

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2018.40541

夏尤普·玉苏甫, 买买提明·苏来曼, 维尼拉·伊利哈尔, 张忠心. 基于 MaxEnt 生态位模型预测对齿藓属 (*Didymodon*) 植物在新疆的潜在地理分布[J]. 植物科学学报, 2018, 36(4): 541-553Shuayib Yusup, Mamtimin Sulayman, Winira Ilghar, Zhang ZX. Prediction of potential distribution of *Didymodon* (Bryophyta, Pottiaceae) in Xinjiang based on the MaxEnt model[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(4): 541-553

# 基于 MaxEnt 生态位模型预测对齿藓属 (*Didymodon*) 植物在新疆的潜在地理分布

夏尤普·玉苏甫<sup>1</sup>, 买买提明·苏来曼<sup>1\*</sup>, 维尼拉·伊利哈尔<sup>1</sup>, 张忠心<sup>2</sup>

(1. 新疆大学生命科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆乌鲁木齐市河滩绿化管理处, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 该文基于 MaxEnt 模型, 利用获得的 132 个对齿藓属 (*Didymodon*) 植物在新疆分布的信息, 结合 RCP45 CO<sub>2</sub> 排放情景下 2050 年和 2070 年的 19 个生物气候数据预测该属在当代、2050 年和 2070 年的潜在分布区域。结果显示, 最湿季平均温度、年平均气温、最干季降水量和年降水量是影响该属分布最主要的气候因子, 其贡献率分别为 33.6%、22.2%、16.4% 和 14.6%; 模型模拟准确度高 (AUC 值达 0.84); 在当代气候条件下, 对齿藓属植物的适宜生境面积占新疆总面积的 38.51%; 最适分布区域是中部的天山山脉、南部昆仑山脉的东部和西部的帕米尔高原; 与当代的分布预测结果相比, 未来 (2050 年和 2070 年) 该属适宜栖息地分布范围总体上呈现退缩趋势; 退缩后的适宜生境面积分别占新疆总面积的 36.56% 和 37.87%。温度和降水量可能是引起对齿藓属地理分布退缩的重要气候因子。研究结果可为探讨气候变化对于旱、半干旱区苔藓植物物种分布的影响提供参考资料。

**关键词:** 对齿藓属; MaxEnt 模型; 潜在分布区; 预测

中图分类号: Q949.35

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2018)04-0541-13

## Prediction of potential distribution of *Didymodon* (Bryophyta, Pottiaceae) in Xinjiang based on the MaxEnt model

Shuayib Yusup<sup>1</sup>, Mamtimin Sulayman<sup>1\*</sup>, Winira Ilghar<sup>1</sup>, Zhang Zhong-Xin<sup>2</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046;

2. Urumqi Hetan Greening Management Office, Urumqi 830000)

**Abstract:** Based on data from 19 bioclimatic variables under the current (1950–2000) and future (2050s, 2070s) climatic conditions with RCP45 CO<sub>2</sub> emission scenarios and on 132 distributional records of *Didymodon* in Xinjiang, we predicted the potential distribution of this genus in Xinjiang in the different periods by using the MaxEnt model and ArcGIS 10.2 software. Results showed that the major factors were mean temperature of wettest quarter, annual mean temperature, precipitation of driest quarter and annual precipitation, with relative contribution percentages of 33.6%, 22.2%, 16.4%, and 14.6%, respectively. For the simulation model with high accuracy, the AUC reached 0.84. For the contemporary climate conditions, suitable habitat of *Didymodon* accounted for 38.51% of the total area, with the most suitable distribution areas found to be the Tianshan Mountains, east of the Kunlun Mountains, and the

收稿日期: 2017-12-18, 退修日期: 2018-01-30。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31460048, 31660052)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation (31460048, 31660052)。

作者简介: 夏尤普·玉苏甫 (1990–), 男, 硕士研究生, 主要从事苔藓植物研究 (E-mail: shuayib@163.com)。

\* 通讯作者: 买买提明·苏来曼 (1964–), 男, 教授, 硕导, 主要从事植物系统分类和苔藓植物研究 (E-mail: mamtimin@xju.edu.cn)。

Pamir Plateau. Compared to the present distribution, the suitable habitat distribution range of the genus will shrink in the future (2050s and 2070s); after shrinking, the suitable habitat area will account for 36.56% and 37.87% of Xinjiang's total area, respectively. Temperature and precipitation will likely be the important climatic factors causing the geographical distribution retreat of *Didymodon*. This research provides a reference for studying the effects of climate change on the species distribution of bryophytes in arid and semi-arid areas.

**Key words:** *Didymodon*; MaxEnt model; Potential distribution region; Prediction

苔藓植物是由水生向陆生过渡的高等植物类群,植物体矮小,形态结构简单,无真正的根、茎、叶分化,以孢子繁殖为主<sup>[1]</sup>。苔藓植物分布广泛,但不同种类因适应机制不同生长环境各异,不少属种具有很强的耐寒、耐旱特性,适应于高寒、干旱等极端环境。极度耐旱的种类有丛藓科(Pottiaceae)、真藓科(Bryaceae),一些物种甚至可以长期生活于干燥、强光照地区<sup>[2,3]</sup>。苔藓植物是生态系统中的重要组成部分,在土壤形成、水分保持、植被恢复、森林更新等方面起着重要作用<sup>[4-8]</sup>,它还能吸附重金属污染物,对环境敏感,可作为大气和土壤污染、气候变化的良好指示植物<sup>[9-13]</sup>,同时,也可以作为河流水质的生物指标<sup>[14]</sup>。

气候环境因子是影响生物分布的决定性因素,也是主导生物体内各种生理代谢和生物繁衍生息的关键因素<sup>[15]</sup>。生物受气候变化驱动会产生生理活性和分布范围的变化。最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型是物种分布模型(species distribution model, SDM)之一,用于预测物种潜在的分布情况。用此模型预测的结果要优于其他同类预测模型,特别是在物种分布数据不全的情况下,MaxEnt模型仍然能得到较为满意的结果<sup>[16,17]</sup>。曾辉等<sup>[18]</sup>、洪波等<sup>[19]</sup>、常志隆等<sup>[20]</sup>和雷军成等<sup>[21]</sup>应用不同预测模型对植物病原菌、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)等有害生物分布区进行预测,发现MaxEnt模型具有较高的预测精度。该模型已广泛应用于鸟类、鱼类、鼠类、植物、昆虫等物种潜在分布预测<sup>[22-28]</sup>。近年来,对苔藓植物空间分布与环境关系的研究有了新的发展,Sergio等<sup>[29]</sup>用MaxEnt模型研究4种苔藓植物的空间分布情况,绘制物种当前的空间分布图,并依据主要环境变化因子,预测了物种的潜在分布区域。姜炎彬等<sup>[30]</sup>首次应用MaxEnt模型与GIS技术相结合

的方法研究苔藓植物在中国的空间分布格局。于晶等<sup>[31]</sup>预测了部分苔藓植物如紫萼藓属(*Grimmia*)、砂藓属(*Racomitrium*)、花叶藓属(*Calymperes*)等在中国的地理分布,分析了物种分布与环境之间的关系。宋闪闪等<sup>[32]</sup>采用MaxEnt模型预测西藏地区对齿藓属(*Didymodon*)植物分布结果显示,该属潜在分布面积较少,影响对齿藓属空间分布的主要环境变量是人为干扰,其次为气候和植被。目前,基于MaxEnt模型研究气候变化对不同苔藓植物分布的影响,均获得了理想的预测结果<sup>[33-37]</sup>。

