

DOI: 10.20103/j.stxb.202211053168

唐梦,陈静,杨灵懿,贾翔,刘济铭,段劼.气候变化下中国主要生物燃油树种分布与变迁.生态学报,2023,43(24):10156-10170.

Tang M, Chen J, Yang L Y, Jia X, Liu J M, Duan J. Distribution and change of major biofuel tree species in China under climate change. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10156-10170.

气候变化下中国主要生物燃油树种分布与变迁

唐 梦^{1,2}, 陈 静^{1,2}, 杨灵懿^{1,2}, 贾 翔¹, 刘济铭³, 段 劼^{1,2,*}

1 北京林业大学林学院, 北京 100083

2 北京林业大学国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083

3 南洋理工大学生命科学学院, 新加坡 637551

摘要:生物燃油树种是发展生物质能源,实现化石能源替代战略的重要物质基础,明确当前和未来气候变化下我国生物燃油树种适生区分布,对保护和利用生物燃油树种,促进林业生物能源产业发展,保障能源安全和实现“双碳”目标具有重要意义。基于我国 10 个主要生物燃油树种的 1037 条树种分布数据和 20 个环境变量,利用最大熵模型(MaxEnt)预测了各树种当前和未来气候情景下(2050 年和 2070 年的 RCP4.5 情景)的潜在适生区,得到了影响各树种分布贡献率最大的环境因子,并对我国各区域主要种植树种进行了区划。结果表明:(1)MaxEnt 模型预测效果较好,各树种模拟结果 AUC 值均在 0.9 以上。(2)影响各种分布的贡献率较高的环境因子因树种而异,最暖季度降水量和温度季节性变化标准差的相对贡献率较高。(3)10 个生物燃油树种极高适生区面积范围在 43.38 万 km²—117.74 万 km²之间,可根据模拟结果将树种分布划分为北部、中东部、东南部和西南部 4 个亚区,北部亚区主要树种为文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)和欧李(*Cerasus humilis*),中东部亚区主要树种为盐肤木(*Rhus chinensis*)、山桐子(*Idesia polycarpa*)、无患子(*Sapindus saponaria*)、乌桕(*Triadica sebifera*)和黄连木(*Pistacia chinensis*),东南部亚区主要树种为光皮桉木(*Cornus wilsoniana*)和山鸡椒(*Litsea cubeba*),西南部亚区主要树种为小桐子(*Jatropha curcas*),各树种分布亚区与我国发布的林业生物质能发展规划一致性较高。(4)与当前相比,在未来 2070 年 RCP4.5 情景下,欧李和山鸡椒适生区面积表现出增加趋势,分别增加 31.79 万 km²和 5.61 万 km²,其他树种面积均减小,减小幅度范围在 5.25 万 km²和 38.63 万 km²之间;光皮桉木和山鸡椒的分布中心在未来向西北移动,盐肤木、乌桕和小桐子向东南移动,其他树种均向东北移动。

关键词:生物燃油树种;气候变化;MaxEnt;适生区区划;生物能源

Distribution and change of major biofuel tree species in China under climate change

TANG Meng^{1,2}, CHEN Jing^{1,2}, YANG Lingyi^{1,2}, JIA Xiang¹, LIU Jiming³, DUAN Jie^{1,2,*}

1 School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 National Energy R & D Center for Non-Food Biomass, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 School of Life Science, Nanyang Technological University, Singapore 637551, Singapore

Abstract: Biofuel tree species are the important material basis for developing biomass energy and realizing the strategy of fossil energy substitution. Clarifying the distribution of suitable tree species for biofuel in our country under current and future climate change plays an important role in protecting and utilizing tree species resources, promoting the development of the forestry bioenergy industry, ensuring energy security, and realizing the goal of “double carbon”. Based on the distribution data of 1037 species of 10 major biofuel species and 20 environmental variables, the maximum entropy model (MaxEnt) was used to predict the distribution of potentially suitable areas of major biofuel species in China under current

基金项目:北京林业大学大学生创新创业训练项目(X202110022020);国家林业和草原局委托项目(2020020011)

收稿日期:2022-11-05; **网络出版日期:**2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duanjie@bjfu.edu.cn

and future climate change scenarios (RCP4.5 scenario in 2050 and 2070). The environmental factors with the greatest impact on the distribution of tree species were obtained, and the major tree species planted in each region of China were zoned. The results showed that (1) the MaxEnt model had a good prediction effect, and the area under the curve (AUC) values of the simulation results were above 0.9 for all tree species. (2) The environmental factors with high contribution to the distribution of each tree species differed from species to species. Precipitation of warmest quarter and temperature seasonality had relatively high contribution rates. (3) The highly suitable areas of the 10 biofuel species ranged from 433, 800 km² to 1,177,400 km², and the distribution of tree species could be divided into four subzones: northern, central-eastern, southeastern, and southwestern based on the simulation results. The main tree species in the northern subzone were *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis*. The main tree species in the central-eastern subzone were *Rhus chinensis*, *Idesia polycarpa*, *Sapindus saponari*, *Triadica sebifera*, and *Pistacia chinensis*. The main tree species in the southeastern subzone were *Cornus wilsoniana* and *Litsea cubeba*. The main tree species in the southwestern subzone was *Jatropha curcas*. The distribution of each tree species was consistent with the forestry biomass energy development plan released by China. (4) Compared with the current situation, under the RCP4.5 scenario in 2070, the suitable area of *Cerasus humilis* and *Litsea cubeba* showed an increasing trend with 317,900 km² and 56,100 km² increase, respectively. While the area of other species decreased, ranging from 52,500 km² to 386,300 km². The distribution centers of *Cornus wilsoniana* and *Litsea cubeba* will move northwest in the future. The distribution centers of *Rhus chinensis*, *Triadica sebifera*, and *Jatropha curcas* will move southeast, while all other tree species will move northeast.

Key Words: biofuel tree species; climate change; MaxEnt; habitat zoning; bioenergy

据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新评估,全球平均气温在过去 140 年间增加了 1.09℃,主要由大气中以 CO₂为主的温室气体浓度大幅增加所致^[1]。为缓解过度碳排放引起的气候变暖现象,近年来许多国家先后公布了“双碳”(碳达峰、碳中和)自主减排目标。中国是“碳中和”行动的积极推进者,先后向世界承诺于 2030 年实现“碳达峰”^[2]、2060 年实现“碳中和”^[3]。实现“碳中和”的决定因素是碳减排和碳增汇^[4]。其中,发展低碳和清洁能源是碳减排的重要途径。据美国石油业协会(American Petroleum Association)最乐观的估计,全球石油、天然气和煤炭的总储量分别约为 1.8 万亿桶、186 万亿 m³和 4.84 万亿 t,仅能使用数百年^[5]。我国作为最大的能源消耗国^[6],人均化石能源可采储量远低于世界平均水平,发展包括生物燃油在内的生物质能源是实行能源替代战略和实现“双碳”目标的重要选择,是实现能源可持续发展的必由之路。生物质能源作为唯一的可再生碳源,因其原料广泛、环保、固碳、可再生等特性得到全世界的广泛认可^[7]。生物燃油可以取代部分化石燃料,减轻对进口石油的依赖^[8],并且在生态环境保护修复、能源平衡、固碳增汇等方面具有显著优势^[9-10]。可用于制取生物燃油的植物类型很多。美国、欧盟等国家多使用玉米、大豆、油菜等制备生物燃油,我国发展生物质能源需遵循“不与人争粮、不与粮争地”的原则^[11-12],林业生物质能源成为重要的生物燃油原料类型。

在适宜气候区开展规模化种植,遵循适地适树原则,是保障生物燃油树种原料稳定生产,实现产业可持续发展的前提^[4]。我国油料树种资源丰富。2013 年,国家林业和草原局(原国家林业局)制定的《全国林业生物质能发展规划(2011—2020 年)》(后文统称为《规划》)中提到,适合在我国大规模种植的乔灌木生物燃油树种有 30 多种,主要包括油棕(*Elaeis guineensis*)、无患子(*Sapindus saponaria*)、小桐子(*Jatropha curcas*)、光皮楝木(*Cornus wilsoniana*)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、山桐子(*Idesia polycarpa*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、欧李(*Cerasus humilis*)、乌桕(*Triadica sebifera*)、东京野茉莉(*Styrax tonkinensis*)等 12 个树种^[13]。这些树种的种子含油率均在 30%以上,经转化加工可提取燃烧性能、安全性能优于传统化石燃油的生物燃油。近年来,围绕生物燃油树种的研究多集中在果实油脂品质评价^[14-16]、油脂组分特征^[17-19]、脂肪酸转化规律^[20-22]、油脂提取工艺^[23-26]、副产品开发利用^[27-29]、栽培技

术^[30–35]、花果调控^[36]等方面。已有学者对部分树种的分布区进行了研究^[7, 37–42],但采用同一方法研究多个树种分布区的文献很少,在此基础上探讨不同生物燃油树种的适生性差异及开展大规模种植布局均存在不确定性,且同一区域内不同树种会存在适生分布区接近或重叠的现象,同时分析多个树种的最适分布区,对确定各区域最优种植树种,实现适地适树及保障产业发展具有重要实践意义。

