

· 研究报告 ·

气候变化对6种荒漠植物分布的潜在影响

吴建国*, 吕佳佳, 周巧富

中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要 分析气候变化对植物分布的影响, 对保护生物多样性具有重要意义。利用CART(分类和回归树)模型及A2和B2情景, 分析了气候变化对短叶假木贼(*Anabasis brevifolia*)、裸果木(*Gymnocarpos przewalskii*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)和喀什膜果麻黄(*Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*)分布范围及空间格局的影响。结果表明: 气候变化下, 这些植物目前适宜分布范围减小; 从新适宜及总适宜分布范围而言, 短叶假木贼和梭梭从1991–2020年到2051–2080年时段增加, 之后减小, 其它植物从1991–2020年到2081–2100年时段减小; 喀什膜果麻黄和驼绒藜适宜分布范围减小并破碎化, 其它植物向目前适宜分布的西部、西北部(或青海西南部)、昆仑山、阿尔金山和祁连山区扩展; 除驼绒藜和喀什膜果麻黄与年均气温变化具显著相关性外, 其它植物分布范围与年均气温和降水量变化的相关性较弱($P>0.05$), 除驼绒藜、喀什膜果麻黄和裸果木目前分布范围与年均气温和降水量变化的回归关系较强外, 其它植物分布范围与年均气温和年降水量变化多元线性回归关系较弱。上述研究结果表明, 气候变化下, 这些植物空间分布格局改变, 目前分布范围减少, 新适宜及总适宜分布范围近期增加, 随着气候变化程度的增强, 又逐渐减小。

关键词 短叶假木贼, 驼绒藜, 气候变化, 濒危植物, 膜果麻黄, 喀什膜果麻黄, 裸果木, 梭梭

吴建国, 吕佳佳, 周巧富 (2010). 气候变化对6种荒漠植物分布的潜在影响. 植物学报 45, 723–738.

过去几十年的气候变化已对物种的分布和丰富度产生了极大的影响(Parmesan and Yehe, 2003; Root et al., 2003), 气候变化将会对物种的分布和丰富度产生更大的影响。因此, 未来生物多样性保护将面临极大的挑战(Araújo et al., 2005)。为了在气候变化下有效地保护生物多样性, 科学认识气候变化对物种分布的影响至关重要(Williams et al., 2005; Pyke et al., 2005)。另外, 气候变化下, 为了科学规划自然保护区而有效保护物种, 准确确定气候变化对物种分布的影响也非常重要(Mccarty, 2001; Coulston and Riitters, 2005)。因此系统研究气候变化对物种分布的影响, 对未来的生物多样性保护具有重要的理论和现实意义(Mccarty, 2001; Thomas et al., 2004)。

国外已广泛开展气候变化对植物物种分布影响的研究。Bakkenes等(2002)分析了气候变化对欧洲高等植物分布的影响。Erasmus等(2002)分析了气候变化对非洲一些物种分布的影响。Shafer等(2001)分析

了气候变化对南美一些乔木及灌木分布的影响等。这些研究将为气候变化下物种保护提供重要的科学依据。不过, 多数研究主要是通过比较物种在观测(或在基准)情景下与未来单一年气候变化情景下分布的差异, 来确定气候变化对物种分布的影响(Iverson and Prasad, 2001), 而对气候变化下物种分布在不同年份及多年变化差异考虑不够。利用长时间序列气候变化情景分析气候变化对物种分布的影响目前备受关注(IPCC, 2007; Loiselle et al., 2008)。另外, 研究中所选择的气候要素差异较大, 如Erasmus等(2002)选择年及月均气温, 年及月最低、最高气温及繁殖期降水量等气候要素; Forsman和Mönkkönen(2003)选择最冷月气温、年均气温、繁殖期气温和降水量等气候要素; Luoto等(2005)选择最冷月气温、降水量及 $>5^{\circ}\text{C}$ 积温等气候要素; Matsui等(2004)和Midgley等(2002)根据相关研究选择气候变量分析气候变化对物种分布的影响。事实上, 气候要素平均状态和极端值对物

收稿日期: 2009-07-23; 接受日期: 2009-11-30

基金项目: 国家“十一五”科技支撑专题“西北珍稀濒危生物适应气候变化的关键技术与对策研究”(No.2007BAC03A02-06)和中国环境科学研究院公益性院所基金(No.2007KYYW05)

* 通讯作者。E-mail: wujg@craes.org.cn

种分布均有一定的影响, 每个气候变量只反映物种与气候要素关系的一个方面, 尽可能多的选择气候变量将有助于提高模拟气候变化对物种分布影响的精度(Araújo et al., 2005)。气候变化后物种分布范围改变, 包括目前适宜、新适宜和总适宜分布范围变化及空间分布格局的改变(Walther et al., 2002), 这些因素对气候变化下物种的就地和异地保护甚为重要(Williams et al., 2005; Pyke et al., 2005), 但尚缺少对目前适宜及新适宜分布区变化的分析。我国在气候变化对植物分布影响方面也开展了一些研究(倪健和宋永昌, 1997; 郝占庆等, 2001), 但仅利用了单一气候变化情景, 对气候要素间相互作用(或波动性)及极端气候事件考虑不够。因此, 为了准确地确定气候变化对物种分布的影响, 需要利用长时间序列气候变化情景, 选择多种气候变量, 系统分析气候变化后物种目前、新适宜及总适宜分布区的变化趋势。

我国约有30 000余种高等植物, 分布在荒漠中的种子植物就有600余种(中国生物多样性国情研究报告编写组, 1998)。气候变化对这些植物的分布可能会有一定的影响, 但目前尚不清楚。为此, 本文选择了短叶假木贼(*Anabasis brevifolia*)、裸果木(*Gymnocarpos przewalskii*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)和喀什膜果麻黄(*Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*)为研究对象, 其中短叶假木贼是典型的亚洲中部荒漠类型优势种, 裸果木为亚洲中部荒漠残遗种, 梭梭和膜果麻黄是亚洲荒漠区分布最广泛的植物种, 驼绒藜属于地中海中亚物种, 喀什膜果麻黄为膜果麻黄变种, 这些植物分布资料齐全且是代表性荒漠植物。采用2种气候变化情景(包括A2和B2情景), 分析了1991–2100年不同时段(1991–2020年、2021–2050年、2051–2080年和2081–2100年)这6种荒漠植物分布的变化(目前适宜分布区、新适宜及总适宜分布区), 以及这些变化与我国年均气温和降水量变化的关系, 以期为气候变化下保护这些植物提供依据, 并为开展相关研究提供参考。植物目前适宜分布区就是根据目前调查和已有文献记载确定的植物适宜分布的区域。植物基准情景下分布就是根据基准气候情景模拟分析的植物分布, 它与目前适宜观测分布为对应关系, 即基准气候情景模拟分析分布与目前适宜分布区越接近, 模拟效果就越好。

1 材料与方法

1.1 植物目前分布数据收集与分析

短叶假木贼(*Anabasis brevifolia* C. A. Mey), 别名鸡爪架, 隶属藜科假木贼属, 分布于内蒙古、宁夏和甘肃西部、西藏和新疆北部及东部, 海拔高度1 400–1 600 m, 零星分布于玛依尔山东坡、艾比湖盆地南缘、博格达山南坡和阿拉善干旱山麓低矮石山, 生长于戈壁、砾质山坡、冲积扇和石质荒漠中。裸果木(*Gymnocarpos przewalskii* Maxim.), 隶属石竹科裸果木属, 分布于内蒙古、甘肃、青海和新疆, 海拔高度800–2 200 m, 零星分布于塔里木盆地东北部和北山戈壁一带, 包括哈顺戈壁和哈密盆地。分布区年均气温6–12°C, 极端最高气温34.3–43.9°C, 极端低温–45––20°C, 年降水量36.9–200 mm, 年蒸发量1 300–3 378 mm, 土壤为灰棕荒漠土、棕色荒漠土砾石戈壁或低矮剥蚀残丘土壤。梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey) Bunge), 原名琐琐, 又名盐木、梭梭柴, 隶属藜科梭梭属, 渐危物种, 分布在内蒙古、甘肃、宁夏、青海和新疆, 海拔高度150–2 600 m, 主要分布在准噶尔盆地、哈顺戈壁、诺敏戈壁、阿拉善高原和柴达木高盆地。分布区年均气温2–11°C, 1月平均气温–18––8°C, 7月平均气温22–26°C, 年降水量30–200 mm(或更少), 适宜于水位较高的风成沙丘、丘间沙地, 淤积、湖积龟裂性粘土及中、轻度盐渍土, 基质极端粗糙且水分异常缺乏的洪积石质戈壁或剥蚀石质山坡及山谷。膜果麻黄(*Ephedra przewalskii* Stapf), 别名蛇麻黄、普氏麻黄, 隶属麻黄科麻黄属, 分布于内蒙古及甘肃西部、青海北部和新疆等地, 包括阿拉善平原、河西走廊、柴达木盆地、哈顺戈壁、塔里木盆地边缘和准噶尔盆地, 适于冲积(或洪积冲积)扇及石质低山。驼绒藜(*Ceratoides latens* (G. F. Gmel.) Reveal et holmgren), 隶属藜科驼绒藜属, 分布于内蒙古、甘肃、宁夏、青海、新疆和西藏等地, 着生于戈壁、荒漠、半荒漠干旱山坡或草原中, 海拔高度500–700 m、3 500 m和4 600–5 200 m, 包括准噶尔盆地、天山南坡、昆仑山北坡、阿里西部山地、柴达木盆地西部、阿拉善东部贺兰山和狼山山前平原、阿拉善中部沙砾质戈壁。分布区年积温1 700–3 000°C、年降水量为100–200 mm, 土壤为棕钙土、