对齿藓属隶属丛藓科(Pottiaceae),主要分布在寒带、温带或高海拔地区的干燥岩石和土壤,属于典型的寒温带山地顶蒴藓类。全世界记录有126种<sup>[38-40]</sup>,其中,我国记载有26种3变种<sup>[41,42]</sup>,新疆记录有16种,(包括1个变种)<sup>[43-45]</sup>。它对干旱、寒冷环境具有极强的适应能力。本文利用16种对齿藓属植物在新疆的132个地理分布信息并基于19个气候数据结合ArcGIS 10.2软件,应用MaxEnt模型预测该属在当代、2050年和2070年的潜在分布区域,并分析不同时期群落分布范围及面积变化,了解新疆对齿藓属的潜在分布及未来气候变化对该属分布的影响,以期为该属植物的区系调查、标本采集、多样性研究、生态学研究、资源保护和利用等提供基础资料。

## 1 研究地区概况

新疆地处中国西北边陲,位于亚欧大陆中部,总面积166.49万km<sup>2</sup>,占全国陆地总面积的六分之一,是我国面积最大的省区。该地区远离海洋,四周高山环绕,境内冰峰耸立,沙漠浩瀚,草原辽阔,绿洲点布,地形地貌可以概括为“三山夹两盆”。北边是阿尔泰山,平均高度2500~3500m(最高峰4374m),年均降水量400~600mm,年均蒸发量500mm;南边是昆仑山,平均高度

4500~500 m(最高峰 8611 m), 年均降水量 150~200 mm, 年均蒸发量 2500 mm; 天山横亘中部, 将新疆分为南北两部分, 平均高度 400~500 m(最高峰 7349 m), 年均降水量 400~600 mm, 年均蒸发量 1000~1500 mm。阿尔泰山与天山之间夹着准噶尔盆地, 面积约 20 万 km<sup>2</sup>, 年均降水量 10~100 mm; 天山与昆仑山之间夹着塔里木盆地, 面积约 53 万 km<sup>2</sup>, 塔克拉玛干沙漠位于盆地中部, 面积约 33 万 km<sup>2</sup>, 年均降水量 10~90 mm, 是我国最大、世界第二大流动沙漠。在新疆东部有吐鲁番盆地, 最低点-154 m, 是我国海拔最低的地

方。这些山脉、盆地和沙漠对本地区气候的形成都有一定的影响。

## 2 研究方法

### 2.1 新疆对齿藓属植物的分布数据与处理

对 1987 年至 2017 年采自新疆各地的 16 种对齿藓属植物(表 1)的 1200 份标本进行整理和分类鉴定, 为了排除空间关联性较大造成过拟合模拟的影响, 采用缓冲区分析法对获得的分布点进行校对并筛选地理信息不重复的 132 个分布点信息(表 2)。

表 1 新疆对齿藓属植物名录  
Table 1 List of *Didymodon* species in Xinjiang

编号 No.	中文名 Chinese name	学名 Scientific name
1	尖锐对齿藓	<i>Didymodon acutus</i> (Brid.) K. Saito.
2	红对齿藓	<i>Didymodon asperifolius</i> (Mitt.) Crum.
3	尖叶对齿藓原变种	<i>Didymodon constrictus</i> var. <i>constrictus</i> (Mitt.) K. Saito
4	尖叶对齿藓芒尖变种	<i>Didymodon constrictus</i> var. <i>flexicuspis</i> (P. C. Chen) Saito
5	长尖对齿藓	<i>Didymodon ditrichoides</i> (Broth.) X. J. Li & S. He
6	北地对齿藓	<i>Didymodon fallax</i> (Hedw.) Zander.
7	反叶对齿藓	<i>Didymodon ferrugineus</i> (Schimp. ex Besch.) Hill.
8	黑对齿藓	<i>Didymodon nigrescens</i> (Mitt.) Saito
9	昆仑对齿藓	<i>Didymodon kunlunensis</i> D. P. Zhao
10	细叶对齿藓	<i>Didymodon perobtusus</i> Broth.
11	硬叶对齿藓	<i>Didymodon rigidulus</i> Hedw.
12	溪边对齿藓	<i>Didymodon rivicola</i> (Brid.) Zand.
13	短叶对齿藓	<i>Didymodon tectorum</i> (C. Mull.) K. Saito
14	灰土对齿藓	<i>Didymodon tophaceus</i> (Brid.) Lisa
15	无疣对齿藓	<i>Didymodon validus</i> Limpr.
16	土生对齿藓	<i>Didymodon vinealis</i> (Brid.) Zand

表 2 对齿藓属在新疆的地理分布  
Table 2 Occurrence records of *Didymodon* in Xinjiang

编号 No.	分布点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude
1	哈巴河县白哈巴村 Baihaba village, Habahe County	86°44'49.6"	48°23'36.6"
2	阿尔泰市 Altai City	88°8'24"	47°51'36"
3	阿尔泰市小东沟 Xiaodonggou, Altai City	88°18'44.28"	48°0'16.2"
4	布尔津县尔齐斯胡 Erqisi hu, Burqin County	86°46'12"	47°36'36"
5	布尔津县尔齐斯河边 Erqisi hebian, Burqin County	86°48'36"	47°39'3.60"
6	布尔津县哈纳斯自然保护区 Kanas Nature Reserve, Burqin County	86°51'3.60"	47°37'48"
7	福海县阿祖拜 Azubai, Fuhai County	89°11'16.8"	47°53'58.20"
8	福海县库尔木图 Kuermutu, Fuhai County	89°11'20.8"	47°53'45.20"
9	福海县铁斯克达拉 Tiesikedala, Fuhai County	88°29'33.72"	47°59'51.72"
10	富蕴县大桥林场 Daqiao Forestry Station, Fuyun County	89°44'7.8"	47°44'11.76"
11	富蕴县 Fuyun County	89°26'24"	47°3'3.60"
12	富蕴县卡拉依格勒东营林区 Kalayiger Forestry Station, Fuyun County	89°1'4.44"	47°42'39.6"

