应用生态学报 2019年11月 第30卷 第11期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Nov. 2019, 30(11): 3833-3843 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201911.020

气候变化下千金榆在我国潜在分布区预测

赵儒楠[1,2] 何倩倩[1,2] 褚晓洁[3] 鲁志强[4] 祝遵凌[1,2,5*]
([1]南京林业大学风景园林学院，南京 210037; [2]南京林业大学南方现代林业协同创新中心，南京 210037; [3]浙江师范大学化学与生命科学学院，浙江金华 321004; [4]中国科学院西双版纳热带植物园，云南西双版纳 666303; [5]南京林业大学艺术设计学院，南京 210037)

摘 要 气候变化严重影响植物的地理分布格局，植物分布对气候变化响应的区域差异性也将为引种和保存提供重要的指导.本研究基于 ArcGIS 与 MaxEnt 模型，利用 176 个千金榆地理信息和 13 个气候变量，对当前和未来的生态位进行重建.结果表明: 模型模拟当代潜在分布区可信度极高，测试集与训练集 AUC 值分别为 0.973 和 0.957.主要核心适宜区集中在秦岭、长白山及其各自的邻近区域，其他为零星的“岛屿”式分布.贵州、江西、云南、福建等地未发现千金榆的分布，但存在一定的适宜分布区.随着未来气候变暖，千金榆生态适宜区明显增加，主要表现为“向高海拔地区收缩”、“北扩”和“东扩”.但核心适宜区略有减少，具体表现为“南缩”、“中稳”和“北扩”.千金榆的分布对气候变暖的响应存在明显的区域性，在东部江苏、安徽等地，因其独特的地理位置与气候环境，该地区开始成为千金榆生态适宜区; 在较低纬度的南方，原有的低海拔地区可能不再适宜千金榆生存; 中部秦岭地区气候为南北的渐变区，有较强的缓冲能力，气候变暖对其分布区影响不大; 较高纬度的长白山地区及其邻近区域愈发适宜千金榆生存.

关键词 千金榆; MaxEnt; 气候变化; 气候因子; 潜在分布区

Prediction of potential distribution of *Carpinus cordata* in China under climate change. ZHAO Ru-nan[1,2], HE Qian-qian[1,2], CHU Xiao-jie[3], LU Zhi-qiang[4], ZHU Zun-ling[1,2,5*] ([1]*College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*; [2]*Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*; [3]*College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua* 321004, *Zhejiang, China*; [4]*Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna* 666303, *Yunnan, China*; [5]*College of Art and Design, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*).

Abstract: Climate change seriously affects the geographical distribution of plants. Regional differences in plant response to climate change will provide important guidance for species introduction and conservation. Based on ArcGIS and MaxEnt model, we used 176 geographic information of *Carpinus cordata* and 13 climatic variables to reconstruct its current and future niche. The results showed that the model had a high credibility in simulating contemporary potential distribution areas. The AUC values of the test set and the training set of the model were 0.973 and 0.957, respectively. The main core suitable areas were concentrated in Qinling, Changbai Mountain and their adjacent areas, with other sporadic “island” distribution. *C. cordata* is not distributed in Guizhou, Jiangxi, Yunnan and Fujian, but the model predicted some suitable distribution areas in those provinces. With climate warming in the future, ecologically suitable areas of *C. cordata* would increase significantly, mainly as “shrinking to high altitude areas”, “expanding northward”, and “expanding eastward”. However, core suitable areas would be slightly reduced, which would be manifested as “shrinking southward”, “moderate stability”, and “expanding northward”. The response of *C. cor-*

本文由国家自然科学基金项目(31770752)、江苏省“333 工程”项目(BRA2018065)和江苏省科技支撑计划项目(BM2013478)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31770752), the Jiangsu Province “333 Project” (BRA2018065) and the Scientific and Technological Suppot Project of Jiangsu Province (BM2013478).
2019-03-17 Received, 2019-09-26 Accepted.
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: zhuzunling@aliyun.com

data distribution to climate warming was obviously regional. Eastern Jiangsu, Anhui, and other places would become ecologically suitable areas for *C. cordata* because of their unique geographical location and climatic environment. The lower latitudes of the south, the original low-altitude areas might no longer be suitable for survival. The central Qinling region was a transition region from north to south, with strong buffer capacity, and climate warming had little effect on its distribution area. The Changbai Mountain and its adjacent areas at higher latitudes were more suitable for *C. cordata*.

Key words: *Carpinus cordata*; MaxEnt; climate change; climatic factor; potential distribution.

植物的地理分布与环境条件密不可分，是物种与环境长期相互作用的结果.它主要取决于植物对环境的适应性.决定物种地理分布的因素多种多样，有气候因子、土壤因子、地形因子等，但其中最主要的还是气候因子[1-3]，植物的地理分布与气候因子的关系一直是当前研究的热点[4].气候变暖在不同地区会对植物产生不同的影响，同一地区的不同植物在相同气候变化条件下也会有不同的结果[5-9].

早在几百万年前，地球气候就发生过巨大变化，导致生物大规模迁移.在冰期，地球生物多在避难所避难，冰期逐渐退去后，生物再由避难所向外扩张[10-12].最后一次冰河期结束后气候相对稳定，维持着当前植物的生存状态与地理分布格局[13]，然而工业革命以来，随着温室气体排放量的增加，全球变暖持续加剧，植物的地理分布也发生了重大变化.全球气候变暖严重影响着植物的生存状态，使一些地区植物的潜在生境迅速减少，这严重影响着全球生态系统和物种多样性的保存[14].近年来，越来越多的学者们意识到气候变暖对当今植物生存的巨大影响，他们开始探究气候变化与植物地理分布格局的关系，以期为植物寻求新的栖息地.随着对气候变化研究的深入以及地理信息技术的发展，物种分布模型成为了预测物种在气候变化下潜在分布区的重要手段，目前国际上已经建立了多种生态位模型用于物种分布区的预测，例如: Domain、Bioclim、Garp、Climex 和 MaxEnt 等模型[15-19].其中，MaxEnt 模型是基于最大熵原理提出的生态位模型，即使在样本较少的情况下，它也可以得出较好的结果，其预测的准确度也往往高于其他模型[20-23].同时，MaxEnt 模型因具有预测精度高、操作简单、运算结果稳定等特点，受到了广大学者的青睐[24-26].