灰钙土、灰棕荒土或棕色荒漠土。喀什膜果麻黄 (*Ephedra przewalskii* Stapf var. *kaschgarica*), 隶属麻黄科麻黄属, 分布于内蒙古、宁夏、甘肃北部、青海北部和新疆天山南北山麓, 适宜干燥沙漠地区、干旱山麓及多砂石盐碱土(胡式之, 1963; 中国植物志编辑委员会, 1978, 1979, 1996; 中国科学院兰州沙漠研究所, 1985; 傅立国, 1989; 内蒙古植物志编辑委员会, 1990; 新疆植物志编辑委员会, 1993, 1996; 青海植物志编辑委员会, 1999; 马德滋等, 2006)。本研究中6种植物分布数据主要通过收集整理《中国珍稀濒危植物红皮书》、《中国植物志》、专题报告和公开发表的文献等获得(胡式之, 1963; 中国植物志编辑委员会, 1978, 1979, 1996; 中国科学院兰州沙漠研究所, 1985; 傅立国, 1989; 内蒙古植物志编辑委员会, 1990; 新疆植物志编辑委员会, 1993, 1996; 青海植物志编辑委员会, 1999; 查丽杭等, 2002; 易津等, 2003; 汪智军等, 2003; 巴哈尔古丽等, 2005; 蒋霞和倪健, 2005; 刘文华等, 2006; 马德滋等, 2006; 汪之波和马金林, 2007; 刘永生等, 2008; 张国中等, 2008)。将《中国地名录-中华人民共和国地图集地名索引》中33 000余条地名录入Excel表格, 将地名、经纬度属性列转换成DBF格式后, 在地理信息系统ArcGIS9.2软件的ArcMAP中打开后加载并读取坐标数据, 然后以数据层方式加载到地图文档中。把植物分布数据在Access软件中建立数据库后, 利用ArcGIS9.2软件将每一种物种分布与否(有分布以1表示, 无分布以0表示)的数据作为属性添加到数字化县级行政区划图属性表上。根据这一属性将数字化县级行政区划图插值为15 770个25 km × 25 km的栅格单元, 制作这些植物的分布图; 再用栅格化物种分布数据裁剪栅格象元大小相同的气候数据, 得到15 770个25 km × 25 km的象元大小栅格化气候数据。将物种分布栅格数据转化为点数据, 根据点ID号将每种植物分布属性表链接后输出得到物种分布属性表。将栅格形式气候数据转化为点数据, 根据点ID号将每一年不同气候变量属性表链接, 得到1991–2100年的气候变量属性表。基于点形式气候数据与点形式的物种分布数据点ID号相同使每个点上气候数据与物种分布数据对应, 建立全国范围的15 770个点气

候数据与物种分布数据相匹配的数据库, 作为分析气候变化对这些植物分布影响的基础数据。

1.2 气候要素选择

分析气候变化对物种分布的影响常选择年均气温、夏季和冬季气温、生长季气温、最热及最冷月气温、年降水量及实际和潜在蒸发量等气候要素。另外, 也常选择干燥指数(谢良若夫干燥指数和伊万若夫干燥指数)、Holdridge指数(Holdridge, 1967; 张新时等, 1993)、Kira指数(Kira, 1977)和Thornthwaite指数(Thornthwaite, 1948; 张新时等, 1993)。基于不同气候要素变量与植物分布关系的复杂性, 本研究还选用了反映气温的多个变量、积温和天数, 反映降水量的多个变量和天数, 以及反映气候要素极端趋势的变量, 并选用了干燥指数、Holdridge指数、Kira指数和Thornthwaite指数, 总计62个变量(表1)。

模拟气候变化对植物分布的影响中, 应用过多参数将会导致模型分析不稳定(Muñoz and FellCisimo, 2004; Beaumont et al., 2005)。PCA(主分量分析)方法利用预测变量产生的主分量集代替预测变量本身, 并且减少了变量数量, 排除了变量间多重共线性问题, 故在分析气候变化对物种分布的影响中PCA方法常被用来减少参数数量(Williams et al., 2003)。本研究中, 考虑到62个气候变量过多且有自变量共线性问题, 也采用PCA方法来减少参数数量, 并根据PCA分析结果, 选择占全部变量99%的前22个主分量作为分析气候变化对物种分布影响的变量(表2)。根据主分量分析的数学原理, 这些主分量为原62个气候要素函数, 每个主分量中各气候要素系数不同。第1个主分量系数较高的原变量包括: 秋季平均气温、>0°C和5°C的积温、气温持续>25°C的天数、年均生物学温度与潜在蒸发率; 而第2到第22个主分量系数较高的原变量分别是: 湿润指数、春季降雨量、干燥度指数2、最大降水强度、暴雨天数、气温持续>20°C的天数、气温持续>15°C的天数、最大降水强度、潜在蒸发量、气温持续>20°C的天数、气温持续>0°C的天数、潜在蒸发量、最热月最高温度、干燥度指数3、降雨量>0 mm的天数、降雨量>5 mm的天数、春季降雨强度、降雨量>0 mm的天数、秋季降雨量、春季降雨强度和气温持续低于20°C的天数。

表1 构建模型的气候变量

Table 1 Environmental variables used to construct the model

No.	Climatic variable	Unit	No.	Climatic variable	Unit
1	Annual mean air temperature	°C	32	Spring precipitation amount	mm
2	January mean air temperature	°C	33	Summer precipitation amount	mm
3	July mean air temperature	°C	34	Autumn precipitation amount	mm
4	Spring mean air temperature	°C	35	Winter precipitation amount	mm
5	Summer mean air temperature	°C	36	Spring precipitation intensity	mm·d ⁻¹
6	Autumn mean air temperature	°C	37	Summer precipitation intensity	mm·d ⁻¹
7	Winter mean air temperature	°C	38	Autumn precipitation intensity	mm·d ⁻¹
8	Cumulative temperature sums above 0°C	°C	39	Winter precipitation intensity	mm·d ⁻¹
9	Cumulative temperature sums above 5°C	°C	40	Cumulative days of precipitation above 0 mm	d
10	Cumulative temperature sums above 10°C	°C	41	Cumulative days of precipitation above 5 mm	d
11	Cumulative temperature sums above 15°C	°C	42	Cumulative days of precipitation above 10 mm	d
12	Cumulative temperature sums above 20°C	°C	43	Cumulative days of precipitation above 25 mm	d
13	Cumulative temperature sums above 25°C	°C	44	Cumulative days of precipitation above 50 mm	d
14	Continued days of temperature above 0°C	d	45	Cumulative days of precipitation above 100 mm	d
15	Continued days of temperature above 5°C	d	46	Cumulative days of precipitation above 150 mm	d
16	Continued days of temperature above 10°C	d	47	Maximum precipitation intensity	mm·d ⁻¹
17	Continued days of temperature above 15°C	d	48	Cumulative days of maximum precipitation intensity	d
18	Continued days of temperature above 20°C	d	49	Days of rainstorm	d
19	Continued days of temperature above 25°C	d	50	* Index of aridity (k1)	
20	Minimum temperature in the coldest month	°C	51	§ Index of aridity (k2)	
21	Maximum temperature in the warmest month	°C	52	† Index of aridity (k3)	
22	Cumulative days of minimum temperature in the coldest month	d	53	Annual mean bio-temperature (BT)	°C
23	Cumulative days of maximum temperature in the warmest month	d	54	Potential evapotranspiration rate (PER)	
24	Cumulative days of temperature above 35°C	d	55	Potential evapotranspiration (PRT)	mm
25	Cumulative temperature continuing below -10°C	°C	56	Warmth index (WI)	
26	Cumulative temperature continuing below -5°C	°C	57	Coldness index (CI)	
27	Cumulative temperature continuing below 0°C	°C	58	Humidity index (HI)	
28	Cumulative days of temperature continuing below -10°C	d	59	Potential evapotranspiration (Em)	
29	Cumulative days of temperature continuing below -5°C	d	60	Index of humidity (I _m)	
30	Cumulative days of temperature continuing below 0°C	d	61	Index of aridity (I _{ay})	
31	Annual precipitation amount	mm	62	Index of humidity (I _{hy})	

*: 干燥度指数k1为谢良若夫干燥度指数; §: 干燥度指数k2为修改谢良若夫干燥度指数; †: 干燥度指数k3为伊万若夫干燥度指数

*: Index of aridity k1, Xie Lian Ni Ruo Fu index of aridity; §: Index of aridity k2, revised Xie Lian Ni Ruo Fu index of aridity; †: Index of aridity k3, Yi Fang Ruo Fu index of aridity

