辽宁医巫闾山	121.71	41.66	0.3317—0.4263	0.3979	0.1906—0.2856	0.2381	0.1363—0.2266	0.1409	-0.1598	-0.2571
内蒙古大黑山	120.51	42.01	0.3317—0.6155	0.4558	0.2381—0.6181	0.3642	0.1363—0.4973	0.3154	-0.0916	-0.1405
宁夏贺兰山	106.04	38.61	0.1425—0.5209	0.3107	0.0478—0.5231	0.1896	0.0456—0.4071	0.1426	-0.1211	-0.1681
青海三江源	97.25	33.01	0.0476—0.6155	0.2478	0.0478—0.6181	0.3419	0.0456—0.4071	0.2211	0.0941	-0.0267
山东云台山	113.43	35.42	0.2844—0.3790	0.3317	0.0956—0.1906	0.1431	0.0912—0.1815	0.1363	-0.1886	-0.1954
山西历山	111.98	35.44	0.2371—0.6155	0.3773	0.0478—0.5231	0.2293	0.0456—0.4071	0.1631	-0.148	-0.2142
山西芦芽山	112.02	38.66	0.5209—0.7101	0.6301	0.3331—0.7130	0.5158	0.2266—0.4973	0.329	-0.1143	-0.3011
陕西佛坪	107.798	33.66	0.3317—0.6155	0.45	0.1431—0.4281	0.2777	0.1363—0.2266	0.189	-0.1723	-0.261
陕西太白山	107.79	34	0.4263—0.7101	0.6338	0.2381—0.7130	0.5619	0.2266—0.4973	0.3896	-0.0719	-0.2442
四川贡嘎山	101.96	30.06	0.0476—0.7101	0.4038	0.0478—0.7130	0.5335	0.0456—0.4973	0.3137	0.1297	-0.0901
四川卧龙	103.18	31.03	0.1425—0.7101	0.5235	0.2381—0.7130	0.5385	0.1363—0.4973	0.3558	0.015	-0.1676
云南哀牢山	101.03	24.71	0.2371—0.7101	0.4746	0.0478—0.7130	0.2713	0.0456—0.4973	0.1895	-0.2032	-0.2851
云南大围山	103.7	22.91	0.1425—0.8047	0.5337	0.0478—0.6181	0.2843	0.0456—0.4071	0.163	-0.2494	-0.3707
云南纳板河	100.66	22.17	0.2371—0.4263	0.3107	0.1431—0.2381	0.1537	0.0456—0.1363	0.096	-0.157	-0.2147
浙江凤阳山	119.23	27.94	0.6155—0.8047	0.7732	0.3331—0.6181	0.5231	0.3168—0.4973	0.4071	-0.2501	-0.3662
浙江古田山	118.16	29.26	0.4263—0.5209	0.45	0.1906—0.2856	0.2381	0.0912—0.1815	0.1363	-0.2119	-0.3136
浙江九龙山	118.89	28.37	0.4736—0.5682	0.5209	0.1906—0.2856	0.2381	0.0912—0.1815	0.1363	-0.2828	-0.3846
浙江普陀山	122.39	30.01	0.3790—0.4736	0.4263	0.1906—0.2856	0.2381	0.0912—0.1815	0.1363	-0.1882	-0.29
浙江清凉峰	118.91	30.11	0.4263—0.8993	0.6268	0.2381—0.8080	0.3896	0.1363—0.5875	0.2889	-0.2372	-0.3379
浙江天目山	119.43	30.32	0.3790—0.4736	0.4263	0.1906—0.2856	0.2381	0.0912—0.1815	0.1363	-0.1882	-0.29
浙江乌岩岭	119.65	27.71	0.3317—0.8047	0.593	0.1431—0.5231	0.3376	0.1363—0.4071	0.2481	-0.2554	-0.3449

从当前状态到 2050 年,海南尖峰岭、吉林长白山、四川卧龙、甘肃祁连山、青海三江源和四川贡嘎山的木灵藓属气候适应指数变高,其余的 32 个保护区的气候适应指数均变低,反映气候条件在恶化。广西花坪、江西庐山、山东云台山、河南鸡公山、贵州梵净山和云南纳板河等目前处于木灵藓属的潜在分布范围,但是到了 2050 年它们的气候条件不再或几乎不再适合于木灵藓属的分布(图 3 和表 3)。

