

气候变化下耐旱藓类连轴藓属在新疆的分布模拟

刘 艳¹, 阿提古丽·毛拉², 沙毕热木·斯热义力², 买买提明·苏来曼^{2*}

(1 重庆师范大学 生命科学学院, 重庆 401331; 2 新疆大学 生命科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要: 该研究基于耐旱藓类连轴藓属 5 种 53 条在新疆的地理分布信息和 7 个气候变量, 利用最大熵模型和 Arc-GIS 10.2 软件, 分别模拟现代气候和未来气候情景下连轴藓属在新疆的适生分布区, 为探讨气候变化对干旱、半干旱区苔藓植物物种分布的影响提供参考。结果表明: (1) Maxent 模型预测连轴藓属在新疆适生区的准确性非常高 ($AUC=0.957$)。 (2) 年降雨量、最干季度降雨量和最暖季度平均气温是影响连轴藓属分布的主要气候因子。 (3) 连轴藓属在新疆的适生区主要集中在阿尔泰山和天山沿线, 在未来 (2061~2080 年) 气候情景下, 连轴藓属分布面积将比现代气候下减少 10.39%, 其绝大部分现有南部适生区将丧失。

关键词: 苔藓植物; 气候变化; 物种分布; 最大熵模型; 干旱区

中图分类号: Q948.13

文献标志码: A

Modeling Potential Distributions of the Desiccation-tolerant Moss Genus *Schistidium* in Xinjiang under Climate Change

LIU Yan¹, ATIGUL Molla², SABIRAM Esrayl², MAMTIMIN Sulayman^{2*}

(1 College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2 College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Based on 53 occurrence records of five *Schistidium* species from Xinjiang, which is a desiccation-tolerant moss genus, and 7 bioclimatic variables, the present study employed both the maximum entropy (Maxent) model and the spatial analysis method in the ArcGIS 10.2 to predict the suitable distributions of *Schistidium* in Xinjiang under current and future climate scenarios, in order to provide basis for exploring the influence of climate change on bryophyte species distributions in arid and semiarid zones. The results indicated that: (1) the Maxent model gave a high accuracy (i. e. $AUC=0.957$) in habitat predictions for *Schistidium*; (2) The annual precipitation, precipitation of driest quarter and mean temperature of warmest quarter were the major climatic factors influencing the distribution of *Schistidium* in Xinjiang; (3) The suitable distribution of *Schistidium* in Xinjiang mainly located along Altai and Tianshan Mountains. Under the future (i. e. 2061–2080) climate scenarios, the range of *Schistidium* was predicted to decrease by 10.39% and most current habitats in south of Xinjiang would lost.

Key words: bryophyte; climate change; species distribution; Maxent; arid zone

干旱、半干旱地区占全球陆地面积的 1/3^[1], 对气候变化十分敏感^[2-3]。新疆维吾尔自治区是中国

典型的干旱、半干旱地区, 位于亚欧大陆中部, 属于温带大陆性干旱气候。历史气象资料显示^[4-6], 新疆

收稿日期: 2017-06-05; 修改稿收到日期: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (31460048, 31660052); 重庆市自然科学基金 (cstc2016jcyjA0031)

作者简介: 刘 艳 (1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事苔藓植物学研究。E-mail: tracy-moss@hotmail.com

* 通信作者: 买买提明·苏来曼, 教授, 主要从事苔藓植物学研究。E-mail: mamtimin@xju.edu.cn

的气候正在向“暖湿”化转变,改变着生态环境,影响其生物多样性。例如,袁亮等^[7]通过分析历史气候数据,发现区域气温和降水的增加导致濒危物种新疆北鲵(*Ranodon sibiricus*)种群数量持续减少。

预测气候变化对生物多样性的影响是全球变化生物学研究的热点领域之一^[8]。最大熵(maximum entropy, Maxent)模型是物种分布模型(species distribution model, SDM)之一。利用该模型,刘会良等^[9]和杨会枫等^[10]分别预测了 56 种野生果树以及西伯利亚蝗虫(*Gomphocerus sibiric*)在新疆的潜在分布,为新疆野生果树资源管理和病虫害防治提供了科学依据。然而,利用 Maxent 模型预测区域气候变化对物种在新疆分布影响的报道总体较少。

