

未来气候条件下裸果木在中国的潜在分布区研究

张佳琦¹, 徐振朋², 宛涛^{1,①}, 蔡萍³, 伊卫东¹

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019;

2. 乌兰察布市农牧业科学研究院, 内蒙古 乌兰察布 012000; 3. 锡林郭勒职业学院, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要: 基于 220 个裸果木 (*Gymnocarpus przewalskii* Maxim.) 分布点及 12 个气候因子, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 系统对影响裸果木潜在分布的主要气候因子进行了分析, 并对 2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 气候情景下裸果木在中国的潜在分布区进行了预测。结果表明: MaxEnt 模型对未来气候条件下裸果木潜在分布区的预测结果非常好。影响裸果木分布的主要气候因子为年均降水量和最湿季降水量, 二者贡献率之和基本高于 50%, 并且, 在不同未来气候情境下年均降水量的贡献率基本高于 30%。总体来看, 在未来气候条件下, 裸果木的适生区主要集中在新疆西部的阿克苏和阿合奇地区及新疆东部的哈密地区, 内蒙古阿拉善西南部, 青海海西地区中部, 甘肃的嘉峪关大部、酒泉和张掖西北部。在 2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年, 裸果木的总适生区面积均在 RCP4.5 气候情景下最大 (分别为 104.60×10^5 和 104.87×10^5 km²), 并分别在 RCP2.6 和 RCP8.5 气候情景下最小 (分别为 90.81×10^5 和 94.11×10^5 km²)。研究结果显示: 降水对裸果木分布的影响最大, 其中, 年均降水量是首要限制因子; 与现代分布区相比, 裸果木在未来气候条件下的适生区明显缩小, 并逐渐向甘肃河西走廊水资源充足区域 (包括甘肃的嘉峪关、张掖和酒泉等地) 移动。

关键词: 裸果木; MaxEnt 模型; 潜在分布区; 适生区; 气候因子; 未来气候情景

中图分类号: Q948.1; S793.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)03-0051-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.03.07

Study on potential distribution areas of *Gymnocarpus przewalskii* in China under future climatic conditions ZHANG Jiaqi¹, XU Zhenpeng², WAN Tao^{1,①}, CAI Ping³, YI Weidong¹ (1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. Institute of Agricultural and Animal Husbandry Sciences of Ulanqab City, Ulanqab 012000, China; 3. Xilingol Vocational College, Xilinhot 026000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(3): 51-57

Abstract: Based on 220 distribution points of *Gymnocarpus przewalskii* Maxim. and 12 climatic factors, main climatic factors affecting potential distribution of *G. przewalskii* were analyzed by using MaxEnt model and ArcGIS system, and potential distribution areas of *G. przewalskii* in China under climate scenarios of RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5 during 2041-2060 and 2061-2080 were predicted. The results show that the prediction result of potential distribution areas of *G. przewalskii* under future climatic conditions is excellent by using MaxEnt model. Main climatic factors affecting distribution of *G. przewalskii* are annual mean precipitation and precipitation of the wettest quarter, the sum of their contribution rate is basically higher than 50%, and the contribution rate of annual mean precipitation under different future climate scenarios is basically higher than 30%. In general, the suitable distribution areas of *G. przewalskii* are mainly distributed in Aksu and Aheqi areas in western Xinjiang and Hami area in eastern Xinjiang, southwestern Alashan in Inner Mongolia, central Haixi area in Qinghai, most of Jiayuguan, Jiuquan and northwestern Zhangye in Gansu. During 2041-2060 and

收稿日期: 2018-11-13

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目(2016MS0324); 内蒙古自治区研究生科研创新项目(S20171012903)

作者简介: 张佳琦(1994—), 女, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 主要从事牧草种质资源研究。

①通信作者 E-mail: wantao425@sohu.com

2061–2080, the areas of total suitable distribution areas of *G. przewalskii* are the largest under climate scenario of RCP4.5 with values of 104.60×10^5 and 104.87×10^5 km², respectively, and are the smallest under climate scenarios of RCP2.6 and RCP8.5 with values of 90.81×10^5 and 94.11×10^5 km², respectively. It is suggested that precipitation has the greatest influence on distribution of *G. przewalskii*, in which, annual mean precipitation is the primary limited factor. Compared with current distribution areas, suitable distribution areas of *G. przewalskii* under future climatic conditions reduce evidently, and gradually move to Hexi Corridor in Gansu with sufficient water resources (including Jiayuguan, Zhangye, and Jiuquan, etc. in Gansu).

