DOI: 10.5846/stxb201810302336

陆双飞,殷晓洁,韦晴雯,张超,马东旭,刘雪莲.气候变化下西南地区植物功能型地理分布响应.生态学报,2020,40(1):310-324. Lu S F, Yin X J, Wei Q W, Zhang C, Ma D X, Liu X L.The geographical distribution response of plant functional types to climate change in southwestern China.Acta Ecologica Sinica,2020,40(1):310-324.

气候变化下西南地区植物功能型地理分布响应

陆双飞1,殷晓洁1,*,韦晴雯2,张超1,马东旭1,刘雪莲1

1 西南林业大学林学院,昆明 650224
2 西南林业大学地理学院,昆明 650224

摘要:以中国西南地区(云南、贵州、四川和重庆)为研究区,基于中国植被图划分植物功能型,筛选影响各植物功能型分布的主导环境因子,进而通过最大熵模型结合未来气候情景(2050年)预测西南地区植物功能型地理分布。结果表明:(1)根据植物冠层特征(针叶/阔叶、常绿/落叶)及对水分和温度的需求,结合研究区实际植被数据,筛选得到15类植物功能型,包含6类乔木、6类灌木和3类草本功能型;(2)影响西南地区热带乔木分布的主导因子为最冷月最低温度和年降水量(贡献率达90.3%),亚热带植物功能型分布主要受到温度变化影响(贡献率达41.7%),温带植物功能型则受降水因子的影响最大(贡献率约40.1%),高寒草甸草和高寒常绿阔叶灌木主要受温度和海拔因子影响,高寒落叶阔叶灌木受降水因子影响大;(3)随 CO₂排放量增加,未来西南各植物功能型分布呈现不同变化,其中,热带常绿阔叶乔木适宜区逐渐扩大;亚热带落叶木本类植物功能型的高适宜区面积 2050年(RCP8.5)增至10.3%,呈东移趋势;亚热带常绿本本和草本类植物功能型适宜区广(占研究区总面积 86.5%),未来气候下分布呈不规则波动;温带植物功能型(除温带灌木类外)适宜区面积减小至2050年(RCP8.5)的13.6%;温带常绿针叶灌木适宜区面积增大,2050年(RCP2.6)高适宜区向西移动且面积增至当前的8.25倍;高寒类植物功能型适宜区面积则呈缩小趋势,高适宜区东移。

关键词:植物功能型;地理分布;气候变化;最大熵模型;西南地区

The geographical distribution response of plant functional types to climate change in southwestern China

LU Shuangfei¹, YIN Xiaojie^{1,*}, WEI Qingwen², ZHANG Chao¹, MA Dongxu¹, LIU Xuelian¹ 1 School of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China 2 School of Geography, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Based on the Vegetation Map of China, the vegetation of southwest areas in China (including Yunnan, Guizhou, Sichuan Province, and Chongqing City) was classified into different plant functional types (PFTs), with the effective environmental factors of each PFTs determined. Combined with simulated future climate data (in 2050), the potential vegetation distribution of southwest areas in China was forecasted by Maximum Entropy Model. The results showed that: (1) According to the plant's canopy characteristics (coniferous/broad-leaved, evergreen/deciduous), the demand for water and temperature, and the actual vegetation data, the vegetation of studied areas was classified into fifteen PFTs, including six types of trees, six types of shrubs and three types of herbal. (2) The dominant factors affecting the distribution of tropical trees in southwest China were the lowest temperature of the coldest month and the annual average precipitation (with a total contribution rate of 90.3%). The distribution of subtropical PFTs was mainly affected by precipitation (with a contribution

基金项目:国家自然科学基金项目(31700467); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(2015)

收稿日期:2018-10-30; 网络出版日期:2019-10-25

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xjyinanne@163.com

rate of 40.1%). Alpine meadow grasses and Alpine evergreen broad-leaved shrubs were mainly affected by temperature and altitude, while the cold deciduous broad-leaved shrubs were mainly influenced by precipitation. (3) With an increase in CO₂ emissions, the distribution of PFTs in southwest China would change as following in the future. First, the suitable area of tropical evergreen broad-leaved trees would gradually expand. Second, areas of high suitability (RCP8.5) for the subtropical deciduous woody plants would increase to 10.3% in 2050, which tend to move eastward. Third, the subtropical evergreen woody and herbaceous plants would occupy a wide range of functionally suitable areas (i.e., 86.5% of the total study area) and display irregular fluctuations under the scenario of future climate. The suitable areas for the temperate plants (except the temperate shrubs) would decrease to 13.6% in 2050 (RCP8.5), while that for the temperate evergreen coniferous shrubs would increase. The highly suitable area would move to the west and the area would increase to 8.25 times of the present area in 2050 (RCP2.6). The suitable area of the alpine plants would decrease with the highly suitable area moving eastward.

Key Words: plant functional types; geographical distribution; climate change; MaxEnt model; southwest of China

以人类活动为主因的全球气候变化,导致的极端天气、海平面升高、物种灭绝等问题日益加剧。随 CO₂排 放量增加,到 21 世纪末地表平均温度将升高 1.1—6.4℃,而这一趋势仍将持续^[1-2]。目前,全球变化及其对人 类生存环境造成的影响受到各国政府和社会各界的高度关注。作为生态系统的重要组成部分,植物在通过改 变自身的形态和生理特征适应环境的同时通过与环境间的物质和能量交换影响气候^[3]。植物种类繁多,将 其归纳为少量植物功能型种类,可大大减少模拟对象的复杂性,使全球植被动态模拟成为可能^[4-5]。植物功 能型(Plant functional types,PFTs)能有效的将植物的生理生态过程、生物物理特征及物候变化等因素引入到 生物地理模型、生物地球化学模型、陆面过程模型和全球动态植被模型等模型中,从而有助于从机理上描述植 被的动态^[3]。因此,植物功能型在分析生态系统功能、评价生态系统对环境变化的敏感性、预测植被随环境 变化而产生的响应等方面具有重大意义^[6]。