续表 2

编号 No.	分布点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude
13	清河县大清河 Daqinghe, Qinghe County	90°23'26.16"	46°55'48.36"
14	清河县边海子 Bianhaizi, Qinghe County	90°42'43.92"	46°49'25.68"
15	裕民县巴尔鲁克自然保护区 Barluk Nature Reserve, Yumin County	82°59'48.48"	46°12'52.92"
16	哈密市 Kumul City	93°26'24"	42°46'48"
17	木垒县 Mulei County	90°20'24"	43°48'36"
18	奇台县大板沟 Dabangou, Qitai County	81°52'30.36"	43°39'20.16"
19	吉木萨尔县吉木萨尔林场 Jimusaer Forestry Station, Jimusaer County	89°1'50.88"	43°46'39"
20	吉木萨尔县大龙口 Dalongkou, Jimusaer County	89°10'12"	43°41'51"
21	阜康县博格达峰 Bogda Peak, Fukang County	88°30'20.88"	43°20'21.12"
22	阜康县兵团 12 师 222 团 12th division, 222 regiments, Fukang County	88°46'4.8"	43°24'11.52"
23	阜康县天池 Tianchi, Fukang County	88°21'23.4"	44°25'8"
24	米泉县米泉林场 Miqan Forestry Station, Miqan County	87°59'38.76"	43°48'39.24"
25	米泉县米泉林场哈熊沟 Haxiongou, Miqan County	88°0'15.48"	47°59'48.48"
26	乌鲁木齐市一号冰川 No.1 glacier, Urumqi City	87°3'54.36"	43°7'26.76"
27	乌鲁木齐市白杨沟天山牧场 Baiyanggou, Urumqi City	88°5'58.2"	43°41'10.68"
28	乌鲁木齐市烈士陵园 Lieshilinyuan, Urumqi City	87°35'36.96"	43°43'53.76"
29	乌鲁木齐市红山 Hongshan, Urumqi City	87°36'17.28"	43°48'33.48"
30	乌鲁木齐市人民公园 People's park, Urumqi City	87°36'0.72"	43°47'50.28"
31	乌鲁木齐市后峡英雄桥 Houxia yingxiongqiao, Urumqi City	87°12'14.76"	43°22'7.32"
32	乌鲁木齐市花儿沟 Huaergou, Urumqi City	87°39'37.44"	43°43'3"
33	乌鲁木齐市南山 Nanshan, Urumqi City	87°57'30.96"	43°50'39.48"
34	乌鲁木齐市南山八一林场 Bayi Forestry Station, Urumqi City	87°30'22.68"	43°32'9.96"
35	乌鲁木齐市南山小渠子林场 Xiaoquzi Forestry Station, Urumqi City	87°15'21.96"	43°20'8.16"
36	乌鲁木齐市雅马山 Yamashan, Urumqi City	87°33'11.52"	43°48'35.64"
37	乌鲁木齐市蝴蝶沟 Hudiegou, Urumqi City	87°47'40.92"	43°48'43.92"
38	乌鲁木齐市小绿谷 Xiaolügu, Urumqi City	87°30'2.52"	43°50'2.76"
39	吐鲁番市葡萄沟 Putaogou, Turpan City	89°11'24"	42°54'36"
40	呼图壁县 Hutubi County	86°55'12"	44°10'48"
41	呼图壁县大塔林场 Data Forestry Station, Hutubi County	86°27'45.36"	44°50'50.28"
42	玛纳斯县 Manas County	86°13'12"	44°16'48"
43	玛纳斯县白杨沟林场 Baiyanggou Forestry Station, Manas County	85°56'2.04"	43°50'20"
44	玛纳斯县清水河大河坝林场 Qingshuihe Daheba Forestry Station, Manas County	86°3'58.32"	43°40'38.28"
45	玛纳斯县清水河大河坝林场 Qingshuihe Daheba Forestry Station, Manas County	86°3'39.6"	43°46'43.68"
46	乌苏县乌苏林场 Wusu Forestry Station, Wusu County	84°37'12"	44°27'3.60"
47	伊吾县 Yiwu County	94°6'36"	43°16'48"
48	沙湾县金沟河 Jingouhe, Shawan County	85°33'36"	44°17'24"
49	沙湾县大南沟 Danangou, Shawan County	85°12'22.32"	43°28'59.88"
50	和静县巴轮胎 Balantai, Hejing County	86°15'3.60"	42°18'36"
51	尼勒克县尼勒克林场 Nileke Forestry Station, Nilka County	82°31'48"	43°49'12"
52	尼勒克县 Nilka County	83°52'2.28"	43°46'39"
53	伊宁县克伯克于孜乡第二大队黄渠边 Kebokeyuzixiang Dierdadui, Yining County	75°14'42.36"	38°55'18.12"
54	伊宁县蒙玛拉加巴楞 Mengmalajabaleng, Yining County	82°15'51.48"	44°5'54.6"
55	伊宁县榆树沟 Yushugou, Yining County	81°34'41.16"	44°13'27.12"
56	伊宁县阿吾赞沟 Awuzangou, Yining County	81°45'11.52"	44°9'37.44"
57	察布查尔县白石峰 Baishifeng, Qapqal County	81°1'36.12"	43°29'20.76"
58	特克斯县库克苏温泉 Kukesu Wenquan, Tekesi County	81°1'16.68"	42°39'16.2"
59	霍城县 Huocheng County	80°52'12"	44°4'12"

续表 2

编号 No.	分布点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude
60	霍城县中华福寿山 Zhonghuafushoushan, Huocheng County	80°47'8.16"	44°23'48.84"
61	霍城县果子沟 Guozigou, Huocheng County	81°12'5.40"	44°24'14.76"
62	霍城县果子沟 Guozigou, Huocheng County	81°12'5.40"	44°25'14.16"
63	温宿县阿克苏托木尔峰国家级自然保护区塔格拉克乡 Tagelakexiang, Tuomuerfeng National Nature Reserve, Wensu County	80°20'28.68"	41°43'12"
64	温宿县阿克苏托木尔峰国家级自然保护区博孜墩乡小库孜巴依林场 Xiaokuzibayi Forestry Station, Bozidun, Tuomuerfeng National Nature Reserve, Wensu County	80°38'9.24"	41°49'12"
65	温宿县阿克苏托木尔峰国家级自然保护区博孜墩乡大库孜巴依林场 Dakuzibayi Forestry Station, Bozidun, Tuomuerfeng National Nature Reserve, Wensu County	80°40'0.84"	41°51'19"
66	温宿县阿克苏托木尔峰自然保护区博孜墩乡破城子 Pochengzi, Bozidun, Tuomuerfeng National Nature Reserve, Wensu County	80°53'8.88"	41°49'45.12"
67	温宿县阿克苏托木尔峰自然保护区塔格拉克乡亚依拉克 Yayilake, Tagelakexiang, Tuomuerfeng National Nature Reserve, Wensu County	80°23'20"	41°45'6.84"
68	库车县铁力买提道班 Tielimaiti daoban, Kuche County	86°11'33.36"	38°5'33.36"
69	库车县铁力买提道班冰山边缘 Tielimaiti daoban, Kuche County	83°26'15"	42°29'43.08"
70	库车县小龙池 Xiaolongchi, Kuche County	89°23'40.56"	37°20'52.08"
71	昭苏县夏塔古道 Xiata Gudao, Zhaosu County	80°49'41.88"	42°31'19.92"
72	昭苏县胡松图哈尔逊蒙古自治乡 Husongtuhaersun Menggu Zizhixiang, Zhaosu County	80°22'14.16"	42°30'2.16"
73	昭苏县木扎特河 Muzhatehe, Zhaousu County	80°22'55.92"	42°33'24.84"
74	昭苏县阿克亚孜卡布亭苏 Akeyazi Kabutingsu, Zhaousu County	81°22'59.88"	41°35'4.92"
75	乌恰县老乌恰乡阿克铁克提尔 Aketiekietier, Laowuqiaxiang, Wuqia County	74°38'7.44"	40°0'37.8"
76	乌恰县老乌恰乡新民其克草原 Xinminqike Caoyuan, Laowuqiaxiang, Wuqia County	74°38'45.96"	40°0'55.08"
77	乌恰县波斯坦列列克林场 Bositantielieke Forestry Station, Wuqia County	75°0'38.88"	39°13'5.16"
78	乌恰县托儿乃提口岸 Tuernaiti Kouan, Wuqia County	75°22'27.84"	40°30'6.48"
79	阿克陶县奥依塔克林场 Aoyitage Forestry Station, Aketao County	75°14'17.88"	38°54'37.08"
80	阿克陶县苏巴什 Subashi, Aketao County	75°2'16.8"	38°30'16.56"
81	阿克陶县奥依塔克林场 Aoyitage Forestry Station, Aketao County	75°24'29.88"	38°58'23.16"
82	阿克陶县黑湖 Heihu, Aketao County	75°7'41.88"	38°26'52.08"
83	阿克陶县奥依塔克林场其克拉格孜 Aoyitage Forestry Station, Aketao County	75°11'11.76"	38°54'6.84"
84	阿克陶县奥依塔克林场其克拉格孜 Aoyitage Forestry Station, Aketao County	75°11'45.6"	38°53'5.64"
85	阿克陶县冰川公园 Glacier Park, Aketao County	75°11'47.04"	38°53'35.16"
86	阿图什市天门 Tianmen, Atushi City	75°31'22.8"	38°39'47.88"
87	塔什库尔干县红旗拉普昆仑沟 Hongqilapu Kunlungou, Tashikurgan County	75°34'21"	36°57'2.88"
88	塔什库尔干县新杆莲 Xinganlian, Tashikurgan County	75°4'39.36"	37°38'25.4"
89	塔什库尔干县红旗拉普昆仑沟 Hongqilapu Kunlungou, Tashikurgan County	75°28'55.56"	36°50'39.12"
90	塔什库尔干县大同乡 Datongxiang, Tashikurgan County	76°9'14"	37°40'0.12"
91	塔什库尔干县瓦罕走廊 Wahan Zoulang, Tashikurgan County	74°49'30"	37°9'25.56"
92	叶城县棋盘乡喀拉崕勒草原 Kalaqule, Qipanxiang, Kagilik County	77°25'12"	37°53'24"
93	叶城县棋盘乡喀拉崕勒草原 Kalaqule, Qipanxiang, Kagilik County	77°18'36"	37°33'3.60"
94	叶城县玉斯什 Yusishi, Kagilik County	77°21'3.6"	37°39'3.6"
95	叶城县阿克孜 Akezi, Kagilik County	76°56'30.2"	37°10'50.16"
96	叶城县柯克亚西乡亚斯普隆草原 Yasipulong Caoyuan, Kekeyaxixiang, Kagilik County	77°16'6.96"	37°7'50.16"
97	叶城县麻扎 Mazha, Kagilik County	77°24'36"	37°36'36"
98	叶城县阿克孜 Akezi, Kagilik County	77°6'21.96"	37°7'57"
99	叶城县故萨草原 Gusasi Caoyuan, Kagilik County	76°32'22.92"	37°18'20.88"