Key words: *Gymnocarpus przewalskii* Maxim.; MaxEnt model; potential distribution area; suitable distribution area; climatic factor; future climate scenario

裸果木 (*Gymnocarpus przewalskii* Maxim.) 隶属于石竹科 (Caryophyllaceae) 裸果木属 (*Gymnocarpus* Forssk.), 为半灌木, 该种为亚洲中部荒漠区的濒危孑遗植物, 主要分布于内蒙古、甘肃、青海和新疆地区^[1], 多生长在干河床、山前冲积扇及砾石质戈壁滩上^[2], 具有抗干旱、耐盐碱、耐贫瘠和耐风蚀沙埋等特点^[3]。裸果木为古地中海植物区系成分, 其生存和演化可反映中国西北干旱地区植物的演化过程^[4], 能够为探究中国西北干旱区的形成和发展提供有力证据, 具有重要的科学价值。

MaxEnt 模型可根据物种现在的分布点和环境数据, 通过特有运算方法算出该物种在未知区域的分布概率, 并有效处理变量之间的关系, 对样本量较少且取样有偏差的数据耐受度较高, 是目前运用最广泛且预测结果优异的物种分布预测模型^[5–7]。

目前, 关于裸果木的研究主要集中在孢粉^[8]、花部特征和繁育系统^[9]、开花物候^[10]、生理^[11–12]和遗传学^[13–14]等方面, 而关于其潜在地理分布的研究却较少^[1, 15]。作者所在项目组已经对近年来裸果木分布格局的变化进行了研究, 结果表明: 目前裸果木主要分布在宁夏北部、河西走廊中部及玉门关以西等地, 并且其分布区域随着近年来极端天气频发而发生了一定的变化^[16–17]。然而, 关于裸果木在未来气候条件下的分布区变化尚未可知, 不利于制定有效的裸果木保护措施。

鉴于此, 基于 220 个裸果木分布点和 12 个气候因子, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 系统对影响裸果木潜在分布的主要气候因子进行了分析, 并对 2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 气候情景下裸果木在中国的潜在分布区进行了预测, 以期揭示未来气候变化条件下影响裸果木分布的主要气候因子及裸果木分布区域的

变化, 为裸果木的资源保护及荒漠地区生态系统平衡研究提供基础数据。

1 研究方法

1.1 裸果木分布点数据获取

裸果木分布点数据主要来自 2 个方面: 一是 2014 年至 2016 年连续 3 年对 4 个地区裸果木地理分布情况的实地踏查结果; 二是教学标本资源共享平台 (<http://mnh.scu.edu.cn/>)、中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.ac.cn/>) 以及国内公开发表的相关文献^[1–2, 15]。实地踏查的 4 个地区包括内蒙古阿拉善地区、甘肃地区 (包括民勤县、高台县、瓜州县、肃北县、阿克塞县、柳园镇、金塔县、肃州区和清泉乡等)、新疆哈密市伊州区和宁夏中卫市沙坡头区, 涵盖了北纬 37°25′~49°20′、东经 73°46′~105°03′ 的区域, 海拔 1 271~1 789 m; 生境主要为干河床、沟坡、砾石质戈壁滩和山前冲积扇等; 植被类型以温带半灌木和灌木荒漠为主, 主要伴生种有霸王 (*Sarcogygium xanthoxylon* Bunge)、沙蒿 (*Artemisia desertorum* Spreng. Syst. Veg.)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia* Shap.) 和红砂 [*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.] 等^[12, 18–20]。

利用在线卫星图像地图 (<http://www.gpsspg.com/maps.htm>) 提取裸果木的分布点, 结合裸果木的生境特点对分布点进行比对后剔除不确定的分布点, 最终得到 220 个裸果木分布点。

1.2 气候因子数据获取及筛选

从世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org/>) 中获取 2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年的 19 个气候因子数据^[21], 气候情景采用 BCC-CSM1.1 大气环流模式^[22–23], 依据 CMIP5 (IPCC 第五次评估