由于青藏高原的隆起,西南地区形成了西高东低的地势格局,使该区域东西部之间的温度和降水具有明显的差异,加之岩溶地貌广布,造就了复杂多样的地形与气候^[7]。由于受地形、气候、海拔等环境因子的影响,西南地区在高、中、低3个海拔梯度上分布着我国绝大多数植被类型,因此对西南地区植物进行植物功能型划分及其潜在地理分布模拟研究具有特殊意义。已有的植物功能型研究,主要集中在全国、区域及保护区3个尺度上,目前未见针对我国西南地区植物功能型的划分及研究^[3,8-10]。已有西南地区植物地理分布的预测研究,多集中于对具体的植物种或属的地理分布预测^[11-13]。而作为沟通植物结构和功能与陆地生态系统属性的桥梁,植物功能型的地理分布必然影响着生态系统的结构与功能,因此对西南地区植物功能型的地理 分布模拟研究十分必要。

本研究对我国西南地区植物功能型进行划分,并结合环境因子数据,采用最大熵模型(Maximum Entropy model,MaxEnt)对当前和未来气候情景下各植物功能型的地理分布进行模拟,以期在区域尺度上为气候变化与西南地区生态系统结构和功能的响应研究提供理论基础,为西南地区植被应对气候变化制定政策措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 植被数据

植被数据来源于《中华人民共和国植被分布图(1:1000000)》,反映 1961—1990 年中国植被的分布状况^[14],本研究选用了其云南、四川、贵州和重庆地区的植被数据(图1)。植被分布的样点数据使用 ArcGIS 的"创建随机点"模块从中国植被图中提取。在植物功能型分布地块上,按照点间最小允许距离 10km 提取西南地区各植物功能型的随机分布样点数据。研究表明,一般样本量达到 500 以后,AUC 标准差小于 0.02^[15],故

随机分布样点个数上限设置为500,各植物功能型简称和分布样点数见表1。

表1 各植物功能型样点数

Table 1 Sampling numbers of PFTs

植物功能型 Plant functional types	简称 Abbreviation	样点数 Samplings numbers
热带常绿阔叶乔木 Tropical evergreen broad-leaved arbors	PFT1	57
亚热带常绿阔叶乔木 Subtropical evergreen broad-leaved arbors	PFT2	500
亚热带落叶阔叶乔木 Subtropical deciduous broad-leaved arbors	PFT3	281
亚热带常绿针叶乔木 Subtropical evergreen coniferous arbors	PFT4	500
亚热带常绿阔叶灌木 Subtropical evergreen broad-leaved shrubs	PFT5	500
亚热带落叶阔叶灌木 Subtropical deciduous broadleaf shrubs	PFT6	500
亚热带草丛草 Subtropical grass	PFT7	500
温带落叶阔叶乔木 Temperate deciduous broad-leaved arbors	PFT8	81
温带常绿针叶乔木 Temperate evergreen coniferous arbors	PFT9	29
温带落叶阔叶灌木 Temperate deciduous broad-leaved shrubs	PFT10	139
温带常绿针叶灌木 Temperate evergreen coniferous shrubs	PFT11	34
温带草甸草 Temperate meadow grass	PFT12	292
高寒常绿阔叶灌木 Alpine evergreen broad-leaved shrubs	PFT13	500
高寒落叶阔叶灌木 Alpine deciduous broad-leaved shrubs	PFT14	461
高寒草甸草 Alpine meadow grass	PFT15	500

PFTs:植物功能型 Plant functional types



图1 基于植被图的植物功能型划分

Fig.1 PFTs based on vegetation map

PFTs:植物功能型 Plant functional types

1.2 环境数据

研究所用气候数据来自于(http://www.worldclim.org/)常用的 19 个生物气候数据(表 1),坐标系为 WGS84,空间分辨率为 30"(约 1km×1km)^[13]。研究采用了现实气候(1950—2000 年)及未来气候情景

(2050年)数据,其中未来气候(2050年)选用中国国家气候中心开发的 BCC_CSM 模型产生的情景数据,其对 温度和降水等各变量的预测有较高精度,已得到广泛应用^[12-13]。未来气候情景选择 IPCC 第五次报告提出的 4 种气候情景模式中的 3 种(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5),分别代表低、中、高 3 种 CO₂浓度排放情景^[13]。另 外,数字高程模型(DEM)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),该数据集为 SRTM 90m 数据,经重采样等预处理提取得到海拔、坡度、坡向数据。根据以上 22 个环境因子数据的属性对 其进行分类,划分为温度、温度变化、降水、降水变化和地形 5 类(表 2)。

类型 Types	变量 Variables	描述 Descriptions	类型 Type	变量 Variables	描述 Descriptions
温度 Temperature/℃	Bio1	年平均温度	降水 Precipitation/mm	Bio12	年降水量
	Bio5	最热月最高温度		Bio13	最湿月降水量
	Bio6	最冷月最低温度		Bio14	最干月降水量
	Bio8	最湿季平均温度		Bio16	最湿季降水量
	Bio9	最干季平均温度		Bio17	最干季降水量
	Bio10	最热季平均温度		Bio18	最暖季降水量
	Bio11	最冷季平均温度		Bio19	最冷季降水量
温度变化 Temperature variation	Bio2	气温日较差	降水变化 Precipitation variation	Bio15	降水季节性变化
	Bio3	等温性	地形 Terrain	ELE	海拔
	Bio4	气温季节变化		SLO	坡度
	Bio7	温度的年较差		ASP	坡向