千金榆(*Carpinus cordata*)又名千金鹅耳枥，是桦木科(Betulaceae)鹅耳枥属落叶乔木，主要分布于我国东北、华北、河南、湖北、陕西和甘肃以及东亚地区的日本、韩国、朝鲜和俄罗斯的滨海边疆区等地[27-28].其树形优美、叶果秀丽，可作为优良的园林绿化树种开发利用; 其材质坚实，可用于制作家具和木制品.千金榆小枝初时疏被长柔毛，后变无毛; 叶上面疏被长柔毛或无毛，下面沿脉疏被短柔毛; 叶柄无毛或疏被长柔毛[27-29].在分类上千金榆有 2 个变种，华千金榆(*C. cordata* var. *chinensis*)小枝密被短柔毛及稀疏长柔毛[27-28,30]; 毛叶千金榆(*C. cordata* var. *mollis*)小枝及叶柄密被绒毛，叶背面密被短柔毛[27-28,31].目前，国内外对千金榆的研究较少，现有研究也仅以研究植物群落结构为主，从未涉及千金榆的潜在分布区预测[32-33].国内千金榆多为野生树种，少有学者对其进行开发利用，基于 MaxEnt 模型预测千金榆潜在分布区，对于进一步了解我国千金榆资源分布具有重要意义，同时也可为我国进一步开发利用千金榆提供理论指导.

本研究通过 ArcGIS 软件与 MaxEnt 模型相结合，利用气候数据和千金榆分布数据，模拟千金榆在我国当前、20 世纪 50 年代(2050s)以及 20 世纪 70 年代(2070s)的潜在分布区，拟进一步了解: 当前千金榆在我国的生态适宜区及核心适宜区，以便更好地开展野外调查及引种驯化工作; 影响千金榆在我国地理分布的主要气候因子; 未来气候变化对千金榆地理分布的影响; 千金榆在我国未来生态适宜区与当前的差异，为其迁地保存和园林应用提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 千金榆分布数据收集与处理 千金榆的分布数据主要来源于中国数字植物标本馆(CVH，http://www.cvh.org.cn/)和全球生物多样性信息网络(GBIF，http://www.gbif.org/)等，并结合作者野外调查数据，将其整理至 Excel 表格中，共获得 1212 条数据.本研究所收集的千金榆分布数据，不包含其变种华千金榆与毛叶千金榆.去除重复的标本记录(相同采集时间与地点)、地理位置不清楚和人工引种栽培的标本记录后，通过谷歌坐标拾取系统和百度坐标拾取系统获取相应的经纬度坐标，位置信息至少精确到乡、镇级，并以谷歌卫星地图检验其准确性，最终共获得 176 个有效坐标.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.1.2 气候变量及地图数据　当代(1950s—2000s)、未来(2050s,2070s)等时期的19个气候变量数据均来源于世界气候数据库 WorldClimate (http://www.worldclim.org/),空间分辨率为30″.未来气候情景数据选用通用大气环流模式 CCSM4,未来温室气体代表性浓度路径包括 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5 等4种排放场景,分别表示温室气体排放的低、中低、中高和高4种情景[34].利用 ArcGIS 软件裁剪这19个气候变量数据,并转化为 ASCII 格式,以便直接加载于 MaxEnt 软件.

研究中所使用的底图均下载自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平台(http://www.resdc.cn/).

1.2　研究方法

1.2.1 气候变量的选择　为了避免各气候变量之间可能存在的相关性而影响预测的准确度[35-36],利用 ArcGIS 10.2 对这19个生物气候变量进行相关性分析.当两个气候变量相关系数<0.85时,相关气候变量全部保留;当两个气候变量相关系数≥0.85时,则保留其中生态意义更为重要的气候变量.选取原则根据 MaxEnt 模型输出的贡献率,同时,根据相关文献和千金榆实际生境筛选对千金榆生存与分布较为重要的气候变量,最终选取13个气候变量用于建立模型(表1).

1.2.2 MaxEnt 模型运行与评价　将千金榆分布数据与气候变量导入 MaxEnt 模型,各参数设置如下:测试集为分布点的25%,训练集为分布点的75%[37],最大迭代次数为500,最大背景点数量为10000,采用刀切法 Jackknife 检验权重,其余选项按默认设置.将上述模型重复运行10次,选取受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,ROC)下的面积值(AUC 值)最大的一组作为最终预测结果.

利用 AUC 值对模型精度进行评价.AUC 值越大,表明模型预测精度越高.一般来说:0.50~0.60表示模型预测无效;0.60~0.70表示模型预测较差;0.70~0.80表示模型预测一般;0.80~0.90表示模型预测良好;0.90~1.00表示模型预测极好[38].

1.2.3 千金榆生境适宜性等级分类　利用 ArcGIS 10.2 软件将 MaxEnt 模型预测结果中的 asc 格式文件转栅格、重分类后绘制出千金榆在我国当代、2050s 以及2070s 的潜在分布图.

ArcGIS 10.2 软件提供了多种重分类方法.其中,Manual 划分过细;Standard Deviation、Geomentrical Interval、Quantile以及Natural breaks等划分的生态适宜区与高适宜性指数地区过大.尝试以0.10、0.20作为划分当代千金榆生态适宜区的阈值,发现其生态适宜区过大、过小,这与千金榆在我国分布现状严重不符,因此采用平均间距法(equal interval)将适宜性指数划分为6个等级.逻辑值采用 ArcGIS 10.2软件的默认划分结果,最终将其按适宜性指数划分成:0.00~0.15、0.15~0.30、0.30~0.45、0.45~0.60、0.60~0.75、0.75~1.00共6级,其中,0.00~0.15为不适宜区;0.15~1.00为生态适宜区,0.60~1.00为核心适宜区;0.15~0.60为一般适宜区.未来千金榆潜在分布区适宜性指数划分亦采用相同等级.

表1　最大熵模型中各个气候变量的贡献率

Table 1　Contribution rate of each climate variable in MaxEnt model

变量代码 Variable code	变量描述 Variable description	单位 Unit	贡献率 Contribution rate (%)
bio12	年降雨量 Annual precipitation	mm	46.0
bio3	等温性 Isothemality	%	14.1
bio10	最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃	12.1
bio9	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	℃	11.2
bio6	极端最低温 Minimum temperature of the coldest month	℃	7.2
bio1	年均温 Annual mean temperature	℃	4.0
bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter	℃	3.3
bio18	最暖季节降雨量 Precipitation of the warmest quarter	mm	0.8
bio5	极端最高温 Maximum temperature of the warmest month	℃	0.6
bio17	最干季降雨量 Precipitation of the driest quarter	mm	0.3
bio8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃	0.1
bio13	最湿月降雨量 Precipitation of the wettest month	mm	0.1
bio16	最湿季降雨量 Precipitation of the wettest quarter	mm	0.1

1.2.4 气候因子重要性评估　MaxEnt 模型提供了贡献率、置换重要性等方式来评价气候因子对千金榆分布的重要性.贡献率是 MaxEnt 模型在训练时环境变量对适应模型的贡献量,最终将贡献量以百分数的形式输出.置换重要性是环境变量所导致的训练 AUC 值的下降幅度,AUC 值下降幅度越大,模型对该环境变量依赖越大.本研究通过贡献率来评估影响千金榆当代地理分布的主要气候因子.