报告)^[24] 选取 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 4 个气候情景获取未来气候因子数据,空间分辨率为 30"。筛选出的 19 个气候因子分别为年平均气温 (Bio1)、昼夜温差月均值 (Bio2)、等温性 (Bio3)、年温季节性变化范围 (Bio4)、最热月最高气温 (Bio5)、最冷月最低气温 (Bio6)、年温变化范围 (Bio7)、最湿季平均气温 (Bio8)、最干季平均气温 (Bio9)、最暖季平均气温 (Bio10)、最冷季平均气温 (Bio11)、年均降水量 (Bio12)、最湿月降水量 (Bio13)、最干月降水量 (Bio14)、降水量季节性变化 (Bio15)、最湿季降水量 (Bio16)、最干季降水量 (Bio17)、最暖季降水量 (Bio18) 和最冷季降水量 (Bio19)。

将 19 个气候因子数据输入 MaxEnt 模型,筛选出对该模型贡献率较高的气候因子,每次运算时通过修正单一要素系数来提高模型的增益,然后将增加的增益值分配给该要素依赖的气候因子,并计算各气候因子的贡献率^[7];采用刀切法 (Jackknife) 分析各气候因子的贡献率,最终筛选出 Bio1、Bio2、Bio3、Bio4、Bio9、Bio11、Bio12、Bio13、Bio14、Bio15、Bio16 和 Bio19 共 12 个气候因子。

1.3 模拟分析

基于 220 个裸果木分布点及 12 个气候因子,利用 MaxEnt 模型对 2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 气候情景下裸果木在中国的潜在分布进行预测,每个气候情景重复预测 10 次,利用 ArcGIS 10.2 系统对预测结果进行分析,计算不同气候情景下各适生区的面积。

1.4 模型检验

受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线以预测的每个值为可能判断阈值,计算得到相应的灵敏度和特异度。将 random test percentage 设为 25%,计算曲线下面积 (area under curve, AUC),据此判定 MaxEnt 模型预测结果的精确度^[25]。0.50 < AUC ≤ 0.60, 表示预测失败;0.60 < AUC ≤ 0.70, 表示预测结果较差;0.70 < AUC ≤ 0.80, 表示预测结果一般;0.80 < AUC ≤ 0.90, 表示预测结果好;0.90 < AUC ≤ 1.00, 表示预测结果非常好^[26]。

1.5 适生区等级划分

用 MaxEnt 模型计算裸果木存在概率 (P)^[27],按 P 值划分适生区。0.80 ≤ P ≤ 1.00 为高适生区,0.60 ≤ P < 0.80 为中适生区,0.40 ≤ P < 0.60 为一般适生区,0.20 ≤ P < 0.40 为低适生区,0.00 ≤ P < 0.20 为非适生区。

2 结果和分析

2.1 MaxEnt 模型预测结果分析

利用 MaxEnt 模型对裸果木潜在分布区进行预测,结果显示:不同气候情景下训练集 AUC 值的平均值为 0.973 2 ± 0.000 4,验证集 AUC 值的平均值为 0.980 7 ± 0.000 7,表明该模型对未来气候条件下裸果木潜在分布区的预测结果非常好,可信度很高。

2.2 影响裸果木分布的主要气候因子分析

根据 MaxEnt 模型计算的各气候因子的贡献率筛选出影响裸果木分布的主要气候因子,结果见表 1。

表 1 影响裸果木分布的主要气候因子分析

Table 1 Analysis on main climatic factors affecting distribution of *Gymnocarpus przewalskii* Maxim.

编号 No.	气候因子 Climatic factor	2041 年至 2060 年各气候情景下的贡献率/% Contribution rate under each climate scenario during 2041-2060			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Bio1	年平均气温 Annual mean temperature	5.06	5.62	4.41	5.32
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean of diurnal range of temperature	0.68	0.81	1.66	0.66
Bio3	等温性 Isothermality	6.30	6.47	5.08	2.80
Bio4	气温季节性变化 Variation of temperature seasonality	7.10	4.49	7.08	4.80
Bio9	最干季平均气温 Mean temperature of the driest quarter	10.17	7.05	5.56	4.88
Bio11	最冷季平均气温 Mean temperature of the coldest quarter	3.68	2.03	7.18	9.80
Bio12	年均降水量 Annual mean precipitation	33.15	34.27	50.66	22.74
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	5.21	20.83	0.25	3.56
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	4.91	5.14	5.74	4.89
Bio15	降水量季节性变化 Variation of precipitation seasonality	3.26	8.67	4.27	5.45
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	19.18	0.63	6.20	27.52
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	1.29	4.00	1.90	7.59