	表 2	环境因子名称及描述	
Table 2	Desci	ription of environmental	factors

Bio1:年平均温度 Annual mean temperature;Bio2:气温日较差 Mean diurnal range;Bio3:等温性 Isothermality;Bio4:气温季节变化 Temperature seasonality;Bio5:最热月最高气温度 Max. temperature of the warmest month;Bio6:最冷月最低气温度 Min. temperature of the coldest month;Bio7:温度 的年较差 Temperature of annual range;Bio8:最湿季平均温度 Mean temperature of the wettest quarter;Bio9:最干季平均温度 Mean temperature of the driest quarter;Bio10:最暖季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter;Bio11:最冷季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter;Bio11:最冷季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter;Bio11:最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter;Bio12: 年降水量 Annual precipitation;Bio13:最湿月降水量 Precipitation of the wettest month;Bio14:最干月降水量 Precipitation of the driest quarter;Bio15:降水季节性变化 Precipitation seasonality;Bio16:最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter;Bio17:最干季降水量 Precipitation of the driest quarter;Bio18:最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter;Bio19:最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter;ELE:海拔 Elevation;SLO: 坡度 Slope;ASP:坡向 Aspect

1.3 西南地区植物功能型划分原则与方法

在已有研究的基础上^[3,8,16],根据本研究的背景与尺度,综合考虑植物形态结构和生理特征,以植物生长型(乔木、灌木和草本)、叶寿命(常绿和落叶)、叶型(阔叶和针叶)及植物对温度和热量的需求为原则,结合我国西南地区的气候及地理条件,基于《中华人民共和国植被分布图(1:1000000)》,对除无植被地带及栽培作物外的西南地区自然植物功能型进行划分。

第一步,先根据水分(生长型)条件将植物分为乔木、灌木和草本3类,再根据温度条件分为热带、亚热带、温带和高寒4类。第二步,根据植物的叶龄来区分常绿植物和落叶植物,再根据叶型分为阔叶植物和针叶植物。

1.4 环境因子筛选

由于各环境因子之间存在一定的相关性,为了避免模型过度拟合现象,需对环境因子按照类别(温度、温度变化、降水、降水变化、地形5类)进行筛选^[17-18]。首先把22个环境因子全部导入 MaxEnt 模型进行模拟,筛选出百分比贡献率大于1.0%的因子,并对各因子进行 Pearson 相关分析(图 2),若同类环境因子中有两个或以上的因子相关性≥±0.8,则选择其中贡献率最高的因子用于最终的模拟^[19]。筛选后得到16个气候变量和3个地形变量参与西南各植物功能型的潜在分布预测建模(表 3)。

	Table 3	Screening	results of e	nvironmenta	l factors fo	r PFTs in southwe	est China		
植物功能型 Plant functional types	温度 Temperature/℃	温度 Tempo vari	变化 erature ation	降 Precipita	水 ttion/mm	降水变化 Precipitation variation		地形 Terrain	
PFT1	Bio6	Bio3	Bio4	Bio12	_	_	ELE		ASP
PFT2	Bio6	_	Bio4	Bio13	_	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT3	Bio6	Bio3	Bio4	Bio12	Bio19	Bio15	ELE	SLO	—
PFT4	Bio6	Bio3	Bio7	Bio13	Bio14	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT5	Bio6	Bio3	Bio7	—	Bio17	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT6	Bio10	Bio3	Bio4	Bio13	_	Bio15	ELE	SLO	—
PFT7	Bio9	Bio3	Bio4	Bio13	Bio19	Bio15	ELE	SLO	—
PFT8	Bio6	_	Bio2	Bio18	Bio14	Bio15	ELE	SLO	—
PFT9	Bio11	_	Bio7	Bio13	Bio19	Bio15	ELE	SLO	—
PFT0	Bio11	Bio3	Bio7	Bio18	Bio17	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT11	Bio10	_	Bio7	Bio18	Bio19	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT12	Bio6	Bio3	Bio2	Bio12	Bio14	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT13	Bio1	Bio3	Bio2	Bio12	_	Bio15	ELE	SLO	ASP
PFT14	Bio6	_	Bio2	Bio12	Bio14	_	ELE	SLO	_
PFT15	Bio1	_	Bio7	Bio13	_	Bio15	ELE	SLO	_

表 3 西南地区各植物功能型环境因子筛选结果



图 2 西南地区常见环境因子相关性

Fig.2 Correlation of common environmental factors in southwest China

Bio1:年平均温度 Annual mean temperature; Bio2:气温日较差 Mean diurnal range; Bio3:等温性 Isothermality; Bio4:气温季节变化 Temperature seasonality;Bio5:最热月最高气温度 Max. temperature of the warmest month;Bio6:最冷月最低气温度 Min. temperature of the coldest month;Bio7: 温度的年较差 Temperature of annual range; Bio8:最湿季平均温度 Mean temperature of the wettest quarter; Bio9:最干季平均温度 Mean temperature of the driest quarter; Bio10: 最暖季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter; Bio11: 最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter; Bio12:年降水量 Annual precipitation; Bio13:最湿月降水量 Precipitation of the wettest month; Bio14:最干月降水量 Precipitation of the driest month;Bio15:降水季节性变化 Precipitation seasonality;Bio16:最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter;Bio17:最干季降水 量 Precipitation of the driest quarter;Bio18:最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter;Bio19:最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter; ELE: 海拔 Elevation; SLO: 坡度 Slope; ASP: 坡向 Aspect

1.5 最大熵模型

近年来,用于物种潜在地理分布预测研究的生态位模型得到快速发展,主要有 GARP (Genetic Algorithm for Ruleset Prediction)、ENFA (Ecological Niche Factor Analysis)、Bioclim(Bioclimatic Prediction System)、Domain (Domain model)、MaxEnt(Maximum Entropy model)等^[19-22]。研究表明,MaxEnt 模型预测结果优于同类模型, 尤其是在物种分布数据不全的情况下仍然能得到较为满意的结果^[23-24],且具有数学原理简单清晰,易于进行 生态学解释等优点^[25-26]。

本研究采用 MaxEnt 模型进行西南地区植物功能型的地理分布模拟。将分布样点数据(CSV 格式)和气候因子数据(ASCII 格式)导入 MaxEnt 模型软件,设置参数进行模拟。随机选择 75%的分布数据作为训练集,用于构建模型,剩余 25%的分布数据作为测试集,用于检验模型的准确性,重复运算次数设为 10 次。采用受试者工作特征曲线(ROC)下的面积,即 AUC 值对建立的最大熵模型模拟准确性进行评价。AUC 取值范围为[0,1],其值越大表示模型模拟准确性越高^[27]。AUC 值的评估标准为如表 4 所示^[14]。分析环境因子对研究区各植物功能型分布的百分贡献率,筛选影响各植物功能型地理分布的主导环境因子^[28]。