1.2.5 未来生态适宜区面积计算　利用 ArcGIS 10.2 软件对未来千金榆潜在分布图进行重分类,重分类后根据各阈值区间的栅格数、栅格边长计算各阈值区间面积及总面积.评估未来千金榆生态适宜区、核

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

心适宜区与当前的面积变化时，采用 2050s、2070s 各气候变化情景下的平均面积.

2 结果与分析

2.1 模型准确性

在当前气候条件下，MaxEnt 模型输出的 ROC 曲线表明，基于 13 个气候因子构建的当代地理分布模型的测试集与训练集 AUC 值分别为 0.973 和 0.957，说明模型预测结果极好，可信度极高(图 1).

2.2 当前气候条件下千金榆潜在分布区

基于 176 个地理分布数据与 13 个气候变量，利用 ArcGIS 与 MaxEnt 模型预测当前气候条件下千金榆在我国的潜在分布区.由图 2、表 2 可知，当前千金榆生态适宜区总面积约 120.09 万 km^2，约占我国国土面积的 12.5%，主要位于华北、东北地区的吉林、辽宁、黑龙江以及河北等地区，中部、中南和中东部地区的陕西、山东、甘肃、四川、河南、湖北、山西、贵州以及重庆等地区，此外，西藏、广西、江西、宁夏、天津、内蒙古、福建、广东以及我国台湾省等地区亦有少量生态适宜区.核心适宜区面积约 17.53 万 km^2，约占我国国土面积的 1.8%，主要分为两部分，一部分以陕西和甘肃为中心，包括周围的湖北、河南、山西、重庆以及四川等地区，另一部分以辽宁和吉林为中心，在其他地区呈零星的“岛屿”式分布.千金榆核心适宜区在陕西、辽宁、甘肃、湖北、河南等 5 省最为集中，其面积超过千金榆核心适宜区总面积的 82.9%，这些地区也多为千金榆的实际分布区，其生态环境条件更有利于千金榆的生存生长.一般适宜区面积约 102.56 万 km^2，约占我国国土面积的 10.7%，广泛分布于吉林、山东、辽宁、黑龙江、四川、陕西、河南、甘肃等地区.

虽然在江苏、山东、河南等一些低海拔地区也存

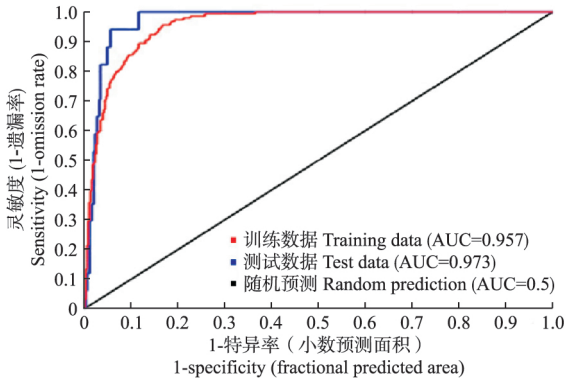

图 1 MaxEnt 模型中 ROC 预测结果
Fig.1 Prediction validation with ROC in MaxEnt.

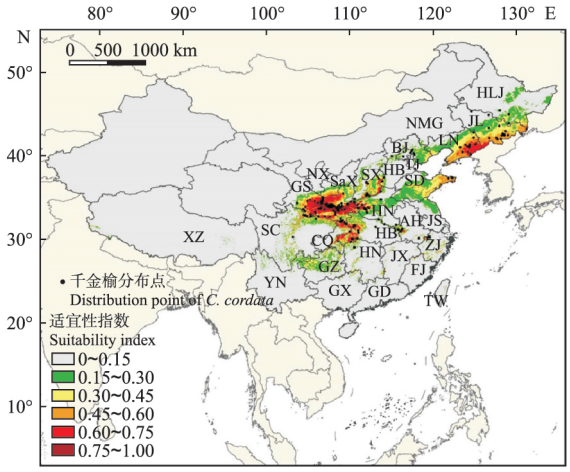

图 2 当前气候条件下千金榆在我国的潜在分布区
Fig.2 Potential distribution of *Carpinus cordata* in China under current climatic conditions.

HLJ: 黑龙江 Heilongjiang; JL: 吉林 Jilin; NMG: 内蒙古 Inner Mongolia; LN: 辽宁 Liaoning; BJ: 北京 Beijing; TJ: 天津 Tianjin; HB: 河北 Hebei; GS: 甘肃 Gansu; NX: 宁夏 Ningxia; SaX: 陕西 Shaanxi; SX: 山西 Shanxi; SD: 山东 Shandong; HN: 河南 Henan; SC: 四川 Sichuan; CQ: 重庆 Chongqing; HB: 湖北 Hubei; AH: 安徽 Anhui; JS: 江苏 Jiangsu; ZJ: 浙江 Zhejiang; JX: 江西 Jiangxi; XZ: 西藏 Tibet; GZ: 贵州 Guizhou; YN: 云南 Yunnan; HN: 湖南 Hunan; GX: 广西 Guangxi; GD: 广东 Guangdong; FJ: 福建 Fujian; TW: 台湾 Taiwan. 下同 The same below.

在千金榆生态适宜区，但其适宜性指数往往较低，而秦岭、长白山、巫山等山脉地区往往适宜性指数较高，例如吉林地区千金榆生态适宜区面积近 12.86 万 km^2，但其核心适宜区面积不足 5100 km^2；山东地区千金榆生态适宜区面积近 11.54 万 km^2，但其核心适宜区面积不足 500 km^2.目前，在贵州、江西、云南、福建、广西以及广东等地尚未发现千金榆的分布，但存在一定的适宜分布区(图 3).可见，千金榆在我国分布较为集中且分布面积较小，尤其是最适宜千金榆生存的核心适宜区，这与目前千金榆在我国实际分布相符，然而千金榆在我国拥有广阔的生态适宜区，这也为开发利用千金榆提供了有力保障.

2.3 千金榆的气候限制因子

由最大熵模型中各个气候变量的贡献率可知：13 个气候变量中对当代千金榆潜在分布区预测结果的贡献率排前 4 的气候变量依次为年降雨量、等温性、最暖季均温和最干季均温，其累积贡献率为 83.4%(表 1).可见，影响当代气候条件下千金榆地理分布的主要气候因子为年降雨量、等温性、最暖季均温和最干季均温.

