

气候变化背景下近30年祁连山高寒荒漠分布时空变化

张富广 曾彪* 杨太保

兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘 要 高寒荒漠作为青藏高原植被带谱的顶端类型广泛分布于祁连山高海拔地区, 其生长和分布条件与周边区域差异明显, 对气候变化的响应更为敏感, 且研究较少。该文利用1990年以来的Landsat TM、OLI数据, 采用决策树分类和人工目视解译方法, 提取了祁连山高寒荒漠的分布范围。结合气候变化情况, 综合分析了气候变化背景下近30年祁连山高寒荒漠分布的动态变化及其时空差异。结果表明: (1)近30年增温气候变化过程中, 祁连山高寒荒漠分布范围呈萎缩趋势, 萎缩速率约为 $348.3 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 萎缩变化幅度表现为西段>中段>东段, 局部地段上存在扩张现象。上述现象导致高寒荒漠下界平均海拔以每10年约15 m的平均速率向更高海拔推进, 向上推进幅度为西段>东段>中段; (2)受水热条件控制, 近30年祁连山高寒荒漠分布动态变化集中分布在低坡度地区。由于水热背景条件的空间差异, 祁连山东段和中段阳坡上高寒荒漠分布动态变化大于阴坡, 而在祁连山西段表现相反; (3) 1990年以来, 祁连山增温显著, 降水量微弱增加。在气候变化以及区域地形限制共同影响下, 祁连山高寒荒漠分布变化时空差异明显, 且过渡带上归一化植被指数与气温相关性高于降水量。以上结果表明, 气候变化影响祁连山高寒荒漠分布动态变化及其空间差异, 但气温是主要的影响因子, 增温促进了高寒荒漠下接植被带主体高寒草甸的生长。

关键词 高寒荒漠; 时空差异; 气候变化; 遥感监测; 祁连山

张富广, 曾彪, 杨太保 (2019). 气候变化背景下近30年祁连山高寒荒漠分布时空变化. 植物生态学报, 43, 305–319. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0241

Spatiotemporal distribution changes in alpine desert belt in Qilian Mountains under climate changes in past 30 years

ZHANG Fu-Guang, ZENG Biao*, and YANG Tai-Bao

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract

Aims Alpine desert, as the top part of the vertical vegetation spectrum of the Qinghai-Xizang Plateau, is widely distributed in the high altitude zones in the Qilian Mountains (QLM). Its distribution and growth conditions are different from the surrounding area. It is more sensitive to climate change but rarely being studied. In this study, we focused on the dynamic changes and spatiotemporal differences of the alpine desert belt in the QLM under the warming climates from the 1990s to the 2010s.

Methods The distribution changes in the alpine desert belt in the QLM during the past three decades were obtained from the thematic mapper and the operational land imager remote sensing digital images by using the decision tree classification and artificial visual interpretation. Spatiotemporal differences of the alpine desert distribution were studied by the overlay analysis. Meanwhile, the relationships between the changes and climates were explored using correlation analysis.

Important findings The results indicated that the alpine desert shrank gradually and lost its area by approximately $348.3 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ in the QLM with climate warming in the past 30 years. The amplitude of the shrinkage increased from east to west. However, its areas expanded in some sections. Collectively, the low boundary of the alpine desert belt moved upwards to higher altitudes at a velocity of 15 m per decade. The maximum upward-shifting amplitude lied in the western QLM, followed by the eastern and middle QLM. The vertical zonal shifting

收稿日期Received: 2018-09-27 接受日期Accepted: 2019-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(41871075)和国家基础科学人才培养资助项目(J1210065)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41871075), and the Fostering Talents Project in National Basic Science (J1210065).

* 通信作者Corresponding author (zengb@lzu.edu.cn)

was modulated by topography-induced difference in local hydrothermal conditions. The distribution shifts in the alpine desert belt were mainly concentrated in the gentle slope regions. Because of the differences of hydrothermal background, the position shifts were greater in the sunny aspects than in the shady aspects in the eastern and middle QLM, while opposite in the western QLM. The differences in the hydrothermal conditions and regional topography led to the spatiotemporal change differences of the alpine desert distribution. The correlation between the normalized differential vegetation index and climate factors in the transition zone showed that temperature was the main factor affecting the dynamics and spatial differences of the alpine desert belt in the QLM, and climate warming facilitated the alpine meadow below the alpine desert belt by releasing the low temperature limitation on the vegetation growth.