		表4 A	UC 值与模型预测准	确性的关系		
	Table 4	Relation between	n AUC value and pr	ediction accuracy of	the model	
准确性	较差	一般	较准确	很准确	极准确	完美
Accuracy	Poor	Fair	Good	Very good	Excellent	Perfect
AUC	0.5—0.6	0.6—0.7	0.7—0.8	0.8—0.9	0.9—1.0	1.0

AUC:受试者工作特征曲线下与坐标轴围成的面积 Area under curve

最大熵模型可以给出各植物功能型在预测地区的存在概率 P,取值范围 0—1。根据统计学原理,当植物 在某一地区的存在概率 P<0.05 时为小概率事件,在此定义为不适宜区^[29]。在参考政府间气候变化专门委员 会(IPCC)关于评估可能性的划分标准后,将研究区各植物功能型的适生等级划分为4类(表5)^[30]。

	衣う	飞候迫且住刘万标准		
	Table 5 Climat	ic suitability classification	criteria	
存在概率 Existence probability	0—0.05	0.05-0.33	0.5—0.66	0.66—1
适生等级 Suitable level	气候不适宜区	气候低适宜区	气候中适宜区	气候高适宜区

2 结果与分析

2.1 西南地区植物功能型划分

依据植物生长型(乔木、灌木和草本)、叶龄(常绿和落叶)、叶型(阔叶和针叶)及植物对水分、温度和热量的需求,对研究区的植物功能型进行理论上的划分。将西南自然植被划分为40种备选植物功能型,包括16种乔木植物功能型,16种灌木植物功能型,8种草本植物功能型(表6)。

在上述理论植物功能型的基础上,根据研究区自然植被的实际情况,去除不存在类型,由于热带落叶阔叶 乔木(4个样点)和温带草原草(1个样点)两个植物功能型面积较小,样本点数小于5,将其合并到空间相临 近似功能型中,得到西南地区15种植物功能型,包括6种乔木类、6种灌木类和3种草本类植物功能型(表 6)。

2.2 模型适用性评价

本文采用 AUC 值,即受试者工作特征曲线(ROC)下的面积,对建立的最大熵模型的模拟准确性进行评价。模型输出 15 种植物功能型的 AUC 值表明,亚热带常绿针叶乔木模拟精度一般;亚热带常绿阔叶乔木、亚 热带常绿阔叶灌木和亚热带草丛草预测较准确;其他 11 类功能型模拟均大于 0.8(表 7),即它们的模型模拟 效果达到很准确的水平,因此最大熵模型可用于我国西南植物功能型地理分布与气候的关系研究。

	Table 6 Theoret	ical and practical division of	PFTs in southwest China	
	热带 Tropical	亚热带 Subtropical	温带 Temperate	高寒 Alpine
乔木	热带常绿阔叶乔木*	亚热带常绿阔叶乔木*	温带常绿阔叶乔木	高寒常绿阔叶乔木
Arbors	热带落叶阔叶乔木	亚热带落叶阔叶乔木*	温带落叶阔叶乔木*	高寒落叶阔叶乔木
	热带常绿针叶乔木	亚热带常绿针叶乔木*	温带常绿针叶乔木*	高寒常绿针叶乔木
	热带落叶针叶乔木	亚热带落叶针叶乔木	温带落叶针叶乔木	高寒落叶针叶乔木
灌木	热带常绿阔叶灌木	亚热带常绿阔叶灌木*	温带常绿阔叶灌木	高寒常绿阔叶灌木*
Shrubs	热带落叶阔叶灌木	亚热带落叶阔叶灌木*	温带落叶阔叶灌木*	高寒落叶阔叶灌木*
	热带常绿针叶灌木	亚热带常绿针叶灌木	温带常绿针叶灌木*	高寒常绿针叶灌木
	热带落叶针叶灌木	亚热带落叶针叶灌木	温带落叶针叶灌木	高寒落叶针叶灌木
草本	热带草甸草	亚热带草甸草	温带草甸草*	高寒草甸草*
Herbs	热带草原草	亚热带草丛草*	温带草原草	高寒草原草

表 6 西南地区植物功能型的理论和实际划分

* 经筛选后西南地区实际存在的植物功能型

表 7	最大熵模型模拟西南地区植物功能型的 AUC 值	

植物功能型 Plant functional types	AUC 值 Value of AUC	植物功能型 Plant functional types	AUC 值 Value of AUC
PFT1	0.987	PFT8	0.950
PFT2	0.750	PFT9	0.969
PFT3	0.836	PFT10	0.930
PFT4	0.654	PFT11	0.972
PFT5	0.772	PFT12	0.919
PFT6	0.835	PFT13	0.842
PFT7	0.762	PFT14	0.905
		PFT15	0.898

Table 7 MaxEnt simulates AUC values of PFTs in the southwest of China

2.3 西南地区植物功能型分布的主导环境因子分析

通过最大熵模型迭代运算和归一化处理,得到19个环境变量对西南地区各植物功能型分布概率的百分 贡献率(图3)。

由图可知:影响热带常绿阔叶乔木分布的主导环境因子为最冷月的最低温度(Bio6)、年降水量(Bio12), 累计贡献率 90.3%,表明西南地区热带植物功能型分布主要受到低温和年降水量的限制。

亚热带类植物功能型分布主要受到温度变化的影响,表征温度变化的环境因子贡献率高达41.7%;此外, 最冷月的最低温度(Bio6)对亚热带木本植物的分布影响较大,累计贡献率约为17.7%;特别地,亚热带常绿阔 叶乔木受坡度(SLO)的影响最大,贡献率为40.9%。