苔藓植物独特的生理生态特征,使其成为研究气候变化的理想研究对象^[11]。目前,基于最大熵模型研究气候变化对不同苔藓植物分布的影响,均获得理想的预测结果^[12-15]。连轴藓属(*Schistidium*)隶属紫萁藓科,属于耐旱藓类植物,主要分布在寒带、温带或高海拔地区的干燥岩面。中国目前记录有 11 种^[16-17],新疆记录有 7 种^[18]。作者基于近年对新疆苔藓植物的广泛采集和研究,记录该属 5 种,即圆蒴连轴藓(*S. apocarpum*)、粗疣连轴藓(*S. strictum*)、长齿连轴藓(*S. trichodon*)、溪岸连轴藓(*S. rivulare*)和细叶连轴藓(*S. liliputanum*)。本文根据上述 5 种在新疆的地理采集信息和气候环境数据,基于 Maxent 模型和 ArcGIS 10.2 软件模拟气候变化下该属在新疆的适生分布区,以期为气候变化对干旱区耐旱物种分布影响的研究提供参考资料。

1 材料和方法

1.1 数据来源

连轴藓属在新疆的分布记录来源于作者近年的野外采集,共获得 53 条不重复的地理信息(表 1)。中国行政区地图来自国家基础地理信息系统数据库(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>)。新疆自治区地图利用 Arc GIS 10.2 软件从中国地图中剪切获得。从全球气候数据库 WorldClim(<http://www.worldclim.org>)^[19]分别下载现代(1960~1990 年)和未来气候情景下(21 世纪 50 年代:2041~2060 年和 21 世纪 70 年代:2061~2080 年)的 19 个生物气候变量,空间分辨率均为 30″(约 1 km)。海拔高度数据(DEM)从美国国家航空航天局发布的全球数字高程模型(SRTM v4. 1, [http:// datamirror. csdb. cn/](http://datamirror.csdb.cn/))下载,空间分辨率为 100 m。采用地理坐标系 GCS_WGS_1984 对上述变量进行投影。未来气候情景采用中国国家气候中心开发的 BCC_CSM 模型 RCP45 情景,即 4 种典型浓度路径(representative concentration pathway, RCP)中的 CO₂ 中等浓度排放情景。其假设为,至 21 世纪末全球气温平均升高 1.8 ℃^[20]。

1.2 变量选择

为避免高度相关的环境数据对预测结果的影响,利用 ArcGIS 10.2 软件对 19 个生物气候变量(<http://www.worldclim.org>)及海拔数据进行相关性分析,对相关系数>0.8 的 2 个变量,选择其中 1 个。选择原则根据 Maxent 模型^[21]的 Jack-knife 分析结果,保留贡献率相对较高的变量。最终,

表 1 连轴藓属在新疆的地理分布

Table 1 Occurrence records of *Schistidium* in Xinjiang

编号 No.	分布地点 Location	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m
1	布尔津县喀纳斯自然保护区 Kanasi, Buerjin County	48.688	87.238	2 190
2	阿勒泰市小东沟 Xiaodonggou, Aletai City	48.029	88.363	2 110
3	福海县新金沟 Xinjingou, Fuhai County	47.986	89.055	1 532
4	福海县乌图布拉克 Wutubulake, Fuhai County	47.854	88.655	1 400
5	富蕴县卡拉都尔根 Kaladuergen, Fuyun County	47.734	89.736	1 972
6	富蕴县卡拉伊格尔德营林场 Kalayiger dongying Forestry Station, Fuyun County	47.711	89.018	1 100
7	富蕴县卡拉伊格尔德营林场 Kalayiger dongying Forestry Station, Fuyun County	47.584	89.457	1 100
8	富蕴县卡拉卓勒瀑布 Kalazhuole Waterfall, Fuyun County	47.325	90.029	1 460
9	青河县大清河 Daqing River, Qinghe County	47.076	90.232	1 835
10	博州夏尔希里自然保护区 Xiaerxili, Bozhou City	45.200	81.997	1 519