续表 2

编号 No.	分布点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude
100	叶城县西和休 Xihexiu, Kagilik County	76°54'7.92"	37°13'14.88"
101	叶城县故萨斯草原 Gusasi Caoyuan, Kagilik County	76°43'28.2"	37°20'52.08"
102	叶城县阿克玛斯提 Akemasiti, Kagilik County	77°27'36"	37°39'3.6"
103	策勒县郊区 Suburb area, Celle County	80°46'48"	37°2'24"
104	策勒县波斯塘乡 Bositangxiang, Celle County	80°36'36"	37°1'12"
105	策勒县双合其格乡 Shuangheqigexiang, Celle County	80°43'12"	37°18'36"
106	策勒县恰卡尔乡康库乃斯牧场 Kangkunaisi Muchang, Qiakaerxiang, Celle County	80°15'1.80"	36°11'34.8"
107	策勒县恰哈乡喀拉塔什东来克 Kalatashidonglaik, Qiahaxiang, Celle County	80°16'54.48"	36°12'56.88"
108	策勒县乌鲁格沙依乡阿哈恰琼萨依 Ahaqiaqionsayi, Celle County	80°42'8.28"	36°1'26.76"
109	策勒县康库乃斯牧场 Kangkunaisi Muchang, Celle County	80°15'1.80"	36°11'34.8"
110	于田县普鲁 Pulu, Yutian County	81°37'48"	36°51'36"
111	于田县中昆仑山 Zhongkunlunshan, Yutian County	81°24'36"	36°33'3.60"
112	民丰县募孜塔格峰 Muztah, Minfeng County	82°37'48"	37°4'12"
113	且末县土拉牧场依协克阿提 Yixiekeati, Tula Muchang, Qiemo County	88°24'16.20"	38°13'28.56"
114	且末县土拉牧场库孜克卡克砍 Kuzikekakekan, Tula Muchang, Qiemo County	83°26'2.4"	42°28'3.72"
115	且末县土拉牧场齐格力格萨依 Qigeligesayi, Tula Muchang, Qiemo County	87°30'9.72"	37°38'0.6"
116	且末县土拉牧场 Tula Muchang, Qiemo County	86°17'3.84"	38°2'0.24"
117	且末县土拉牧场撒西坎卡姆徐可全 Saxikankamuxukequan, Tula Muchang, Qiemo County	87°21'21.24"	38°8'12.12"
118	若羌县阿尔金山国家级自然保护区皮提勒克河边 Pitilekehebian, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	89°39'0.36"	36°46'35"
119	若羌县阿尔金山国家级自然保护区依协克卡西提萨依 Yixiekekaxitisayi, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°24'45"	37°13'48.36"
120	若羌县阿尔金山国家级自然保护区骆驼山 Luotuoshan, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	89°47'7.08"	37°34'24.24"
121	若羌县阿尔金山国家级自然保护区卡尔墩 Kaerdun, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°11'10.68"	36°46'26.76"
122	若羌县阿尔金山国家级自然保护区祁曼塔格 Qimantage, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°16'31.44"	37°25'35.4"
123	若羌县阿尔金山国家级自然保护区库鲁克皮提勒克塔格 Kulukepitleketage, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°17'31.20"	36°55'3.36"
124	若羌县阿尔金山国家级自然保护区卡尔墩老头山 Kaerdun Laotoushan, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°25'26.40"	37°13'26.04"
125	若羌县阿尔金山国家级自然保护区阿其克湖东面 Aqikehudongmian, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	89°8'41.64"	36°45'20.88"
126	若羌县阿尔金山国家级自然保护区卡尔求卡 Kaerqiuka, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°45'15.2"	37°2'35.88"
127	若羌县阿尔金山国家级自然保护区大九巴 Dajiuba, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	89°49'34.68"	36°51'54"
128	若羌县阿尔金山国家级自然保护区依协克卡西提萨依 Yixiekekaxitisayi, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°28'32.52"	37°11'34.44"
129	若羌县阿尔金山国家级自然保护区依协克帕提 Yixiekepati, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°32'55.68"	37°10'58.8"
130	若羌县阿尔金山国家级自然保护区且地塔格 Qieditage, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	89°5'16.80"	36°55'12.72"
131	若羌县阿尔金山国家级自然保护区小沙子湖 Xiaoshazihu, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	90°17'7.08"	37°0'41"
132	若羌县阿尔金山国家级自然保护区阿塔提罕河口检查站 Atatihanhe Shankou Jianchazhan, Altun National Nature Reserve, Ruoqiang County	89°55'6.96"	37°48'23.04"

## 2.2 预测环境变量

### 2.2.1 环境变量数据来源

从全球气候数据库 WorldClim (<http://www.worldclim.org>) 分别下载现代(1950 – 2000年)和 未来(2041 – 2060年和 2061 – 2080年)气候情景下的 19个气候变量数据(表3), 空间分辨率均为 1 km。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 CO<sub>2</sub>中等浓度排放情景。

表3 MaxEnt 模型中所用的 19个环境变量  
Table 3 Nineteen environment variables used in the MaxEnt model

变量 Variable	描述 Description
Bio1	年平均气温 Annual mean temperature
Bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range
Bio3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7) (× 100)
Bio4	温度季节性变化 Temperature seasonality (standard deviation × 100)
Bio5	极端最高温 Max temperature of warmest month
Bio6	极端最低温 Min temperature of coldest month
Bio7	年温度变化范围 Temperature annual range
Bio8	最湿季平均温度 Mean temperature of wettest quarter
Bio9	最干季平均温度 Mean temperature of driest quarter
Bio10	最热季平均温度 Mean temperature of warmest quarter
Bio11	最冷季平均温度 Mean temperature of coldest quarter
Bio12	年降水量 Annual precipitation
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month
Bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter
Bio17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter
Bio18	最热季降水量 Precipitation of warmest quarter
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter

### 2.2.2 环境变量的选择

为了避免各环境因子之间可能存在的相关性影响预测准确度, 利用 ArcGIS 10.2 的空间分析工具分别对 19个生物气候变量进行相关性分析。当相关系数大于 0.85 时, 保留其中一个生物学意义更明确的因子。选择原则根据 MaxEnt 模型的 Jackknife 分析结果, 保留贡献率相对较高的变量<sup>[17]</sup>。最终选取 6个环境变量因子用于模型分析, 分别为最湿季平均温度 (Bio8)、年平均气温 (Bio1)、昼

夜温差月均值 (Bio2)、温度季节性变化 (Bio4)、最干季降水量 (Bio17)、年降水量 (Bio12)。

### 2.3 软件及地图数据

本研究所用的 MaxEnt 软件版本为 version 3.4.1, 获取地址为 ([http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/))。采用美国环境系统研究所公司研发的 ArcGIS 10.2 软件。从国家基础地理信息系统下载中国地图并剪切获得新疆维吾尔自治区地图。

### 2.4 MaxEnt 模型的运行与结果评价

从 WorldClim 数据集中下载环境数据, 通过 ArcGIS 中的 Extraction by mask 工具进行裁剪, 使之与研究区同范围, 再用 From Raster to ASCII 工具转换格式, 以便模型中能直接被运用。物种分布点的 Excel 数据保存为 MaxEnt 软件可识别的以逗号分隔的 CSV 数据格式, 与环境变量一起导入 MaxEnt 中。随机选取 25% 的分布点作为测试数据集、75% 为训练数据集, 选择刀切法 (Jackknife), 其他参数均为默认值, 再运行模型。