1.3 气候变化情景

在气候变化分析中,本研究采用了IPCC排放情景特别报告(SRES)中的A2和B2情景。这些情景由中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所引进的英国Hadley气候中心RCM(Regional Climate Model)系统PRECIS(Providing Regional Climates for Impacts Studies)气候模型产生(许吟隆等, 2002, 2005; 许吟隆, 2005; 居辉等, 2005; 熊伟等, 2005)。A2情景描述了区域经济发展趋势, 单个资本经济发展和技术革

新比其它情景慢, CO₂浓度从2000年380 μL·L⁻¹到2080年700 μL·L⁻¹, 全球最高增温幅度为3.79°C; B2情景描述了区域社会经济和环境可持续发展, 人口持续增加(比A2情景低), 经济中速发展, 采用不同发展技术, CO₂浓度从2000年380 μL·L⁻¹到2080年550 μL·L⁻¹, 全球最高增温幅度为2.69°C; 基准情景选择1961–1990年气候要素值, 基准情景与未来情景均由同一个气候模式产生。这些情景在我国已被检验并应用, 包括对基准气候情景(1961–1990年)与观测值对应检验及模拟分析未来中国气候变化趋势(许吟隆等,

表2 占总变量99%的前22个主分量

Table 2 First 22 PC amount to 99% of the total variance

Component	Standard deviation	Proportion of variance (%)	Cumulative proportion (%)
1	5.87	55.60	55.60
2	2.91	13.60	69.20
3	1.83	5.40	74.60
4	1.64	4.30	78.90
5	1.54	3.80	82.70
6	1.32	2.80	85.50
7	1.12	2.00	87.50
8	1.04	1.70	89.30
9	1.00	1.60	90.90
10	0.96	1.50	92.40
11	0.83	1.10	93.50
12	0.78	1.00	94.50
13	0.73	0.90	95.30
14	0.72	0.80	96.20
15	0.68	0.80	96.90
16	0.57	0.50	97.40
17	0.52	0.40	97.90
18	0.45	0.30	98.20
19	0.40	0.30	98.50
20	0.38	0.20	98.70
21	0.35	0.20	98.90
22	0.31	0.20	99.10

2002, 2005; 许吟隆, 2005; 居辉等, 2005; 熊伟等, 2005)。为了使气候数据与物种分布数据相统一, 利用Kriging法将这些气候数据通过插值转化为象元大小为25 km × 25 km的栅格数据。如1.1节所述, 为了与物种分布数据进行匹配, 用已栅格化的物种分布数据裁剪同样栅格、象元大小一致的气候数据, 得到15 770个25 km × 25 km栅格上的气候要素数据。

1.4 模拟方法

分类和回归树(classification and regression tree, CART)模型是广泛用来模拟分析物种分布的生态位模型, 也是广泛用来模拟分析气候变化对物种分布影响的方法(Thuiller, 2003)。这种模型是非参数化回归及分类方法, 不需要预先设定因变量和自变量间的关系, 而是根据因变量利用递归划分法, 将由自变量定义的空间划分为尽可能的同质类别, 每一次划分均由自变量的一次最佳划分值来完成, 重复此过程, 直到数据不可再分为止; 根据响应变量不同, 既可以预测

种类(分类树), 也可以预测平均值(回归树), 还可以很好地揭示具有等级、非线性、非加性和分类性质变量数据结构的关系。在分析气候变化对物种分布的影响时, 需要根据已确定的物种分布数据和对应的气候变量数据, 把物种分布数据输入到因变量或响应变量, 气候要素数据输入到自变量或预测变量, 求解模型参数和检验模型; 模型运行后, 再把新气候变量数据输入到预测变量下进行物种分布范围预测, 要求新气候变量数据形式与求解参数时气候变量格式一致(Thuiller, 2003)。本研究采用这个模型分析气候变化对6种植物分布的影响, 最小节点数选择10, 节点偏差选择0.010。由于CART模型模拟计算出的物种分布信息是以概率的形式表示, 故参考国际上的做法, 以概率>0.5作为分布存在标准, 小于0.5作为分布不存在标准(Bakkenes et al., 2002; Berry et al., 2002; Midgley et al., 2003)。

模拟分析中, 先根据6种植物目前分布范围与部分基准气候情景数据求出模型参数, 然后利用基准气候情景模拟这些植物在当前气候条件下的分布, 并与观测分布对比评价模拟效果。同时, 通过计算AUC (the area under the relative operating characteristic curve)(相对操作特征曲线下面积, 表示模型模拟结果与现实观测分布之间的一致性, 这个面积越大表示一致性越好)并利用Kappa(k)统计学方法评价模拟准确性(Thuiller, 2003)。

分析气候变化对6种植物分布的影响时, 先计算基准气候(1961–1990年时段)和不同气候变化情景(1991–2100年各年代)下这些植物的分布范围, 再计算不同气候变化情景下这些植物在1991–2020年、2021–2050年、2051–2080年和2081–2100年时段分布范围的平均值。通过比较这些植物在基准气候情景(1961–1990年)与1991–2020年、2021–2050年、2051–2080年和2081–2100年时段分布范围的差异, 分析气候变化后这些植物分布的变化趋势。适宜气候分布范围=模拟计算未来气候情景适宜分布格点数/基准情景下适宜分布格点数×100%。同时, 利用相关分析方法分析这些植物分布范围与年均气温变化和年降水量变化的相关性, 用多元回归方法分析这些植物分布范围与年均气温和年降水量变化的多元回归关系, 使用Durbin Watson方法检验气候要素长时间序列的自相关性, 并用Hildreth-Lu方法消除这些回归

关系中自变量之间的自相关性(Kutner et al., 2004)。我国年均气温变化= Σ (每个格点每年气温-每个格点基准情景下平均气温)/总格点数;我国年降水量变化= Σ ((每个格点每年降水量-每个格点基准情景下年降水量)/每个格点基准情景下年降水量 $\times 100$)/总格点数。气温和降水量变化均通过比较未来情景(1991-2100年)和基准气候情景(1961-1990年)得到。

2 结果与讨论

2.1 模拟效果分析

图1显示, CART模型模拟的基准气候情景下6种植物分布与观测分布总体上比较接近, 模拟的这些植物目前适宜分布占观测分布范围的70%以上(表4)。另外, 从表3可以看出, 6种植物模拟的AUC值均在0.90以上; 除驼绒藜外, 其它植物的Kappa(k)统计值均在

0.75以上, 说明对多数植物的模拟结果较好。这些植物主要分布在西北和北方一些区域及青海和西藏的部分区域(图1)。

2.2 气候变化对植物分布范围的影响

由表4可知, 气候变化下, 6种植物目前适宜分布范围减小, 其中喀什膜果麻黄减小幅度最大(95%以上), 裸果木、驼绒藜和膜果麻黄次之(60%-80%), 短叶假木贼和梭梭较小(50%以上); 短叶假木贼和梭梭新适宜及总适宜分布范围从1991-2020年时段到2051-2080年时段增加, 从2051-2080年到2081-2100年时段减小; 裸果木、膜果麻黄、驼绒藜和喀什膜果麻黄新适宜及总适宜分布范围在1991-2020年时段较大, 从1991-2020年到2081-2100年时段减小; 到2081-2100年时段, 短叶假木贼新适宜分布范围最大(80%以上), 裸果木和驼绒藜次之, 梭梭、膜果麻黄

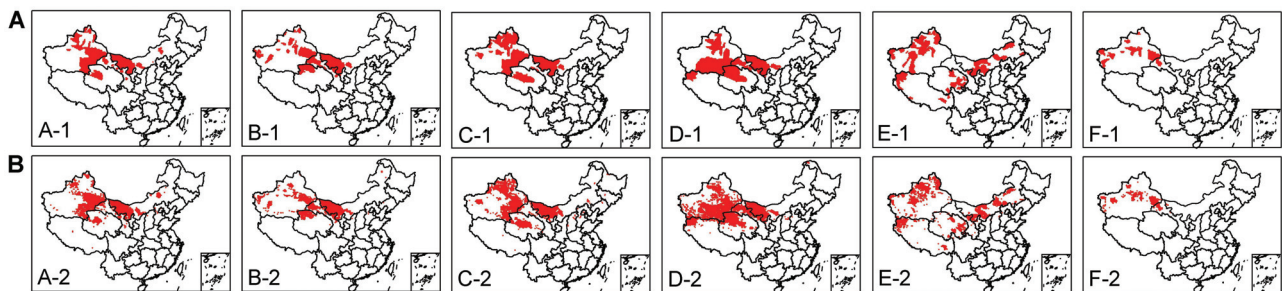


图1 6种植物的观测(A)和基准气候(B)分布

A-1和A-2: 短叶假木贼; B-1和B-2: 裸果木; C-1和C-2: 梭梭; D-1和D-2: 膜果麻黄; E-1和E-2: 驼绒藜; F-1和F-2: 喀什膜果麻黄

Figure 1 The observed distribution (A) and simulated distribution (B) of six plants

A-1 and A-2: *Anabasis brevifolia*; B-1 and B-2: *Gymnocarpos przewalskii*; C-1 and C-2: *Haloxylon ammodendron*; D-1 and D-2: *Ephedra przewalskii*; E-1 and E-2: *Ceratoides latens*; F-1 and F-2: *Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*