续表 1 Continued Table 1				
编号 No.	分布地点 Location	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m
11	霍城县果子沟 Guozigou, Huocheng County	44.404	80.787	3 020
12	霍城县果子沟 Guozigou, Huocheng County	44.404	81.201	2 400
13	霍城县果子沟 Guozigou, Huocheng County	44.401	81.067	1 680
14	伊宁县阿吾赞沟 Awuzangou, Yining County	44.160	81.753	2 000
15	乌苏县待甫僧 Daifuseng, Wusu County	44.105	84.501	2 240
16	呼图壁县哈熊沟 Haxiongou, Hutubi County	43.954	85.106	1 885
17	呼图壁县哈熊沟 Haxiongou, Hutubi County	43.698	86.659	1 650
18	呼图壁县哈熊沟 Haxiongou, Hutubi County	42.954	82.106	1 885
19	沙湾县鹿角湾 Lujiaowan, Shawan County	43.945	85.131	2 320
20	沙湾县大泉水沟 Daquanshuigou, Shawan County	43.862	85.852	1 480
21	玛纳斯县白杨沟林场 Baiyanggou Forestry Station, Manasi County	43.849	85.934	1 480
22	木垒县洞洞沟 Dongdonggou, Mulei County	43.812	90.343	1 930
23	木垒县大南沟 Danangou, Mulei County	43.614	90.097	2 030
24	米泉县米泉林场 Miquan Forestry Station, Miquan County	43.822	88.004	2 200
25	米泉县哈熊沟 Haxiongou, Miquan County	43.826	88.006	1 900
26	米泉县哈熊沟 Haxiongou, Miquan County	43.809	87.994	1 969
27	米泉县哈熊沟 Haxiongou, Miquan County	43.699	87.999	1 850
28	吉木萨尔县林场 Jimsar Forestry Station, Jimsar County	43.777	89.031	1 778
29	吉木萨尔县林场 Jimsar Forestry Station, Jimsar County	43.772	89.019	1 820
30	吉木萨尔县林场 Jimsar Forestry Station, Jimsar County	43.768	89.023	1 800
31	吉木萨尔县大龙口 Dalongkou, Jimsar County	43.691	89.053	1 760
32	奇台县大板沟 Dabangou, Qitai County	43.664	81.874	1 700
33	奇台县大东沟 Dadonggou, Qitai County	43.583	81.874	1 560
34	奇台县大东沟 Dadonggou, Qitai County	43.535	89.924	1 920
35	察布查尔县琼博拉 Qiongbola, Qapqal County	43.470	81.005	1 632
36	乌鲁木齐市南山小渠子林场 Xiaoquzi Forestry Station, Nanshan, Urumqi City	43.451	87.089	—
37	乌鲁木齐市南山小渠子林场 Xiaoquzi Forestry Station, Nanshan, Urumqi City	43.487	87.101	2 500
38	新源县新源林场 Xinyuan Forestry Station, Xinyuan County	43.370	84.359	1 760
39	巩留县野核桃沟 Yehetaogou, Gongliu County	43.350	82.273	1 252
40	巩留县恰西 Qiayi, Gongliu County	43.125	82.675	1 477
41	巩留县恰西 Qiayi, Gongliu County	43.057	82.678	1 795
42	巩留县塔里木 Talimu, Gongliu County	43.042	82.556	1 890
43	巩留县塔里木 Talimu, Gongliu County	43.007	82.545	2 100
44	和静县班禅沟 Banchangou, Hejing County	43.263	83.770	2 286
45	尼勒克县于赞 Yuzan, Nileke County	43.006	82.637	1 570
46	尼勒克县依生布古 Yishengbugu, Nileke County	43.601	83.867	2 240
47	特克斯县琼库什台 Qiongkushitai, Tekesi County	42.911	82.120	2 010
48	特克斯县小库什台 Xiaokushitai, Tekesi County	42.908	81.991	1 985
49	昭苏县阿克牙孜 Akeyazi, Zhaosu County	42.642	81.453	2 640
50	昭苏县木扎特河 Muzhate River, Zhaosu County	42.580	80.324	2 100
51	昭苏县木扎特河 Muzhate River, Zhaosu County	42.564	80.322	2 160
52	昭苏县木扎特河 Muzhate River, Zhaosu County	42.546	80.372	2 160
53	昭苏县木扎特河 Muzhate River, Zhaosu County	42.492	80.318	2 260