续表1 Table 1 (Continued)

编号 No.	气候因子 Climatic factor	2061 年至 2080 年各气候情景下的贡献率/% Contribution rate under each climate scenario during 2061-2080			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Bio1	年平均气温 Annual mean temperature	5.57	5.81	5.48	4.96
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean of diurnal range of temperature	0.95	0.76	0.33	0.52
Bio3	等温性 Isothermality	7.61	3.12	6.46	6.61
Bio4	气温季节性变化 Variation of temperature seasonality	7.05	4.49	7.37	4.49
Bio9	最干季平均气温 Mean temperature of the driest quarter	8.52	4.46	2.24	8.19
Bio11	最冷季平均气温 Mean temperature of the coldest quarter	3.09	6.00	9.75	9.08
Bio12	年均降水量 Annual mean precipitation	18.48	43.36	42.91	43.36
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	0.00	0.42	1.83	3.42
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	5.40	5.29	5.02	4.27
Bio15	降水量季节性变化 Variation of precipitation seasonality	1.67	8.36	3.39	2.80
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	39.92	11.85	11.28	9.49
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	1.75	6.08	3.93	2.80

结果表明:在 2041 年至 2060 年,RCP2.6、RCP4.5 和 RCP6.0 气候情景下年均降水量的贡献率均最大,分别为 33.15%、34.27%和 50.66%,并且,RCP2.6 气候情景下最湿季降水量的贡献率较大(19.18%),RCP4.5 气候情景下最湿月降水量的贡献率也较大(20.83%),而 RCP6.0 气候情景下其他气候因子的贡献率均较小;RCP8.5 气候情景下最湿季降水量的贡献率最大(27.52%),其次为年均降水量(22.74%)。而在 2061 年至 2080 年,RCP2.6 气候情景下最湿季降水量的贡献率最大(39.92%),年均降水量的贡献率次之(18.48%);RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 气候情景下年均降水量的贡献率均最大(分别为 43.36%、42.91%和 43.36%),最湿季降水量的

贡献率均次之(分别为 11.85%、11.28%和 9.49%)。总体来看,年均降水量和最湿季降水量对裸果木分布的影响最大。

对影响裸果木分布的主要气候因子的变化范围进行了预测,结果见表 2。结果表明:年均降水量在 2041 年至 2060 年的最大值为 113.20 mm、最小值为 101.92 mm,而在 2061 年至 2080 年的最大值为 114.92 mm、最小值为 107.10 mm;最湿季降水量在 2041 年至 2060 年的最大值为 67.01 mm、最小值为 58.30 mm,而在 2061 年至 2080 年的最大值为 67.33 mm、最小值为 62.62 mm。总体来看,与现代气候条件相比,各主要气候因子的平均值在未来气候条件下均升高,并在 2061 年至 2080 年达到最大值。

表 2 影响裸果木分布的主要气候因子的变化范围¹⁾Table 2 Variation range of main climatic factors affecting distribution of *Gymnocarpus przewalskii* Maxim.¹⁾