表3 模拟效果检验

Table 3 The assessment of modeling

Species	AUC	Effect	Kappa value	Effect
<i>Anabasis brevifolia</i>	0.96	Excellent	0.82	Excellent
<i>Gymnocarpos przewalskii</i>	0.97	Excellent	0.75	Excellent
<i>Haloxylon ammodendron</i>	0.95	Excellent	0.77	Excellent
<i>Ephedra przewalskii</i>	0.96	Excellent	0.76	Excellent
<i>Ceratoides latens</i>	0.94	Excellent	0.65	Good
<i>Ephedra przewalskii</i> var. <i>kaschgarica</i>	0.98	Excellent	0.73	Excellent

AUC: 相对操作特征曲线下面积 AUC: The area under the relative operating characteristic curve

表4 A2和B2气候变化情景下6种植物的分布范围

Table 4 The distribution region of six plants under A2 and B2 climate change scenarios

Species	Climate scenarios	Distribution region	Present	1961–1990a	1991–2020a		2021–2050a		2051–2080a		2081–2100a	
			Observation (%)	Baseline scenarios (%)	Mean (%)	Standard deviations	Mean (%)	Standard deviations	Mean (%)	Standard deviations	Mean (%)	Standard deviations
DYJ-MZ	A2	MQSY	100	76	42	9	44	11	42	14	36	15
		XSY	0	12	77	15	92	21	98	24	86	20
		ZSY	100	89	119	21	136	29	140	36	122	33
	B2	MQSY	100	76	42	9	44	11	44	13	42	15
		XSY	0	12	79	16	94	20	101	26	94	24
		ZSY	100	89	121	22	138	29	144	37	136	36
LGM	A2	MQSY	100	72	36	9	32	11	24	10	15	7
		XSY	0	13	83	23	73	20	74	25	76	25
		ZSY	100	85	120	28	104	28	98	33	91	28
	B2	MQSY	100	72	35	9	31	11	26	11	22	9
		XSY	0	13	81	23	73	20	76	23	75	23
		ZSY	100	85	116	27	104	28	102	31	91	28
SS	A2	MQSY	100	76	40	12	41	14	41	13	37	14
		XSY	0	15	45	12	51	16	51	18	39	14
		ZSY	100	91	86	23	92	29	92	30	76	26
	B2	MQSY	100	76	40	13	42	13	43	13	40	13
		XSY	0	15	46	13	52	16	53	20	45	17
		ZSY	100	91	86	25	93	28	96	32	85	29
MG-MH	A2	MQSY	100	79	40	10	38	11	33	11	27	9
		XSY	0	19	53	14	50	11	48	12	42	10
		ZSY	100	98	94	21	87	20	81	22	69	19
	B2	MQSY	100	79	40	10	38	11	35	12	31	11
		XSY	0	19	53	14	50	11	49	11	45	11
		ZSY	100	98	93	21	88	20	83	22	76	21
TRL	A2	MQSY	100	62	30	5	25	6	17	5	13	3
		XSY	0	19	95	19	82	16	65	18	51	15
		ZSY	100	81	126	23	106	20	81	22	63	17
	B2	MQSY	100	62	29	5	24	5	18	4	16	4
		XSY	0	19	92	16	81	14	71	16	63	17
		ZSY	100	81	121	20	105	19	90	19	79	20
KSM-GMH	A2	MQSY	100	69	9	3	1	1	0	0	0	0
		XSY	0	18	14	4	4	2	3	1	2	1
		ZSY	100	87	23	7	4	2	3	1	2	1
	B2	MQSY	100	69	6	9	0	0	0	0	0	0
		XSY	0	18	9	3	2	1	1	1	2	1
		ZSY	100	87	16	5	2	1	1	0	2	0

DYJMZ: 短叶假木贼; LGM: 裸果木; SS: 梭梭; MGMH: 膜果麻黄; TRL: 驼绒藜; KSMGMH: 喀什膜果麻黄; MQSY: 目前适宜分布; XSY: 新适宜分布; ZSY: 总适宜分布

DYJMZ: *Anabasis brevifolia*; LGM: *Gymnocarpus przewalskii*; SS: *Haloxylon ammodendron*; MGMH: *Ephedra przewalskii*; TRL: *Ceratoides latens*; KSMGMH: *Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*; MQSY: The current suitable distribution; XSY: The new suitable distribution; ZSY: Total suitable distribution

和喀什膜果麻黄较小(5%–30%), 并且A2情景下变化较大, B2情景下变化较小。

气候变化下, 这些植物目前适宜分布范围中位数从1991–2020年到2081–2100年时段减少, 其中喀什膜果麻黄变化最大, 裸果木和驼绒藜次之, 膜果麻黄、短叶假木贼和梭梭较小。短叶假木贼和梭梭新适宜及总适宜分布范围中位数从1991–2020年到2051–2080年时段增加, 从2051–2080年到2081–2100年时段减少; 裸果木、膜果麻黄、驼绒藜和喀什膜果麻黄新适宜及总适宜分布范围中位数从1991–2020年到2081–2100年时段减小; 到2081–2100年时段, 短叶假木贼总适宜分布范围中位数最大(100%以上), 裸果木、梭梭、膜果麻黄和驼绒藜次之(65%以上), 喀什膜果麻黄(10%以下)较小, 并且A2情景下变化较大, B2情景下变化较小(表5)。

气候变化下, 6种植物目前适宜分布范围最小值、最大值从1991–2020年到2081–2100年时段减少, 其中喀什膜果麻黄变化较大, 裸果木、驼绒藜、膜果麻黄、短叶假木贼和梭梭次之; 短叶假木贼和梭梭新适宜及总适宜分布范围最小值、最大值从1991–2020年到2051–2080年时段增加, 从2051–2080年到2081–2100年时段减少; 裸果木、膜果麻黄、驼绒藜和喀什膜果麻黄新适宜及总适宜分布范围最小值、最大值在1991–2020年时段较大, 从1991–2020年到2081–2100年时段减小, 并且A2情景下变化较大, B2情景下变化较小(表5)。

2.3 气候变化后植物空间分布格局的改变

图1和图2对比分析显示, 气候变化下, 短叶假木贼目前适宜分布范围的南部和西南部一些区域将不再适宜, 新适宜分布区将向目前适宜分布区的西部和西北部及青海西南部、青海与西藏交界处的一些区域扩展; 裸果木目前适宜分布区的东南部、南部、西部和西南部一些区域将不再适宜, 新适宜分布区将向目前适宜分布区的西北及东北的一些区域扩展, 且在柴达木盆地及青海、甘肃和新疆交界处的一些区域相对稳定; 梭梭目前适宜分布区的东部、南部及东南部和西南部的一些区域将不再适宜, 新适宜分布范围将向目前适宜分布区的西北及东北一些区域扩展; 膜果麻黄目前适宜分布区的东部、南部、西北及西南部的一些区域将不再适宜, 新适宜分布区将向目前适宜分布区的西

部及西北部的一些区域扩展, 且在新疆塔里木盆地南侧、甘肃、新疆和青海交界处较稳定; 驼绒藜目前适宜分布区的东南、东北、北部、南部、西部及西北的一些区域将不再适宜, 新适宜分布区将向目前适宜分布区的西部、西北及西南部的一些区域扩展, 且在东北大兴安岭北侧也有零星扩展; 喀什膜果麻黄目前适宜分布区的东部、南部、东北及西部和西南部的一些区域将不再适宜, 新适宜分布范围将零星向新疆和青海交界处及新疆西部边界扩展, 且适宜分布范围破碎化。此外, A2情景下变化较大, B2情景下变化较小。

2.4 气候变化后6种植物分布区改变与我国年均温度和降水变化的关系

气候变化下, 不同植物的分布范围变化与我国年均气温和降水量变化的相关性不同。梭梭、膜果麻黄、驼绒藜和喀什膜果麻黄的目前、新和总适宜分布范围与年均气温和降水量变化呈负相关; 短叶假木贼目前适宜分布范围与年均气温和降水量变化呈负相关, 新和总适宜分布范围与气温和降水量变化呈正相关; 裸果木目前、新和总适宜分布范围与年降水量变化呈负相关, 目前及总适宜分布范围与温度变化呈负相关, 新适宜分布范围与温度变化呈正相关。但短叶假木贼目前、新和总适宜分布范围与气温和降水量变化的相关性均不显著。裸果木目前适宜分布范围与年降水量变化的偏相关性、新适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关性均不显著。此外, 梭梭目前、新和总适宜分布范围与年均气温和降水量变化的相关性, 膜果麻黄目前适宜分布范围与降水量变化的偏相关性均不显著($P > 0.05$) (表6)。

6种植物分布范围与年均气温和年降水量变化的多元线性回归关系中, 已利用Hildreth-Lu方法排除了气温和降水变量的自相关性。多元回归分析表明, 短叶假木贼、梭梭、喀什膜果麻黄新适宜和总适宜分布范围及裸果木和膜果麻黄目前分布范围随年降水量的增加而下降; 驼绒藜分布范围随降水量的增加而增加; 膜果麻黄、驼绒藜、喀什膜果麻黄适宜分布范围