从 20 个环境数据中选取 7 个用于模型分析,分别是:月平均昼夜温差(Bio 2: Mean Diurnal Range (Mean of monthly(max temp-min temp))、等温性(Bio 3: Isothermality)、最干季度平均气温(Bio 9: Mean temperature of driest quarter)、最暖季度平均气温(Bio 10: Mean temperature of warmest quarter)、年降雨量(Bio 12: Annual precipitation)、降雨量的季节性变化(变异系数)(Bio 15: Precipitation seasonality(coefficient of variation))、最干季度降雨量(Bio 17: Precipitation of driest quarter)。

1.3 Maxent 模型运行及检验

将物种地理分布信息与现代和未来气候情景下的 7 个环境变量分别导入 Maxent3.3.3k 软件^[21],随机抽取 25% 的分布点作为测试集,其余为训练集。其它参数均采用模型的默认值。采用“10 percentile training presence logistic threshold”进行重分类获得物种适生分布预测图^[22]。利用 ArcGIS 10.2 空间分析模块分别计算现代和未来气候情景下连轴藓属在新疆的适生区面积及分布范围。采用接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic, ROC)下的面积值(AUC)对 Maxent 模型预测结果进行精度检验。AUC 值越接近 1,说明模型预测结果的准确性越高^[23]。

2 结果与分析

2.1 影响连轴藓属在新疆分布的主要气候因子及其生态位

Maxent 模型在现代气候情景下的 AUC 值为 0.957,表明模型预测的准确性非常高。7 个气候变量对连轴藓属适生分布区预测结果的贡献率依次为:年降雨量(39.5%)>最干季度降雨量(35.9%)>最暖季度平均气温(16.1%)>降雨量的季节性变化(变异系数)(6.7%)>等温性(1.8%)>月平均昼夜温差(0.1%)>最干季度平均气温(0)。对 3 个主要气候因子进行单因子建模,根据单变量响应曲线(图 1),获得各气候因子的阈值(物种分布概率=0.3,即重分类阈值):年降雨量>171.43 mm,最干季度降雨量>6.67 mm,最暖季度平均气温 8.33~19.17℃。

2.2 连轴藓属在新疆的适生区模拟

由图 2 可以看出,连轴藓属在新疆的适生区包括阿勒泰北部、西北部和东南部、昌吉东北部和南部、乌鲁木齐东部、南部和西部、哈密西北部、吐鲁番北部和西北部、塔城北部、中西部 and 南部、博州北部、

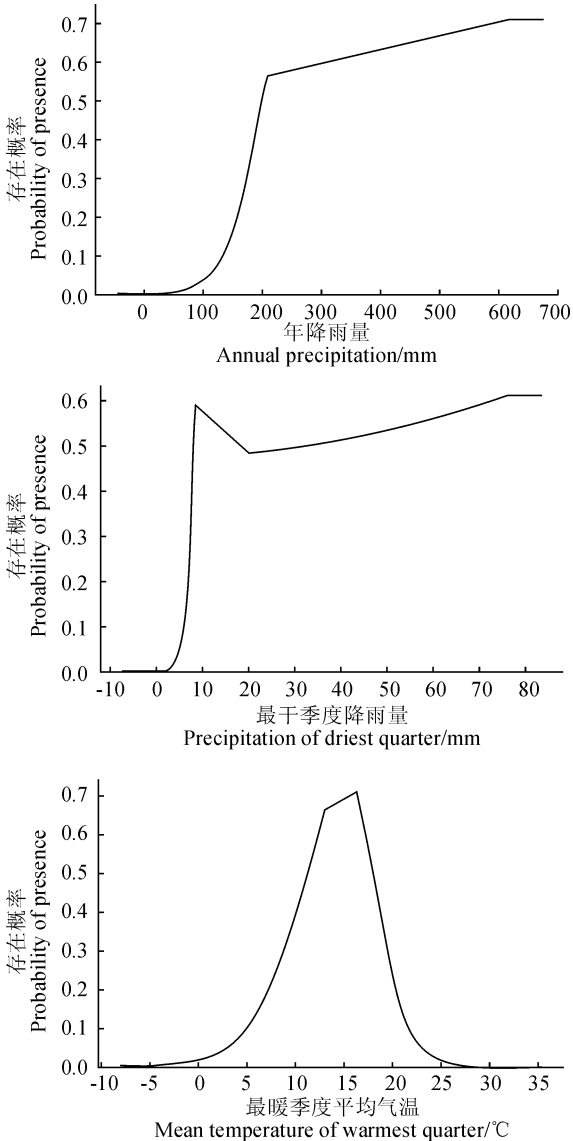


图 1 主要气候因子与连轴藓属物种存在概率的关系
Fig. 1 Relationship between major climatic factors and probability of *Schistidium* presence