根据表 1 及图 4 可见，年降雨量对预测当代千金榆生态适宜区的贡献率最大，当年降雨量 <500 mm 时千金榆分布概率几乎为 0，当年降雨量

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

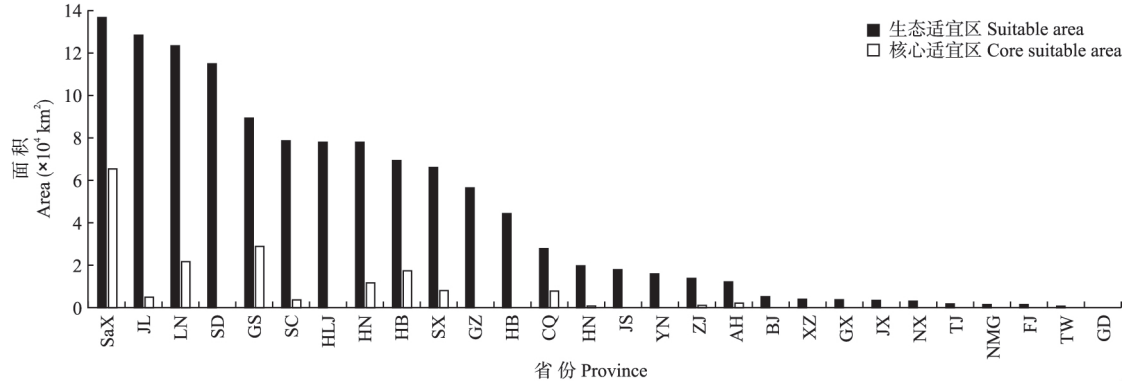

图 3　我国千金榆不同适宜区的区域分布

Fig.3　Regional distribution of different suitable areas of *Carpinus cordata* in China.

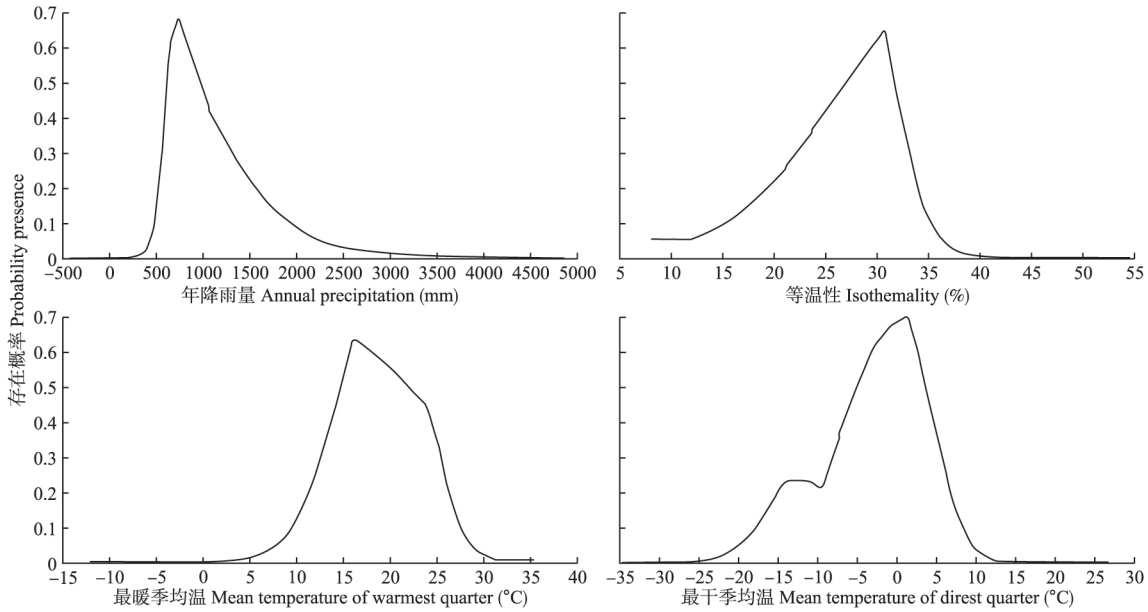

图 4　主要气候因子的响应曲线

Fig.4　Response curves of major climate factors.

表 2　气候变化情景下部分地区千金榆生态适宜区面积

Table 2　Ecologically suitable area of *Carpinus cordata* under climate change scenarios in some areas (×10⁴ km²)

气候变化情景 Climate change scenario	全国 Whole country		甘肃、陕西、河南 Gansu, Shaanxi, Henan		吉林、辽宁 Jilin, Liaoning		山东 Shandong	
	生态适宜区 Suitable area	核心适宜区 Core suitable area	生态适宜区 Suitable area	核心适宜区 Core suitable area	生态适宜区 Suitable area	核心适宜区 Core suitable area	生态适宜区 Suitable area	核心适宜区 Core suitable area
当前 Current	120.09	17.53	30.53	10.64	34.10	2.71	11.50	0.04
RCP 2.6 Ⅰ	134.68	17.17	35.13	10.90	34.24	3.32	11.13	0.02
RCP 4.5 Ⅰ	132.55	16.51	34.65	10.02	34.91	3.04	11.50	0.01
RCP 6.0 Ⅰ	149.96	16.83	35.89	9.65	35.36	4.32	11.84	0.04
RCP 8.5 Ⅰ	145.77	15.62	35.33	9.41	35.68	3.58	10.92	0.30
平均 Average	140.74	16.53	35.25	10.00	35.05	3.57	11.35	0.09
RCP 2.6 Ⅱ	136.80	17.04	35.42	10.54	35.37	3.42	11.31	0.01
RCP 4.5 Ⅱ	142.39	16.76	37.21	9.98	36.32	3.32	11.56	0.01
RCP 6.0 Ⅱ	146.02	17.06	36.97	10.31	36.45	3.70	12.61	0.02
RCP 8.5 Ⅱ	151.53	17.86	35.28	9.99	36.37	4.80	11.93	0.60
平均 Average	144.19	17.18	36.22	10.21	36.13	3.81	11.85	0.16

Ⅰ: 2050s; Ⅱ: 2070s.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

>500 mm 分布概率急剧上升，当年降雨量约 700 mm 时，分布概率达到峰值，此时年降雨量达到千金榆最适生存条件.随后分布概率又急剧降低，当年降雨量达到 3000 mm 左右时，分布概率几乎减小为 0.若以生存概率>0.6为适应范围，千金榆年降雨量的适应范围为 600~900 mm.