物种分布区可以表征物种在空间中所能分布的最大面积和最大范围,是物种重要的生态学特征^[43]。使用物种分布模型(Species Distribution Model, SDMs)可利用物种已知的分布数据和分布点环境变量,通过数学模型计算模拟物种的生态需求,并将其投射到不同时间和空间来推测物种当前和未来的潜在分布范围^[44]。国际上主要的物种分布模型有 CLIMEX 模型^[45]、BIOCLIM 模型^[46]、DOMAIN 模型^[47]、GARP 模型^[48]、MaxEnt 模型^[49]等。其中,MaxEnt 模型由 S. J. Phillips 等于 2004 年建立,相比其他模型具有更高的耐受性和预测精度^[50–52],已被广泛运用于物种入侵^[53–56]、濒危动植物保护^[57–59]、病虫害防控^[60–61]、土地利用^[62]等研究。同时,在气候变化日益加剧的背景下,树种在长期的生长过程中必然会受到气候变化的影响。开展生物燃油树种种植规划,有必要使用物种分布模型研究当前和未来气候背景下各树种的分布状况与趋势。

本研究以《规划》中发布的 10 种主要生物燃油树种为对象,使用 1037 份分布数据,使用最大熵模型(MaxEnt)模拟各树种当前和未来气候背景下的潜在分布范围和趋势,分析影响各树种分布的主要环境因子,结合《规划》对各树种种植区进行区划,并试图揭示气候变化对各树种未来分布状况的影响,以期为我国生物燃油树种的资源保护、规模化种植和产业发展提供参考。本研究将主要回答以下问题:(1)影响我国主要生物燃油树种分布的环境因子有哪些?(2)当前适合我国各区种植的生物燃油树种及其分布格局。(3)未来气候背景下各生物燃油树种的适生区如何变化?

1 材料与方法

1.1 研究树种及分布信息

本研究选取《规划》(表 1)中鼓励发展的 10 个生物燃油树种,各树种分布数据来源于中国植物图像库(<http://ppbc.iplant.cn/>)、中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)、中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn>),还有部分数据来源于课题组前期研究^[63–68],共获取了 10 个树种的 1206 条分布数据。通过检索图像和标本所在具体地理位置,借助百度拾取坐标系统(<http://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint/>)确定各分布样点的经纬坐标,保存为 csv 格式。为降低分布数据的空间自相关性,通过 ArcGIS 10.5 缓冲区工具,设置缓冲范围 3 km^[60],最终筛选出 1037 条数据进行研究(图 1),平均每个树种 104 条分布数据。

表 1 生物燃油树种基本信息及分布数据数量
Table 1 Basic information of biofuel species and quantity of distribution data

树种 Tree Species	科属 Subordinate	种子含油率/% Seed oil content	分布数据数量 Quantity of distribution data
欧李 <i>Cerasus humilis</i>	蔷薇科, 樱属	40	81
光皮楝木 <i>Cornus wilsoniana</i>	山茱萸科, 楝木属	30	74
山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	大风子科, 山桐子属	32—41	99
小桐子 <i>Jatropha curcas</i>	大戟科, 麻疯树属	38—41	76
山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	樟科, 木姜子属	30—50	110
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	漆树科, 黄连木属	42.2	131
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科, 盐肤木属	34.9	113
无患子 <i>Sapindus saponaria</i>	无患子科, 无患子属	38.1	137
乌柏 <i>Triadica sebifera</i>	大戟科, 乌柏属	40.8	106
文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolium</i>	无患子科, 文冠果属	59.9	110

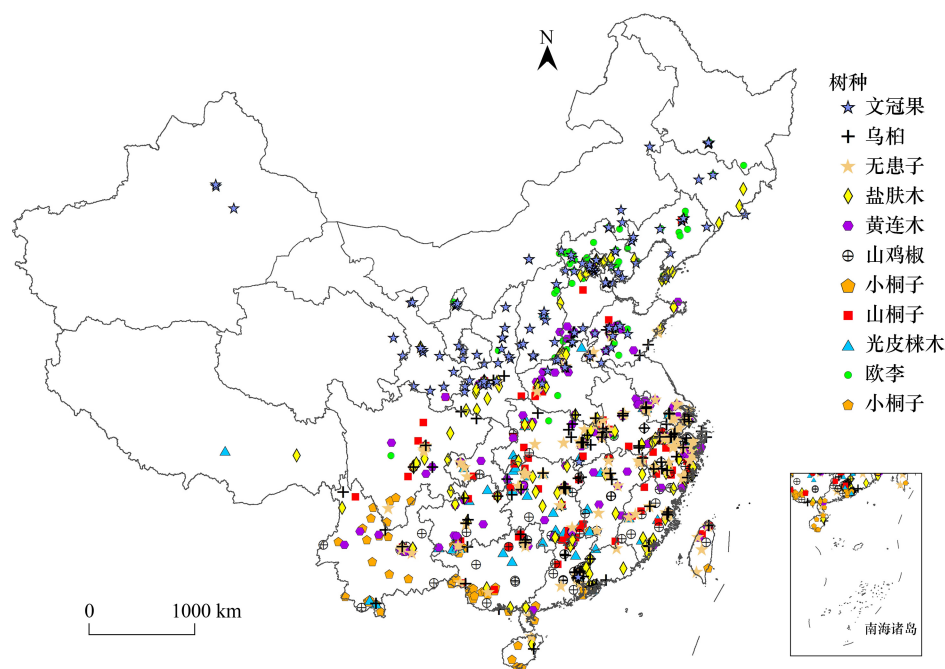


图 1 10 个生物燃油树种的分布数据

Fig.1 Germplasm sampling information of ten biofuel tree species

1.2 环境和地图数据来源

植物生长会同时受多个气候因子的影响。为保证研究结果的一致性和可靠性,本研究选取的当前和未来气候数据均来源于世界气候数据网站(www.worldclim.org),包括现代(1970—2000年)、未来2050年(2041—2060年)、未来2070年(2061—2080年)三个时期的19个生物气候因子,分别为:年平均气温(bio1)、平均日较差(bio2)、等温性(bio3)、温度季节性变化(标准差 $\times 100$)(bio4)、最暖月最高温度(bio5)、最冷月最低温度(bio6)、年均温变化范围(bio7)、最湿季度平均温度(bio8)、最干季度平均温度(bio9)、最暖季度平均温度(bio10)、最冷季度平均温度(bio11)、年降水量(bio12)、最湿月降水量(bio13)、最干月降水量(bio14)、降水量季节性变化(bio15)、最湿季度降水量(bio16)、最干季度降水量(bio17)、最暖季度降水量(bio18)、最冷季度降水量(bio19)。此外,还选取了影响树种分布的地形因子海拔(ASL)。在模拟未来气候情景时,考虑到不同树种在适应极端气候时其生长可能存在较大不确定性,本研究选取了CCSM5模式下的RCP4.5(Representative Concentration Pathways, RCPs)典型排放情景(代表未来全球温室气体中等排放时情景^[69])。该情景数据由政府间气候变化委员会(IPCC)提出,RCP4.5属于“典型浓度目标”中等排放情景,在应对全球气候变化的各种方案中充分考虑了社会经济状况对未来温室气体排放的影响^[70]。所有气候因子和地形因子数据分辨率为2.5 arcmin,数据格式为tiff,并将其转换为asc格式备用。

由于19个生物气候因子可能存在多重共线性,为避免造成数据过拟合,使用SPSS v20.0(IBM, Chicago, IL, USA)中的Pearson相关系数来分析环境因子间的相关性,对相关系数大于0.8的环境因子,选择其中贡献度较高且与生物燃油树种生长影响更为密切的因子作为最终构建模型的气候因子^[71]。本研究涉及地图的绘制均使用ArcGIS 10.5(ESRI, Redlands, CAL, USA)进行,中国行政区划标准地图来源于国家测绘地理信息局标准地图服务网(<http://211.159.153.75/index.html>),底图边界无修改。

1.3 最大熵模型(MaxEnt)的构建与评价标准

将各树种的分布数据(csv格式)和筛选后的环境因子分别导入MaxEnt v3.4.1软件,随机设置75%的分布数据作为训练集,25%的分布数据作为测试集^[60],其他参数均设置为默认值,重复运行10次。使用刀切法

(jackknife) 评估不同环境因子在影响生物燃油树种生长中所占的权重,利用建立的受试者工作特征曲线 ROC 曲线(Receiver Operating Characteristic, ROC)与横坐标围合的面积(Area Under Curve, AUC)大小来评价模型预测的准确性。AUC 取值范围为 0—1,越接近 1 表明预测效果越好。评价标准:AUC 值在 0.50—0.60 时,预测结果不可接受;AUC 值在 0.60—0.70 时,预测结果较差;AUC 值在 0.70—0.80 间,预测结果一般;AUC 值在 0.80—0.90,预测结果良好;AUC 值在 0.90—1.00 时,预测结果极佳^[72]。未来 2050 年和 2070 年的树种分布模拟同样按上述相同方法进行。