编号 No.	气候因子 Climatic factor	单位 Unit	现代 Current			2041 年至 2060 年 2041-2060			2061 年至 2080 年 2061-2080		
			Min	Max	\bar{X}	Min	Max	\bar{X}	Min	Max	\bar{X}
Bio1	年平均气温 Annual mean temperature	℃	7.09	7.31	8.27	8.63	9.90	9.41	8.93	11.44	10.09
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean of diurnal range of temperature	℃	14.12	14.16	14.14	13.80	14.08	13.93	13.79	14.03	13.91
Bio3	等温性 Isothermality	℃	3.02	3.04	3.03	3.08	3.03	3.06	3.01	3.14	3.07
Bio4	气温季节性变化 Variation of temperature seasonality	℃	11.24	11.31	11.28	11.09	11.27	11.23	11.06	11.47	11.22
Bio9	最干季平均气温 Mean temperature of the driest quarter	℃	-5.70	5.49	-5.57	-3.60	2.78	-2.94	-3.53	0.05	-1.89
Bio11	最冷季平均气温 Mean temperature of the coldest quarter	℃	-8.37	8.18	-10.10	-6.26	-5.18	-5.65	-6.05	-4.04	-4.96
Bio12	年均降水量 Annual mean precipitation	mm	98.10	102.32	109.66	101.92	113.20	109.91	107.10	114.92	111.63
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm	23.20	24.21	27.23	23.81	28.90	27.03	26.41	29.52	28.30
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.15	0.14
Bio15	降水量季节性变化 Variation of precipitation seasonality	mm	8.13	8.28	5.79	7.93	8.88	8.45	8.52	8.77	8.66
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm	56.51	58.82	55.52	58.30	67.01	63.76	62.62	67.33	65.30
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm	5.43	5.73	5.94	5.61	6.42	5.91	5.63	6.91	6.11

¹⁾ Min: 最小值 The minimum value; Max: 最大值 The maximum value; \bar{X} : 平均值 Mean.

2.3 裸果木的潜在适宜分布区分析

预测结果(图 1)表明:在 2041 年至 2060 年,裸果木的高适生区主要零星分布在新疆西部和甘肃西部。在 RCP2.6 气候情景下,裸果木的中适生区主要分布在新疆的阿合奇东南部、阿克苏北部、巴州北部和哈密东北部,甘肃的嘉峪关大部、酒泉和张掖西北部,内蒙古的阿拉善西南部;随着典型浓度路径的增大,裸果木在上述地区的分布面积逐渐减小;在 RCP8.5 气候情景下,裸果木的中适生区在新疆哈密和巴州地区完全消失,而在新疆阿合奇东南部和阿克苏北部却大幅增大,并在青海海西地区中部出现新的分布区。与 RCP2.6 气候情景相比,RCP8.5 气候情景下裸果木在新疆、青海、甘肃和内蒙古地区的适生区面积分别增加了 5.47×10^5 、 1.86×10^5 、 0.65×10^5 和 4.62×10^5 km^2 。

预测结果(图 1)还表明:在 2061 年至 2080 年,

裸果木的高适生区与 2041 年至 2060 年基本相同,但在 RCP4.5 气候情景下,裸果木的中适生区面积最大,其在新疆阿合奇及阿克苏北部、甘肃嘉峪关、内蒙古阿拉善西北部的分布面积增大。与 RCP2.6 气候情景相比,RCP8.5 气候情景下裸果木在新疆、甘肃和内蒙古地区的适生区面积分别增加了 5.93×10^5 、 0.66×10^5 和 1.25×10^5 km^2 。在 RCP8.5 气候情景下,裸果木的分布区面积明显缩小,在内蒙古阿拉善西南部和甘肃张掖北部完全消失。与 RCP4.5 气候情景相比,RCP8.5 气候情景下裸果木在内蒙古和甘肃的适生区面积分别减少了 2.76×10^5 和 0.85×10^5 km^2 。

预测结果(表 3)表明:在 2041 年至 2060 年,裸果木的总适生区面积在 RCP4.5 气候情景下最大(104.60×10^5 km^2),在 RCP2.6 气候情景下最小(90.81×10^5 km^2);并且,裸果木的高、中适生区面积所占比例在 RCP8.5 气候情景下最大(1.98%),在