2070 年状态下 38 个保护区的木灵藓属综合气候适应指数均比当前状态的小。广西花坪、江西庐山、云南纳板河、广西十万大山、河南鸡公山、山东云台山、浙江普陀山、浙江天目山、浙江古田山、浙江九龙山、福建武夷山、贵州梵净山、辽宁医巫闾山、陕西佛坪、河南小秦岭等 15 个地区当前处在木灵藓属的气候适应范围内,到 2070 年均变得不适合木灵藓属植物的分布(表 3)。对于木灵藓属来讲,随着气候的变暖,木灵藓属的气候适应范围持续变小,该属的潜在分布区面积从当前的 65.81% 下降到 2050 年的 50.06%,到 2070 年进一步下降到 44.94%,综合气候适应指数也从当前的 0.2933 下降到 2050 年的 0.2366,到 2070 年进一步下降到 0.1928。

藓属植物与木灵藓属植物的现代地理分布格局存在明显差异。藓属植物偏温暖潮湿分布,在我国的东部和东南部比木灵藓属的气候适应能力高些,而木灵藓属偏温带干旱的环境,在我国西北部、华东和东北有较高的分布概率(图 2、3)。总体上,木灵藓属比藓属具有更广的气候适应范围,更高的综合气候适应指数(图 2、3,表 4)。

表 4 当前、2050 和 2070 气候状态下藓属和木灵藓属在各气候适应等级上在我国的面积比和综合气候适应指数

Table 4 Area percentage corresponding to each grade of climatic adaptation indices of *Macromitrium* and *Orthotrichum* under present, 2050 and 2070 climatic conditions in China, respectively

气候适应指数等级 Grade of climatic adaptation indices	当前 Present		2050		2070	
	藓属 <i>Macromitrium</i>	木灵藓属 <i>Orthotrichum</i>	藓属 <i>Macromitrium</i>	木灵藓属 <i>Orthotrichum</i>	藓属 <i>Macromitrium</i>	木灵藓属 <i>Orthotrichum</i>
1 *	64.11	19.10	59.69	27.18	70.20	30.62
2 *	4.64	15.03	8.81	22.74	17.56	24.43
3	5.42	19.64	11.21	16.67	5.84	18.93
4	9.03	15.99	8.91	12.24	4.06	12.11
5	8.24	10.93	6.06	8.74	1.34	7.55
6	5.56	8.15	3.42	6.17	0.43	4.52
7	1.86	6.66	1.38	4.15	0.24	1.63
8	0.88	3.29	0.43	1.94	0.18	0.17
9	0.22	1.15	0.09	0.15	0.14	0.03
10	0.04	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01
** 适生面积百分比 Total area percentage above the threshold	31.25	65.86	31.52	50.08	12.25	44.95
综合指数 Integrated indices	0.1715	0.2933	0.1593	0.2366	0.0995	0.1928

\* :气候适应指数低于阈值 0.23, those below the threshold of 0.23; \*\* : 阈值以上, the total area percentage of the areas above the threshold

### 3 讨论

本文利用 MaxEnt 模型对木灵藓科两个大属在气候变化下我国的适生区进行了预测,反映了气候变化会强烈地影响到藓类植物分布格局。

世界上约有三十余种气候模式使用不同的排放情景对未来气候变化进行模拟预测,不同模式给出的结果差异很大<sup>[19]</sup>。由于设置 CO<sub>2</sub> 排放的情景不同,对于全球 CO<sub>2</sub> 的变化有三个典型的预测,即 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5,在 RCP2.6 模型中,全球平均的 CO<sub>2</sub> 浓度将在 2050 年达到 440 ppm,在 RCP8.5 的模型中,CO<sub>2</sub> 的浓度将达到 935 ppm,而且在 2250 年将达到 1961 ppm。本文中采用了中等程度的 CO<sub>2</sub> 增高下预测的气候数据,以