1.4 适生区等级划分及变迁确定

将 MaxEnt v3.4.1 的模拟分布图(asc 文件)加载至 ArcGIS v10.5 中,使用 ArcToolbox 工具将分布图转换为栅格数据,随后进行可视化操作。以中国行政区划图为底图制作各树种的适生等级图,采用掩膜提取工具(extract by mask)提取中国区域,并使用重分类工具(reclassify)将各树种的生境适宜性按照自然划分法(natural break)分成 5 个等级,等级间隔为 0.2,等级由高至低分别为:极高适生区(深红色)、高适生区(浅红色)、中适生区(黄色)、低适生区(浅绿色)、非适生区(深绿色)^[37]。在分析未来 2050 年、2070 年气候背景下树种适生区分布变迁时同样采用以上方法,将适生区等级划分为适生和不适生 2 个等级,等级间隔为 0.5。使用 ArcGIS v10.5 中的 SDMtoolbox v2.4 生成相邻时期适生区质心(分布区多边形的中心)变化方向及大小的矢量文件,分析各树种潜在分布面积和分布区几何中心随气候变化的迁移情况^[73],以此来比较各树种适生区质心随气候变化的迁移方向和距离,揭示各树种的未来分布变化情况。

2 结果

2.1 MaxEnt 模型预测结果精度评价

AUC 值常用于评价 MaxEnt 模型预测结果的精度。使用 MaxEnt 对 10 个生物燃油树种在当前、2050 年(RCP4.5)和 2070 年(RCP4.5)情景下的分布区进行模拟,并得到各预测结果的 AUC 值。结果显示,所有模型的 AUC 值范围在 0.987(盐肤木)—0.993(欧李)之间(表 2),均大于 0.9,表明模型预测精度极好,结果可靠,可用来模拟生物燃油树种的未来潜在分布。

表 2 模型 AUC 值
Table 2 AUC Value of the model

物种名 Species name	AUC 值 Area under the curve value	标准差 Standard deviation	物种名 Species name	AUC 值 Area under the curve value	标准差 Standard deviation
欧李 <i>Cerasus humilis</i>	0.993	0.001	黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	0.988	0.001
光皮楸木 <i>Cornus wilsoniana</i>	0.991	0.003	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	0.987	0.002
山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	0.990	0.001	无患子 <i>Sapindus saponaria</i>	0.990	0.001
小桐子 <i>Jatropha curcas</i>	0.991	0.003	乌桕 <i>Triadica sebifera</i>	0.991	0.002
山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	0.991	0.001	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolium</i>	0.989	0.003

表中 AUC 表示受试者工作特征曲线下面积

2.2 环境因子重要性分析

使用 Maxent 软件的 Jackknife 功能,结合百分比贡献率来判定影响各树种适生区的主导环境因子,将贡献率之和超过 80%^[74]的所有环境因子列入表 3。结果表明,影响生物燃油树种分布的主要环境因子有平均日较差(bio2)、温度季节性变化标准差(bio4)、最冷季度平均温度(bio11)、最湿月降水量(bio13)、降水量变异系数(bio15)、最暖季度降水量(bio18)、最冷季度降水量(bio19)。其中,贡献率最大的环境因子是最暖季度降水量(bio18),贡献率范围在 24.5%—59.2%之间;其次是温度季节性变化标准差(bio4),对除文冠果外的其他 9 个树种分布影响较大,贡献率范围在 15.4%—21.1%之间;降水量变异系数(bio15)对欧李、光皮楸木、小桐子、文冠果、黄连木的分布有一定影响,贡献率范围在 5.3%—15.9%。此外,还可看出欧李和文冠果同时受

降水和温度影响,其他生物燃油树种多受降水因素影响。

在 Maxent 软件中设置存在概率大于 50% 为树种适宜分布阈值,根据主导环境因子的响应曲线可得到各树种适宜环境因子的阈值范围(表 3)。由表 3 可知,文冠果和欧李对最暖季度降水量(bio18)要求较低,其阈值范围在 256—516 mm 间,降水量 550 mm 以下也可正常生长;光皮柞木、山桐子、黄连木、无患子的最暖季度降水量(bio18)阈值范围相差较小,在 400—760 mm 之间;相比而言,小桐子、盐肤木、乌桕、山鸡椒的最暖季度降水量(bio18)耐受范围较大,在 430—1160 mm 之间。文冠果和欧李温度季节性变化标准差(bio4)阈值上限最高,可达 1200,表明其对温度变化的耐受性强;光皮柞木、山桐子、黄连木、盐肤木、无患子、乌桕、山鸡椒的温度季节性变化标准差(bio4)阈值范围在 517—978;小桐子温度季节性变化标准差(bio4)最小,阈值范围在 335—615 间,表明其对温度的耐受性相对最低。

表 3 各树种的主导环境因子贡献率和阈值范围

Table 3 Contributions and threshold of domain environmental factors							
树种 Species	主导因子 Domain factors	贡献率/% Contribution	阈值范围 Threshold value	树种 Species	主导因子 Domain factors	贡献率/% Contribution	阈值范围 Threshold value
欧李 <i>Cerasus humilis</i>	bio18	35.2	331.70—516.84 mm	黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	bio18	47.9	398.53—635.96mm
	bio4	20.1	969.10—1233.91		bio4	15.4	679.30—978.49
	bio15	15.9	91.97—136.49		bio13	9.9	161.44—241.18
	bio11	8.7	—8.42—1.41℃	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	bio15	7.2	49.20—86.50
	bio19	5.2	7.13—23.16		bio18	51.1	375.06—960.65mm
光皮柞木 <i>Cornus wilsoniana</i>	bio18	59.1	443.54—689.64mm		bio4	20.8	534.53—929.08
	bio4	20	650.73—900.06	无患子 <i>Sapindus saponaria</i>	bio13	10	155.17—266.74
	bio15	5.3	46.38—71.68		bio18	57.4	431.55—764.04mm
山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	bio18	59.2	469.10—753.98mm		bio4	18.9	680.05—934.03
	bio4	21.1	655.51—892.94	乌桕 <i>Triadica sebifera</i>	bio2	4.5	6.83—8.63
小桐子 <i>Jatropha curcas</i>	bio18	58.6	575.16—1162.20mm		bio18	51.1	431.40—868.57mm
	bio4	13.8	335.43—615.73		bio4	20	612.40—931.78
文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolium</i>	bio15	10.4	67.00—89.63	山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	bio13	8.6	163.95—289.63
	bio18	24.5	256.54—542.50mm		bio2	5.6	6.74—8.81℃
	bio19	20.2	6.25—21.26		bio18	57.8	498.6—1046.06mm
	bio11	16.8	—8.05—1.36℃		bio4	18.7	517.84—829.11
	bio4	16.2	923.07—1231.08		bio13	7.0	204.19—327.29
	bio15	7	81.82—136.70				

bio2: 平均日较差 Mean Diurnal Range; bio4: 温度季节性变化(标准差×100) Temperature Seasonality(standard deviation×100); bio11: 最冷季度平均温度 Mean Temperature of Coldest Quarter; bio13: 最湿月降水量 Precipitation of Wettest Month; bio15: 降水量季节性变化(变异系数) Precipitation Seasonality(Coefficient of Variation); bio18: 最暖季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter; bio19: 最冷季度降水量 Precipitation of Coldest Quarter

2.3 当前气候下生物燃油树种的潜在分布区

根据预测结果可知,我国主要生物燃油树种的极高适生区面积差异较大,其中黄连木面积最大,达 117.74 万 km², 占国土面积 12.22%;小桐子面积最小,为 43.38 万 km², 占国土面积 4.5%,其余树种分布面积介于二者之间(图 2)。由图 2 还可见部分生物燃油树种分布区重叠,表明树种间生态位接近,如欧李和文冠果、乌桕和无患子等。根据模型预测结果,可结合我国气候类型将主要生物燃油树种潜在适生分布区划分为 4 个亚区,分别为北部亚区(中温带和暖温带)、中东部亚区(暖温带和亚热带)、东南部亚区(亚热带和热带)和西南部亚区(亚热带)(图 2)。

北部亚区集中分布的树种是文冠果和欧李,两个树种的极高适生区面积分别为 70.06 万 km²和 59.88 万 km², 占国土面积的 7.27%和 6.22%,主要分布于辽宁、北京、天津、河北、山东、山西南部、陕西北部、甘肃南部、