温带类植物功能型的分布受降水类环境因子的影响最大,其环境因子贡献率平均为40.1%;其中,温带常 绿针叶灌木的分布受最热季降水量(Bio18)的影响较大,贡献率为29.4%;温带常绿针叶乔木的分布受最湿月 降水量(Bio13)影响最大,贡献率为49.7%;此外,温带落叶阔叶乔木和温带草甸草的分布受最冷月最低温度 (Bio6)的影响最大,贡献率分别为 34.7%和 44.8%。

高寒常绿阔叶灌木分布主要受年平均温度(Bio1)、气温日较差(Bio2)和海拔(ELE)的影响,累计贡献率 86.0%;影响高寒落叶阔叶乔木的植物功能型的主导环境因子为年降水量(Bio12)、最干月降水量(Bio14)、气 温日较差(Bio2)和最冷月最低温度(Bio6),累积贡献率94.7%;高寒草甸草的分布则主要受年平均温度 (Bio1)、最湿月降水量(Bio13)和海拔(ELE)的影响,累计贡献率达94.7%。

综合来看,乔木类植物功能型的分布受最冷月最低气温(Bio6)的影响最大,贡献率为28.1%;灌木和草本 类植物功能型分布受温度类环境因子和海拔的影响较大。阔叶类植物功能型受坡度(SLO)的影响较大;针叶 类植物功能型的分布受温度年较差(Bio7)的影响较大;除热带常绿阔叶乔木、高寒落叶阔叶灌木外,各植物功能型分布受到海拔(ELE)因子影响也比较明显。



各植物功能型含义见表 1,各环境因子含义见表 2

2.4 气候变化下西南地区植物潜在分布模拟

由表 8 和图 4 可知,随着 CO₂排放水平的增加,热带常绿阔叶乔木的适宜分布区范围呈逐渐扩大的趋势, 但增加的适宜区主要为低适宜分布区,中、高适宜区面积有所减少,由当前的 0.5%减小为 2050 年 CO₂排放量 最高的 RCP8.5 情景下的 0.2%,低适宜分布区质心不断向东北方向移动,中、高适宜分布区质心向东南方小幅 移动。

	Table o T	ercenta	ge of ge	cograpi	ncar uis	sumuu		UTT.	is unu	unite	i ent ch	maue s	cenar io	5			
气候情景 Climate scenarios	适生等级 Suitable level	PFT1	PFT2	PFT3	PFT4	PFT5	PFT6	PFT7	PFT8	PFT9	PFT10	PFT11	PFT12	PFT13	PFT14	PFT15	
当前气候情景	不适宜区	93.1	10.2	36.9	4.6	25.8	54.7	22.6	74.7	89.0	68.4	81.6	69.5	53.8	73.7	67.2	
Current climate	低适宜区	5.0	47.5	37.4	23.0	33.2	15.1	38.3	19.0	8.8	23.8	14.0	19.0	17.0	9.3	13.7	
scenario	中适宜区	1.4	37.5	22.5	68.9	38.9	28.9	35.3	4.9	1.6	6.1	3.2	9.6	27.6	16.4	17.8	
	高适宜区	0.5	4.8	3.2	3.5	2.1	1.4	3.8	1.4	0.5	1.7	1.3	1.9	1.6	0.6	1.3	
2050 RCP2.6	不适宜区	94.5	7.1	42.7	3.2	27.0	57.9	20.5	77.0	86.8	58.2	52.9	67.5	58.4	69.6	73.0	
	低适宜区	4.5	46.4	27.2	43.2	34.8	12.1	40.4	17.1	10.7	32.5	25.2	22.5	20.4	15.2	15.8	
	中适宜区	0.7	40.0	25.9	52.5	38.0	24.8	38.4	5.1	1.8	7.8	10.9	8.3	21.0	14.4	11.1	
	高适宜区	0.1	6.5	4.2	1.1	0.2	5.2	0.7	0.8	0.7	1.5	10.9	1.7	0.2	0.9	0.1	
2050 RCP4.5	不适宜区	91.1	10.8	41.7	1.6	25.6	57.5	19.7	79.3	89.1	63.8	61.5	69.0	59.7	74.1	73.3	
	低适宜区	7.1	48.1	26.6	25.9	30.5	11.4	37.0	16.6	8.2	28.1	19.6	21.4	19.6	12.8	17.5	
	中适宜区	1.5	36.6	23.8	69.3	43.4	24.3	40.5	3.7	2.1	6.5	10.0	7.9	20.5	12.6	9.0	
	高适宜区	0.3	4.5	7.9	3.2	0.5	6.8	2.8	0.4	0.6	1.5	8.9	1.7	0.2	0.6	0.2	
2050 RCP8.5	不适宜区	90.6	6.7	39.9	2.7	26.8	55.2	20.0	90.1	90.3	61.2	63.0	78.8	82.5	86.4	79.5	
	低适宜区	8.1	46.0	29.2	49.3	36.2	12.5	37.0	6.6	6.9	28.3	17.7	16.3	11.2	12.6	20.5	
	中适宜区	1.2	40.3	19.4	47.8	36.7	23.1	39.6	2.5	2.1	8.7	10.1	4.2	6.2	1.1	≈ 0.0	
	高适宜区	0.2	7.1	11.5	0.2	0.4	9.2	3.4	0.7	0.7	1.8	9.1	0.8	≈0.0	≈ 0.0	0.0	

表 8	不同气候情景下各植物功能型地理分布面积百分比/%
-----	--------------------------

nhight distribution area of DETs under differ

nt alimatia a

2050 RCP2.6:2050 RCP2.6 气候情景 2050 RCP2.6 climate scenario;2050 RCP4.5:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario;2050

RCP8.5:2050 RCP8.5 气候情景 2050 RCP8.5 climate scenario





Fig.4 Geographical distribution and center of mass of tropical evergreen broad-leaved trees under different climatic scenarios I:当前气候情景 current climate scenario;Ⅱ:2050 RCP2.6 气候情景 2050 RCP2.6 climate scenario;Ⅲ:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario;Ⅳ:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario