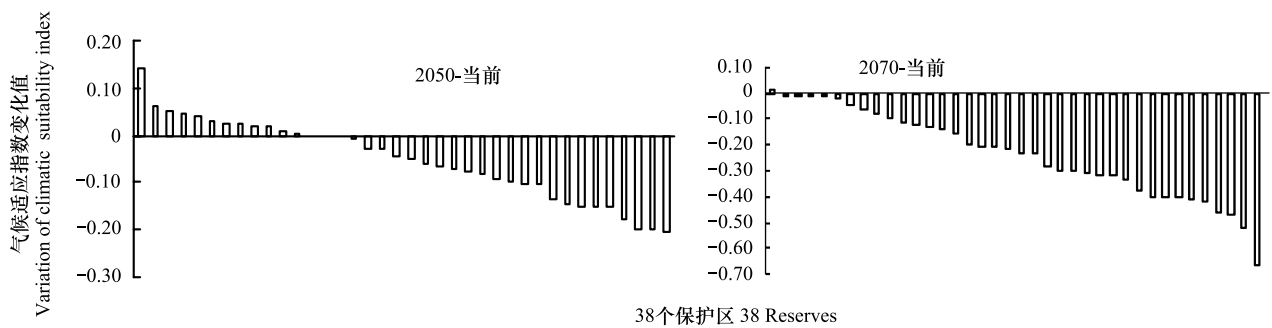


图 4 2050 和 2070 气候条件下藓属在 38 个保护区的综合气候适应指数与当前的相比的变化

Fig.4 Variation of integrated climatic adaptation indices of *Macromitrium* in 38 Reserves in 2050 and 2070 compared those under present climatic conditions

横坐标上的 38 个保护区以变化值由正到负的程度排列

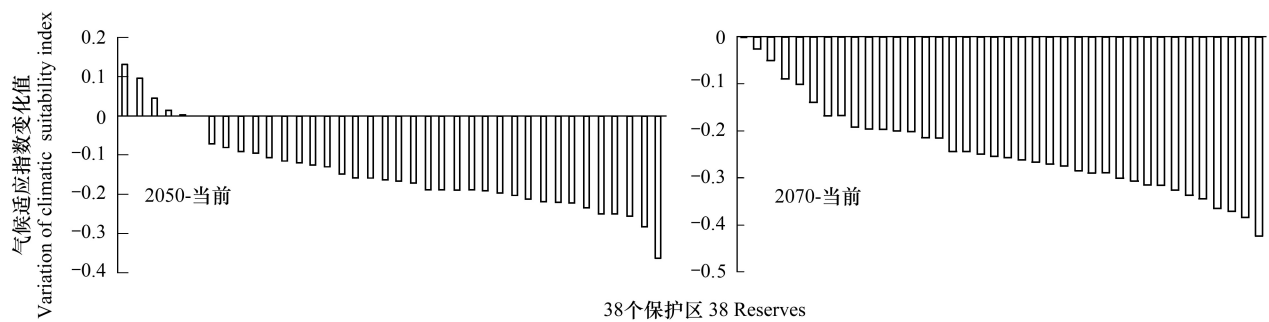


图 5 2050 和 2070 气候条件下木灵藓属在 38 个保护区的综合气候适应指数与当前的相比的变化

Fig.5 Variation of integrated climatic adaptation indices of *Orthotrichum* in 38 Reserves in 2050 and 2070 compared those under present climatic conditions

横坐标上的 38 个保护区以变化值由正到负的程度排列

此数据预测藓属和木灵藓属在中国的分布范围,发现此强度的气候变化下对藓属和木灵藓属在中国的分布范围已造成了巨大的影响。RCP8.5 是假设全球的  $\text{CO}_2$  排放按目前这种状态,不进行专门的协调减排出现的情形,可以预计,如果在 RCP8.5 的排放情形下,我国的苔藓植物分布格局将受到更强烈的影响,众多温带性的种类会从中国藓类植物区系中消失。

全球气候变化是一个复杂的生物地球化学过程,这一过程中,年平均温度的变化相对缓慢,而温度的季节性变动系数上升的幅度更强烈,最湿季节的降水量在全球范围会呈现出更加不均衡趋势<sup>[1]</sup>。从本文的研究可以看出,温度的季节性波动、最湿季节的降水量等对藓属和木灵藓属植物会造成强烈影响。气候变化下降降水的时空不均衡分布和温度季节性变动幅度的增大,会对整个苔藓植物的分布造成强烈影响。