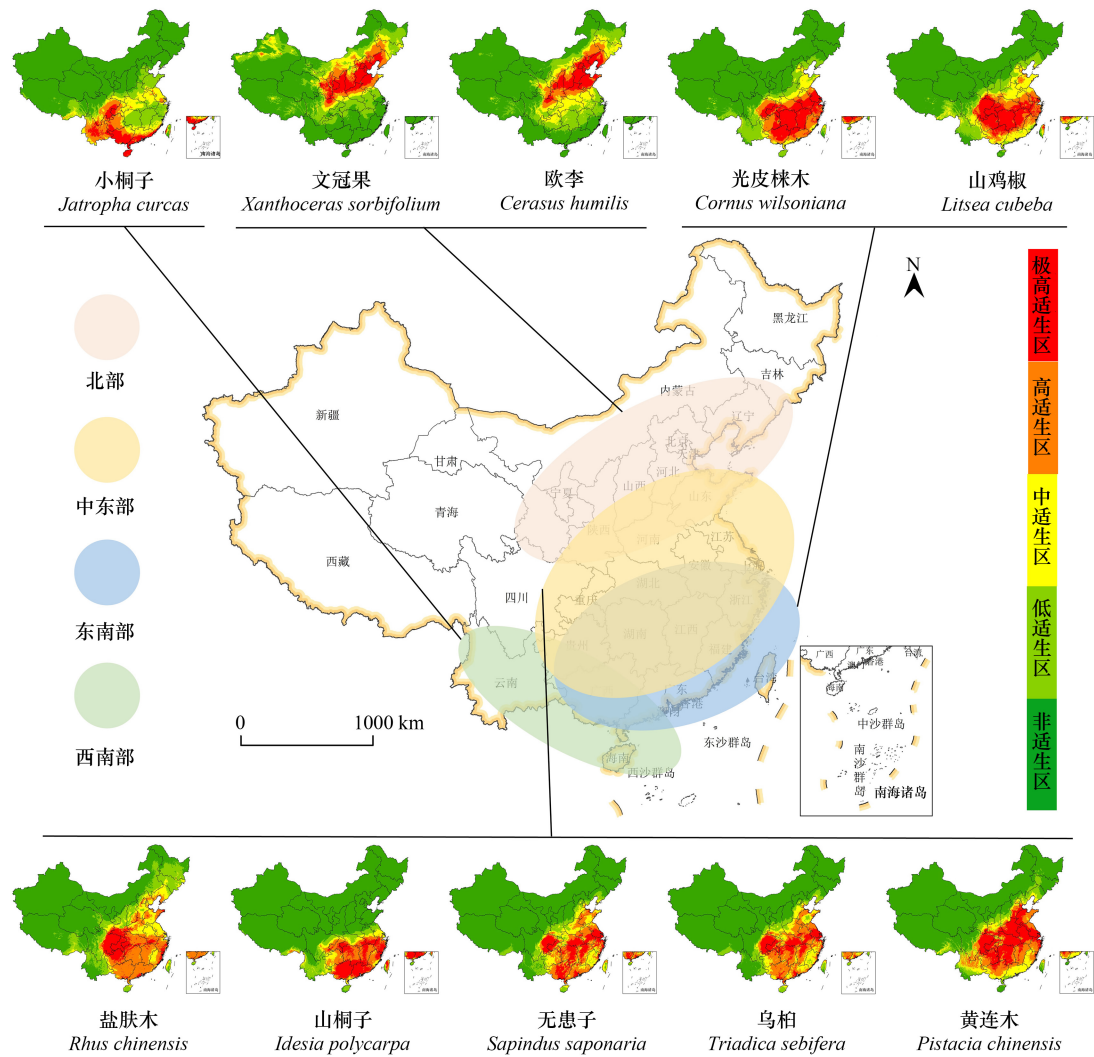


图 2 十个生物燃油树种当代潜在分布图
Fig.2 The current potential distribution of 10 biofuel trees

河南北部等省市,另在四川东北部也有少量极高适生区分布。从地理位置来看,主要分布于我国东北平原、辽东丘陵、内蒙古高原、燕山、阴山山脉、太行山脉、黄土高原、华北平原、山东丘陵等地。

中东部亚区的主要适生树种为盐肤木、山桐子、无患子、乌桕和黄连木,极高适生区面积分别为 60.38 万 km^2 、94.01 万 km^2 、64.85 万 km^2 、54.88 万 km^2 和 117.74 万 km^2 , 占国土面积的 6.27%、9.76%、6.73%、5.70%、12.22%,主要分布于湖南、江西、浙江、广西、湖北、安徽、河南、江苏、贵州、重庆、四川等中部和东南部省份,包括山东丘陵、华北平原、秦岭、大巴山脉、巫山、四川盆地、雪峰山、东南丘陵、长江中下游平原等区域,主要位于黑河腾冲一线的东部地区。

东南部亚区的主要适生树种为光皮楸木和山鸡椒,极高适生区面积分别为 98.22 万 km^2 和 63.67 万 km^2 , 占国土面积的 10.19% 和 6.61%,分布于湖南、江西、浙江、广西、湖北南部、安徽南部、江苏南部、广东北部、台湾、贵州东部,在四川和重庆交界处也有较大面积的极高适生区,包括四川盆地、巫山、长江中下游平原、雪峰山、东南丘陵、南岭、武夷山脉等地区。

西南部亚区主要的适生树种是小桐子,极高适生区面积为 43.38 万 km^2 , 占国土面积的 4.5%,分布于四川和重庆交界处、广西南部、海南、云南中部,另外在贵州西南部和广东南部也有少量分布,主要位于云贵高原、四川盆地和海南岛地区。

2.4 未来气候情景下生物燃油树种适生区变化

在未来气候情景下,我国主要生物燃油树种适生区面积表现出不同的变化趋势,与当前适生区面积相比,可分为持续增加和减小两种模式(图 3)。

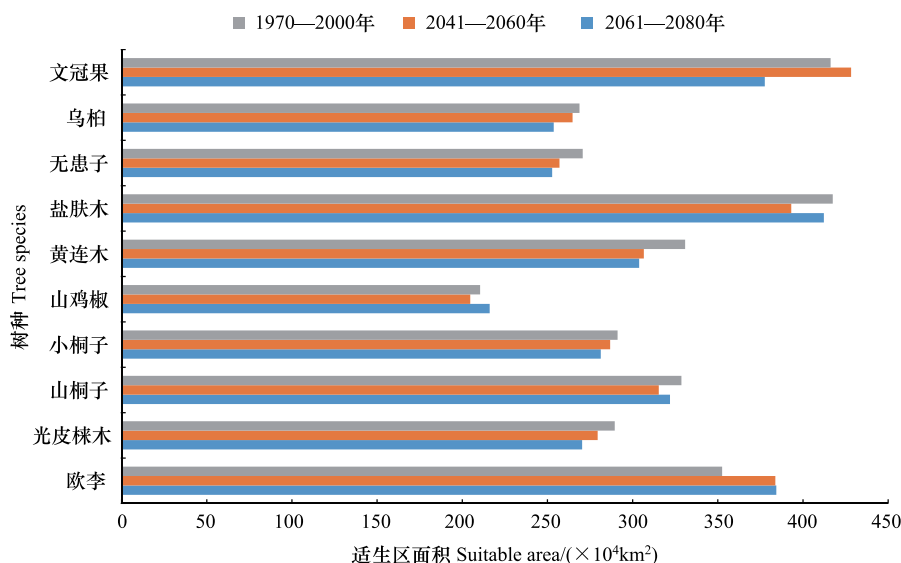


图 3 各树种的适生区面积变化

Fig.3 The suitable area changes of each tree specie

表现为适生区面积增加的树种有欧李,适生区面积从当前的 352.59 万 km^2 增长到 2050 年的 383.81 万 km^2 ,2070 年继续增长到 384.38 万 km^2 ;山鸡椒表现为先减少后增加,适生区面积从当前的 210.50 万 km^2 减少到 2050 年的 204.73 万 km^2 ,2070 年增长到 216.11 万 km^2 。其他 8 个树种的适生区面积最终减小,其中文冠果表现为 2050 年适生区面积增加,2070 年面积减小;盐肤木和山桐子表现为 2050 年适生区面积减小,2070 年面积增加,但均比当前面积减小;乌桕、无患子、黄连木、小桐子和光皮楸木适生区面积持续减小,乌桕当代适生区面积为 268.85 万 km^2 ,到 2050 年下降至 264.78 万 km^2 ,2070 年减小至 253.70 万 km^2 ;无患子当代适生区面积为 270.73 万 km^2 ,到 2050 年下降至 257.11 万 km^2 ,2070 年下降至 252.82 万 km^2 ;黄连木当代适生区面积为 330.84 万 km^2 ,到 2050 年下降至 306.58 万 km^2 ,2070 年持续下降至 303.85 万 km^2 ;小桐子当代适生区面积为 291.22 万 km^2 ,到 2050 年下降至 286.82 万 km^2 ,2070 年仅为 281.33 万 km^2 ;光皮楸木当代适生区面积为 289.53 万 km^2 ,到 2050 年下降至 279.52 万 km^2 ,2070 年持续下降至 270.37 万 km^2 ,表明这些生物燃油树种对未来气候变化的耐受力相对较弱。

未来气候情景下,各树种适生区分布中心的移动距离在 27.54—113.43 km,多数树种的分布中心在省内移动,变动幅度较小。欧李的分布中心在 2050 年和 2070 年均持续向东北移动,文冠果、黄连木、无患子、山桐子的分布中心从当前到 2070 年向整体东北移动,山鸡椒、光皮楸木的分布中心在 2070 年整体向西北移动,盐肤木、乌桕和小桐子的分布中心在 2070 年整体向东南移动(表 4,图 4)。