表5 A2和B2气候情景下6种植物地理分布范围最小值、最大值和中位数

Table 5 The minimal, maximum and median of distribution of six plants under A2 and B2 climate change scenarios

Species	Climate scenarios	Distrib- ution region	Observation	Base- line	1991–2020a			2021–2050a			2051–2080a			2081–2100a		
					Min	Max	Median	Min	Max	Median	Min	Max	Median	Min	Max	Median
DYJMZ	A2	MQSY	100	76	24	67	44	23	70	44	12	67	44	7	61	36
		XSY	0	12	52	122	77	58	135	92	65	152	89	58	132	81
		ZSY	100	89	87	189	118	95	200	133	88	213	131	68	191	114
	B2	MQSY	100	76	23	66	43	23	70	44	12	68	44	11	65	42
		XSY	0	12	50	123	79	61	136	94	65	152	96	59	142	88
		ZSY	100	89	84	189	120	95	201	136	88	212	142	80	206	129
LGM	A2	MQSY	100	72	13	56	38	10	53	32	7	49	23	5	31	14
		XSY	0	13	47	142	89	35	122	70	38	149	67	27	147	73
		ZSY	100	85	66	186	120	50	175	101	47	191	93	32	171	88
	B2	MQSY	100	72	13	55	36	9	53	30	7	51	26	7	41	21
		XSY	0	13	47	142	84	39	124	71	41	135	71	35	150	74
		ZSY	100	85	65	186	114	57	176	99	53	185	96	32	171	88
SS	A2	MQSY	100	76	14	64	41	16	72	41	11	74	41	11	61	36
		XSY	0	15	26	74	45	23	98	50	23	91	46	17	71	38
		ZSY	100	91	41	138	86	39	166	91	34	165	87	28	127	75
	B2	MQSY	100	76	14	66	41	16	71	42	11	75	42	11	62	40
		XSY	0	15	25	76	46	22	96	52	23	105	50	21	77	44
		ZSY	100	91	40	142	89	37	164	94	33	171	93	32	136	83
MGMH	A2	MQSY	100	79	16	62	40	13	63	37	12	61	29	11	52	26
		XSY	0	19	34	93	49	30	83	48	27	78	46	23	64	40
		ZSY	100	98	50	153	89	43	141	86	39	132	74	38	109	65
	B2	MQSY	100	79	16	62	40	13	64	37	12	62	33	11	54	30
		XSY	0	19	33	93	49	29	85	49	24	76	48	25	63	43
		ZSY	100	98	49	153	89	42	144	89	36	134	82	36	118	73
TRL	A2	MQSY	100	62	20	39	31	15	38	24	9	31	16	7	22	13
		XSY	0	19	57	147	95	47	113	79	29	112	65	31	96	49
		ZSY	100	81	76	186	126	63	151	103	38	142	79	43	118	63
	B2	MQSY	100	62	19	36	30	15	36	24	10	31	18	11	26	17
		XSY	0	19	55	121	93	50	109	79	42	111	71	43	116	62
		ZSY	100	81	74	155	125	66	146	103	56	142	89	53	143	77
KSMGMH	A2	MQSY	100	69	4	35	10	2	28	3	1	19	2	0	10	2
		XSY	0	18	10	59	14	6	43	6	4	34	4	3	25	3
		ZSY	100	87	22	90	24	7	81	9	4	72	5	4	55	5
	B2	MQSY	100	69	4	32	8	1	22	3	2	16	3	1	10	2
		XSY	0	18	8	44	9	4	31	4	2	24	3	1	19	2
		ZSY	100	87	15	83	17	5	57	7	5	40	6	3	32	4

DYJMZ、LGM、SS、MGMH、TRL、KSMGMH、MQSY、XSY和ZSY同表4。

DYJMZ, LGM, SS, MGMH, TRL, KSMGMH, MQSY, XSY and ZSY see Table 4.

及梭梭和裸果木目前和总适宜分布范围随气温的增
加而减少；短叶假木贼目前适宜分布范围随年均气温
的升高而增加。但短叶假木贼、膜果麻黄和梭梭的分
布范围及裸果木新适宜和总适宜分布范围与年均气
温和年降水量变化的多元线性回归关系决定系数较
小(小于0.20) (表7)。

2.5 讨论

气候变化对不同物种分布范围将会产生不同的影响。

例如Midgley等(2003)模拟气候变化对物种分布影响
时发现，气候变化下28个物种中有5个失去了适宜分
布范围，12个分布范围减小。Peterson等(2002)模拟
气候变化时发现，气候变化下28个物种中23个发生
了迁移，13个则没有地理范围重叠。Erasmus等
(2002)模拟时发现，气候变化下南非17%的物种分布
范围扩展，78%范围缩小，3%没有反应，2%局地灭
绝。本研究结果表明，气候变化下，6种植物目前适宜
分布范围(平均值、中位数、最小值和最大值)减小，不

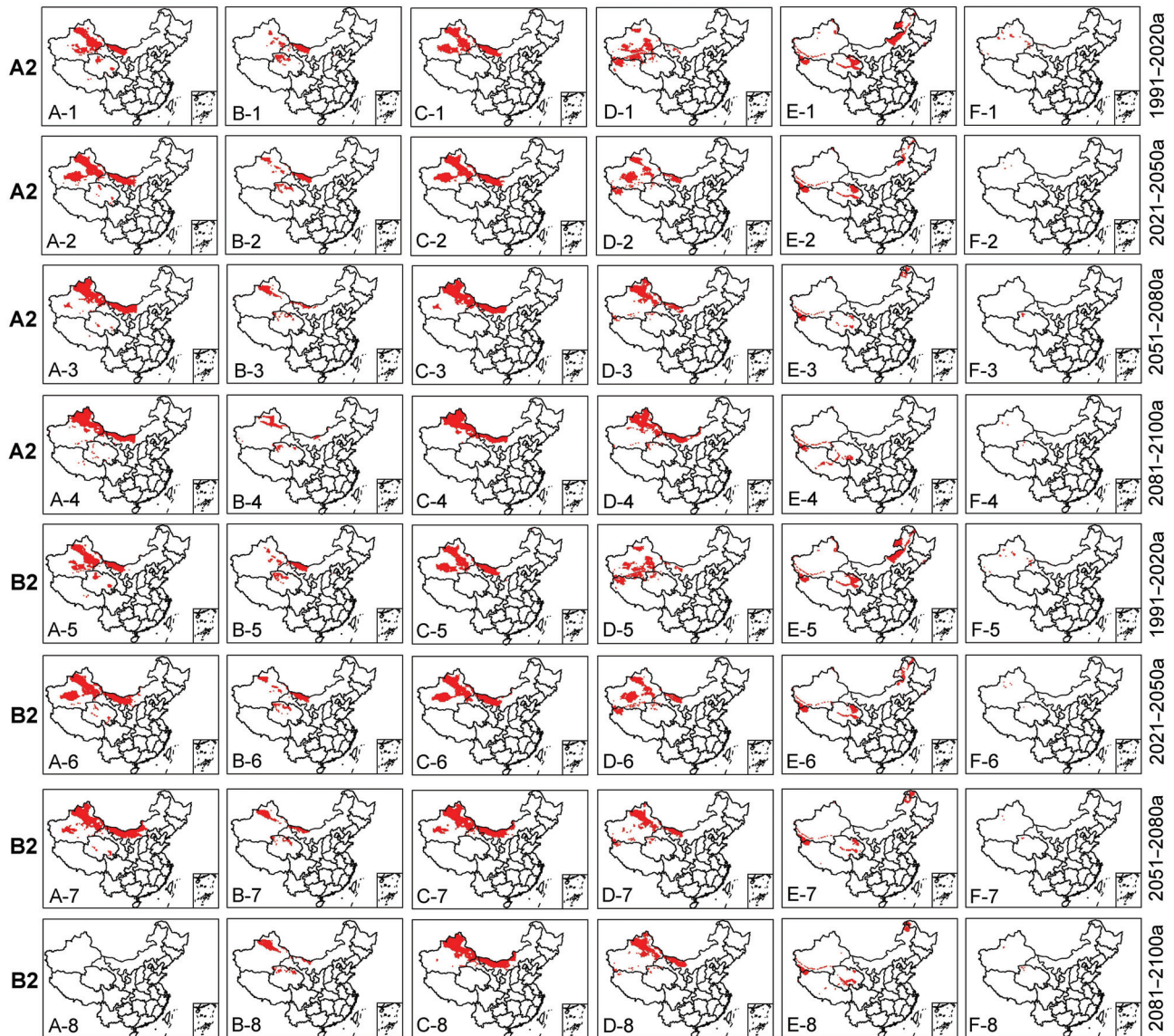


图2 A2和B2气候变化情景下6种植物分布范围的变化

A-1-A-8: 短叶假木贼; B-1-B-8: 裸果木; C-1-C-8: 梭梭; D-1-D-8: 膜果麻黄; E-1-E-8: 驼绒藜; F-1-F-8: 喀什膜果麻黄

Figure 2 The changing of distribution of six plant species under A2 and B2 climate change scenarios