对模型预测结果进行精度检验时, 采用 ROC 曲线分析法。ROC 曲线以实际存在且被预测为存在的比率为纵坐标, 以实际不存在但被预测为存在的比率为横坐标, 所围成面积 (AUC) 的大小将作为衡量模型预测准确度的指标用于评价预测模型的精度。AUC 的取值范围为 0~1, 取值越大, 表示与随机分布相距越远, 预测效果越好。评估标准为: AUC 值为 0.5 ~ 0.6, 表示模型模拟效果失败; 0.6 ~ 0.7, 表示效果较差; 0.7 ~ 0.8, 表示效果一般; 0.8 ~ 0.9, 表示效果好; 0.9 ~ 1 表示模型模拟效果非常好。

### 2.5 对齿藓属适生等级分区

MaxEnt 模型输出结果为对齿藓属在新疆范围内的存在概率 ( $P$ ), 数据为 ASCII 格式, 首先使用 ArcGIS 的 ArcToolbox 格式转换工具将数据转换为 Raster 格式。参考 IPCC 报告<sup>[46,47]</sup> 关于评估可能性的划分方法, 结合新疆对齿藓属植物的实际情况, 利用 ArcGIS 软件的重分类功能, 划分分布值等级及相应分布范围, 并使用不同颜色表示, 划分标准为:  $P < 0.14$ , 为非适生区;  $0.14 < P < 0.33$ , 为低适生区;  $0.33 < P < 0.52$ , 为中适生区;  $P > 0.52$ , 为高适生区。

### 3 结果与分析

#### 3.1 ROC 曲线和 AUC 值对模型准确性的检验

MaxEnt 模型模拟输出的 ROC 曲线表明(图 1), 基于主导环境变量构建的对齿藓属植物在现代(图 1: A)、2050 年(图 1: B)和 2070 年(图 1: C)的地理分布模拟的 AUC 值分别为 0.840、0.846 和 0.847, 均在 0.8 ~ 0.9 范围, 表明构建模型的预测效果好。

#### 3.2 影响对齿藓属在新疆分布的主要气候因子

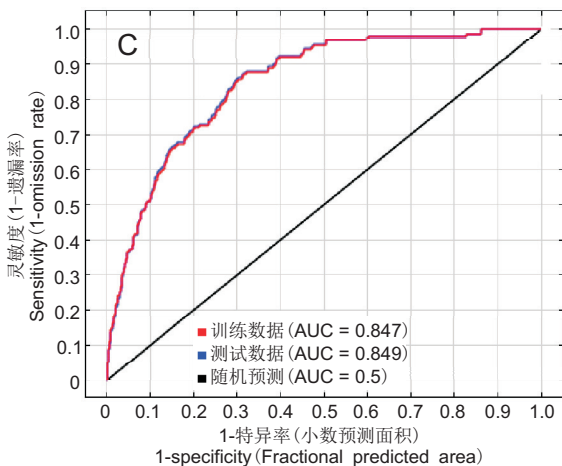
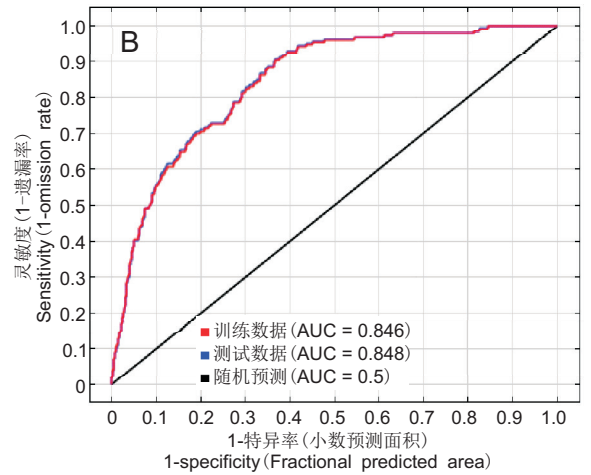
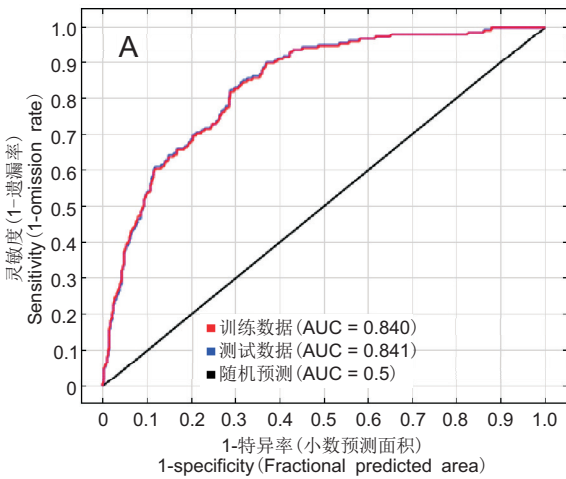
在现代气候情景下的 MaxEnt 模型中, 6 个气候变量对对齿藓属适生区预测结果的贡献率大小依次为: 最湿季平均温度 (33.6%) > 年平均气温 (22.2%) > 最干季降水量 (16.4%) > 年降水量 (14.6%) > 温度季节性变化 (8.6%) > 昼夜温差月均值 (4.6%)。

刀切法检验结果可反映不同环境变量对分布增益的贡献大小, 该方法分别计算“仅此变量”、“除

此变量”和“所有变量”模拟式的训练得分情况, 判定标准: 为“仅此变量”时得分较高, 说明该因子具有较高的预测能力, 对物种分布贡献较大; 为“除此变量”时模型训练得分能力降低较多, 说明该变量具有较多的独特信息, 对物种分布较为重要; 为“所有变量”时模型训练得分最高, 说明所有变量用于模型预测时预测效果最好, 也就是说任何一个变量对于分布区预测都不可或缺。刀切法检验结果表明(图 2), 影响对齿藓属分布的环境变量重要性顺序为: 最湿季平均温度 > 年平均气温 > 年降水量 > 昼夜温差月均值 > 最干季降水量 > 温度季节性变化。

#### 3.3 对齿藓属植物在新疆的适生区模拟

对对齿藓属植物当代、2050 年及 2070 年的潜在分布可看出(图 3), 当代对齿藓属植物在新疆的适生区包括: 阿尔泰地区北部、西北部和东南部, 昌吉回族自治州东北部和南部, 乌鲁木齐东部、西部和南部, 哈密地区西北部, 吐鲁番市北部和西北



A, B, C 分别表示当代、2050 年和 2070 年分布模拟的 ROC 曲线。  
A, B and C are the ROC curves representing distribution simulation under contemporary, 2050s and 2070s climates.