如表 8 和图 5 所示, 亚热带常绿阔叶乔木和亚热带常绿针叶乔木分布范围广泛, 适宜分布区面积分别占 到研究区总面积的 89.8%和 95.4%, 在 2050 RCP4.5 气候情景下这两种植物功能型各等级适生区分布范围与 当前气候情景大致相近; 在 2050 RCP2.6 和 2050 RCP8.5 气候情景下亚热带常绿阔叶乔木适宜分布区分别增 加 3.1%和 3.5%, 高适宜分布区面积增加较为明显且质心向南移动; 亚热带常绿针叶乔木在 2050 RCP2.6 气 候情景下研究区西南部的高适宜分布区基本消失, 研究区东部的高适宜分布区面积有所增加, 但高适宜分布 区总面积由 3.5%减小为 1.1%, 且高适宜分布区质心向东移动; 在 2050 RCP8.5 气候情景下中、高适生区面积 骤减, 分别由 68.9%和 3.5%减小为 47.8%和 0.2%。亚热带落叶阔叶乔木主要分布于研究区北部, 且高适宜分 布区主要集中在研究区东部, 在未来情境下随着 CO₂排放水平增加, 适宜分布区面积有所增加, 其中高适宜分 布区面积由当前的 3.2%逐渐增加到 2050 RCP8.5 气候情景下的 11.5%, 高适宜分布区质心东移。在不同气 候情景下, 亚热带常绿阔叶灌木的总适宜分布区相似, 但高适宜分布区面积显著减小, 尤其在 2050 RCP2.6 气 候情景下, 高适宜分布区面积由当前气候的 2.1%减小为 0.2%, 高适宜分布区质心向东北移动。亚热带落叶 阔叶灌木适宜分布区面积由当前气候的 2.1%减小为 0.2%, 高适宜分布区面积逐步由当前气候情景下的 1.4%增加至 2050 RCP8.5 气候情景下的 9.2%, 高适宜分布区质心向南移动。随着 CO₂排放水平增加, 亚热带 草丛草适宜分布区面积略有增加, 而高适宜分布区面积则先减小后增加, 在 2050 RCP2.6 气候情景下高适宜

由表 8 和图 6 可知:温带落叶阔叶乔木适宜分布区随着 CO₂排放水平的增加而减小,其中高适宜分布区 面积也由当前的 1.4%减小为 0.7%;温带常绿针叶乔木的适宜分布区面积在 2050 PCR2.6 气候情景下略微增 加,由当前的 8.8%增加为 10.7%,其余气候情景下,适生区面积无明显变化,低、中适宜区质心略向东移。温 带落叶阔叶灌木适宜分布区随 CO₂排放水平的增加先增加后略有减小,其中 2050 年 RCP2.6 气候情景下适宜 分布区面积由当前的 31.6%增加为 41.8%,其中、低适宜分布区面积增加明显,由原来的 23.8%增至 32.5%,各 等级适宜区质心略向西移动;温带常绿针叶灌木各等级适宜分布区面积随 CO₂排放水平增加呈明显增加后略 有减小,2050 年 RCP2.6 气候情景下适宜分布区面积由当前的 18.4%增加为 47.1%,高适宜分布区面积由当前 的 1.3%增加为 10.9%,高适宜分布区质心向西移动。温带草甸草适宜分布区面积在 2050 年 RCP2.6、 RCP4.5、RCP8.5 情景下先增大后减小,但高适宜分布区面积不断减小,由当前的 1.9%逐步减小至 RCP8.5 情 景下的 0.8%,高适宜分布区质心明显向东北方向移动。





I:当前气候情景 current climate scenario;Ⅱ:2050 RCP2.6 气候情景 2050 RCP2.6 climate scenario;Ⅲ:2050 RCP 4.5气候情景 2050 RCP4. 5 climate scenario;Ⅳ:2050 RCP8.5 气候情景 2050 RCP8.5 climate scenario

I-PFT2

I-PFT3

I-PFT4

I -PFT5

I-PFT6

I-PFT7

http://www.ecologica.cn

319



图 6 不同气候情景下温带植物功能型地理分布及质心

Fig.6 Geographical distribution and center of mass of temperate PFTs under different climatic scenarios

I:当前气候情景 current climate scenario; II:2050 RCP2.6 气候情景 2050 RCP2.6 climate scenario; III:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario; IV:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario

在 2050 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下(表 8 和图 7),高寒类植物功能型适宜区逐渐缩小,高适宜分布区 质心大致向东移动。高寒常绿灌木适宜区面积由 46.2%减小为 17.5%,高寒落叶阔叶灌木适宜区面积由 26.3%减小为 13.6%,高寒草甸草适宜区面积由 32.8%减小为 20.5%。在 2050 年 CO₂排放量最高的 RCP8.5 情景下,高寒类植物功能型中、高适宜区几乎消失。



Fig.7 Geographical distribution and center of mass of alpine PFTs under different climatic scenarios

I:当前气候情景 current climate scenario;Ⅱ:2050 RCP2.6 气候情景 2050 RCP2.6 climate scenario;Ⅲ:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario;Ⅳ:2050 RCP4.5 气候情景 2050 RCP4.5 climate scenario

3 讨论

3.1 植物功能型划分

本文选取3个冠层特征:生长型(乔木/灌木/草本);叶型(针叶/阔叶);叶片寿命(常绿/落叶),2项生理 特征(水分需求、温度需求)对研究区的自然植被进行功能型划分。植物功能型的划分与特定的研究目的和 背景相联系^[31],由于本研究所划分的植物功能型主要用于西南地区植物潜在地理分布模拟研究,所以并未将 植物的光合途径(C₃、C₄、CAM)这一常用于生物地球化学模型的生理特征列入植物功能型划分依据,同时西 南地区种类繁多,使用C₃、C₄进行植物功能型划分存在较大难度^[3,32]。划分植物功能型时,根据西南植被、地 形与气候实际情况,将温度指标进行了细化,虽然西南地区在纬度梯度上仅包含热带、亚热带两个气候带,但 由于青藏高原的隆起使该区域呈现"西高东低"的地形格局^[7],温度受海拔梯度的影响十分明显,所以在增加 亚热带和温带两个温度等级后,又针对云南西北部和四川西部的青藏高原区,划分了高寒类植物功能型,使植 物功能型划分更具代表性且符合实际。