生物分布的预测过程中使用的地理背景会对物种预测结果造成很大影响<sup>[20]</sup>。如果地理背景太小,不能够代表预测类群整个分布范围,会使该类群的预测范围被低估<sup>[21]</sup>。Acevedo 等应用 8 个不同大小的地理背景来预测 4 种生物的地理分布范围,发现地理背景范围紧邻目前种类的分布范围时预测效果最好<sup>[20]</sup>。本文中包括了藓属的 131 个地理分布数据和木灵藓属的 66 个地理分布数据,覆盖了这两个属在我国的分布范围,结合 AUC 值,因此预测的结果可信。

应用 MaxEnt 进行的植物分布区预测中,人们多数应用从世界气候数据网站下载的 19 个生物气象数据变量(<http://www.worldclim.org>),这 19 个气数据变量是根据 12 个月中温度和雨量记录演生而来(Graham & Hijmans, 2006)。但是,Kruijer 等认为高度相关的变量会影响预测结果,即 19 个变量之间存在多重线性重复(multicollinearity)的问题<sup>[22]</sup>,为了避免这一问题,建议采用泊松相关系数在 0.7 到-0.7 之间的气候变量,本文

也采用了这一策略。不过,在今后基于生物气候数据,应用 MaxEnt 进行物种分布区预测时,建议采取不同的气候变量或变量组合,借助于现在快速运算能力的计算机,取 AUC 最高的方案,而所需要变量又最少的标准选择预测模型。

Maxent 模型是一种基于生态位原理的生境适宜性模型,与其他的物种模型相比,具有较高的预测精度,在物种分布数据较少的情况下依然会取得较高的预测精度,因此在当前的生物地理分布范围预测中得到了广泛的应用<sup>[23]</sup>。但是,对于象木灵藓属和藓属来讲,仅仅考虑到气候因素也会一定程度上影响物种分布区的预测精度,因为这两个属主要是树附生的。因此,将来的研究工作中,如果将植被数据引入到它们的分布预测中,会提高预测精度。本文主要考虑到需要预测气候变化下两种的分布范围,缺乏在气候变化情况下全球植被的分布数据,因此仅仅考虑了 11 种生物气候数据。