A-1-A-8: *Anabasis brevifolia*; B-1-B-8: *Gymnocarpus przewalskii*; C-1-C-8: *Haloxylon ammodendron*; D-1-D-8: *Ephedra przewalskii*; E-1-E-8: *Ceratoides latens*; F-1-F-8: *Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*

同植物变化幅度不同, 其中喀什膜果麻黄减小幅度最大, 裸果木、驼绒藜和膜果麻黄次之, 短叶假木贼和梭梭较小。另外, 气候变化下, 6种植物新适宜及总适宜分布范围变化趋势不同, 其中短叶假木贼和梭梭新适宜及总适宜分布范围从1991-2020年到2051-2080年时段增加, 从2051-2080年到2081-2100年

时段下降, 其它植物新适宜及总适宜分布范围随气候变化程度的增加而减小。这可能是由于不同荒漠植物适宜的气候要素范围不同, 气候变化引起气候要素变化超出植物适应的范围, 导致目前分布范围的一些区域不再适宜, 不同植物分布特征及适宜气候要素范围不同导致在气候变化后改变趋势不同。另外, 气候变

表6 6种植物分布范围与我国年平均气温和降水量变化的相关系数

Table 6 The correlation coefficient between distribution region of six plants and the changing of annual mean temperature and annual mean precipitation in China

Species	Precipitation or air temperature change	Distri- bution region	A2				B2			
			Correlation coefficient	<i>P</i>	Partial correlation coefficient	<i>P</i>	Correlation coefficient	<i>P</i>	Partial correlation coefficient	<i>P</i>
DYJMZ	Precipitation change	MQSY	-0.139	0.147	0.022	0.822	-0.042	0.663	0.008	0.932
		XSY	0.149	0.119	-0.040	0.674	0.147	0.124	-0.072	0.457
		ZSY	0.051	0.599	-0.020	0.839	0.094	0.328	-0.048	0.617
	Air temperature change	MQSY	-0.235	0.013	-0.193	0.044	-0.091	0.342	-0.081	0.398
		XSY	0.271	0.004	0.233	0.014	0.380	0.000	0.360	0.000
		ZSY	0.099	0.300	0.088	0.362	0.249	0.008	0.236	0.013
LGM	Precipitation change	MQSY	-0.505	0.000	-0.118	0.221	-0.368	0.000	-0.128	0.183
		XSY	-0.028	0.770	-0.044	0.649	-0.069	0.471	-0.124	0.196
		ZSY	-0.234	0.013	-0.072	0.456	-0.203	0.032	-0.114	0.235
	Air temperature change	MQSY	-0.668	0.000	-0.517	0.000	-0.516	0.000	-0.406	0.000
		XSY	0.008	0.936	0.035	0.719	0.067	0.487	0.123	0.201
		ZSY	-0.278	0.003	-0.169	0.078	-0.203	0.032	-0.115	0.233
SS	Precipitation change	MQSY	-0.021	0.830	0.061	0.529	0.053	0.582	0.066	0.495
		XSY	-0.108	0.257	-0.122	0.204	-0.064	0.505	-0.145	0.132
		ZSY	-0.075	0.433	-0.046	0.634	-0.014	0.886	-0.055	0.568
	Air temperature change	MQSY	-0.100	0.294	-0.115	0.230	-0.005	0.958	-0.040	0.682
		XSY	-0.025	0.794	0.062	0.523	0.108	0.261	0.168	0.079
		ZSY	-0.062	0.518	-0.017	0.863	0.061	0.524	0.081	0.400
MGMH	Precipitation change	MQSY	-0.364	0.000	-0.104	0.277	-0.255	0.007	-0.101	0.291
		XSY	-0.061	0.524	0.095	0.325	0.032	0.735	0.112	0.245
		ZSY	-0.234	0.014	0.005	0.959	-0.125	0.192	0.010	0.917
	Air temperature change	MQSY	-0.447	0.000	-0.296	0.002	-0.325	0.000	-0.231	0.015
		XSY	-0.199	0.036	-0.212	0.026	-0.115	0.230	-0.156	0.103
		ZSY	-0.361	0.000	-0.283	0.003	-0.249	0.008	-0.217	0.023
TRL	Precipitation change	MQSY	-0.462	0.000	0.182	0.057	-0.323	0.001	0.132	0.168
		XSY	-0.338	0.000	0.225	0.018	-0.105	0.273	0.254	0.007
		ZSY	-0.398	0.000	0.250	0.008	-0.184	0.053	0.269	0.005
	Air temperature change	MQSY	-0.822	0.000	-0.775	0.000	-0.744	0.000	-0.714	0.000
		XSY	-0.698	0.000	-0.671	0.000	-0.535	0.000	-0.570	0.000
		ZSY	-0.784	0.000	-0.755	0.000	-0.662	0.000	-0.679	0.000
KSMGMH	Precipitation change	MQSY	-0.404	0.000	0.065	0.500	-0.285	0.002	0.089	0.354
		XSY	-0.397	0.000	-0.034	0.724	-0.281	0.003	-0.030	0.759
		ZSY	-0.419	0.000	-0.024	0.806	-0.298	0.001	-0.016	0.866
	Air temperature change	MQSY	-0.670	0.000	-0.587	0.000	-0.640	0.000	-0.603	0.000
		XSY	-0.573	0.000	-0.450	0.000	-0.483	0.000	-0.411	0.000
		ZSY	-0.616	0.000	-0.498	0.000	-0.536	0.000	-0.466	0.000

DYJMZ、LGM、SS、MGMH、TRL、KSMGMH、MQSY、XSY和ZSY同表4。

DYJMZ, LGM, SS, MGMH, TRL, KSMGMH, MQSY, XSY and ZSY see Table 4.

表7 6种植物分布区范围与年均气温变化和年降水量变化的多元回归系数**Table 7** The linear regression coefficient between distribution patterns of six plants and annual mean temperature and annual mean precipitation change in China

Species	Distribution region	Climate scenarios	B ₀	B ₁	B ₂	R ²	D-W
DYJMZ	MQSY	A2	46.518	0.017	-1.877	0.056	1.862
		B2	45.567	0.007	-0.934	0.008	1.920
	XSY	A2	78.195	-0.056	4.001	0.075	1.524
		B2	73.982	-0.107	8.060	0.148	1.588
	ZSY	A2	124.764	-0.039	2.104	0.010	1.684
		B2	119.567	-0.101	7.111	0.064	1.749
LGM	MQSY	A2	41.843	-0.072	-4.423	0.454	1.850
		B2	41.549	-0.087	-4.176	0.278	1.814
	XSY	A2	75.925	-0.066	0.637	0.002	1.709
		B2	73.647	-0.191	2.653	0.020	1.721
	ZSY	A2	117.769	-0.133	-3.833	0.082	1.864
		B2	116.709	-0.222	-3.127	0.054	1.820
SS	MQSY	A2	42.495	0.051	-1.187	0.014	1.792
		B2	41.538	0.060	-0.500	0.004	1.810
	XSY	A2	47.960	-0.125	0.760	0.016	1.853
		B2	46.293	-0.164	2.679	0.032	1.956
	ZSY	A2	90.401	-0.080	-0.352	0.006	1.853
		B2	87.775	-0.105	2.171	0.007	1.904
MGMH	MQSY	A2	44.213	-0.072	-2.578	0.208	1.887
		B2	44.650	-0.078	-2.539	0.115	1.891
	XSY	A2	52.203	0.074	-2.053	0.048	1.864
		B2	51.602	0.093	-1.843	0.026	1.776
	ZSY	A2	96.349	0.006	-4.619	0.130	1.954
		B2	96.297	0.014	-4.386	0.062	1.920
TRL	MQSY	A2	33.536	0.059	-4.767	0.686	1.491
		B2	33.826	0.047	-5.033	0.561	1.646
	XSY	A2	100.174	0.244	-11.598	0.513	1.551
		B2	96.767	0.285	-10.542	0.332	1.558
	ZSY	A2	133.693	0.304	-16.403	0.638	1.680
		B2	130.645	0.337	-15.642	0.479	1.718
KSMGMH	MQSY	A2	21.766	0.032	-4.380	0.451	1.310
		B2	23.099	0.047	-5.552	0.415	1.383
	XSY	A2	160.222	-0.120	-21.458	0.329	2.124
		B2	163.076	-0.114	-24.305	0.234	2.159
	ZSY	A2	182.046	-0.088	-25.872	0.380	2.056
		B2	186.208	-0.066	-29.884	0.287	2.083

DYJMZ、LGM、SS、MGMH、TRL、KSMGMH、MQSY、XSY和ZSY同表4。B₀: 常数; B₁: 年降水量变化; B₂: 年均气温变化; R²: 决定系数; D-W: Durbin-Watson统计量值

DYJMZ, LGM, SS, MGMH, TRL, KSMGMH, MQSY, XSY and ZSY see Table 4. B₀: Constant; B₁: Change of annual mean precipitation; B₂: Change of annual mean temperature; R²: Determine coefficient; D-W: The value of Durbin-Watson statistic

化下降水量过低(或过高)也可能会使荒漠植物不再适宜, 不同植物适宜降水量范围差异也会引起气候变化后其分布范围改变趋势不同(Woodward, 1987)。此外, 由于温度过高或降水量不适宜或气候综合指标不