Key words alpine desert belt; spatiotemporal difference; climate change; remote sensing monitor; Qilian Mountains

Zhang FG, Zeng B, Yang TB (2019). Spatiotemporal distribution changes in alpine desert belt in Qilian Mountains under climate changes in past 30 years. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 305–319. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0241

植被是全球气候变化的指示器(Zhang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2015), 也是陆地生态系统与气候变化密切相关的主要表现形式。当前快速升温的气候变化过程(Stocker *et al.*, 2013)已经并正在引起区域乃至全球尺度的地表植被覆盖变化, 并引起了诸多的生态环境问题(Tchebakova *et al.*, 2010; Walther, 2010; Ni, 2011; Stocker *et al.*, 2013; Arneth, 2015)。而受寒冷气候控制的高寒地区, 其植被生长和分布对气候变化的响应可能更为敏感(Aerts *et al.*, 2006; 朱文泉等, 2007; Chen *et al.*, 2011; Qin *et al.*, 2013)。

以气候寒冷为共同特征的高纬度和高海拔地区, 其植被在气候变化驱动下, 不仅表现出生长量和覆盖度的量变, 而且其典型植被类型的分布范围相比其他地区也发生了更为显著的变化, 并由此带来了水平和垂直梯度上植被带谱的变化(贾庆宇等, 2010; 孙建和程根伟, 2014)。青藏高原作为典型的高海拔地区, 其特殊的地理位置和地貌特征使其成为许多天气系统的策源地和改造场, 其地表覆盖变化能够对区域乃至全球的气候系统产生重大影响(Wang *et al.*, 2011; 马耀明等, 2014)。高寒荒漠作为青藏高原植被带谱的顶端类型, 广泛分布于青藏高原的高山区, 包含冰雪带和亚冰雪稀疏植被带。气候变化对该地区植被分布产生了重要影响。由于高寒荒漠植被稀少, 其分布范围主要受其下接植被带的影响。在高原中部和北部祁连山地区, 高寒荒漠带下接高山草甸带, 其主体为高寒蒿草草甸。高寒荒漠和高山草甸在植被盖度和地表反射特征上具有显著差异, 自然边界明显。

祁连山作为青藏高原北缘的重要组成部分, 是典型的高寒半干旱生态系统, 是高寒荒漠的主要分布区。对该地区高寒荒漠的动态监测与分析, 能够

为研究更大尺度的青藏高原高寒荒漠带的变化提供重要借鉴。同时, 祁连山位于青藏高原区、西北内陆干旱区和东部季风湿润区三大自然区的交汇处, 其植被覆盖对全球和区域气候变化同样具有高度的敏感性。研究表明, 祁连山生态环境在近几十年气候变暖的背景下也发生了显著变化(刘晶等, 2012; 汪有奎等, 2012; 姚俊强等, 2013)。此外, 祁连山地区的地理格局和气候变化十分复杂, 环境背景和生理特性的差异也很大, 故该地区气候变化对植被分布的影响必然存在显著的时空差异, 这些差异为全面理解气候快速变化下高寒荒漠分布特征及其动态变化规律提供了绝佳的条件。且祁连山地区人类活动相对较少, 为观测纯自然过程下高寒区植被带谱变化提供了可能。

越来越多的研究关注高原植被与气候之间的相互反馈作用(于海英和许建初, 2009; 邹婵, 2011; 刘振元等, 2017; Teste *et al.*, 2017)。但由于数据和工作量的制约, 更多的研究是在大尺度低分辨率遥感监测基础上研究其关联关系, 或者是基于统计学的区域气候生物模型的模拟, 而针对植被带谱的高分辨率遥感监测和考虑局部地形与土壤条件的模拟研究很少(Jahan & Gan, 2011)。少量的研究也主要关注于高原高山草甸带和高山草原带植物生长状况及其与气候间关系的定量反演, 对其分布范围的讨论相对较少(Mu *et al.*, 2013; 周伟等, 2014)。

本文利用长时间序列、空间分辨率为30 m的Landsat TM、OLI数据提取1990年以来祁连山高寒荒漠分布范围, 分析气候变化背景下高寒荒漠分布动态变化特征及其时空差异, 为全球植被与气候响应模式的完善提供区域尺度的关键数据, 同时为气候背景下地区生态问题评估和生态建设提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