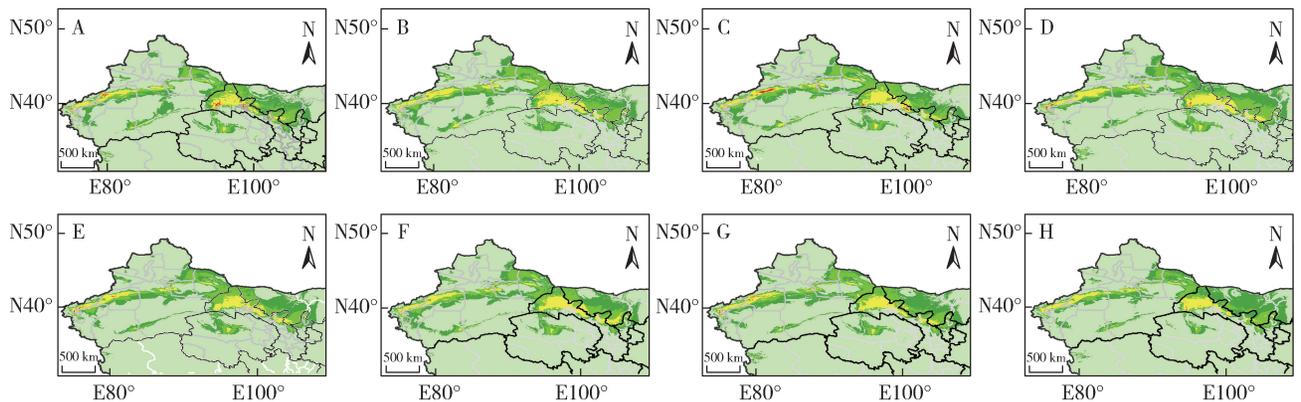


图 1 MaxEnt 模型预测的裸果木潜在适宜分布区
 Fig. 1 Potential suitable distribution areas of *Gymnocarpus przewalskii* Maxim. predicted by MaxEnt model

A, B, C, D. 2041 年至 2060 年的预测结果 Prediction results during 2041–2060; A. RCP2.6; B. RCP4.5; C. RCP6.0; D. RCP8.5. E, F, G, H. 2061 年至 2080 年的预测结果 Prediction results during 2061–2080; E. RCP2.6; F. RCP4.5; G. RCP6.0; H. RCP8.5.

表 3 未来气候情景下裸果木各适生区面积所占比例

Table 3 Area percentage of each suitable distribution area of *Gymnocarpus przewalskii* Maxim. under future climate scenarios

适生区类型 Type of suitable distribution area	2041 年至 2060 年面积所占比例/% Area percentage during 2041–2060				2061 年至 2080 年面积所占比例/% Area percentage during 2061–2080			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
高适生区 High suitable distribution area	0.08	0.01	0.07	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01
中适生区 Middle suitable distribution area	1.53	1.90	1.77	1.95	1.63	1.94	1.65	1.46
一般适生区 General suitable distribution area	3.25	3.92	3.60	3.74	3.55	3.78	3.71	2.79
低适生区 Low suitable distribution area	4.59	5.06	4.58	5.11	5.02	5.19	4.97	5.54
总适生区 Total suitable distribution area	9.45	10.88	10.03	10.83	10.22	10.91	10.35	9.79

RCP2.6 情景下最小(1.61%)。在 2061 年至 2080 年,裸果木的总适生区面积在 RCP4.5 气候情景下最大($104.87 \times 10^5 \text{ km}^2$),在 RCP8.5 气候情景下最小($94.11 \times 10^5 \text{ km}^2$);并且,裸果木的高、中适生区面积所占比例在 RCP4.5 气候情景下最大(1.94%),在 RCP8.5 气候情景下最小(1.47%)。

3 讨论和结论

在大尺度上,限制植物分布的主要因子为气候因子^[28],气候因子变化可直接导致植物生境发生改变,致使分布区植物种类和分布地环境变化^[29]。相关研究结果^[26,28]表明:在不同生境下,影响荒漠地区植物分布的因子各异,但降水和温度是影响荒漠地区植物分布的主要气候因子。本研究中,MaxEnt 模型筛选出 2 个对裸果木分布影响较大的气候因子,分别为年均降水量和最湿季降水量,不同未来气候情境下年均降水量的贡献率基本达到 30%以上,2 个气候因子的贡献率总和基本达到 50%以上,说明年均降水量是影响裸果木分布的首要限制因子,并且,与温度相比,降水对裸果木分布的影响更大。实地踏查发现,裸果木多生长在西北荒漠地区的干河床、山前冲积扇和砾石质戈壁滩,这些区域的年均降水量仅 90~100 mm,河流数量少,生境极为干旱,区域内许多植物随着水资源分布而建群,印证了降水对裸果木分布的重要性。