图 1 模型适用性检验的 AUC 值  
Fig. 1 AUC values for the applicability of the MaxEnt model

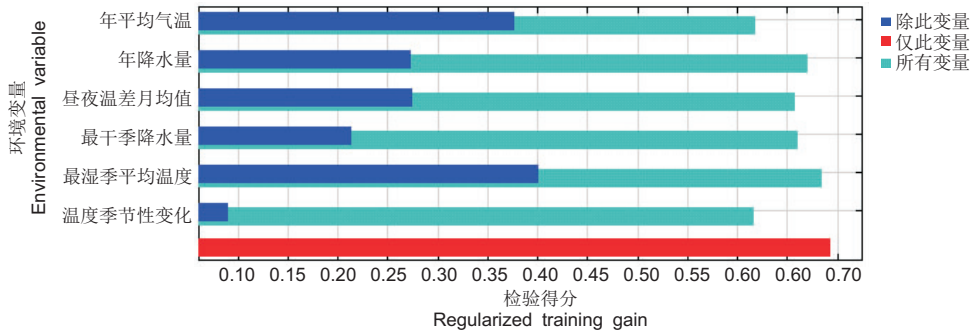


图 2 环境变量对对齿藓属在新疆分布的重要性 (Jackknife)

Fig. 2 Importance of environmental variables on the distribution of *Didymodon* in Xinjiang by Jackknife analysis

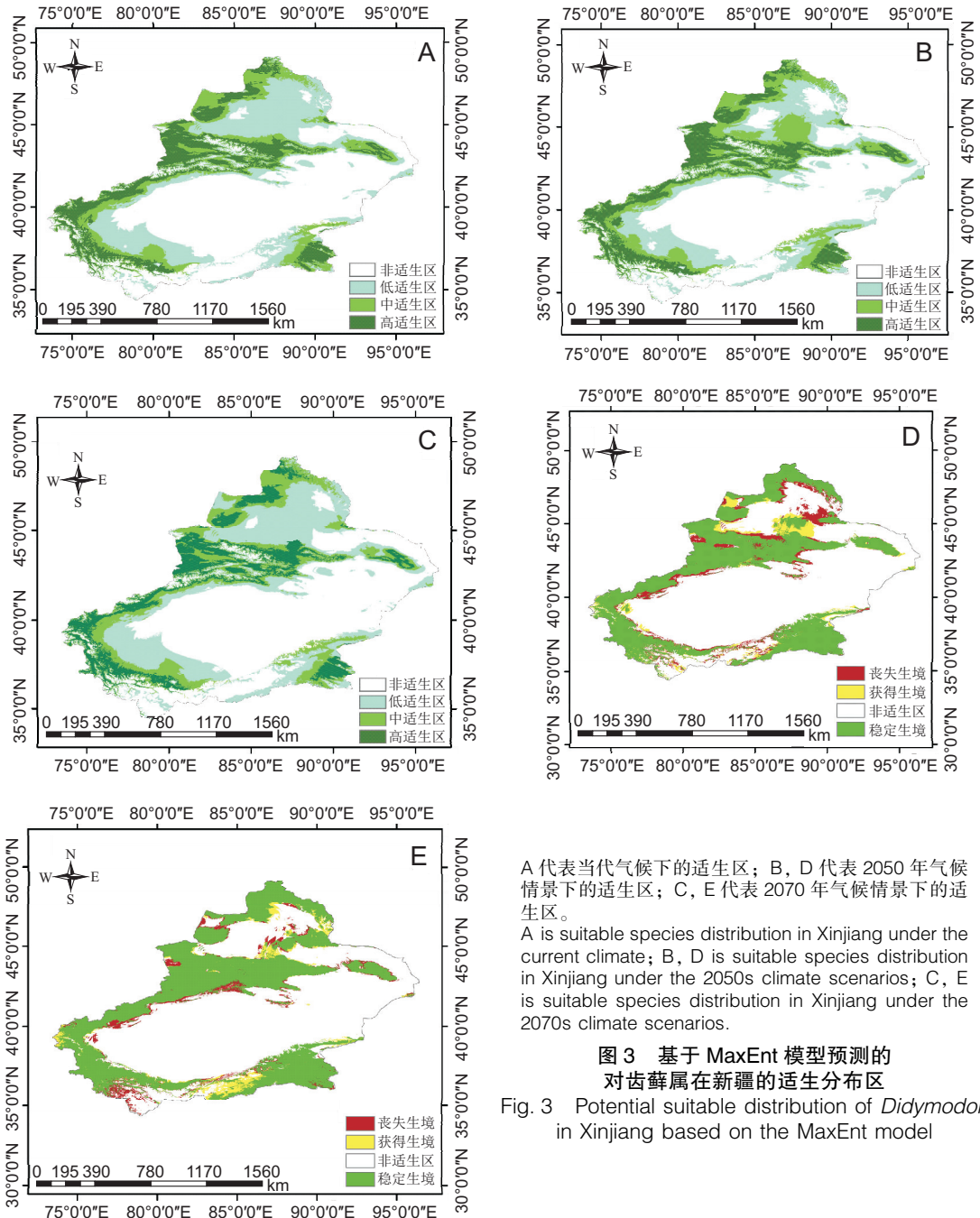


图 3 基于 MaxEnt 模型预测的对齿藓属在新疆的适生分布区  
Fig. 3 Potential suitable distribution of *Didymodon* in Xinjiang based on the MaxEnt model

部, 塔城地区北部、中西部和南部, 博尔塔拉蒙古自治州北部、西部和南部、伊犁地区北部和南部、巴楚县西北部, 阿克苏地区北部和西北部, 克孜勒苏柯尔克孜族自治州北部和西北部, 喀什地区西部和西南部, 和田地区南部和西南部, 若羌县南部(图 3: A)。

从当代到 2070 年, 对齿藓属植物分布范围总体上呈现退缩的趋势(图 3: A ~ E), 但在部分区域的物种适生区面积既有扩张也有退缩( $P = 0.33$ , 即重分类阈值)。在当代气候条件下, 该属在新疆的适生区面积占自治区总面积的 38.51% (图 3: A)。到 2050 年, 该属在新疆的适生区将在现有各分部中心基础上分别向四周略有退缩, 适生区面积占自治区总面积的 36.56% (图 3: B、D)。丧失的生境主要有北疆地区的清河县与富蕴县南部、北部, 阿尔泰市与布尔津县中部, 塔城地区西北角, 南疆地区的阿克苏地区与克州西部、喀什与和田地区南部和阿尔金山。新获得的生境主要集中在阿尔泰山脉西部和福海县南部, 米泉县与阜康县北部、塔城地区托里县西南部和南疆的喀什地区也有分布。比较未来的两个年代, 到 2070 年对齿藓属在新疆的潜在分布范围将有所扩张, 面积占自治区总面积的 37.87% (图 3: C、E)。对齿藓属在昆仑山脉适应区向西扩散, 新扩增的区域主要在民丰县和且末县南部。总的来看, 在未来气候情景下, 对齿藓属在新疆的潜在分布区面积在原有基础上将缩小 0.24% ~ 2.25%。

#### 4 讨论

采用物种分布模型及相关软件结合气候数据预测物种的适宜生境或潜在分布是生物地理学和保护生态学等相关学科的研究热点<sup>[17]</sup>。本文利用物种分布数据和环境数据, 基于 MaxEnt 模型预测对齿藓属在新疆的潜在分布区, 模型预测结果可信(AUC 值为 0.84)。本研究在当代气候情景下预测该属在新疆的分布结果显示, 对齿藓属的适生区主要集中在清河县与富蕴县南部和北部、阿尔泰市与布尔津县中部、塔城地区西北角、其他北疆地区、中部的天山山脉、阿克苏地区与西边的帕米尔高原、克孜勒苏柯尔克孜西部、南边的昆仑山脉东部、喀什与和田地区南部和阿尔金山。此外, 阿尔泰山西北部、塔城地区北部和中部也有分布。近年

来, 越来越多的苔藓植物工作者利用 MaxEnt 物种分布模型结合气候进行苔藓植物现代及未来分布预测。从本研究在未来气候情景下预测对齿藓属在新疆的分布结果来看, 该属分布范围略有退缩(图 3: D、E), 适生区面积将有所减少。气候变化对植物地理分布的影响表现在分布范围和分布面积两方面的变化<sup>[48]</sup>。本研究结果显示, 2050 年和 2070 年对齿藓属适生区面积分别占自治区总面积的 36.56% 和 37.87%, 对齿藓属在新疆的潜在分布区面积在原有基础上将缩小 0.24% ~ 2.25%。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<sup>[49-51]</sup>。Desamore 等<sup>[52]</sup> 基于 MaxEnt 模型预测结果显示, 同蒴藓 (*Homalothecium sericeum*) 至 2080 年在南欧的分布区域将明显减少。刘艳等<sup>[35]</sup> 在未来气候情景下预测的连轴藓属 (*Schistidium*) 在新疆的分布面积将比当代气候下减少 10.39%。