3 讨论

3.1 模型的准确性评价

使用 MaxEnt 预测物种分布的优势在于其可以抵消在较小物种分布数据下的过度拟合^[75],虽然样本量的增加会提高预测精度^[76],但也会增加冗余误差^[75]。与其他类似研究相比^[37, 41, 77],本研究收集到的各树种分布数据数量可以满足模拟要求。因各生物燃油树种分布范围和研究历史不同,筛选后用于建模的分布数据量介于 74 条(光皮楸木)—131 条(黄连木)之间。使用 AUC 值可通过综合评价各系列阈值判别能力来评估模

型性能,不受相关系列阈值大小影响,可更合理地表明模型模拟目标物种适生区的有效性^[78–80]。已有研究均已证明 AUC 值在预测物种分布模型有效性^[80–81]。本研究模拟的我国 10 个主要生物燃油树种潜在适生分布情况 AUC 平均值为 0.990,预测精度达到极好水平。

表 4 未来 RCP4.5 气候情景下树种分布中心的变化
Table 4 Shifts for each tree species under future climate change scenario of RCP4.5

树种 Species	1960—2000 年至 2050 年 From 1960—2000 to 2050			2050 年至 2070 年 From 2050 to 2070			最终迁 移方向 Final direction
	位移/km Displacement	角度/(°) Angle	方向 Direction	位移/km Displacement	角度/(°) Angle	方向 Direction	
欧李 <i>Cerasus humilis</i>	60.39	31.10	东北	38.04	31.30	东北	东北
光皮楸木 <i>Cornus wilsoniana</i>	66.89	182.00	西南	32.50	10.62	东北	西北
山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	27.54	35.14	东北	58.77	13.79	东北	东北
小桐子 <i>Jatropha curcas</i>	29.34	91.18	西北	64.21	312.29	东南	东南
山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	46.10	350.15	东南	110.26	164.12	西北	西北
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	69.58	43.43	东北	63.03	235.52	西南	东北
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	70.05	355.58	东南	42.17	94.94	西北	东南
无患子 <i>Sapindus saponaria</i>	55.74	17.80	东北	74.37	202.67	西南	东北
乌桕 <i>Triadica sebifera</i>	63.92	255.61	西南	41.91	35.19	东北	东南
文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolium</i>	113.43	18.66	东北	34.71	288.65	东南	东北

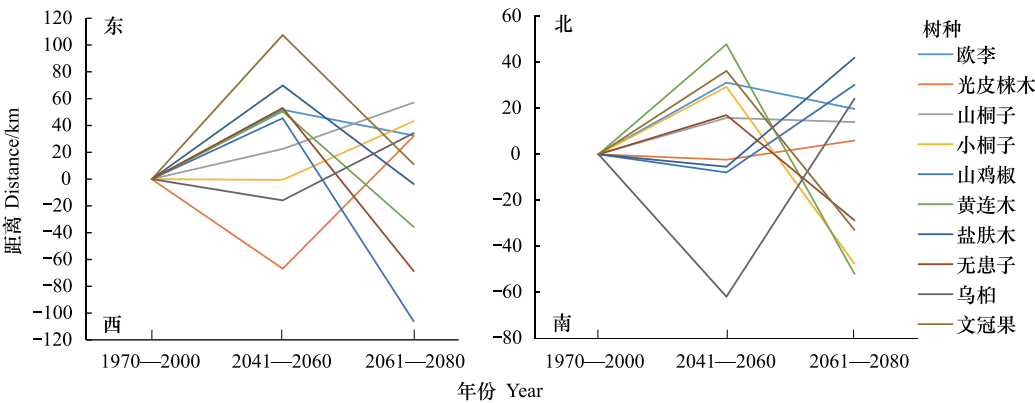


图 4 未来 RCP4.5 气候情景下不同适生等级质心移动
Fig.4 Shifts for different suitable degrees under future climate change scenario of RCP4.5

3.2 影响各树种分布的主导环境因子

物种的分布受一系列相对独立的状态因子和多个交互控制因子的影响,如气候、母质、地形、资源供应、干扰体系、生物功能群类型和人类活动等,从宏观尺度上来看,气候是决定物种分布的主要因素^[39, 82–83]。不同树种具有不同的生态习性,且对气候变化的响应亦不同^[84]。本研究表明降水和温度是影响我国主要生物燃油树种分布的主要因素,其中最暖季度降水量和温度季节性变化标准差在各树种分布贡献率中占有较大比重。

文冠果和欧李主要分布在降水量较低的北方区域,其都具有适应性强、耐旱的生物学特征^[85–86]。同时,文冠果和欧李的季节性变化标准差阈值范围也较大,表明其对温度变化的耐受范围较大,更加适应北方四季较大的温度变化。相比而言,小桐子温度季节性变化标准差最小,表明其对温度变化的耐受性相对最差,适宜生境要求温度变化幅度低。文检^[41]等认为最暖季度降水量和温度季节性变化标准差等生物气候因子对小桐子的分布贡献率最大,与本文结果一致。与小桐子类似,多数生物燃油树种主要分布在我国秦岭以南地区,气

候类型以亚热带季风气候为主,夏季炎热降水充沛,冬季温和,降雨量少。就无患子而言,刘济铭^[37]等研究结果与本研究一致,均得到了最暖季度降雨量是对其分布贡献率最高的环境因子,且其贡献率值与本文几乎相同,为 57.1%。Wang^[87]等研究了光皮桉木和乌桉两个树种的适生性分布,均得到最暖季降水量是影响光皮桉木和乌桉分布的贡献率最大的环境因子。与本研究类似,王祎琛^[40]等发现年降水量和最冷季度最高气温对黄连木的分布影响最大,夏季降雨量较低的西部区域、北部和东北温差较大区域均不适合种植黄连木。刘芙蓉^[88]等研究发现低温比降雨对山桐子分布影响更为重要,这与本研究降水贡献率高于温差贡献率不同,可能是由于其建模时加入了土壤因子。郑维艳^[89]等研究发现山鸡椒的分布主要受年平均降水量、最干月份降水量的影响,这也与山鸡椒喜湿润、不耐旱和贫瘠的特性相符。与本研究方法不同,Guo^[90]等从 19 个生物气候因子选择了 7 个用来建模,并发现年温度变化范围是对山鸡椒分布贡献率最大的因子。有关使用物种分布模型研究盐肤木主导环境因子和适生性分布的文献较少,其主要分布于我国南方,对温度和湿度适应性强。最暖季降水不仅影响生物燃油树种分布,而且还对果实发育和成熟阶段具有影响。研究表明,生物燃油树种果实含油量的积累大多集中在 7—9 月,如黄连木在 7 月上中旬进入油脂转化期^[91],光皮桉木在 7—9 月进入果实膨大和油脂转化期^[92],山桐子根据测得的不同采收期果实的含油率得到最佳采收时间为果实成熟后至 10 月^[93]。

3.3 我国主要生物燃油树种适生区区划

适地适树是造林的重要原则之一^[94],生物燃油树种只有栽植在适合生长的区域才能实现高产稳产。本研究发现,10 个生物燃油树种在我国分布广泛,且存在重叠适生区,下文结合《规划》分析了四个分布亚区内适合种植的生物燃油树种。值得注意的是,由于我国发展生物质能源不能占用农地和影响粮食生产^[95],因此生物燃油树种的实际可种植发展面积会比本研究结果小。

北部亚区主要在秦岭以北地区,主要包括黄土高原、太行山脉和东北平原,以温带大陆性气候和温带季风气候为主,1 月平均气温在 0℃ 以下,雨季降水量小于 800 mm,西北多高原山脉,东南多平原。分析模拟结果可知文冠果和欧李是适合该亚区种植的主要燃油树种。文冠果具有较强的适应性和抗逆能力^[96],我国 300 mm 等降水线以南及以东的大部分湿润和半湿润地区均能满足其生长需要^[40],集中分布于内蒙古、河南、陕西等北方地区;欧李耐旱耐严寒^[97],主要分布于我国北方 13 个省、直辖市和自治区^[98]。有学者使用生态位模型预测了欧李^[42]、文冠果^[38]的适生区分布,结果和本研究一致。与《规划》相比,文冠果的发展区域分布于河北、山西、辽宁、陕西、甘肃、河南等 11 省区,重点区域为坝上高原、科尔沁山地、吕梁山地、陕西洛河流域、湟水河流域 5 个地区,均在本研究预测范围内。《规划》中文冠果在内蒙古中部、新疆天山、河南北部、吉林西部、青海和黑龙江两个省的适宜分布区较少,可参考本研究结果进一步确定适合种植区域。《规划》中没有对欧李的发展省份进行区划,亦可参考本研究结果发展种植。