除年降雨量外，对当代千金榆生态适宜区预测贡献最大的为等温性，等温性亦有一峰值，等温性达到 31.0%左右时最适宜千金榆生长，若以生存概率>0.6为适应范围，千金榆等温性的适应范围约为 29.0%~32.0%.最暖季均温达到约 16 ℃时最适宜千金榆生长，最暖季均温<5 ℃或>30 ℃时千金榆分布概率几乎为 0，若以生存概率>0.6 为适应范围，千金榆最暖季均温的适应范围约为 15~18 ℃.最干季均温在 1 ℃左右时最适宜千金榆生长，最干季均温<-20 ℃或>10 ℃时千金榆分布概率几乎为 0.若以生存概率>0.6 为适应范围，千金榆最干季均温的适应范围约为-4~4 ℃.

2.4 未来气候变化下千金榆潜在分布区

由图 2、表 2 和图 5 可见，未来气候变化下千金榆在我国生态适宜区面积明显高于当前，总体上表现出增加趋势.其中，变化最明显的地区为东部地区的江苏、安徽等地，该地区千金榆生态适宜区面积明显增加，尤其是在 RCP 6.0 和 RCP 8.5 较高浓度情景下，江苏大部分地区成为千金榆的生态适宜区.东北长白山地区的吉林、辽宁等地千金榆生态适宜区略有增加.中部地区的河南、湖北等地明显增加，主要表现为河南、湖北等地东部广大平原地区开始成为千金榆的生态适宜区.核心适宜区面积除 2070s 在 RCP 8.5 高浓度情景下略有增加外，其余各浓度情景下均明显低于当前，中部秦岭地区的甘肃、陕西、河南等地基本稳定，而东北长白山地区的吉林、辽宁等地明显增加，但我国南方地区明显减少，例如湖北、重庆交界地区以及四川等地.可见，未来气候变化下千金榆生态适宜区面积虽有明显增加，但其核心适宜区面积却略有减少.对比当前、2050s 和 2070s 预测结果可见：在不同浓度情景下，千金榆在我国生态适宜区与一般适宜区面积变化趋势基本相同，但其核心适宜区面积变化趋势与生态适宜区、一般适宜区明显不同.

对比当前，在不同气候情景下，千金榆在我国生态适宜区、一般适宜区和核心适宜区的空间位置也发生着不同程度的变化.对于生态适宜区，东部地区变化最明显的是江苏和安徽，江苏地区逐渐由北部连云港地区往南扩张逐渐至长江一带，尤其是在 RCP 6.0 与 RCP 8.5 浓度情景下江苏绝大部分区域均成为千金榆的生态适宜区；安徽中部滁州等地及北部与江苏交界地区，亦开始出现千金榆生态适宜区.东北地区的吉林、辽宁等地千金榆生态适宜区有一定程度上的“北扩”，但“北扩”程度不高，总体来说相对稳定.中部地区千金榆生态适宜区明显向高海拔地区收缩和“东扩”，其中，甘肃、陕西及与四川交界等地明显向高海拔地区收缩；河南、湖北等地明显向其东部平原地区“东扩”.四川、云南、贵州、重庆、湖北等环山脉地区明显向北部和高海拔地区收缩，呈明显的“环状”分布.千金榆一般适宜区的空间位置变化与生态适宜区有诸多相似之处，在一定程度上向高海拔地区扩张、“东扩”，一般适宜区明显扩大.2050s、2070s，东部沿海的江苏地区逐渐由北部向全省扩张；东北地区千金榆一般适宜区北部边界略有“北移”，南部边界随着核心适宜区的扩张向低海拔地区收缩；中部陕西、甘肃、河南等地，明显向高海拔地区扩张；西南地区的贵州、四川等地，明显向高海拔地区收缩.

核心适宜区变化最明显的地区是位于甘肃、陕西、河南等地的秦岭地区，湖北、重庆交界及四川等地，吉林、辽宁等地的长白山地区及其邻近区域如山东半岛等.2050s、2070s，在甘肃、陕西以及河南一带的秦岭地区，千金榆核心适宜区有“东西向缩短、向陕西境内收缩”的趋势，但总体相对稳定(表 2).在湖北、重庆、甘肃交界地区，千金榆核心适宜区明显减少并向北部或高海拔地区收缩；在重庆、湖北、湖南交界地区，千金榆核心适宜区急剧减少明显向高海拔地区收缩；四川等地千金榆核心适宜区明显减少并向高海拔地区收缩.在山东半岛，千金榆核心适宜区较小，在 RCP 2.6 和 RCP 4.5 较低浓度情景下几乎不存在，但在 RCP 6.0 和 RCP 8.5 较高浓度情景下开始出现较大核心适宜区，且由山东东北部逐渐向山东内陆扩张.吉林、辽宁等地的长白山地区，在未来气候变化下千金榆核心适宜区明显增加，由长白山中部地区逐渐向四周扩张，同时，长白山中部高海拔地区适宜性指数 0.75~1.00 的区域明显增大.

总的来说，未来气候变化下千金榆生态适宜区总面积呈增加趋势，主要是因为其生态适宜区出现一定程度的“向高海拔地区收缩”、“东扩”和“北扩”，且一些平原地区开始成为千金榆的生态适宜区，但在山脉地区也有向高海拔地区收缩的趋势.但其核心适宜区有“南缩”、“中稳”和“北扩”的趋势，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