适宜而限制这些植物分布, 气候变化下这些限制因素改变将可能会使这些植物分布范围扩展。当然, 气候要素空间不均匀性和复杂地形的影响也会使这些植物的分布范围在气候变化下改变趋势不同。

许多研究表明, 气候变化将会导致物种向高海拔和高纬度地区迁移(Midgley et al., 2002; Thomas et al., 2004), 例如Wilson等(2005)发现平均温度升高 1.3°C , 巴西中部 16 种蝴蝶分布的海拔高度升高 212 m。当然并不是所有物种都会向高海拔和高纬度地区迁移; Thuiller(2003)发现气候变化下大部分物种都会按预期发生向北迁移, 但分布在北部的物种例外。Peterson等(2002)发现, 气候变化下cape floristic 区域的一些物种会向西南方向迁移, 另有一些物种会向西部迁移。Erasmus等(2002)发现, 气候变化下南非动物将会主要向西移动。Shafer等(2001)发现, 气候变化下物种会向多个方向迁移。本研究结果表明, 气候变化下喀什膜果麻黄和驼绒藜适宜分布范围会极大地减小并破碎化, 其它植物分布区的南部及东南一些区域将不再适宜, 向高纬度、柴达木盆地和一些高海拔区域扩展。研究表明, 气候变化下这些植物分布范围的南部一些区域将不再适宜, 新适宜分布范围向北部或西北部或高海拔的一些区域扩展, 如帕米尔高原、昆仑山、阿尔金山和祁连山等。另外, 气候变化后驼绒藜的新适宜分布区向东北大兴安岭北侧扩展, 可能是因为这种植物分布范围广泛, 气候变化下大兴安岭北侧的一些区域将会变成半干旱区(吴建国和吕佳佳, 2009)。这说明气候变化下一些适应范围广的植物将可能向东北高纬度区域扩展。气候变化下植物分布格局改变的主要原因也可能是目前适宜区气候要素存在空间差异及气候变化空间差异, 或者气候变化下降雨量减少致使以前湿润区变成干旱区, 荒漠植物将可能扩展到以前的湿润区, 而气候变化下原先干旱区的降水量增加后, 如果更适宜其它植物生长, 那么荒漠植物与其它植物存在竞争也可能会导致分布格局改变。因此, 气候变化下这些植物分布格局的改变是多种因素共同作用的结果。当然, 观测分布范围记录不准确导致在基准情景下分布过小(或插值造成误差)也会使结果有一定的误差。

目前, 全球年均气温变化与物种分布的关系备受关注。例如, Hitz和Smith(2004)发现全球温度增加 3°C , 将会有一半的自然保护区无法实现它原有的保护目标(尤其对保护物种影响较大)。Leemans和Eichhout (2004)发现全球温度增加 $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$, 许多物种适应气候变化能力将会非常有限。本研究结果表明, 6 种植物分布范围与我国年均气温变化的关系较为复

杂, 一些植物分布范围与年平均气温及降水量变化的相关性不显著, 多数植物分布范围并没有随年均气温和年降水量的变化而改变, 一些植物分布范围与年均气温和降水量变化的多元回归关系较弱。以上结果说明, 气候变化后这些植物分布范围与年均气温和年降水量变化可能呈非线性复杂关系, 并且这些植物分布范围的改变可能与其它气候要素密切相关。我们认为, 以区域年平均气温或降水量来分析气候变化对植物分布的影响将可能存在很大的不确定性。

需要指出的是, 影响植物分布的因素很多。本研究分析的气候变化对荒漠植物分布的影响实际上反映了气候变化后这些植物适宜气候分布范围的变化, 这些变化是气候变化后植物分布范围改变的前提。另外, 本研究中植物分布格点的分辨率较粗, 没有考虑土地利用变化及土壤、地下水位、动植物间关系和迁移的影响。如果考虑土壤因素的限制, 气候变化后这些植物分布范围减小幅度会更大, 新适宜分布范围将会更小。同时, 由于这些植物分布比较复杂, 本研究收集的有关植物分布数据不是非常全面准确, 气候变化情景也具有不确定性, 并且利用GIS软件进行气候要素和物种分布数据插值时会产生误差等, 均可能给研究结果带来一定的误差和不确定性, 因此需要进一步改进完善。尽管如此, 在目前的认识和技术条件下, 本研究探索了气候变化后这些植物分布变化的一些趋势, 为制定气候变化后这些植物的保护措施具有一定的参考意义。

3 结论

本研究得出以下结论。(1)气候变化下, 荒漠植物适宜气候要素范围不同、限制植物分布的气候要素因素的改变及气候要素空间不均匀性等共同作用, 使不同荒漠植物目前适宜分布范围缩小趋势及新适宜和总适宜分布范围变化趋势不同; 气候变化下, 保护荒漠植物及植被需要考虑荒漠植物的目前适宜和新适宜分布范围的变化趋势。(2)气候变化下, 多种因素共同影响使荒漠植物分布范围的南部一些区域不再适宜, 新适宜分布范围向北部或西北部或高海拔的帕米尔高原、昆仑山、阿尔金山和祁连山等一些区域扩展, 一些适应范围广的植物可能会向东北高纬度区域扩展。(3)气候变化下, 荒漠植物分布范围与年均气温和年

降水量变化呈非线性关系,植物分布范围改变可能与其它气候要素密切相关,以区域或全球年均气温或降水量变化等气候要素分析气候变化对植物分布的影响将有很大的不确定性。(4)本研究结果总体上反映了气候变化下这些植物适宜分布范围的变化趋势,对制定气候变化下这些植物的保护措施具有一定的参考意义,但需进一步改进完善。

参考文献

巴哈尔古丽,汪志军,郭仲军 (2005). 珍稀濒危植物裸果木地理分布与资源现状. *中国野生植物资源* **24**(4), 39–40.

查丽杭,苏志国,张国政,欧阳藩 (2002). 麻黄资源的利用与研究开发进展. *植物学通报* **19**, 396–405.

傅立国 (1989). 中国珍稀濒危植物. 上海: 上海教育出版社. pp. 93–94, 99–100.

郝占庆,代力民,贺红士 (2001). 气候变暖对长白山主要树种的潜在影响. *应用生态学报* **12**, 653–658.

胡式之 (1963). 中国西北地区的梭梭荒漠. *植物生态学与地植物学丛刊* **1**(1/2), 81–108.

蒋霞,倪健 (2005). 西北干旱区10种荒漠植物地理分布与大气气候的关系及其可能潜在分布区的估测. *植物生态学报* **29**, 98–107.

居辉,熊伟,许吟隆,林而达 (2005). 气候变化对我国小麦产量的影响. *作物学报* **31**, 1340–1343.

刘文华,王海燕,王伟峰,钟凌 (2006). 西北濒危动物资源现状与保护对策. *陕西师范大学学报(自然科学版)* **34**, 197–202.

刘永生,徐怀寿,孙继周 (2008). 对国家二级保护植物裸果木的调查与研究. *宁夏农林科技* (1), 16–16, 26–26.

马德滋,刘慧兰,胡福秀 (2006). 宁夏植物志(下卷)(第2版). 银川: 宁夏人民出版社. pp. 131–134.

内蒙古植物志编辑委员会 (1990). 内蒙古植物志(第2卷)(第2版). 呼和浩特: 内蒙古人民出版社. pp. 78–78, 332–332.

倪健,宋永昌 (1997). CO₂倍增条件下中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种分布区的可能变迁. *植物生态学报* **21**, 455–467.

青海植物志编辑委员会 (1999). 青海植物志. 西宁: 青海人民出版社. pp. 60–60, 187–187, 189–189.

汪之波,马金林 (2007). 珍稀濒危植物裸果木群落物种多样性及濒危原因初探. *天水师范学院学报* **27**(2), 55–57.

汪智军,李行斌,郭仲军,巴哈尔古丽 (2003). 新疆14种珍稀濒危植物资源现状及保护. *中国野生植物资源* **22**(2), 15–

16.

吴建国,吕佳佳 (2009). 气候变化对我国干旱区分布及其范围的潜在影响. *环境科学研究* **22**, 199–206.

新疆植物志编辑委员会 (1993,1996). 新疆植物志. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社. pp. 17–17, 71–71, 74–74, 92–92, 93–93, 218–218.

熊伟,许吟隆,林而达,卢志光 (2005). 两种温室气体排放方案下我国水稻产量变化模拟. *应用生态学报* **16**, 65–68.

许吟隆 (2005). 中国21世纪气候变化的情景模拟分析. *南京气象学院学报* **28**, 323–329.

许吟隆,黄晓莹,张勇,林万涛,林而达 (2005). 中国21世纪气候变化情景分析. *气候变化进展* **1**(2), 80–83.

许吟隆,薛峰,林一骅 (2002). 不同温室气体排放情景下中国21世纪地面气温和降水变化模拟分析. *气候与环境研究* **8**, 207–217.

易津,王学敏,乌仁其木格,张力君 (2003). 驼绒藜属植物生物学特性研究进展. *草地学报* **11**(2), 87–94.