由于热带落叶阔叶乔木(175km²、地块数为4、样本点数为4)和温带草原草(110km²、地块数为1、样本点数为1)两个实际存在的植物产生样本点个数小于5,无法得到可靠的模拟结果,因此将其合并到空间相临近 似功能型热带常绿阔叶乔木和温带草甸草中。西南地区四川盆地等地存在着大面积栽培植物,由于栽培植物

受人为活动影响大,因此本研究将其剔除,未进行植物功能型划分。其中,四川盆地的耕地分布面积最大且集中,而云南、贵州、重庆以及四川西部地区栽培植物呈离散、复杂的斑块分布(图1),这与地形因素非常相关。

此外,研究所用的中国植被图数据多为20世纪80年代前的调查结果,植被变化是缓慢的过程,因此其总体分布状况没有变化。近一二十年来,研究区的地表植被除少部分区域出现退化外,整体呈现改善趋势^[33]。 相关研究表明温度升高是影响西南地区植被覆盖增加的主要自然因素^[34],此外,天保工程、退耕还林还草等 生态工程的有效实施对西南地区植被生长整体上也起到促进作用^[35]。

3.2 植物功能型地理分布模拟

西南地区各植物功能型分布面积差异大,导致分布样点数相差较大,分布样点较多的可达 500 个(如亚热带落叶阔叶灌木),较少的甚至不足 40 个(如温带常绿针叶乔木、温带常绿针叶灌木)。MaxEnt 运行结果显示,即使是分布样点数据较少的几类植物功能型,其 AUC 值仍能达到 0.9 以上,如温带常绿针叶乔木功能型 (29 个样点)的 AUC 值达到 0.969,这一结果印证了在分布样点数据较少的情况下,MaxEnt 仍能获得较为满意的结果^[36]。而亚热带常绿针叶乔木、亚热带常绿阔叶乔木等植物功能型虽然分布样点个数多(500 个),但其 AUC 值却小于 0.8,这表明对于研究区中分布范围非常广的物种,建立高精度关系模型存在困难,因此 AUC 值往往较低,与 Yang 等的研究结果一致^[19,37-38]。对比西南植物功能型的实际分布图(图 1)和模型预测的分布结果(图 4—图 7),可以发现,各植物功能型的实际分布和预测分布高度一致,也反映出 MaxEnt 模型对西南地区植物功能型好的模拟效果。

模拟结果显示,随 CO₂排放量增加,未来西南各植物功能型分布呈现不同变化,其中,高寒类植物功能型 适宜区面积均明显减小,高适宜区东移,这反映出高浓度温室气体排放导致的升温等气候因子变化,将严重威 胁到高寒类植物功能型的生存,造成其退化甚至消失等一系列严重后果;热带常绿阔叶乔木植物低适宜区面 积增加且质心向东北方向移动,但其高适宜区面积却有所减少,这与相关研究中气候变暖导致热带地区植物 生长期减少对应的结果相一致^[39]。大量研究表明 CO₂浓度升高对植物生长具有促进作用,尤其对于 CO₂饱 和点较高的 C₃植物具有最大的生长促进作用^[40]。不同类型植物对 CO₂浓度升高的反应存在差异,会引起植 物群落组成和比例发生一定变化^[41]。本研究采用模型预测植物功能型地理分布时,主要考虑了 CO₂温室效 应增温的影响,未将其施肥效应考虑在内,从而会一定程度上影响未来气候情景下植物功能型地理分布的预 测精度。

本研究为区域尺度,环境变量分辨率约为1km²,因此坡度、坡向因子只能从较大尺度上反映出总的地形规律,分辨率会对坡度和坡向两个地形因子模拟各植物功能型分布的准确性有所影响。植被的分布除了受到 气候、地形等环境因素影响外,还会受到生物因素、物种的扩散能力、物种适应新环境的进化能力等影响^[2,42]。 本研究为大尺度下的气候变化模拟响应研究,因此只考虑了气候和地形因子对各植物功能型分布的影响。有 研究得出土地利用类型对植物分布的影响也十分显著^[19],希望在后续的研究中能够结合此类人类活动因素, 以期获得更加准确的预测结果。

4 结论

基于中国植被图数据,结合西南地区自然植被的实际情况,按照温度、水分、冠层特征的植物功能型划分 原则筛选得到15类植物功能型。对影响各植物功能型分布的主导环境因子分析表明:影响热带常绿阔叶乔 木分布的主导因子为最冷月的最低温度和年降水量;亚热带类植物功能型分布主要受到温度变化的影响;温 带类植物功能型的分布受降水类因子的影响最大;高寒草甸草和高寒常绿阔叶灌木受温度类和海拔因子的影 响较大,高寒落叶阔叶灌木则受降水类因子影响最大。未来气候情景下,随着 CO₂排放水平的提高,各植物功 能型适生区的面积和质心相对于当前都有不同程度的变化和移动,尤其是高寒类植物功能型适宜区面积均明 显减小,高适宜区东移,表明高水平温室气体排放所导致的升温现象可能对高寒类植物功能型的生存产生严 重威胁,如不对环境加以保护改善气候条件,高寒类植物功能型可能进一步退化甚至消失。