祁连山位于青藏高原东北缘, 横跨青海、甘肃两省, 东起乌鞘岭, 西至当金山口, 北邻河西走廊, 南接柴达木盆地(图1)。祁连山由多条西北-东南走向的宽谷和平行山系组成, 地势西高东低。祁连山区自然条件复杂, 水热条件差异大, 年平均气温 0.6°C , 年降水量 $400\text{--}700\text{ mm}$, 属典型的高原大陆性气候。祁连山区内河流众多, 且植被分布呈现独特的垂直地带性特征, 土壤系统也具有明显的垂直带谱。本研究根据祁连山区环境背景和水热条件差异(Chen & Peng, 1994; 戴声佩等, 2010), 将其分为三部分: 从乌鞘岭至民乐为东段, 从民乐至酒泉为中段, 从酒泉至当金山口为西段。高寒荒漠作为研究区内植被带谱的顶端类型, 其下接高寒草甸带, 高寒草甸的萎缩与扩张直接影响高寒荒漠下界的动态变化。

1.2 数据源及数据处理

1.2.1 TM/OLI遥感影像及预处理

选用美国地质勘探调查局USGS提供的空间分辨率为 30 m 的Landsat TM/OLI影像。选取夏季7、8月份植被生长最好、积雪覆盖影响小的时期, 且云覆盖量低(小于 10%)的影像。并对有云图像利用相邻

时期影像进行裁剪和补充。对选取的遥感影像进行了系统辐射校正和地面控制点几何精校正, 并利用数字高程模型(DEM)进行了地形校正。

1.2.2 气候数据及预处理

选择由中国气象局气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的祁连山区及周边记录连续的36个气象站点(图1), 获取1990–2015年月平均气温和降水数据。由于研究区分布的站点稀少且空间分布不均, 同时研究区地形复杂, 基于气象站点的“点状”分析不能有效地反映山地系统的气候变化情况, 故本文采用气象插值模型ANSPLINE 4.3对月值气象数据进行插值。

1.2.3 数字高程模型及预处理

选用美国国家航空和航天局NASA提供的空间分辨率为 30 m 的ASTER GDEM V2数据。

同时根据DEM数据计算了坡度、坡向数据, 作为地形分析基础数据。

1.2.4 归一化植被指数(NDVI)数据及预处理

选取全球监测与模型模拟组(GIMMS)提供的祁连山地区1990–2006年 8 km 空间分辨率的15天合成的先进型甚高分辨辐射仪(AVHRR) NDVI数据和2000–2015年 250 m 空间分辨率的16天合成的中分