张国中,满多清,王继和,杨自辉 (2008). 河西中麻黄地理分布与环境因子的关系. *甘肃林业科技* **33**(4), 6–11, 66–66.

张新时,杨莫安,倪文革 (1993). 植被的PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(三)——几种主要方法与PEP程序介绍. *植被生态学与地植物学学报* **17**, 97–109.

中国科学院兰州沙漠研究所 (1985). 中国沙漠植物志. 北京: 科学出版社. pp. 337–346, 446–446.

中国生物多样性国情研究报告编写组 (1998). 中国生物多样性国情研究报告. 北京: 中国环境科学出版社. pp. 1–6.

中国植物志编辑委员会 (1978). 中国植物志(第7卷). 北京: 科学出版社. pp. 471–471, 473–473.

中国植物志编辑委员会 (1979). 中国植物志(第25卷第2分册). 北京: 科学出版社. pp. 26–26, 140–140, 145–145.

中国植物志编辑委员会 (1996). 中国植物志(第26卷第2分册). 北京: 科学出版社. pp. 51–51.

Araújo MB, Pearson RG, Thuiller W, Erhard M (2005). Validation of species-climate impacts models under climate change. *Glob Chang Biol* **11**, 1504–1513.

Bakkenes M, Alkemade JRM, Ihle F, Leemans R, Latour JB (2002). Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Glob Chang Biol* **8**, 390–407.

Beaumont LJ, Hughes L, Poulsen M (2005). Predicting species distributions; use of climatic parameters in bioclim and its impacts on prediction of species current and future distribution. *Ecol Modell* **186**, 250–269.

Berry PM, Dawson TP, Harrison PA, Pearson RG (2002).

- Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Glob Ecol Biogeogr* **11**, 453–462.
- Coulston J, Riitters KH** (2005). Preserving biodiversity under current and future climates: a case study. *Glob Ecol Biogeogr* **14**, 31–38.
- Erasmus BFN, Vanjaarsveld SA, Chown LS, Kshatriya M, Wessels KJ** (2002). Vulnerability of south African animal taxa to climate change. *Glob Chang Biol* **8**, 679–693.
- Forsman JT, Mönkkönen M** (2003). The role of climate in limiting European resident bird populations. *J Biogeogr* **30**, 55–70.
- Hitz S, Smith J** (2004). Estimating global impacts from climate change. *Glob Environ Change* **14**, 201–218.
- Holdridge LR** (1967). Life Zone Ecology. Costa Rica: Tropical Science Center and Jose. pp. 206–206.
- Iverson LR, Prasad AM** (2001). Potential change in tree species richness and forest community types following climate change. *Ecosystems* **4**, 186–199.
- Kira TA** (1977). Climatologically interpretation of Japanese vegetation zones. In: Miyawaki A, Tüxen R, eds. Vegetation Science and Environmental Protection. Tokyo: Maruzen. pp. 21–30.
- Kutner MH, Nachtsheim CJ, Neter J** (2004). Applied Linear Regression Models, 4th edn. New York: McGraw-Hill Companies, Inc. pp. 492–501.
- Leemans R, Eickhout B** (2004). Another reasons for concern: regional and global impacts on ecosystem for different levels of climate change. *Glob Environ Change* **14**, 219–228.
- Loiselle BA, Jørgensen PM, Consiglio T, Jiménez I, Blake JG, Lohmann LG, Montiel OM** (2008). Predicting species distributions from herbarium collections: does climate bias in collection sampling influence model outcomes? *J Biogeogr* **35**, 105–116.
- Luoto M, Pöyry J, Heikkinen RK, Saarinen K** (2005). Uncertainty of bioclimatic envelope models based on the geographical distribution of species. *Glob Ecol Biogeogr* **14**, 575–584.
- Matsui T, Tsutomu Y, Tomoki N, Nakaya T, Taoda H, Yoshinaga S, Daimaru H, Tanaka N** (2004). Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. *J Veg Sci* **15**, 605–614.
- Mccarty JP** (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conserv Biol* **15**, 320–331.
- Midgley GF, Hannah L, Millar D, Rutherford MC, Powrie LW** (2002). Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. *Glob Ecol Biogeogr* **11**, 445–451.
- Midgley GF, Hannah L, Millar D, Thuiller W, Booth A** (2003). Developing regional and species-level assessment of climate change impacts on biodiversity in the cape floristic region. *Biol Conserv* **112**, 87–97.
- Muñoz J, Felícisimo ÁM** (2004). Comparison of statistical methods commonly used in predictive modeling. *J Veg Sci* **15**, 285–292.
- Parmesan C, Yehe G** (2003). Globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**, 37–42.
- Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Sánchez-Cordero V, Soberón J, Buddemeier RH, Stockwell DRB** (2002). Future projections for Mexican fauns under climate change scenarios. *Nature* **416**, 626–629.
- Pyke CR, Andelman SJ, Midgley G** (2005). Identifying priority areas for bioclimatic representation under climate change: a case study for Proteaceae in the cape floristic region, South Africa. *Biol Conserv* **125**, 1–9.
- Root TL, Price JT, Hall KR, Schneider SH, Rosenzweig C, Pounds JA** (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* **421**, 57–60.
- Shafer SL, Bartlein PJ, Thompson RS** (2001). Potential changes in the distribution of western north America tree and shrub taxa under future climate scenarios. *Ecosystems* **4**, 209–215.
- The Intergovernmental Panel On Climate Change** (2007). Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press. pp. 213–249.
- Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BFN, de Siqueira MF, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld AS, Midgley GF, Miles L, Ortega-Huerta MA, Peterson AT, Phillips OL, Williams SE** (2004). Extinction risk from climate change. *Nature* **427**, 145–148.
- Thorntwaite CW** (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev* **38**, 57–94.
- Thuiller W** (2003). Biomod-optimizing predictions of species distribution and projecting potential future shifts under global change. *Glob Chang Biol* **9**, 1353–1362.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C,**

- Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Gudberg O, Bairlein F** (2002). Ecological response to recent climate change. *Nature* **416**, 389–395.
- Williams P, Hannah L, Andelman S, Midgley G, Araújo M, Hughes G, Manne L, Martinez-Meyer E, Pearson R** (2005). Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the cape Proteaceae. *Conserv Biol* **19**, 1063–1074.
- Williams SE, Bolitho EE, Fox S** (2003). Climate change in Australian tropical rainforests; an impending environmental catastrophe. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* **270**, 1887–1892.
- Wilson RJ, Gutiérrez D, Gutiérrez J, Martínez D, Agudo R, Monserrat VJ** (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecol Lett* **8**, 1138–1146.
- Woodward FI** (1987). *Climate and plant distribution*. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 62–63.

Potential Effects of Climate Change on the Distribution of Six Desert Plants in China

Jianguo Wu^{*}, Jiajia Lü, Qiaofu Zhou

Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Understanding the effects of climate change on the distribution of species is crucial for the conservation of biodiversity. The effects of climate change on the distribution patterns of *Anabasis brevifolia*, *Gymnocarpos przewalskii*, *Haloxylon ammodendron*, *Ephedra przewalskii*, *Ceratoides latens* and *Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica* in China were analyzed by using the classification and regression tree (CART) niche model and climate change scenarios of A2 and B2. Climate change in China will decrease the current distribution of these plants greatly. *A. brevifolia* or *H. ammodendron* will show a new suitable distribution or total suitable distribution region that will increase from 1991–2020 to 2051–2080, then will decrease from 2051–2080 to 2081–2100, whereas the new suitable distribution or total suitable distribution region of the other plants will decrease from 1991–2020 to 2081–2100. In addition, the current distribution region of *E. przewalskii* var. *kaschgarica* or *C. latens* will be fragmented; the southwest, southeast or south region of the current distribution of the other plants will be reduced; and the new regions will expand towards west or northwest, north, northeast of the current distribution region, towards the southwest region of Qinghai province, Konglun mountains, A ErJin mountain or Qilian mountain. The change in the current distribution, new suitable distribution or total suitable distribution region of the plants is poorly related to the change in annual mean air temperature or precipitation in China, except for the correlation between the distribution region of *C. latens* or *E. przewalskii* var. *kaschgarica* and change in annual mean temperature in China. The linear regression relationship between the change in the distribution region of plants and annual mean temperature or annual mean precipitation in China was poor, except for the relationship between the change in the distribution region of *C. latens* or *E. przewalskii* var. *kaschgarica* or the current distribution region of *G. przewalskii* and change in annual mean air temperature or annual precipitation in China. Climate change in China will cause a change in spatial distribution pattern of plants and decrease the current distribution region and increase the new suitable distribution region of the plants in the near future. With the increasing extent of climate change, climate change in China will cause a decrease in expanding distribution region or total distribution region.

Key words *Anabasis brevifolia*, *Ceratoides latens*, climate change, endangered plant, *Ephedra przewalskii*, *Ephedra przewalskii* var. *kaschgarica*, *Gymnocarpos przewalskii*, *Haloxylon ammodendron*

Wu JG, Lü JJ, Zhou QF (2010). Potential effects of climate change on the distribution of six desert plants in China. *Chin Bull Bot* **45**, 723–738.

* Author for correspondence. E-mail: wujg@craes.org.cn