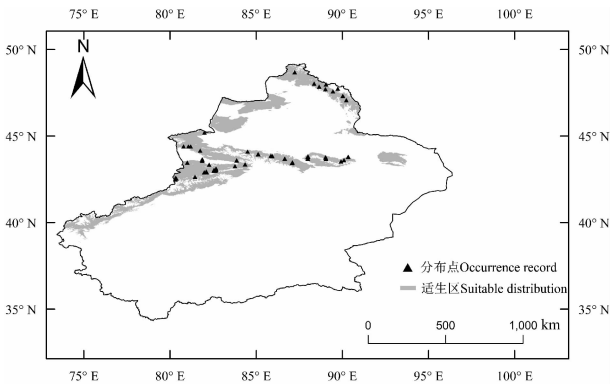
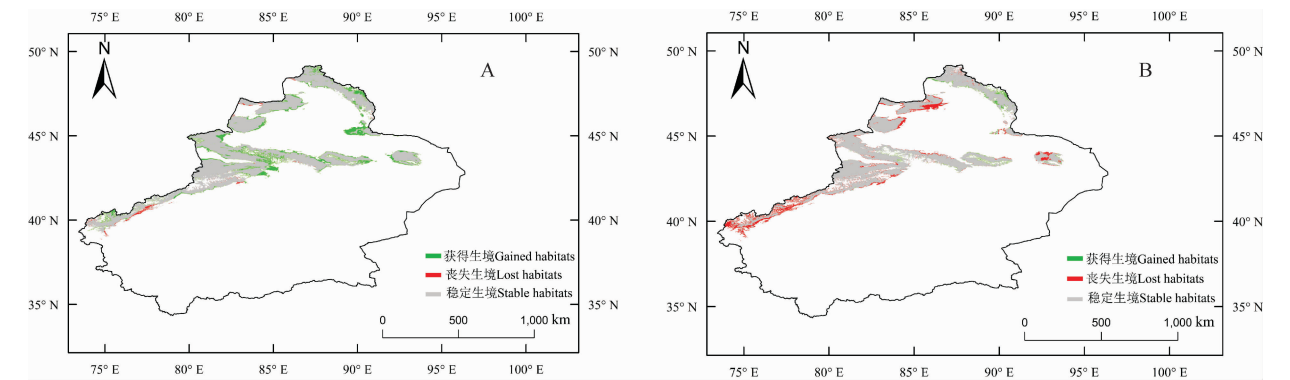


图 2 连轴藓属在新疆的分布记录 and 现代气候下的适生区
Fig. 2 Occurrence records and suitable species distribution of *Schistidium* in Xinjiang under current climate

表 2 不同气候情景下新疆 3 个主要气候因子的变化

Table 2 Changes in three major climatic factors under different climate scenarios in Xinjiang

气候情景 Climate scenario	年降雨量 Annual precipitation/mm		最干季度降雨量 Precipitation of driest quarter/mm		最暖季度平均气温 Mean temperature of warmest quarter/℃	
	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
现代气候 Current climate	12~653	108.10	0~108	7.28	-10.8~32.0	18.9
21 世纪 50 年代 2050s	12~657	106.18	0~81	7.93	-8.2~34.6	21.4
21 世纪 70 年代 2070s	12~678	116.54	0~88	7.79	-7.9~35.0	21.7



A. 2050s; B. 2070s

图 3 未来气候情景下连轴藓属在新疆的适生区

Fig. 3 Suitable species distribution of *Schistidium* in Xinjiang under future climate scenarios

西部和南部、伊犁北部和南部、巴州西北部、阿克苏北部和西北部、克州北部和西北部。

2.3 未来气候情景下连轴藓属在新疆的分布模拟

利用 ArcGIS 10.2 软件对影响连轴藓属在新疆地理分布的 3 个主要气候因子进行统计,由表 2 可知,在未来气候情景下,新疆年降雨量、最干季度降雨量和最暖季度平均气温均有不同程度的增加。至 21 世纪 70 年代,最暖季度平均气温将比现代气候下升高 2.8℃。年均降雨量和最干季度平均降雨量增幅较小。