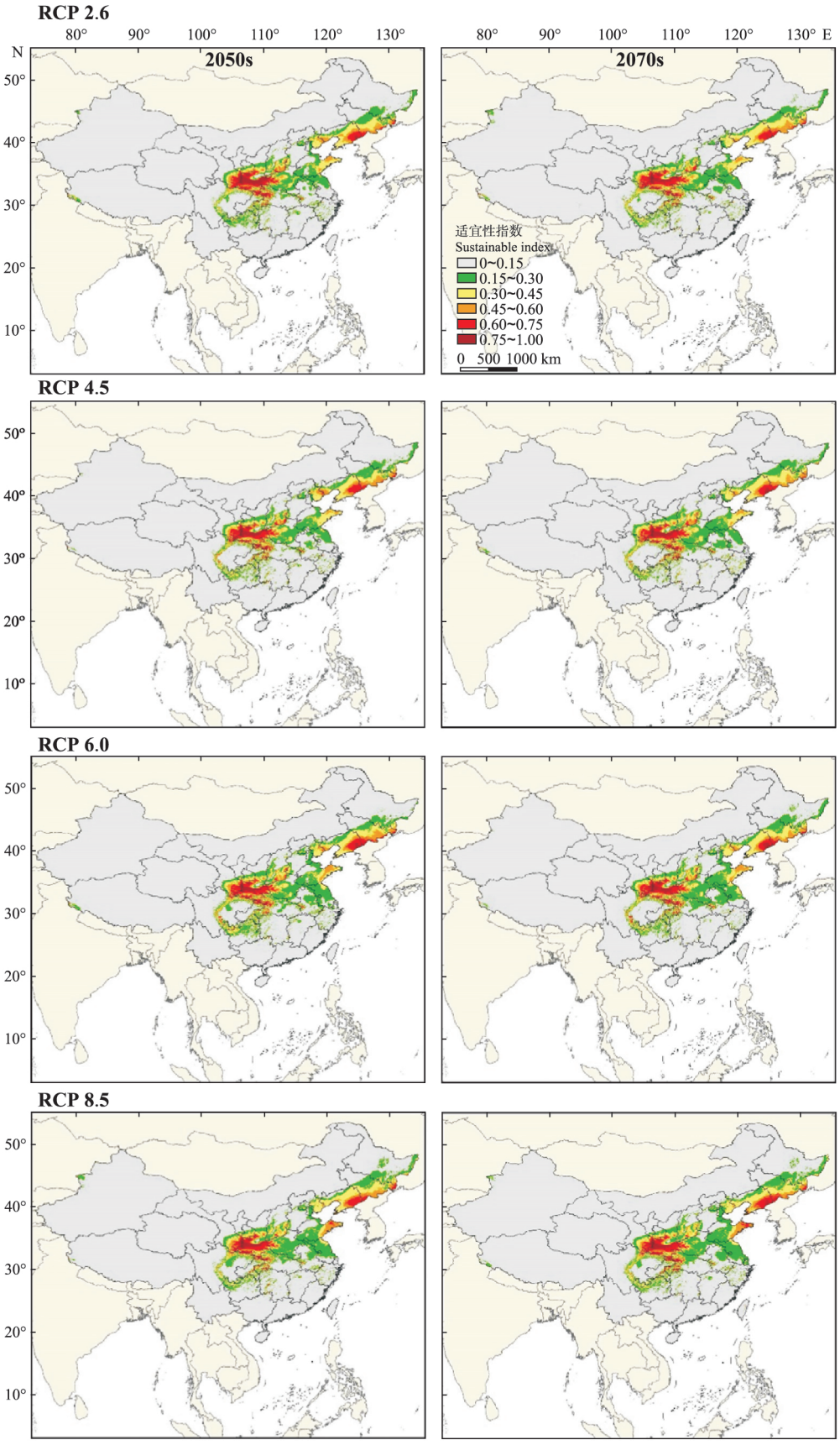

图 5　不同气候情景下千金榆潜在分布区

Fig.5　Potential distribution of *Carpinus cordata* under different climate scenarios.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

即随着气候变暖，我国中南、西南等地千金榆核心适宜区明显向高纬度及高海拔地区收缩，中部秦岭地区千金榆核心适宜区基本稳定.而在东北地区的吉林、辽宁以及东部地区的山东等地，千金榆核心适宜区明显增加.

3 讨 论

目前在预测植物潜在分布区的研究中，大多数学者在选择植物分布数据时选择舍弃栽培点，然而 Booth [39] 认为，增加引种栽培点比不引入能更准确地反映树种的基础生态位. Vetaas [40] 认为，可以使用来自植物园的分布数据，但是要谨慎使用这种方法，因为植物园高水平的管理干预可能会限制观察的价值，Booth [39] 也认同了这个观点.收集千金榆分布数据时发现，千金榆主要引种栽培点有辽宁熊岳植物园、浙江杭州植物园和江西庐山植物园，由于植物园存在较高水平的人工管理，对野生种的管理相对科学，管理人员也相对专业 [40] ，因而千金榆在植物园的成长状态不一定反映千金榆在当地真实的生长状况.同时目前千金榆的引种栽培仍处在基础的引种驯化阶段，在此阶段引种驯化的野生种都会模拟生境来栽培，故本研究在千金榆的分布数据中舍弃了栽培点，以避免这一不确定性给预测结果带来的误差.虽然目前已有部分植物园对千金榆进行引种栽培，但其多被用于植物专类园，用以丰富物种组成、增加物种丰富度，总体来说目前我国对千金榆开发利用较少，少有将其应用于园林绿化.

预测结果显示，当前千金榆潜在分布区跨我国 20 余个省、市、自治区，其中，贵州、江西、云南、福建、广西以及广东等地目前尚未发现千金榆的分布，但存在一定的适宜分布区，这些地区很有可能存在过千金榆的分布，但由于生境破坏等原因已无遗存.野外调查发现，千金榆多分布于路边、湖畔等半阴环境，适宜在温暖、湿润环境条件下生存.由贡献率识别出，影响当代千金榆地理分布的最主要的气候因子是年降雨量、等温性、最暖季均温和最干季均温，同时利用响应曲线可见千金榆喜湿润温暖环境、较耐寒.未来气候变化下千金榆虽有“北扩”现象，但并不明显，其分布北界变化不甚明显，由此可见低温和降水可能是影响千金榆向北扩散的主要因素.当前及未来气候条件下，我国西部地区少有千金榆的分布，推测主要是西部地区干旱、缺水的气候条件限制了千金榆的分布，因而在未来气候变化下，要注意高温和干旱对千金榆生存的影响.

当前千金榆生态适宜区主要集中分布于秦岭、长白山及其各自的邻近区域，其他为零星的“岛屿”式分布，表现出明显的破碎化，这可能是由于千金榆的生态习性所致.根据前人所采集标本信息可以发现，千金榆多分布于海拔 500～2500 m 的山脉地区，这导致诸多较低海拔地区为千金榆的不适宜区，较高海拔的适宜区与较低海拔的不适宜区间断出现，这可能是当前千金榆生境破碎化的主要成因.作者野外调查也发现，千金榆多分布于路边、湖畔、山腰、半阴山坡或山谷杂木林等地，适宜在半阴、湿润、温暖环境条件下生存 [27-28] ，这样的野外分布环境致使其生境易被破坏，因而我们推测正是这样野外分布环境使其实际分布出现明显破碎化.对比当前，未来气候变化下千金榆生境破碎化程度有所改善，主要是诸多中高海拔山地已没有足够的高海拔低温生境可供千金榆迁移，这些地区不再适宜千金榆生存.而秦岭、长白山等山脉地区海拔较高存在足够的高海拔低温生境，随着气候变暖，千金榆逐渐往高海拔和高纬度地区迁移，且这部分生境在纬度上或海拔上能够成片连接在一起.