中东部亚区多为平原和丘陵,包含秦岭、华北平原、四川盆地、长江中下游平原等地区,气候类型以温带季风气候和亚热带季风气候为主,气候较北部亚区温暖湿润。根据模拟结果,该亚区可主要种植山桐子、黄连木、盐肤木、无患子、乌桉等树种。这些树种多为喜光树种,对环境的适应性强,如山桐子^[99]是阳性速生树种,能耐低温高热,分布于华北南部、华中等地区;黄连木^[91]性喜光,对土壤要求不严,主要分布地区包括山东南部、江苏北部、广西北部、贵州以及浙江、安徽、江西三省交界处等地区^[40];盐肤木喜光,喜温暖湿润气候,对环境适应性强,自然分布地区的年平均温度 10—22℃,1 月平均气温 -6—12℃,年降水量 600—2200mm,适合中东部亚区的气候^[100];无患子为强喜光、耐干旱乔木,分布中心包括湖南、江苏、贵州南部、云南东南部、湖北西部等地区;乌桉喜光、喜温、喜水,是中亚热带的代表性树种之一,广泛分布于长江流域地带。前人对山桐子^[88]、黄连木^[40]、无患子^[37]、乌桉^[7]的适生性预测结果与本文结果相符。《规划》中黄连木主要在陕西、河北、河南、湖北、安徽、甘肃、云南等 10 省发展,重点区域为太行山南部山地、安徽中部丘陵区、秦岭中东部山地 3 个区域,均在本研究预测适生区内,但甘肃、山西两省适宜分布区较少;不在《规划》中的贵州、广西、湖南、江西、江苏、重庆等省份黄连木适生区面积大,可考虑逐步推广。无患子在《规划》中主要在广西、重庆、贵州、江

西、福建、浙江等 11 个省区发展,其中广西西南、四川盆地东南部和大巴山区、福建北部、江西东部、浙江中部丘陵盆地、安徽西南区和广东北部山地为重点培育区域,均在模型预测范围内,陕西的适生区较少,江苏省不在《规划》中,可考虑纳入。《规划》中乌桕的分布区主要集中在安徽、福建、江西、河南、湖北、湖南、重庆等 11 个省区,其中四川省仅四川盆地地区较适宜乌桕生长,福建、云南、陕西 3 个省份适宜分布区面积较小,不在《规划》中的广西、江苏等地区存在较大面积的适生区,可作为后续发展区域。《规划》中没有对山桐子和盐肤木的发展省份进行区划,可参考本研究结果进行种植发展。

东南部亚区以平原和丘陵为主,涵盖四川盆地、长江中下游平原、南岭、东南丘陵、武夷山脉等地区,气候类型包括亚热带季风气候和热带季风气候,适生树种为光皮桉木和山鸡椒。光皮桉木生态适应性广^[101],水平分布于长江流域至西南各地的石灰岩地区^[102],核心区域在湖南、江西、湖北、重庆、广西和广东等地。山鸡椒性喜光,在向阳且微酸性的砂质壤中生长良好,主要分布于长江以南省份^[103]。前人对光皮桉木^[7]和山鸡椒^[89]的适生性预测结果与本文相符。《规划》中光皮桉木能源林建设区主要位于湖南、湖北和江西三省,重点区域为南方地区的鄂西湘北和湘东赣西区,在本文预测的光皮桉木适宜分布区内。《规划》中没有对山鸡椒进行发展区划,可参考本研究结果。

西南部亚区以云贵高原及其东南缘为主,具亚热带季风气候和热带季风气候,雨热同期,该地区主要适生树种为小桐子。小桐子喜炎热气候,适宜在年平均气温 17.0—28.5℃、极端低温 0℃ 以上的环境下生长,云南、四川、贵州、广西、广东、海南等地为集中分布区。资料显示云南、四川、贵州省份均有小桐子分布,已有种植面积达 2 万 hm^2 ,重庆和广西两省也将小桐子列为重点木本油料发展对象^[13]。前人对小桐子^[41]的适生区预测结果与本文一致。《规划》中小桐子发展区域集中在四川、云南、广西、贵州四省,重点区域为金沙河流域、澜沧江流域、江河流域和南盘江流域,均位于模型预测的适宜分布区内。

3.4 未来气候条件下生物燃油树种的分布变化

据政府间气候变化专门委员会(IPCC)估计,21 世纪全球气温最高可上升 2.6—4.8℃,最低也将上升 0.3—1.7℃^[104],持续的全球变暖将不可避免地影响植物的生长和分布^[105–106]。温度是影响植物生长的主要因素,适当增温有助于部分植物更快生长^[107],但持续增温度会引起胁迫而改变植物的光合速率和气孔导度,使植物生长减缓甚至死亡,如高温胁迫会损伤小桐子细胞质膜透性,降低其清除有机自由基的能力,严重影响林木生长和产量^[7]。同时,气候变化还会影响传粉昆虫活动期的改变,导致传粉关系的错配或丢失,进而改变林木生长及分布^[108]。

了解未来气候背景下生物燃油树种的分布规律可以更好地开展种植规划与资源利用保护。本研究表明,未来气候背景下,生物燃油树种适生区面积和分布区中心均会发生变化,且因树种而异。各树种适生区的变化在 2070 年与现在相比可分为增加、减小两种,分布区中心变化分为向东北、东南和西北迁移三类。分析结果可知,除欧李和山鸡椒外,其他 8 个生物柴油树种在未来 2070 年的适生区面积均会出现不同程度的减小。7 个树种的分布中心向北方移动,如欧李、文冠果、黄连木、无患子、山桐子的分布中心未来向东北移动,山鸡椒、光皮桉木的分布中心向西北移动,而盐肤木、乌桕、小桐子的分布中心向东南移动。研究表明,未来北半球中、高纬度大部分地区降水强度增加,温度升高, CO_2 浓度增加^[109],可以满足向北方移动树种对热量资源、水分的需求。此外,由于我国东部缺少高大山脉与高原,北部寒流可迅速向南方移动,增加了未来南方地区发生气候极端事件的频率和强度,导致部分树种适生区面积的减小和破碎化程度的增加^[84, 110–111]。还有研究表明,未来我国西部干旱可能更加恶化,使得部分树种的适生区向东移动^[84]。前人在研究无患子、白栎(*Quercus fabri*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、白豆杉(*Pseudotaxus chienii*)等多数树种未来分布时也发现其适生区面积减小,且分布中心向东北移动^[67, 87, 112–115]。除了我国,TUCK^[115]在研究欧洲主要生物质能源作物时也发现,随着未来夏季温度升高,能源作物分布会明显向北移动,南欧许多能源作物产量在 2080 年将急剧下降。

综合来看,针对以上未来气候情景下生物燃油树种的分布变化需采取不同的发展路径。对于当前分布在适生地区的树种,应加强经营管理,提高其生产潜力。对于欧李、山鸡椒适生区面积持续增加的树种,可开展

规模化种植。对其他 8 个未来适生区面积减小的树种,可首先开展种质资源收集和筛选,在保存遗传多样性的同时筛选优良种质,并开展无性繁殖试验,形成高产稳产优良品种及其配套技术。对于未来新增加的适生区域,可以在种质资源筛选基础上,选取优良特色种质,逐步开展人工引种栽培试验,开展异地保存,并制定合理的生态调控措施,避免对当地生态系统造成影响。需要指出的是,本研究所指气候变化指宏观尺度上的变化,针对某一特定地区气候变化的幅度和方向可能存在差异,因此在开展生物燃油树种种植规划的过程中,还需要结合地区小气候进行综合研判。

4 结论

(1)本研究基于 MaxEnt 模型研究了当前和未来气候背景下我国 10 个主要生物燃油树种的分布,发现影响各树种分布的主要环境因子各异,主要包括平均日较差、温度季节性变化标准差、最冷季度平均温度、最湿月降水量、降水量变异系数、最暖季度降水量和最冷季度降水量,其中最暖季度降水量和温度季节性变化标准差的贡献率相对较高。

(2)按照各树种适生区当前分布情况,将我国生物燃油树种划分为北部亚区、中东部亚区、东南部亚区和西南部亚区,北部亚区主要树种为文冠果和欧李,极高适生区面积分别为 70.06 万 km²和 59.88 万 km²;中东部亚区主要树种为盐肤木、山桐子、无患子、乌桕和黄连木,极高适生区面积分别为 60.38 万 km²、94.01 万 km²、64.85 万 km²、54.88 万 km²和 117.74 万 km²;东南部亚区主要树种为光皮楸木和山鸡椒,极高适生区面积分别为 98.22 万 km²和 63.67 万 km²;西南部亚区主要树种为小桐子,极高适生区面积为 43.38 万 km²。

(3)2070 年气候背景下,10 个树种的适生区面积表现为增加和减小两种类型,欧李和山鸡椒分别增加 31.79 万 km²和 5.61 万 km²,其余 8 个树种均表现为面积减小,减小幅度最小的为盐肤木,减小 5.25 万 km²,减小幅度最大的是文冠果,减小 38.63 万 km²。各树种适生区分布中心呈向东北、西北和东南方向移动三种,光皮楸木和山鸡椒向西北移动,盐肤木、乌桕和小桐子向东南移动,其余树种均向东北移动。