从气候因子对模型预测结果的贡献率来看, 最湿季平均温度、年平均气温、最干季降水量和年降水量累积贡献率达 86.8%, 说明温度和降水量是影响对齿藓属在新疆地理分布的主要因子。历史气象资料显示, 从 1951-1980 年到 1981-2010 年间, 中国干湿度整体呈变湿的趋势, 尤其是以西部的青藏高原、河西走廊和新疆的干旱区最明显<sup>[53]</sup>; 新疆的气候正在向“暖湿”化转变<sup>[54-56]</sup>, 改变着生态环境<sup>[56,57]</sup>, 影响其生物多样性。例如, 袁亮等<sup>[58]</sup> 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北鲵 (*Ranodon sibiricus*) 种群数量持续减少。Graham 指出<sup>[59]</sup> 在大尺度景观上, 决定物种分布的主要气候因子是温度和降水量。其中温度和降水量的极端值和变动幅度, 与物种潜在生境的空间分布紧密相关。未来气候情景下气温和降水的增加可能是导致对齿藓属地理分布面积在该地区呈现退缩趋势的原因之一。

本文选择一个行政自治区作为研究区域, 仅选取气候数据为环境变量, 存在一定的局限性。由于存在一些影响苔藓植物生长和分布的生物和非生物因素如植被类型、维管植物分布格局、人类活动和地形等, 这一预测结果还有待今后进一步调查加以验证。若能综合考虑人类活动、地形、气候变化对植被的影响、物种孢子扩散能力等因素, 预测结果可能更加准确可靠。

## 参考文献:

- [ 1 ] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [ 2 ] 胡人亮. 苔藓植物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [ 3 ] Turetsky MR, Bond-Lamberty B, Euskirchen E, Talbot J, Frolking S, McGuire AD, Tuittila ES. The resilience and functional role of moss in boreal and arctic ecosystems [J]. *New Phytol*, 2012, 196: 49–67.
- [ 4 ] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 干旱与半干旱地区苔藓植物生态学 研究综述[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1129–1134.
- Zhang YM, Cao T, Fan BR. A review on the studies of bryophyte ecology in arid and semi-arid areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1129–1134.
- [ 5 ] Concostrina ZL, Martinez L, Rabasa S, Escudero A. The influence of environmental factors on biological factors on biological soils crust: from a community perspective to a species level approach [J]. *J Veg Sci*, 2014, 25: 503–513.
- [ 6 ] Frego KA. Bryophytes as potential indicators of forest integrity[J]. *Forest Ecol Manag*, 2007, 242: 65–75.
- [ 7 ] 龙朝波, 张朝晖. 喀斯特石漠化山区苔藓植物水分吸收特征 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 350–354.
- Long CB, Zhang ZH. Water absorption characteristics of bryophytes in karst rocky desertification area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 350–354.
- [ 8 ] 杨永胜, 邱永利, 周小泉, 穆兴民, 卜崇峰. 毛乌素沙地人为干扰苔藓结皮的土壤水分和风蚀效应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 20–24.
- Yang YS, Qiu YL, Zhou XQ, Mu XM, Bu CF. Effects of disturbed moss dominated crusts on soil moisture and wind erosion in Mu Us Sandland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 20–24.
- [ 9 ] Ermakova EV, Frontasyeva MV, Steinnes E. Air pollution studies in Central Russia (Tula region) using the moss bio-monitoring technique, INAA and AAS [J]. *J Radioanal Nucl Ch*, 2004, 259: 51–58.
- [ 10 ] Jiang YB, Wang TJ, de Bie CAJM, Skidmore AK, Liu XH, Song SS, Zhang L, Wang J, Shao XM. Satellite-derived vegetation indices contribute significantly to the prediction of epiphyllous liverworts [J]. *Ecol Indic*, 2014, 38: 72–80.
- [ 11 ] Pesch R, Schoeder W. Mosses as bio-indicators for metal accumulation; Statistical aggregation of measurement data to exposure indices [J]. *Ecol Indic*, 2006, 6: 137–152.
- [ 12 ] Wang S, Zhang Z, Wang Z. Bryophyte communities as bio-monitors of environmental factors in the Goujiang karst bauxite, southwestern China [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 538: 270–278.
- [ 13 ] 王登富, 张朝晖. 苔藓植物对废弃卡林型金矿区重金属污染的监测评价[J]. 黄金, 2015, 36: 83–87.
- Wang DF, Zhang CH. Evaluation of bryophytes on monitoring heavy metals pollution in abandoned carlin gold mine areas [J]. *Gold*, 2015, 36: 83–87.
- [ 14 ] Ceschin S, Alefi M, Bisceglie S, Savo V, Zuccarello V. Aquatic bryophytes as ecological indicators of the water quality status in the Tiber River basin (Italy) [J]. *Ecol Indic*, 2012, 14: 74–81.
- [ 15 ] Kozak KH, Graham CH, Wiens JJ. Integrating GIS-basal environmental data into evolutionary biology [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23: 141–148.
- [ 16 ] Elith J, Graham CH, Erson RP. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. *Ecography*, 2006, 29: 129–151.
- [ 17 ] Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distribution [J]. *Ecol Model*, 2006, 190: 231–259.
- [ 18 ] 曾辉, 黄冠胜, 林伟, 梁忆冰, 李志红. 用 MaxEnt 预测橡胶南美叶疫病菌在全球的潜在地理分布 [J]. 植物保护, 2008, 34(3): 88–93.
- Zeng H, Huang GS, Lin W, Liang YB, Li ZH. Prediction of potential geographic distribution of *Microcyclus ulei* in the world using MaxEnt [J]. *Plant Protection*, 2008, 34(3): 88–93.
- [ 19 ] 洪波, 陈林, 赵惠燕, 程登发. 基于 GIS 的有害生物分布预测系统研究开发 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(2): 499–502.
- Hong B, Chen L, Zhao HY, Cheng DF. Research on prediction system of pest distribution based on GIS [J]. *Computer Engineering Design*, 2009, 30(2): 499–502.
- [ 20 ] 常志隆, 周益林, 赵遵田, 段霸瑜. 基于 MaxEnt 模型的小麦印度腥黑穗病在中国的适生性分析 [J]. 植物保护, 2010, 36(3): 110–112.
- Chang ZL, Zhou YL, Zhao ZT, Duan BY. Suitability analysis of Karnal bunt in China based on MaxEnt model [J]. *Plant Protection*, 2010, 36(3): 110–112.
- [ 21 ] 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 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 137–141.
- Lei JC, Xu HG. MaxEnt-based potential distribution of *Solidago canadensis* in China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 137–141.
- [ 22 ] Anderson RP, Real VS. Artefactual absences in species distributions: test for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela [J]. *J Biogeogr*, 2003, 30: 591–605.
- [ 23 ] De-Meyer M, Robertson MP, Peterson AT, Mansell MW, Ekesi S, Tsurtuta K, Mwaiko W, Vayssières JF, Peterson AT. Ecological niches and potential geographical distributions of Mediterranean fruit fly (*Ceratitidis capitata*) and Natal fruit fly (*Ceratitidis rosa*) [J]. *J Biogeogr*, 2008, 35: 270–281.