一般来说，随着气候变暖，物种分布会向着高纬度及高海拔地区迁移 [41-42] ，但在未来气候变化条件下，千金榆在不同地区对气候变化的响应机制有着明显的不同，表现出明显的区域性 [5-9] .东北长白山地区千金榆生态适宜区有一定程度上的“北扩”，主要是因为随着气候变暖长白山及其北部地区气候适度变暖，千金榆在我国分布的北界适度北移.南部的四川、云南、贵州、重庆、湖北等环山脉地区明显向高海拔和北部高纬度地区收缩，呈明显的“环状”分布，主要是未来气候变化下南方地区气候变暖，原有一些中高海拔地区已没有足够的高海拔低温生境可供千金榆迁移，因而这部分生境丧失.而一些山脉地区在气温升高条件下，存在诸多高纬度低温地区，致使千金榆向此高海拔和北部高纬度地区收缩并在此海拔或纬度处相互连接起来.中部秦岭地区千金榆生态适宜区明显“向高海拔地区收缩”和“东扩”，主要是随着气温升高，原有一些生境不再适宜千金榆生存，致使其向高海拔低温生境迁移.在野外调查中也发现，在某些低海拔地区也存在千金榆的分布，这可能是在未来气候变化下河南与湖北等东部平原地区出现大量千金榆生态适宜区的原因之一.东部地区的安徽和江苏等地，千金榆生态适宜区面积明显增加，推测可能是随着气候变暖，江苏以及安徽部分地区作为山东的邻近区域，其气候条件与山东半岛

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有诸多相似之处,导致该地区开始适宜千金榆生存.随着气候变暖,原有部分生境因温度升高不再适宜植物生存,因而诱导植物向高海拔或高纬度低温生境迁移,但近年来也有一些研究发现未来气候变化亦会诱导植物向低海拔地区迁移,就千金榆目前的分布状况以及我国"西高东地"的地势格局而言,未来气候变化很有可能诱导千金榆向我国东部地区迁移,这可能也是千金榆生态适宜区明显"东扩"的原因.

对比当前,千金榆的核心适宜区也发生了诸多变化: 我国南方的四川及湖北、重庆交界地区,气候变暖,山下温度升高[43-44],原有的低海拔地区不再适宜千金榆生存,使千金榆向北方高纬度及高海拔低温地区收缩,致使千金榆核心适宜区缩减.甘肃、陕西以及河南一带的秦岭地区气候为南北的渐变区,有较强的缓冲能力[45-46],全球变暖对其分布区影响不大,该地区千金榆核心适宜区面积基本稳定.吉林、辽宁等地的长白山地区,随着温室气体排放的增加和气候变暖,该地区气候条件变得更加适宜千金榆生存,千金榆核心适宜区面积明显增加.长白山邻近区域山东半岛等地,在未来高浓度温室气体排放情景下开始出现较大核心适宜区,可见山东半岛由于其独特的地理位置和环境条件,在未来极有可能并且适宜发展成为千金榆的核心适宜区.在未来气候变化下,长白山及其邻近区域如山东半岛等温度较低的区域愈发适宜千金榆生存,因而千金榆可能向高海拔和北方高纬度地区扩张.

4　结　　论

研究千金榆对气候的响应将为其应用提供重要的基础支撑.本研究通过生态位模拟,构建了千金榆当前和未来的生态位,并识别了影响当前千金榆分布的主要气候因子,结果发现: 千金榆绝大部分生态适宜区和核心适宜区位于中部秦岭地区的陕西、甘肃、河南、湖北、山西等地和东北长白山地区的辽宁、吉林等地以及东部沿海地区的山东半岛,这些地区大都拥有广阔的土地和适宜的气候条件,适宜对千金榆进行大规模种植与推广.影响当代千金榆地理分布的主要气候因子为年降雨量、等温性、最暖季均温和最干季均温.未来气候变化下,千金榆生态适宜区在不同地区对气候变化的响应有"向高海拔地区收缩'、'东扩"和"北扩"的趋势.核心适宜区有"南缩'、'中稳"和"北扩"的趋势.

随着气候变暖,千金榆在我国生态适宜区与当前出现较大差异.我国南方诸多区域不再适宜千金榆生存; 中部地区千金榆生态适宜区明显"东扩",大部分平原地区开始成为千金榆生态适宜区; 东北地区气候变得更加适宜千金榆生存,山东、江苏等地开始出现大量生态适宜区.在全球变暖的大背景下,以秦岭及其邻近区域为代表的中纬度地区和长白山及其邻近区域山东半岛等为代表的较高纬度地区,大都拥有广阔的土地和适宜的气候条件,适宜进行千金榆的迁地保存和开发利用.东部的江苏以及安徽等部分地区在未来气候变化下,拥有较大的生态适宜区,尽管适宜性指数不是很大,但通过采取相应的技术措施如加强引种驯化与栽培养护手段,在很大程度上有成功引种栽培的可能.

参考文献

[1] Zhu G-P (朱耿平), Liu G-Q (刘国卿), Bu W-J (卜文俊), *et al*. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2013, **21**(1): 90-98 (in Chinese)

[2] Zhang X-W (张兴旺), Li Y (李　垚), Fang Y-M (方炎明). Geographical distribution and prediction of potential ranges of *Quercus acutissima* in China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2014, **34**(8): 1685-1692 (in Chinese)

[3] Manthey M, Box EO. Realized climatic niches of deciduous trees: Comparing western Eurasia and eastern North America. *Journal of Biogeography*, 2007, **34**: 1028-1040

[4] Ni J (倪　健), Song Y-C (宋永昌). Relationship between Kira's indexes and distribution of dominants and companions of subtropical evergreen broadleaved forest in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1998, **18**(3): 248-262 (in Chinese)

[5] Freeman BG, Freeman AMC. Rapid upslope shifts in New Guinean birds illustrate strong distributional responses of tropical montane species to global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**: 4490-4494

[6] Buizer B, Weijers S, Bodegom PMV, *et al*. Range shifts and global warming: Ecological responses of *Empetrum nigrum* L. to experimental warming at its northern (high Arctic) and southern (Atlantic) geographical range margin. *Environmental Research Letters*, 2012, **7**: 25501-25509

[7] Colwell RK, Brehm G, Cardelus CL, *et al*. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 2008, **322**: 258-261

[8] Dyderski MK, Paz S, Frelich LE, *et al*. How much does climate change threaten European forest tree species distributions. *Global Change Biology*, 2018, **24**: 1150-1163

[9] Zhang X-Q (张晓芹), Li G-Q (李国庆), Du S (杜　盛). Predicting the influence of future climate change on the suitable distribution areas of *Elaeagnus angustifolia*.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 2018, **29**(10): 3213-3220 (in Chinese)