现代气候下,连轴藓属在新疆的适生区面积占自治区总面积的 11.65%。至 21 世纪 50 年代(图 3,A),连轴藓属在新疆的适生区将在现有各分布中心基础上分别向四周略有扩张,适生区面积占自治区总面积的 14.02%,是现代气候下的 121.89%。其中,新获得的生境主要在天山以北的北疆地区,而丧失生境主要在南疆地区。至 21 世纪 70 年代(图 3,B),连轴藓属在新疆的潜在分布将有所缩小,面积占自治区总面积的 10.44%,是现代气候下的 89.61%。现代气候下南疆的绝大部分适生区将丧失,北疆塔城北部和西部以及哈密西北部地区的现有分布区也将有所减小。相反,阿尔泰山的适生区

将向南北略有扩张。

3 讨 论

本研究利用 Maxent 模型和 ArcGIS 软件,定量展示了气候变化下耐旱藓类植物连轴藓属在新疆的适生区变化,为全球气候变化对于干旱区生物多样性的影响,尤其是对苔藓植物的影响,提供了科学依据,具有重要意义。

气候变化对植物地理分布的影响表现在分布范围和面积两方面的变化^[8]。从整体上看,气候变化正严重威胁着生物多样性,促使植物向高海拔或高纬度地区迁移^[24-26]。至 21 世纪 70 年代,在 RCP45 情景下,新疆最暖季度平均气温预计将达到 21.7℃,比现代气候下升温 2.8℃,比连轴藓属最适生态位(8.33~19.17℃),上限高出 2.53℃。基于 Maxent 模型预测结果显示,连轴藓属在新疆的适生区,尤其是绝大部分现有南部适生区将丧失(图 3,B),这与新疆同纬度的欧洲的相关苔藓植物研究结果大体一致。例如,Désamoré 等^[12]基于 Maxent 模型预测,至 2080 年,同蒴藓(*Homalothecium sericeum*)在南欧的分布区将明显减少,分布范围向欧洲北部移动。Frahm 等^[27]发现,在过去 20 年间由于

气温升高,34 种苔藓植物已经从欧洲南部向欧洲中部扩张。另一方面,全球气候变化对连轴藓属在新疆地理分布面积的影响(将比现代气候下减少 10.39%)小于对同区域其它荒漠植物的影响^[28-29],这说明耐旱藓类连轴藓属对气候变化的敏感程度不及荒漠植物,但耐受程度高于荒漠植物。例如,至 2081~2100 年,短叶假木贼(*Anabasis brevifolia*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、喀什膜果麻黄(*Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*)、肉苁蓉(*Cistanchedeserticola*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia*)在新疆的适生区将完全丧失;裸果木(*Gymnocarpus przewalskii*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、膜果麻黄(*E. przewalskii*)、新疆贝母(*Fritillaria walujewii*)和伊贝母(*F. pallidiflora*)在新疆的适生区将大部分丧失^[28-29]。

根据 7 个气候变量对模型预测结果的贡献率来看,年降雨量、最干季度降雨量和降雨量的季节性变化(变异系数)这 3 个与降水相关的气候因子累积贡献率达 82.1%,说明降水是影响耐旱藓类连轴藓属在新疆地理分布的决定因素。苔藓植物不同于其他高等植物,属于变水植物,其植物体内的水分多少直接受外界环境影响。当外界环境干旱时,苔藓植物能够在植物体大量失水的状态下继续存活;而当外界环境湿润时,植物体复水。这是许多苔藓类群耐