本研究可为了解当前和未来我国主要生物燃油树种适生区变化,保护和发展生物燃油树种资源,确定各区域适合种植树种,促进林业生物质能源产业发展提供参考。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Press, Cambridge, UK. 2021.
- [2] 中国国家发展和改革委员会应对气候变化司. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献. 2015.
- [3] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [4] 方精云. 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173-1176.
- [5] 张传坤, 牛文东, 赵舒铭, 张远镇, 牛子凡. 全球能源短缺调查及思考. 国网技术学院学报, 2019, 22(2): 36-38.
- [6] Liang X Y, Wang Z H, Zhou Z J, Huang Z Y, Zhou J H, Cen K F. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China. Journal of Cleaner Production, 2013, 39: 24-31.
- [7] 代光辉. 气候变化下中国七种木本油料树种的潜在分布[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [8] 刘瑾, 郭建国. 生物燃料的发展现状与前景. 生态学报, 2008, 28(4): 1339-1353.
- [9] Sun L Y, Li H M, Dong W J, Shi D H, Zhou D J. An analysis on advantages and disadvantages of developing forest carbon sequestration projects in China. Ecologic Science, 2005, 24(1): 42-45.
- [10] Wslsh M P. German survey evaluates costs, benefits of biofuels. Walsh Carline, 2004, 6: 16-18.
- [11] Li X F, Hou S L, Su M, Yang M F, Shen S H, Jiang G M, Qi D M, Chen S Y, Liu G S. Major energy plants and their potential for bioenergy development in China. Environmental Management, 2010, 46(4): 579-589.
- [12] Zhuang D F, Jiang D, Liu L, Huang Y H. Assessment of bioenergy potential on marginal land in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1050-1056.
- [13] 国家林业和草原局. 全国林业生物质能源发展规划(2011-2020 年). 2013.
- [14] 陈振超, 倪张林, 莫润宏, 钟冬莲, 汤富彬. 7 种木本油料油脂品质综合评价. 中国油脂, 2018, 43(11): 80-85.
- [15] 许佳敏, 佟祎鑫, 王菊花, 曹月琴, 殷振雄, 孔维宝. 文冠果油的营养成分及功能活性研究进展. 中国油脂, 2022, 47(10): 77-82.
- [16] 常志娟, 李红, 卜琳斐. 冷、热榨文冠果油品质比较分析. 中国油脂, 2019, 44(10): 121-123.

- [17] 陈子茜,陈耀兵,黄秀芳,郭小妮,左慧瑶,罗凯.采收期对“鄂选2号”山桐子果实成分及脂肪酸组成变化影响.中国粮油学报,2023,38(2):96-103.
- [18] 黄莹莹,黎栩成,班彩玉,吴春燕,谭义秋.广西山苍子油提取工艺及成分分析.食品工业,2022,43(12):84-88.
- [19] 秦愉,庞丽蓉,符少团,贺飞翔,葛浩毅,姚瑰玮.无患子种仁油的提取工艺优化及脂肪酸组成分析.中国油脂,2018,43(1):13-15.
- [20] 牟洪香,侯新村,刘巧哲.不同地区文冠果种仁油脂脂肪酸组分及含量的变化规律.林业科学研究,2007,20(2):193-197.
- [21] 赵晴,陈保华.文冠果油脂脂肪酸乙酯的制备方法.林业科技通讯,2022(10):54-56.
- [22] 郑玉琳,刘济铭,史双龙,贾黎明,翁学煌,罗水晶,盛克寨.无患子果实成熟过程及其油脂、皂苷动态变化.南京林业大学学报:自然科学版,2021,45(4):76-82.
- [23] 陈建烟,刘超兰,刘伟,陈爱平.无患子种仁油提取工艺优化及其理化性质研究.西部林业科学,2020,49(4):22-28.
- [24] 董蕾,苏有勇,孙浩伟,周慧,徐天宇,邵子昕.固体碱催化小桐子油裂化制备生物基燃料油的研究.化工新型材料,2020,48(7):231-234.
- [25] 刘东风.无患子油制备生物柴油的工艺研究.粮食科技与经济,2018,43(1):114-117.
- [26] 张玉锋,王挥,宋菲,陈华,张建国,雷新涛.棕榈油加工技术研究进展.粮油食品科技,2018,26(1):30-34.
- [27] 高红芳.酶法制备欧李汁条件优化及果汁饮料配方研究.食品工业,2022,43(8):39-43.
- [28] 郭联天,冯志波,黄阳阳,吴雨轩,史金宝,田桂芝,孙婉.利用植物有效成分合成天然洗手液.现代园艺,2018,14:211.
- [29] 江冠宇,田晓菊,张惠玲.不同干燥方法对欧李叶袋泡茶的影响.食品工业,2022,43(6):116-121.
- [30] 傅晓军,胡茂松,黄飞,廖文胜,罗洪.多用途树种乌桕的开发应用价值与栽培关键技术.林业科技情报,2022,54(4):103-106.
- [31] 高恩婷,曾庆扬,谷战英,卢雨析,李扬,冯楠可,熊荟璇,张春来,曾乐景.不同间作模式对山苍子光合特性及其栽培土壤水分和养分的影响.经济林研究,2022,40(4):61-71.
- [32] 黄华明,余卓荣,邱群,陈杰,黄静怡.无患子高接换种配套栽培技术优化及应用.热带农业科学,2021,41(7):8-13.
- [33] 王阳,张付豪,窦敏,许婷,陈昊.山苍子植株再生体系的优化.林业科学,2022,58(8):126-135.
- [34] 徐阳,龚榜初,吴开云,白杰健.山桐子栽培管理技术.现代农业科技,2019,12:121-122.
- [35] 姚鸿翼.山乌桕苗木培育技术.林业与生态,2022,5:40-41.
- [36] 高媛,贾黎明,高世轮,苏淑钗,段劫,翁震.无患子树体合理光环境及高光效调控.林业科学,2016,52(11):29-38.
- [37] 刘济铭,贾黎明,王连春,孙操稳,王昕,郑玉琳,陈仲,翁学煌.基于MaxEnt的中国无患子属适生区区划及生态特征.林业科学,2021,57(5):1-12.
- [38] 贺晓慧,宁小莉,郭彦龙,卫海燕.我国文冠果分布的气候地理特征及未来气候情景下适宜种植区预测.农业现代化研究,2019,40(2):316-324.
- [39] 谢彩香,张琴,白光宇.木本能源植物文冠果的生态特征及区划.植物科学学报,2018,36(2):229-236.
- [40] 王祎琛,毛俊儒,陈星京,张忠强,杨秀云.应用最大熵模型预测黄连木在中国的潜在分布.东北林业大学学报,2021,49(7):61-65.
- [41] 文检,宋经元,谢彩香,张琴,曾凡琳,张艺.基于最大信息熵模型的能源物种麻疯树潜在适宜区.植物科学学报,2016,34(6):849-856.
- [42] 张琴,宋经元,邵飞,傅生辰,孙成忠,袁丽钗,谢彩香.防风固沙优良树种欧李的潜在适生区及生态特征.北京林业大学学报,2018,40(3):66-74.
- [43] 李利平,何思源,蒋祥明,王拓,赵辉辉,崔伟宏,郑姚闽,海鹰,万华伟.物种分布区特征及其对生物多样性保育的意义.中国科学:生命科学,2019,49(8):929-937.
- [44] 朱耿平,刘国卿,卜文俊,高玉葆.生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用.生物多样性,2013,21(1):90-98.
- [45] Lanoiselet V, Cother E J, Ash G J. CLIMEX and DYMEX simulations of the potential occurrence of rice blast disease in south-eastern Australia. Australasian Plant Pathology, 2002, 31(1): 1-7.
- [46] Busby J. BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system. Plant Protection Quarterly, 1991, 56(3): 621.
- [47] Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. Biodiversity & Conservation, 1993, 2(6): 667-680.
- [48] Stockwell D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 143-158.
- [49] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning, 2004, 655-662.
- [50] Li G Q, Du S, Wen Z M. Mapping the climatic suitable habitat of oriental arborvitae (*Platycladus orientalis*) for introduction and cultivation at a global scale. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-9.
- [51] Merow C, Smith M J, Edwards T C Jr, Guisan A, McMahon S M, Normand S, Thuiller W, Wüest R O, Zimmermann N E, Elith J. What do we gain from simplicity versus complexity in species distribution models? Ecography, 2014, 37(12): 1267-1281.
- [52] Merow C, Smith M J, Silander J A Jr. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. Ecography, 2013, 36(10): 1058-1069.