- [24] 郭水良, 高平磊, 娄玉霞. 应用 MaxEnt 模型预测检疫性杂草毒莠苣在我国潜在分布范围[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2011, 29(5): 15-19.  
Guo SL, Gao PL, Lou YX. Prediction of potential invasive range of quarantine weed *Lactuca serriola* in China by MaxEnt model[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2011, 29(5): 15-19.
- [25] 徐磊, 潘涌智, 黄阳洋. 油茶象的潜在分布区预测[J]. 福建林业科技, 2011, 38(4): 55-58.  
Xu L, Pan YZ, Huang YY. Prediction the potential geographical distribution of *Curculio chinensis* Chevrolat[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2011, 38(4): 55-58.
- [26] Li BN, Wei W, Ma J, Zhang RJ. Maximum entropy niche-based modeling (Maxent) of potential geographical distributions of fruit flies *Dacus bivittatus*, *D. ciliatus* and *D. vertebrates* (Diptera: Tephritidae) [J]. *Journal of Insect*, 2009, 52(10): 1122-1131.
- [27] 张晓峰, 佟友贵, 杨建东, 黄忠, 熊忠平. 基于 MaxEnt 生态位模型预测球果角胫象在云南的潜在地理分布[J]. 环境昆虫学报, 2013, 35(1): 28-32.  
Zhang XF, Tong YG, Yang JD, Huang Z, Xiong ZP. Maximum entropy niche-based modeling (MaxEnt) of potential geographical distribution of weevil *Shirahoshizo conifer* Chao in Yunnan Province[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2013, 35(1): 28-32.
- [28] 佟友贵, 张晓峰, 潘涌智, 徐磊. 基于 MaxEnt 生态位模型预测台榿大痣小蜂在云南省的潜在分布[J]. 现代农业科技, 2013(2): 166-167.  
Tong YG, Zhang XF, Pan YZ, Xu L. Maximum entropy niche-based modeling (MaxEnt) of potential geographical distribution of *Juniperus formosana* in Yunnan Province [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2013(2): 166-167.
- [29] Sergio C, Figueira R, Draper D, Menezes R, Sousa A. Modeling bryophyte distribution based on ecological information for extent of occurrence assessment[J]. *Biol Conserv*, 2007, 135: 341-351.
- [30] Jiang Y, Liu X, Song S, Yu Z, Shao X. Diversity and distribution of ground bryophytes in broadleaved forest in Mabian Dafengding National Nature Reserve, Sichuan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35: 13-19.
- [31] 于晶, 唐艳雪, 郭水良. 基于 GIS 和 MaxEnt 比较中国砂藓属与紫萼藓属植物地理分布[J]. 植物科学学报, 2012, 30(5): 443-458.  
Yu J, Tang YX, Guo SL. Comparison of the geographical distribution of *Racomitrium* and *Grimmia* in China using ArcGIS and MaxEnt software[J]. *Plant Science Journal*, 2012, 30(5): 443-458.
- [32] 宋闪闪. 西藏干旱半干旱区丛藓科物种多样性及空间分布的初步研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.  
Song SS. Preliminary study on diversity and distribution of Pottiaceae in arid and semiarid area of Tibet, China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [33] 沈阳, 于晶, 郭水良. 不同气候变化情境下中国木灵藓属和藓藓属植物的潜在分布格局[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6449-6459.  
Shen Y, Yu J, Guo SL. *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6449-6459.
- [34] 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. Prediction of suitable distribution of *Meteorium* in China under climate change [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2016(6): 192-202.
- [35] 刘艳, 阿提古丽·毛拉, 沙毕热木·斯热义力, 买买提明·苏来曼. 气候变化下耐旱藓类连轴藓属在新疆的分布模拟[J]. 西北植物学报, 2017, 37(9): 1881-1887.  
Liu Y, Atigul M, Sabiram E, Mamtimin S. Modeling potential distribution of the desiccation-tolerant moss genus *Schistidium* in Xinjiang under climate change [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(9): 1881-1887.
- [36] 程军, 沈阳, 郭水良. 气候变暖对花叶藓属植物在中国的潜在分布范围影响的预测[J]. 生态科学, 2015, 34: 9-16.  
Cheng J, Shen Y, Guo SL. Influence of climate warming on potential distribution regions of *Calymperes* in China [J]. *Ecological Science*, 2015, 34: 9-16.
- [37] 麻亚鸿, 李丹丹, 于晶, 郭水良. 中国藓藓属与木灵藓属分布式样与气候因子的关系[J]. 生物多样性, 2013, 21: 177-191.  
Ma YH, Li DD, Yu J, Guo SL. Geographical distribution patterns of *Macromitrium* and *Orthotrichum* in China and their relationship with climate factors [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21: 177-191.
- [38] Zander RH. *Didymodon* Hedw., Flora of North America: Vol. 27 [M]. New York: Oxford University Press, 2007: 539-561.
- [39] Frey W, Stech M. Syllabus of Plant Families, A Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien. 13th ed. Part 3. Bryophytes and Seedless Vascular Plants [M]. Berlin: Borntraeger, 2009: 1-257.
- [40] Jiménez JA, David T, Jamers RS. *Didymodon californicus* (Pottiaceae), a new species from California, USA [J]. *Phytotaxa*, 2014, 158(1): 105-110.
- [41] Li XJ, Marshal RC, He S. Moss Flora of China: Vol. 2 [M]. Beijing, New York: Science Press, Missouri Botanical Garden Press, 2001: 114-250.

- [42] 贾渝, 何思. 中国生物物种名录: 第1卷: 苔藓植物[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 60–113.
- [43] Mamtimin S. New checklist of Xinjiang liverworts, Hornworts, and mosses [J]. *Journal of Xinjiang University*, 2012, 19(3): 259–267.
- [44] 夏尤普·玉苏甫, 买买提明·苏来曼, 赵东平. 藓类植物中国新记录种——无疣对齿藓[J]. 西北植物学报, 2017, 37(5): 1038–1041.  
Shuayib Y, Mamtimin S, Zhao DP. *Didymodon validus* Limpr., New to the moss flora of China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(5): 1038–1041.
- [45] Zhao DP, Mamtimin S, He S. *Didymodon kunlunensis* D. P. Zhao, S. Mamtimin & S. He (Pottiaceae), a new species from Xinjiang, China[J]. *Journal of Bryology*, 2018. <https://doi.org/10.1080/03736687.2018.1451736>.
- [46] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva: IPCC, 2007.
- [47] 段居琦, 周广胜. 中国水稻潜在分布及其气候特征[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6659–6668.  
Duan JQ, Zhou GS. Potential distribution of rice in China and its climate characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6659–6668.
- [48] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365–377.
- [49] Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB. Climate change threats to plant diversity in Europe[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(23): 8245–8250.
- [50] Lenoir J, Gégout JC, Marquet PA. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. *Science*, 2008, 320: 1768–1771.
- [51] Frahm JP, Klaus D. Bryophytes as indicators of recent climate fluctuations in central Europe[J]. *Lindbergia*, 2001, 26(2): 97–104.
- [52] Désamoré A, Laenen B, Stech M. 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): 2915–2924.
- [53] 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 葛全胜, 易云鹤. 1951–2010年中国主要气候划界线的移动[J]. 地理研究, 2013, 32(7): 1179–1187.  
Bian JJ, Hao ZX, Zheng JY, Ge QS, Yi YH. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1179–1187.
- [54] 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 GQ, Wei WS. Climate change of Xinjiang and its impact on eco-environment [J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 14–18.
- [55] 商沙沙, 廉丽妹, 马婷, 张琨, 韩拓. 近54a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68–76.  
Shang SS, Lian LZ, Ma T, Zhang K, Han T. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 68–76.
- [56] 贺普云, 张明军, 王鹏, 辛宏, 黄小燕. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 499–508.  
He PY, Zhang MJ, Wang P, Xin H, Huang XY. New progress of the study on climate in Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3): 499–508.
- [57] 胡汝骥, 攀自立, 王亚俊. 近50a新疆气候变化对环境影响评估[J]. 干旱区地理, 2001, 24(2): 97–103.  
Hu RJ, Pan ZL, Wang YJ. Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years [J]. *Arid Land Geography*, 2001, 24(2): 97–103.
- [58] 袁亮, 吴焯, 叶小芳, 古丽格娜·海力力, 冯俊, 王秀玲. 近52a区域气候变化对濒危物种北鲩 *Ranodon sibiricus* 潜在影响分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 58–66.  
Yuan L, Wu Y, Ye XF, Guligena H, Feng J, Wang XL. 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.
- [59] Graham A. The current status of the legume fossil record in the Caribbean region [C]//Herendeen PS, Dilcher DL. Advance in legume systematics, Part 4. The fossil records. London: Kew Publishing, 1992: 161–167.