旱的原因所在^[30]。未来气候情景下,新疆的降水增幅较小,可能是导致连轴藓属地理分布面积在该区域变化相对较小的原因之一。

Maxent 模型是利用物种已知地理分布及其环境因子进行分析运算,找到熵最大的概率分布作为最优分布,从而预测物种的适生区。该模型预测的苔藓植物适生区能够与其实分布情况很好的匹配^[12, 15, 31]。本研究结果显示,Maxent 模型预测的准确性非常高(AUC=0.957),结果可信。连轴藓属在新疆的适生区主要集中在阿尔泰山和天山沿线,与物种已知分布记录一致。这些区域植被丰富,是新疆苔藓植物分布最集中的地区之一^[32]。此外,阿勒泰东南部、昌吉东北部、哈密中部、吐鲁番西北部、塔城北部和中西部、阿克苏北部和西北部、克州北部和西北部也被预测为连轴藓属的适宜生境,但是这些区域目前还缺乏相应采集记录。考虑到苔藓植物孢子具有长距离传播的能力,能够在较短历史时期内快速、有效的、在广阔的地理区域内定殖^[33-34]。因此,上述区域可能由于阿尔泰山沿线种群的孢子向南传播或天山沿线种群的孢子分别向南北传播而定殖形成潜在分布区。这一预测结果还有待今后的调查工作加以验证。由于目前只考虑了降水和温度对物种的影响,若能综合考虑人类活动、土地利用方式变化、气候变化对植被的影响、物种孢子扩散能力等因素,预测结果将更为准确。

参考文献:

[1] WHITFORD WG. Ecology of desert systems[M]. San Diego: Academic Press, 2002.

[2] 王澄海. 气候变化与荒漠化[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

[3] 於 琨, 曹明奎, 陶 波, 等. 基于潜在植被的中国陆地生态系统对气候变化的脆弱性定量评价[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(3): 521-530.
YU L, CAO M K, TAO B, *et al.* Quantitative assessment of the vulnerability of terrestrial ecosystems of China to climate change based on potential vegetation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(3): 521-530.

[4] 徐贵青, 魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2004, **27**(1): 14-18.
XU G Q, WEI W S. Climate change of Xinjiang and its impact on eco-environment[J]. *Arid Land Geography*, 2004, **27**(1): 14-18.

[5] 贺晋云, 张明军, 王 鹏, 等. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, **28**(3): 499-508.
HE J Y, ZHANG M J, WANG P, *et al.* New progress of the study on climate change in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2011, **28**(3): 499-508.

[6] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 近 50 年新疆气候变化对环境的影响评估[J]. 干旱区地理, 2001, **24**(2): 97-103.
HU R J, FAN Z L, WANG Y J, *et al.* Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years[J]. *Arid Land Geography*, 2001, **24**(2): 97-103.

[7] 袁 亮, 吴 焯, 叶小芳, 等. 近 52a 区域气候变化对濒危物种新疆北鲵潜在影响分析[J]. 干旱区地理, 2016, **39**(1): 58-66.
YUAN L, WU Y, YE X F, *et al.* Potential impact of regional climate change on endangered species *Ranodon sibiricus* in China over the past 52 years[J]. *Arid Land Geography*, 2016, **39**(1): 58-66.

[8] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, *et al.* Impacts of climate change on the future of biodiversity[J]. *Ecology Letters*, 2012, **15**(4): 365-377.

[9] 刘会良, 张玲卫, 张宏祥, 等. 基于物种分布模型的新疆野生果树物种丰富度分布格局[J]. 林业科学, 2015, **51**(12): 1-8.
LIU H L, ZHANG L W, ZHANG H X, *et al.* Distribution pattern of species richness for wild fruit trees in Xinjiang based