致谢:中国植被图编辑委员会和中国科学院资源环境科学数据中心对本研究提供数据支持,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 张晓华,高云,祁悦,傅莎. IPCC 第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析. 气候变化研究进展,2014,10(1):14-19.
- [2] 贾翔,马芳芳,周旺明,周莉,于大炮,秦静,代力民.气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响.生态学报,2017,37(2): 464-473.
- [3] 翁恩生,周广胜.用于全球变化研究的中国植物功能型划分.植物生态学报,2005,29(1):81-97.
- [4] 唐海萍, 蒋高明. 植物功能型及其生态学意义. 应用生态学报, 2000, 11(3): 461-464.
- [5] Woodward F I, Cramer W. Plant functional types and climatic changes: introduction. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 306-308.
- [6] 李荣平, 刘志民, 蒋德明, 李雪华. 植物功能型及其研究方法. 生态学杂志, 2004, 23(1): 102-106.
- [7] 曹伟超,陶和平,孔博,刘斌涛,孙玉莲.基于 DEM 数据分割的西南地区地貌形态自动识别研究.中国水土保持,2011,(3):38-41.
- [8] 秦浩,董刚,张峰.山西植物功能型划分及其空间格局.生态学报,2015,35(2):396-408.
- [9] 胡楠,范玉龙,丁圣彦,卢训令.伏牛山自然保护区森林生态系统乔木植物功能型分类.植物生态学报,2008,32(5):1104-1115.
- [10] Skarpe C. Plant functional types and climate in a southern African savanna. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 397-404.
- [11] 刘然, 王春晶, 何健, 张志翔. 气候变化背景下中国冷杉属植物地理分布模拟分析. 植物研究, 2018, 38(1): 37-46.
- [12] 赵泽芳,卫海燕,郭彦龙,顾蔚. 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3607-3615.
- [13] 应凌霄,刘晔,陈绍田,沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, 24(4): 453-461.
- [14] 殷晓洁,周广胜,隋兴华,何奇瑾,李荣平.蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值.生态学报, 2013, 33(1): 103-109.
- [15] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
- [16] Nemani R, Running S W. Implementation of a hierarchical global vegetation classification in ecosystem function models. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 337-346.
- [17] 郭杰,刘小平,张琴,张东方,谢彩香,刘霞. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测. 应用生态学报, 2017, 28(3): 992-1000.
- [18] 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 贾俊鹤, 刘翔. 基于 MAXENT 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定. 生态学报, 2017, 37 (9): 3124-3132.
- [19] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, Justicia adhatoda L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [20] Larson S R, DeGroote J P, Bartholomay L C, Sugumaran R. Ecological niche modeling of potential west Nile virus vector mosquito species in Iowa. Journal of Insect Science, 2010, 10(110): 1-17.
- [21] Rubio G D, Acosta L E. Geographical distribution of the space-weaving spider, *Chibchea Salta*, from northwestern Argentina: new records and bioclimatic modeling. Journal of Insect Science, 2011, 11(54): 1-14.
- [22] Peterson A T, Papeş M, Eaton M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. Ecography, 2007, 30(4): 550-560.
- [23] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [24] Rupprecht F, Oldeland J, Finckh M. Modelling potential distribution of the threatened tree species Juniperus oxycedrus: how to evaluate the predictions of different modelling approaches? Journal of Vegetation Science, 2011, 22(4): 647-659.
- [25] 杨志香,周广胜,殷晓洁,贾丙瑞.中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性.生态学杂志,2014,33(6):1429-1436.
- [26] 殷晓洁,周广胜,隋兴华,何奇瑾,李荣平.辽东栎林潜在地理分布及其主导因子.林业科学,2013,49(8):10-14.
- [27] 高文强, 王小菲, 江泽平, 刘建锋. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子. 生态学报, 2016, 36(14): 4475-4484.
- [28] 车乐,曹博,白成科,王娟娟,张琳琳. 基于 MaxEnt 和 AreGIS 对太白米的潜在分布预测及适宜性评价. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1623-1628.
- [29] 何奇瑾,周广胜.我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性.生态学报,2012,32(12):3931-3939.
- [30] 石慰. 气候变化对中国东北兴安落叶松分布的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
- [31] 朱玉洁,杨霏云,赵俊芳,刘峻杉.植物功能型研究方法在生态系统模型中的应用.生态学杂志,2011,30(1):138-144.
- [32] Wang R Z. Plant functional types and their ecological responses to salinization in saline grasslands, Northeastern China. Photosynthetica, 2004, 42

(2): 511-519.

- [33] 张永恒,范广洲,李腊平,周定文,王永立,黄先伦.西南地区植被变化与气温及降水关系的初步分析.高原山地气象研究,2009,29 (1):6-13.
- [34] 张勃,王东,王桂钢,马琼,张国斌,季定民.西南地区近 14a 植被覆盖变化及其与气候因子的关系.长江流域资源与环境,2015,24 (6):956-964.
- [35] 郑朝菊,曾源,赵玉金,赵旦,吴炳方.近15年中国西南地区植被覆盖度动态变化.国土资源遥感,2017,29(3):128-136.
- [36] 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 刘凤权. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063-3069.
- [37] McPherson J M, Jetz W. Effects of species' ecology on the accuracy of distribution models. Ecography, 2007, 30(1): 135-151.
- [38] Evangelista P H, Kumar S, Stohlgren T J, Jarnevich C S, Crall A W, Norman III J B, Barnett D T. Modelling invasion for a habitat generalist and a specialist plant species. Diversity and Distributions, 2008, 14(5): 808-817.
- [39] Mora C, Caldwell I R, Caldwell J M, Fisher M R, Genco B M, Running S W. Suitable Days for Plant Growth Disappear under Projected Climate Change: Potential Human and Biotic Vulnerability. Plos Biology, 2015, 13(6): e1002167.
- [40] 王为民,王晨,李春俭,林伟宏.大气二氧化碳浓度升高对植物生长的影响.西北植物学报,2000,20(4):676-683.
- [41] 陈平平. 大气二氧化碳浓度升高对植物的影响. 生物学通报, 2002, 37(3): 20-22.
- [42] 陈俊俊, 燕亚媛, 丛日慧, 刘庆福, 刘洋, 丁勇, 牛建明, 张庆. 基于 MaxEnt 模型的短花针茅在中国的潜在分布区研究及预估. 中国草地 学报, 2016, 38(5): 78-84.