据相关文献^[15,17]记载,裸果木的现代分布区主要集中在河西走廊大部、宁夏北部、青海柴达木盆地及新疆塔里木盆地周边地区。MaxEnt 模型预测结果显示:总体来看,在未来气候条件下,裸果木的适生区主要集中在新疆西部的阿克苏和阿合奇地区及新疆东部的哈密地区,内蒙古阿拉善西南部,青海海西地区中部,甘肃的嘉峪关大部、酒泉和张掖西北部。随着未来气候变化,裸果木的高适生区逐渐减小甚至消失;中适生区在内蒙古西南部和新疆北部明显收缩,并主要集中在新疆西部和甘肃西北部;其他大部分分布区为一般适生区和低适生区,并且,一般适生区和低适生区逐渐向内蒙古阿拉善地区迁移,且面积明显缩小。研究表明:近 100 年来,中国的年降水量波动明显,但整体呈现逐渐减少的趋势^[29]。吴建国等^[30]的研究结果表明:在未来气候条件下,中国的极端干旱区和湿润区均缩小,而干旱区明显增大,植物分布

逐渐向湿润地区迁移。本研究中,与现代分布区相比,裸果木在未来气候条件下的适生区明显缩小,其在青海海西地区 and 新疆部分地区的适生区面积逐渐减小,并逐渐向甘肃河西走廊水资源充足区域(包括甘肃的嘉峪关、张掖和酒泉等地)移动。

参考文献:

- [1] 吴建国,吕佳佳,周巧富. 气候变化对 6 种荒漠植物分布的潜在影响[J]. 植物学报, 2010, 45(6): 723-738.
- [2] 柴永青,曹致中,蔡卓山,等. 肃北地区稀有植物裸果木种群的空间分布格局[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 239-249.
- [3] 王亮. 安西极旱荒漠区裸果木分布现状调查及保护研究[D]. 兰州:甘肃农业大学林学院, 2018: 2-13.
- [4] 党荣理,皮锡铭. 新疆繁缕亚科和裸果木亚科植物地理分布和区系特点的研究[J]. 西北植物学报, 1994, 14(2): 136-142.
- [5] 庄鸿飞,张殷波,王伟,等. 基于最大熵模型的不同尺度物种分布概率优化热点分析:以红色木莲为例[J]. 生物多样性, 2018, 26(9): 931-940.
- [6] 孔维尧,李欣海,邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [7] 张兴旺,李焱,谢艳萍,等. 气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4): 31-41.
- [8] 党荣理,姜彦成. 新疆裸果木亚科植物花粉形态学研究[J]. 西北植物学报, 1996, 16(1): 61-64.
- [9] 李新蓉,唐欣,付文洁. 荒漠孑遗植物裸果木的花部特征及繁育系统[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2592-2598.
- [10] 唐欣,李新蓉. 荒漠孑遗植物裸果木的开花物候特征[J]. 植物学报, 2017, 52(4): 487-495.
- [11] 孙宗国. PEG-6000 模拟干旱胁迫下裸果木幼苗的生理响应[J]. 甘肃农业科技, 2014(12): 41-44.
- [12] 连转红,杨海莉,吴芳明,等. NaCl 或 PEG 胁迫对裸果木种子萌发的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 89-96.
- [13] 徐振朋,宛涛,蔡萍,等. 裸果木种群遗传多样性特点及与地理气候因子关联研究[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 70-76.
- [14] 狄林楠,李新蓉,宋楠. 基于 SCoT 分子标记的裸果木遗传多样性分析[J]. 植物研究, 2018, 38(5): 725-732.
- [15] 马松梅,张明理,张宏祥,等. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸果木的潜在地理分布及格局[J]. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1327-1335.
- [16] 徐振朋. 荒漠区裸果木种群分布与性状适应特征研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 2017: 19-29.
- [17] 徐振朋,张佳琦,宛涛,等. 孑遗植物裸果木历史分布格局模拟及避难区研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(10): 2074-2081.
- [18] 柴永青,曹致中,蔡卓山. 肃北地区裸果木荒漠群落构成特征及物种多样性研究[J]. 草业学报, 2010, 19(1): 21-27.
- [19] 巴哈尔古丽,汪志军,郭仲军. 濒危植物裸果木地理分布与资源现状[J]. 中国野生植物资源, 2005, 24(5): 42-43.