另外,Guralnick 基于历史气候和物种分布资料的研究发现,随着气候变暖,那些位于分布区南缘的山地型哺乳动物会向高海拔的区域分布,而平地型哺乳动物则向高纬度方向分布,并认为基于最近一次冰期后的气候变暖的物种分布区响应能够更好地预测今后气候变暖对物种分布的影响<sup>[24]</sup>。但是这些方法需要有比较好的化石记录,但是苔藓植物缺少足够多的化石资料,难于使用这类方法用于苔藓植物分布区的预测。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 李明阳, 巨云为, 吴文浩, 何燕杰, 徐光彩. 气候变化情景下外来森林病虫害潜在生境动态分析——以美国南方松大小蠹为例. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 64-69.
- [ 2 ] Pérez-García N, Font X, Ferré A, Carreras J. Drastic reduction in the potential habitats for alpine and subalpine vegetation in the Pyrenees due to twenty-first-century climate change. Regional Environmental Change, 2013, 13(6): 1157-1169.
- [ 3 ] Lyons J, Stewart J S, Mitro M. Predicted effects of climate warming on the distribution of 50 stream fishes in Wisconsin, U. S. A. Journal of Fish Biology, 2010, 77(8): 1867-1898.
- [ 4 ] Hagen S B, Jepsen J U, Ims R A, Yoccoz N G. Shifting altitudinal distribution of outbreak zones of winter moth *Operophtera brumata* in sub-arctic birch forest: a response to recent climate warming? Ecography: Pattern and Diversity in Ecology, 2007, 30(2): 299-307.
- [ 5 ] Porretta D, Mastrantonio V, Amendolia S, Gaiarsa S, Epis S, Genchi C, Bandi C, Otranto D, Urbanelli S. Effects of global changes on the climatic niche of the tick *Ixodes ricinus* inferred by species distribution modeling. Parasites & Vectors, 2013, 6(1): 1-8.
- [ 6 ] Yu J, Ma Y H, Guo S L. Modeling potential geographic distribution of epiphytic moss *Macromitrium japonicum* (Bryophyta: Musci) in China via a Maximum Entropy Algorithm and ArcGIS. Annales Botanici Fennici, 2013, 50(1/2): 35-42.
- [ 7 ] 麻亚鸿, 李丹丹, 于晶, 郭水良. 中国藓属与木灵藓属分布式样与气候因子的关系. 生物多样性, 2013, 21(2): 177-184.
- [ 8 ] 胡理乐, 张海英, 秦岭, 闫伯前. 中国五味子分布范围及气候变化影响预测. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2445-2450.
- [ 9 ] Kumar P. Assessment of impact of climate change on *Rhododendrons* in Sikkim Himalayas using Maxent modelling: limitations and challenges. Biodiversity Conservation, 2012, 21(5): 1251-1266.
- [ 10 ] Bates J W, Thompson K, Grime P. Effects of simulated long term climatic change on the bryophytes of a lime stone grass land community. Global Change Biology, 2005, 11(5): 757-769.
- [ 11 ] Toet S, Cornelissen J H C, Aerts R, van Logtestijn R S P, de Beus M, Stoevelaar R. Moss responses to elevated CO<sub>2</sub> and variation in hydrology in a temperate lowland peatland. Plant Ecology, 2006, 182(1/2): 27-40.
- [ 12 ] 孙守琴, 田维莉. 苔藓植物对气候变化的响应研究进展. 贵州师范大学: 自然科学版, 2010, 28(4): 103-107.
- [ 13 ] Crosby M R, Magill R E, Allen B, He S. A checklist of the mosses. St. Louis, Missouri Botanical Garden, 1999: 1-306.
- [ 14 ] Jia Y, He S, Guo S L. Orthotrichaceae // Wu P C, Crosby M R. Moss flora of China, English version, Erpodiaceae - Climaciaceae, 5, Science Press (Beijing, New York) & Missouri Botanical Garden Press (St. Louis), 2011, 22-116.
- [ 15 ] Guo S L, Ma Y H, Cao T, Lou Y X. A synopsis of *Macromitrium* (Orthotrichaceae) in China. Cryptogamie, Bryologie, 2012, 33(4): 341-355.
- [ 16 ] Dufresne J L, Foujols M A, Denvil S, Caubel A, Marti O, Aumont O, Balkanski Y, Bekki S, Bellenger H, Benshila R, Bony S, Bopp L, Braconnot P, Brockmann P, Cadule P, Cheruy F, Codron F, Cozic A, Cugnet D, de Noblet N, Duvel J P, Ethé C, Fairhead L, Fichet T, Flavoni S, Friedlingstein P, Grandpeix J Y, Guez L, Guilyardi E, Hauglustaine D, Hourdin F, Idelkadi A, Ghattas J, Joussaume S, Kageyama M, Krinner G, Labetoulle S, Lahellec A, Lefebvre M P, Lefebvre F, Levy C, Li Z X, Lloyd J, Lott F, Madec G, Mancip M, Marchand M, Masson S, Meurdesoif Y, Mignot J, Musat I, Parouty S, Polcher J, Rio C, Schulz M, Swingedouw D, Szopa S, Talandier C, Terray P, Viovy N, Vuichard N. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. Climate Dynamics, 2013, 40(9/10):

2123-2165.

- [17] 杭月荷. CMIP5 多模式对中国极端降水的模拟评估及未来情景预估 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [18] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [19] 吕佳佳, 吴建国. 气候变化对植物及植被分布的影响研究进展. *环境科学与技术*, 2009, 32(6): 85-95.
- [20] Acevedo P, Jiménez-Valverde A, Lobo J M, Real R. Delimiting the geographical background in species distribution modeling. *Journal of Biogeography*, 2012, 39(8): 1383-1390.
- [21] Barve N, Barve V, Jiménez-Valverde A, Lira-Noriega A, Mahera S P, Peterson A T, Soberón J, Villalobos F. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 2011, 222(11): 1810-1819.
- [22] Kruijer J D, Raes N, Stech M. Modeling the distribution of the moss species *Hypopterygium tamarisci* (Hypopterygiaceae, Bryophyta) in Central and South America. *Nova Hedwigia*, 2010, 91(3/4): 399-420.
- [23] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [24] Guralnick R. Differential effects of past climate warming on mountain and flatland species distributions: a multispecies North American mammal assessment. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(1): 14-23.