- on species distribution modeling[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(12): 1-8.
- [10] 杨会枫, 郑江华, 吴秀兰, 等. 基于 MaxEnt 模型的西伯利亚蝗虫在新疆潜在分布预测研究[J]. *新疆农业科学*, 2016, **53**(1): 43-50.
- YANG H F, ZHENG J H, WU X L, *et al.* Prediction of potential distribution area of *Gomphocerus sibiric* in China based on the MaxEnt model[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2016, **53**(1): 43-50.
- [11] TUBA Z, SLACK NG, STARK L R. Bryophyte ecology and climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [12] DÉSAMORÉ A, LAENEN B, STECH M, *et al.* How do temperate bryophytes face the challenge of a changing environment? Lessons from the past and predictions for the future [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(9): 2 915-2 924.
- [13] SÉRGIO C, GARCIA CA, VIEIRA C, *et al.* Conservation of Portuguese red-listed bryophytes species in Portugal: Promoting a shift in perspective on climate changes[J]. *Plant Biosystems*, 2014, **148**(4): 837-850.
- [14] 沈阳, 于晶, 郭水良. 不同气候变化情境下中国木灵藓属和藓属植物的潜在分布格局[J]. *生态学报*, 2015, **35**(19): 6 449-6 459.
- SHEN Y, YU J, GUO S L. *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(19): 6 449-6 459.
- [15] 刘 艳. 气候变化下我国蔓藓属(*Meteorium*)适生分布的预测[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2016, (6): 192-202.
- LIU Y. Predictions of suitable distribution of *Meteorium* in China under climate change[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2016, (6): 192-202.
- [16] 黎兴江. 中国苔藓志(第3卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [17] 丁彩琴, 白学良, 冯 超, 等. 毛尖连轴藓及其近缘种的比较形态学研究[J]. *植物科学学报*, 2015, **33**(1): 9-18.
- DING C Q, BAI X L, FENG C, *et al.* Comparative morphology of *Schistidium lancifolium* and its relevant species[J]. *Plant Science Journal*, 2015, **33**(1): 9-18.
- [18] 买买提明·苏来曼. 新疆苔类, 角苔类, 藓类植物最新名录[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2012, **29**(3): 259-267.
- MAMTIMIN S. New checklist of Xinjiang liverworts, hornworts, and mosses [J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2012, **29**(3): 259-267.
- [19] HIJMANS RJ, CAMERON SE, PARRA JL, *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, **25**(15): 1 965-1 978.
- [20] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [21] PHILLIPS SJ, ANDERSON RP, SCHAPIRE RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, **190**(3-4): 231-259.
- [22] PEARSON GR, DAWSON TP, LIU C. Modelling species distributions in Britain: a hierarchical integration of climate and land-cover data[J]. *Ecography*, 2004, **27**(3): 285-298.
- [23] SWETS JA. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. *Science*, 1988, **240**(4 857): 1 285-1 293.
- [24] THUILLER W, LAVOREL S, ARA ÚJO MB, *et al.* Climate change threats to plant diversity in Europe [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(23): 8 245-8 250.
- [25] KELLY A E, GOULDEN M L. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(33): 11 823-11 826.
- [26] LENOIR J, GÉGOUT JC, MARQUET PA, *et al.* A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century [J]. *Science*, 2008, **320**: 1 768-1 771.
- [27] FRAHM JP, KLAUS D. Bryophytes as indicators of recent climate fluctuations in Central Europe [J]. *Lindbergia*, 2001, **26**(2): 97-104.
- [28] 吴建国. 气候变化对7种荒漠植物分布的潜在影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, **16**(5): 650-661.
- WU J G. Effects of climate changes on distribution of seven desert plants in China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, **16**(5): 650-661.
- [29] 吴建国, 吕佳佳, 周周富. 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.
- WU J G, LÜ J J, ZHOU Q F. Potential effects of climate change on the distribution of six desert plants in China [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, **45**(6): 723-738.
- [30] GLIME JM. Bryophyte Ecology (vol. 1) [M]. Michigan Technological University and the International Association of Bryologists, 2007.
- [31] KRUIJER JD, NIELS R, MICHAEL S. Modelling the distribution of the moss species *Hypopterygium tamarisci* (Hypopterygiaceae, Bryophyta) in central and south America [J]. *Nova Hedwigia*, 2010, **91**(3-4): 399-420.
- [32] 热比也木·吾甫, 艾尼瓦尔·阿布都热衣木, 玛尔孜亚·阿不力米提, 等. 新疆苔藓植物的研究进展[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2014, **31**(3): 335-340, 362.
- RABIYE G, ANWAR A, MARZIYA A, *et al.* Recent advances in Xinjiang bryological research [J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2014, **31**(3): 335-340, 362.
- [33] VANDERPOORTEN A, DEVOS N, GOFFINET B, *et al.* The barriers to oceanic island radiation in bryophytes: insights from the phylogeography of the moss *Grimmia montana* [J]. *Journal of Biogeography*, 2008, **35**: 654-663.
- [34] PATINO J, MEDINA R, VANDERPOORTEN A, *et al.* Origin and fate of the single-island endemic moss *Orthotrichum handiense* [J]. *Journal of Biogeography*, 2013, **40**: 857-868.