- [20] 鲁 艳. 哈密盆地裸果木群落物种多样性及其优势种群生态位研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学资源与环境学院, 2007: 15-16.
- [21] HIJMANS R J, CAMERON S, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [22] KIEHL J T, HACK J J, BONAN G B, et al. The national center for atmospheric research community climate model: CCM3 [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(6): 1131-1149.
- [23] KNUTTI R, SEDLACEK J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 369-373.
- [24] 周天军, 邹立维. IPCC 第五次评估报告全球和区域气候预估图集评述[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 149-152.
- [25] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365-372.
- [26] 郭彦龙, 卫海燕, 路春燕, 等. 气候变化下桃儿七潜在地理分布的预测[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 249-261.
- [27] 高 蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 843-852.
- [28] 马松梅, 张明理, 陈 曦. 沙冬青属植物在亚洲中部荒漠区的潜在地理分布及驱动因子分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1301-1307.
- [29] 吕佳佳. 气候变化对我国主要珍稀濒危物种分布影响及其适应对策研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2009: 5.
- [30] 吴建国, 吕佳佳. 气候变化对我国干旱区分布及其范围的潜在影响[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 199-206.

(责任编辑: 佟金凤)

(上接第 50 页 Continued from page 50)

- [3] 牟洪香. 木本能源植物文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)的调查与研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院林业研究所, 2006: 20-25.
- [4] 敖 妍, 韩树文, 杨晓辉. 立地条件和栽植密度对文冠果生长结实的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(6): 11-14.
- [5] 柴春山, 戚建莉, 薛 睿, 等. 甘肃省文冠果优良单株的选择及其性状特征[J]. *经济林研究*, 2017, 35(4): 22-28.
- [6] 刘五爱, 王志贤. 立地条件及造林方式对文冠果造林效果的影响[J]. *园艺与种苗*, 2016(6): 44-46.
- [7] 卜 静, 李登武, 王冬梅. 玉竹品质与主要生态因子的相关性[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1447-1454.
- [8] 敖 妍. 木本能源植物文冠果类型划分、单株选择及相关研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院林业研究所, 2010.
- [9] 张晓燕. 神东矿区不同种源地文冠果生长适宜性及耐盐性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学水土保持学院, 2012: 32-37.
- [10] 杨庆珍, 王增绘, 付 娟, 等. 黄芪化学成分与生态因子的相关性[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 732-738.
- [11] 何忠俊, 梁社往, 丁 颖, 等. 三七主根稳定碳同位素组成与生态因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4): 561-568.
- [12] 刁松峰, 邵文豪, 董汝湘, 等. 无患子光合生理日变化及其与生理生态因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(4): 828-834.
- [13] 刘 军, 张海燕, 姜景民, 等. 毛红椿种实和苗期生长性状地理种源变异[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(3): 55-59.
- [14] 郑 健, 胡增辉, 郑勇奇, 等. 花椒树种源间表型性状的地理变异分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2012, 21(3): 50-56.
- [15] 李因刚, 周志春, 金国庆, 等. 乳源木莲苗生长和形态的地理种源分化[J]. *林业科学研究*, 2007, 20(1): 35-39.
- [16] 童 冉, 吴小龙, 姜丽娜, 等. 野生玫瑰种群表型变异[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3706-3715.
- [17] 杨晓霞, 冷平生, 郑 健, 等. 暴马丁香不同种源种子和幼苗的表型性状变异及其与地理-气候因子的相关性[J]. *植物资源与环境学报*, 2016, 25(3): 80-89.
- [18] 林 玲, 王军辉, 罗 建, 等. 砂生槐天然群体种实性状的表型多样性[J]. *林业科学*, 2014, 50(4): 137-143.
- [19] 张 振, 张含国, 周 宇, 等. 红松多无性系群体的种实性状变异研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(2): 67-78.
- [20] 刘 军, 陈益泰, 姜景民, 等. 香椿种源苗期性状变异与原产地生态因子典型相关分析[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(11): 27-29.
- [21] 王葆芳, 张景波, 杨晓晖, 等. 梭梭不同种源间种子性状和幼苗生长性状与地理和气候因子的关系[J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(1): 28-35.

(责任编辑: 郭严冬)