- [53] 张海涛, 罗渡, 牟希东, 徐猛, 韦慧, 罗建仁, 章家恩, 胡隐昌. 应用多个生态位模型预测福寿螺在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1277-1284.
- [54] 雷军成, 徐海根. 基于 MaxEnt 的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 137-141.
- [55] 张颖, 李君, 林蔚, 强胜. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2970-2976.
- [56] O'Donnell J, Gallagher R V, Wilson P D, Downey P O, Hughes L, Leishman M R. Invasion hotspots for non-native plants in Australia under current and future climates. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 617-629.
- [57] 王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1230-1237.
- [58] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. 生态学报, 2011, 31(5): 1221-1229.
- [59] Butler C J, Stanila B D, Iverson J B, Stone P A, Bryson M. Projected changes in climatic suitability for Kinosternon turtles by 2050 and 2070. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(21): 7690-7705.
- [60] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [61] Ardestani E G, Mokhtari A. Modeling the lumpy skin disease risk probability in central Zagros Mountains of Iran. *Preventive Veterinary Medicine*, 2020, 176: 104887.
- [62] 蒙莉娜, 郑新奇, 赵璐, 邓婧. 基于生态位适宜度模型的土地利用功能分区. 农业工程学报, 2011, 27(3): 282-287.
- [63] 荣贵纯, 吴尚, 段劼, 马履一, 苏淑钗, 苏曼琳. 文冠果叶幕微气候与结果产量的关系. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(9): 57-61.
- [64] 苏曼琳, 吴尚, 马履一, 段劼, 荣贵纯, 苏淑钗, 敖妍. 文冠果结果与枝条主要性状因子间的相关分析. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 59-63.
- [65] Wang M Z, Liu J M, Zheng Y L, Sun C W, Wang X, Xu Y Y, Wang L X, Zhao G C, Weng X H, Jia L M, Sheng K Z, Wei C S, Yang M Y. Environmental factors influence the seed phenotypic variation of *Sapindus mukorossi* Gaertn. and *Sapindus delavayi* (Franch.) Radlk. in China. *Forest Science*, 2022, 68(5/6): 487-495.
- [66] 吴尚, 马履一, 段劼, 苏曼琳, 荣贵纯, 苏淑钗, 敖妍. 文冠果花期和果期内源激素的动态变化规律. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 111-118.
- [67] Liu J M, Wang L C, Sun C W, Xi B Y, Li D D, Chen Z, He Q Y, Weng X H, Jia L M. Global distribution of soapberries (*Sapindus* L.) habitats under current and future climate scenarios. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-13.
- [68] Zhang Y Q, Wen Y, Bai Q, Ma Z, Ye H L, Su S C. Spatio-temporal effects of canopy microclimate on fruit yield and quality of *Sapindus mukorossi* Gaertn. *Scientia Horticulturae*, 2019, 251: 136-149.
- [69] 陈敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体减排和对中国的挑战. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 436-442.
- [70] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [71] Liu J M, Xu Y Y, Sun C W, Wang X, Zheng Y L, Shi S L, Chen Z, He Q Y, Weng X H, Jia L M. Distinct ecological habits and habitat responses to future climate change in three east and Southeast Asian *Sapindus* species. *Forest Ecology and Management*, 2022, 507: 119982.
- [72] Araujo M B, Pearson R G, Thuiller W, Erhard M. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 2005, 11(9): 1504-1513.
- [73] 郭恺琦, 姜小龙, 徐刚标. 薄片青冈潜在适生区及气候变化对其分布的影响. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2563-2574.
- [74] 陈冰瑞, 邹慧, 孟祥红, 王铃茜, 郝秀丽, 康勋, 王臣, 张欣欣. 气候变化对柴胡与狭叶柴胡适生分布的影响. 生态学报, 2022, 42(20): 8471-8482.
- [75] 赵晓同, 巩娟娟, 赵莎莎, 孟浩贤, 闫伯前, 齐欣宇. 样本量及其空间分布对物种分布模型的影响. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 208-215.
- [76] Reese G C, Wilson K R, Hoeting J A, Flather C H. Factors affecting species distribution predictions: a simulation modeling experiment. *Ecological Applications*, 2005, 15: 554-564.
- [77] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [78] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [79] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [80] 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, McC M Overton J, Townsend Peterson A, 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.
- [81] 李英杰, 德永军, 刘宇欣, 张国盛. 基于 MaxEnt 与 Arcgis 模型的内蒙古自治区文冠果适宜性区划分析. 西部林业科学, 2021, 50(3): 66-73.
- [82] Broennimann O, Treier U A, Müller-Schärer H, Thuiller W, Peterson A T, Guisan A. Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters*, 2007, 10(8): 701-709.

- [83] Gallardo B, Aldridge D C. Evaluating the combined threat of climate change and biological invasions on endangered species. *Biological Conservation*, 2013, 160: 225-233.
- [84] 郑维艳, 曹坤芳. 中国柯属 5 种资源植物潜在地理分布及其对气候变化的响应. *植物科学学报*, 2019, 37(4): 474-484.
- [85] 谢志玉, 张文辉. 干旱和复水对文冠果生长及生理生态特性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1759-1767.
- [86] 姜英淑, 陈书明, 王秋玉, 卢宝明. 干旱胁迫对 2 个欧李种源生理特征的影响. *林业科学*, 2009, 45(6): 6-10.
- [87] Wang W G, Tang X Y, Zhu Q L, Pan K, Hu Q C, He M X, Li J T. Predicting the impacts of climate change on the potential distribution of major native non-food bioenergy plants in China. *PLoS One*, 2014, 9(11): e111587.
- [88] 刘芙蓉, 罗建勋, 杨马进. 山桐子的地理分布及其潜在适宜栽培区划. *林业科学研究*, 2017, 30(6): 1028-1033.
- [89] 郑维艳, 曹坤芳. 未来气候变化对四种木姜子地理分布的影响. *广西植物*, 2020, 40(11): 1584-1594.
- [90] Guo Y L, Zhao Z F, Zhu F X, Li X. Climate change may cause distribution area loss for tree species in Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2022, 511: 120134.
- [91] 秦飞, 郭同斌, 刘忠刚, 宋明辉. 中国黄连木研究综述. *经济林研究*, 2007, 25(4): 90-96.
- [92] 国家林业局. 国家林业局关于印发光皮树和盐肤木原料林可持续培育指南的通知. 2017.
- [93] 王灿, 罗恒, 胡中立, 刁英. 山桐子的研究进展. *林业世界*, 2019, 8(2): 40-45.
- [94] 翟明普, 沈国舫. 森林培育学. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [95] Cao B, Bai C K, Zhang M, Lu Y M, Gao P F, Yang J J, Xue Y, Li G S. Future landscape of renewable fuel resources: current and future conservation and utilization of main biofuel crops in China. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150946.
- [96] 高述民, 马凯, 杜希华, 李凤兰. 文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia*) 研究进展. *植物学通报*, 2002, 19(3): 296-301.
- [97] 刘保东, 孙井山, 杜鹃, 高红建. 西部特有野生树种欧李优良类型选择研究. *内蒙古林业科技*, 2008, 34(4): 33-35.
- [98] 王有信, 何卫军, 李向东, 贺润平. 欧李种质资源分布及种群分类特性研究. *山西果树*, 2005, 6: 36-38.
- [99] 戴国富, 谢世友, 万腾, 安小凤. 山桐子开发利用前景与展望. *重庆三峡学院学报*, 2011, 27(3): 105-109.
- [100] 刘春强. 盐肤木基础研究及利用. *中国林业*, 2008, 23: 53.
- [101] 李斌, 原梓洋. 光皮楸木籽油的提取及其品质的研究. *食品研究与开发*, 2018, 39(6): 41-45.
- [102] 王明怀, 林军, 邓文剑, 张应中, 张良波, 何祯祥. 光皮楸木果实特征及产量. *林业与环境科学*, 2017, 33(3): 24-28.
- [103] 张水英, 郭强, 高小力, 郭志琴, 赵云芳, 柴兴云, 屠鹏飞. 樟科药用植物山鸡椒的化学成分和药理活性研究进展. *中国中药杂志*, 2014, 39(5): 769-776.
- [104] Qin D, Manning M, Chen Z. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Computational Geometry*, 2013, 18(2): 95-123.
- [105] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [106] Hedhly A, Hormaza J I, Herrero M. Global warming and sexual plant reproduction. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(1): 30-36.
- [107] Saxe H, Cannell M G R, Johnsen Ø, Ryan M G, Vourlitis G. Tree and forest functioning in response to global warming. *The New Phytologist*, 2001, 149(3): 369-399.
- [108] 施雨含, 任宗昕, 赵延会, 王红. 气候变化对植物-传粉昆虫的分布区和物候及其互作关系的影响. *生物多样性*, 2021, 29(4): 495-506.
- [109] Zwieniecki M A, Secchi F. Threats to xylem hydraulic function of trees under 'new climate normal' conditions. *Plant, Cell & Environment*, 2015, 38(9): 1713-1724.
- [110] Smith J B, Schneider S H, Oppenheimer M, Yohe G W, Hare W, Mastrandrea M D, Patwardhan A, Burton I, Corfee-Morlot J, Magadza C H D, Fussler H M, Pittcock A B, Rahman A, Suarez A, van Ypersele J P. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reasons for concern. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(11): 4133-4137.
- [111] Zank C, Becker F G, Abadie M, Baldo D, Maneyro R, Borges-Martins M. Climate change and the distribution of neotropical red-bellied toads (*Melanophryniscus*, Anura, Amphibia): how to prioritize species and populations? *PLoS One*, 2014, 9(4): e94625.
- [112] 李璇, 李焱, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区. *林业科学*, 2018, 54(8): 153-164.
- [113] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 张晓玮. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟. *生态学报*, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [114] 张文秀, 寇一翮, 张丽, 曾卫东, 张志勇. 采用生态位模拟预测濒危植物白豆杉 5 个时期的适宜分布区. *生态学报*, 2020, 39(2): 600-613.
- [115] Tuck G, Glendinning M J, Smith P, House J I, Wattenbach M. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. *Biomass and Bioenergy*, 2006, 30(3): 183-197.