[10] Jacobson GL. After the ice age. *Ecology*, 1992, **73**: 715

[11] Mao L-H (毛俐慧), Li Y (李 垚), Liu C (刘 畅), *et al*. Predication of potential distribution of *Haplocladium microphyllum* in China based on MaxEnt model. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(1): 54-60 (in Chinese)

[12] Hu Z-J (胡忠俊), Zhang Y-L (张镱锂), Liu L-S (刘林山), *et al*. Refugia and their identification methods: A review. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2013, **32**(12): 3397-3406 (in Chinese)

[13] Ying J-S (应俊生). Species diversity and distribution pattern of seed plants in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2001, **9**(4): 393-398 (in Chinese)

[14] Hu L-L (胡理乐), Li J-S (李俊生), Luo J-W (罗建武), *et al*. Reviews of the effects of the cultivation of bioenergy plants on biodiversity. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2014, **22**(2): 231-241 (in Chinese)

[15] Carpenter G, Gillison AN, Winter J. DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity & Conservation*, 1993, **2**: 667-680

[16] Busby JR. BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 1991, **6**: 8-9

[17] Stockwell D. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, **13**: 143-158

[18] Song H-M (宋红敏), Zhang Q-F (张清芬), Han X-M (韩雪梅), *et al*. CLIMEX: Professional biological software for predicting potential distribution of species. *Entomological Knowledge* (昆虫知识), 2004(4): 379-387 (in Chinese)

[19] Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, **190**: 231-259

[20] Elith J, Graham CH, Anderson RP, *et al*. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, **29**: 129-151

[21] Li GQ, Du S, Wen ZM. Mapping the climatic suitable habitat of oriental arborvitae (*Platycladus orientalis*) for introduction and cultivation at a global scale. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 1-9

[22] Yusup S (夏尤普·玉苏甫), Sulayman M (买买提明·苏来曼), Ilghar W (维尼拉·伊利哈尔), *et al*. Prediction of potential distribution of Didymodon (Bryophyta, Pottiaceae) in Xinjiang based on the MaxEnt model. *Plant Science Journal* (植物科学学报), 2018, **36**(4): 541-553 (in Chinese)

[23] Zhang Y-B (张殷波), Gao C-H (高晨虹), Qin H (秦 浩). Prediction of the suitable distribution and responses to climate change of *Elaeagnus mollis* in Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(4): 1156-1162 (in Chinese)

[24] Padalia L, Srivastava V, Kushwaha SPS. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics*, 2014, **22**: 36-43

[25] Guo J (郭 杰), Liu X-P (刘小平), Zhang Q (张 琴), *et al*. Prediction for the potential distribution area of *Codonopsis pilosula* at global scale based on Maxent model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(3): 992-1000 (in Chinese)

[26] Ahmed SE, Mcinerny G, O'Hara K, *et al*. Scientists and software: Surveying the species distribution modelling community. *Diversity and Distributions*, 2015, **21**: 258-267

[27] Chinese Botanical Committee of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院中国植物志委员会). Flora of China Volume 21. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese)

[28] Hu X-S (胡先骕). Forest Tree Map of China. Beijing: Fan Memorial Institute of Biology, 1948 (in Chinese)

[29] Blume CL. Museum Botanicum Lugduno-Batavum. Leiden, the Netherlands: E.J. Bril, 1851

[30] Francis R. Plantarum sinensium ecologe tertia. *Journal of Botany*, 1899, **13**: 198-208

[31] Chen R (陈 嵘). Taxonomy of Chinese Trees. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1959 (in Chinese)

[32] Zhou L-Y (周琳月). Study on Propagation Technique of *Carpinus cordata*. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2016 (in Chinese)

[33] Wu P-P (吴萍萍). Species diversity of *Carpinus cordata* communities in Lishan Nature Reserve, Shanxi Province. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2018, **38**(2): 195-200 (in Chinese)

[34] Tang J-H (唐继洪), Cheng Y-X (程云霞), Luo L-Z (罗礼智), *et al*. Maxent-based prediction of overwintering areas of *Loxostege sticticalis* in China under different climate change scenarios. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(14): 4852-4863 (in Chinese)

[35] Li X (李 璇), Li Y (李 垚), Fang Y-M (方炎明). Prediction of potential suitable distribution areas of *Quercus fabri* in China based on an optimized maxent model. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2018, **54**(8): 153-164 (in Chinese)

[36] Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, *et al*. ORIGINAL ARTICLE: Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 2007, **34**: 102-117

[37] Xu W-H (徐卫华), Luo C (罗 翀). Application of MAXENT model in *Rhinopithecus roxllanae* habitat assessment in Qinling mountain. *Forest Engineering* (森林工程), 2010, **26**(2): 1-3 (in Chinese)

[38] Swets JA. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, **240**: 1285-1293

[39] Booth TH. Assessing species climatic requirements beyond the realized niche: Some lessons mainly from tree species distribution modelling. *Climatic Change*, 2017, **145**: 259-271

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[40] Vetaas OR. Realized and potential climate niches: A comparison of four Rhododendron tree species. *Journal of Biogeography*, 2002, **29**: 545-554

[41] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, **421**: 37-42

[42] Zhong Y-D (钟永德), Li M-H (李迈和), Norbert KC. Global warming facilitates plant migration and biological invasion. *Geographical Research* (地理研究), 2004, **23**(3): 347-356 (in Chinese)

[43] Cai R-S (蔡榕硕), Fu D (付　迪). The pace of climate change and its impacts on phenology in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), 2018, **42**(4): 729-740 (in Chinese)

[44] Li Y (李　勇), Yang X-G (杨晓光), Wang W-F (王文峰), *et al*. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. Ⅰ. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in South China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2605-2614 (in Chinese)

[45] Hu X-H (胡小晖). Study on the Climate Change and Its Environmental Effects between The North and South Region of Qinling Mountains under Global Change. Master Thesis. Xi'an: Shanxi Normal University, 2001 (in Chinese)

[46] Li S-S (李双双), Lu J-Y (芦佳玉), Yan J-P (延军平), *et al*. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2018, **73**(1): 13-24 (in Chinese)

作者简介　赵儒楠, 男, 1997 年生, 硕士研究生. 主要从事园林植物应用研究. E-mail: zhao-rn@njfu.edu.cn

责任编辑　杨　弘

赵儒楠, 何倩倩, 褚晓洁, 等. 气候变化下千金榆在我国潜在分布区预测. 应用生态学报, 2019, **30**(11): 3833-3843
Zhao R-N, He Q-Q, Chu X-J, *et al*. Prediction of potential distribution of *Carpinus cordata* in China under climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(11): 3833-3843 (in Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net