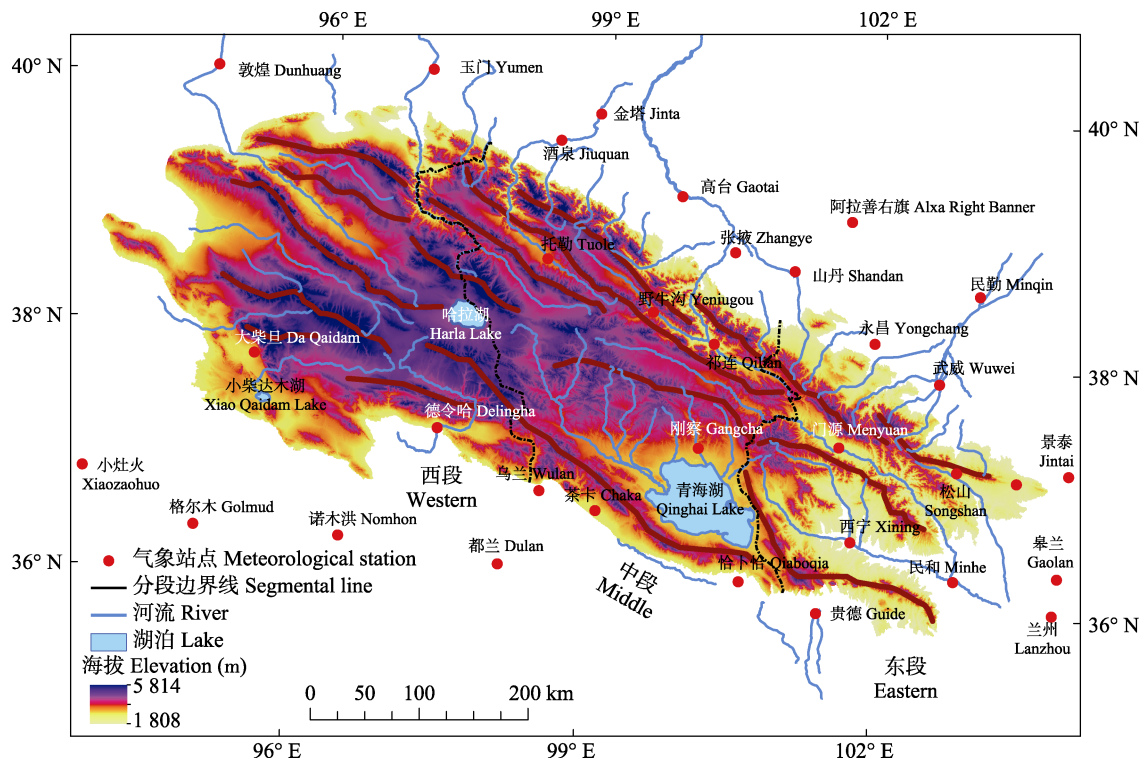


图1 祁连山高寒荒漠研究区位置图。

Fig. 1 Study area of the alpine desert belt in the Qilian Mountains.

分辨率成像光谱仪(MODIS) *NDVI*数据。对2000–2006年GIMMS *NDVI*和MODIS *NDVI*重叠时期内的两组数据进行一致性检验(表1)。结果显示两者相关系数均大于0.7, 表明研究区GIMMS *NDVI*和MODIS *NDVI*时间序列数据具有很好的一致性。

采用ENVI软件将GIMMS *NDVI*数据重投影为阿尔伯斯等面积投影, 利用研究区矢量边界范围进行裁剪处理。将MODIS *NDVI*数据采用MRT (MODIS Reprojection Tool)进行拼接和重投影为阿尔伯斯等面积投影, 裁剪出研究区范围的数据。对GIMMS *NDVI*和MODIS *NDVI*数据集采取降噪处理(曾彪, 2008; Eklundh & Jönsson, 2010; 邓少福, 2013)。对于降噪处理后的*NDVI*数据进行月最大值合成(MVC), 得到1990–2015年每月的*NDVI*序列数据集。

普遍认为*NDVI*最大值小于0.1的像元为植被稀疏区或无植被区(Tucker, 1986; Tucker & Sellers, 1986)。由于*NDVI*时间序列将被用于监测过渡带上植被变化及其动态趋势, 本文仅选取1990–2015年*NDVI*月最大值大于0.1的像元。对于超出月平均*NDVI*二倍标准差的像元进行剔除, 并用月平均*NDVI*值替换。如此可以保证后续分析中排除非植被相关变化的影响(Myneni *et al.*, 1997)。最终, 基于*NDVI*的时间序列, 利用MVC法获得年*NDVI*最大值(*NDVI*_{max}), 以反映一年内最佳植被生长状况。

为了确保*NDVI*序列数据空间分辨率保持一致, 将空间分辨率为8 km的GIMMS *NDVI*数据重采样为250 m。

1.3 研究方法与精度评估

1.3.1 提取高寒荒漠分布范围

高寒荒漠分布在海拔极高的高山地区, 通过海拔限定可以很好地与相对温暖地区的干旱荒漠区分开来。在野外实地考察的基础上, 结合GPS定点数据与同时段Google Earth影像高程剖面, 为祁连山区东、中、西段分别设定3 000 m, 3 400 m, 3 800 m

的海拔限值可以很好地与相对温暖地区的干旱荒漠区分开。

利用GPS野外测定的边界点与Landsat TM/OLI遥感图像建立对应关系, 确定高寒荒漠边界对应应在基于Landsat TM/OLI遥感数据计算的*NDVI*结果图像上的*NDVI*阈值, 同时建立高寒荒漠光谱特征库作为目视解译标准; 然后利用决策树分类法对像元海拔、*NDVI*值等限定特征进行聚类, 得到初步的高寒荒漠分布图像。并对同年代际前、中、后期影像初步解译结果求交集, 然后基于建立的光谱特征并参考区域高分辨率Google影像进行目视修改, 将研究区内的煤矿、采石场、修建的道路和其他人工构造物进行掩膜处理, 去除人类活动的直接影响, 获得最终的祁连山区每一年代际高寒荒漠分布结果。

1.3.2 精度评估

目视解译可能会造成寒冻荒漠边界范围像素级别的位移误差。一般认为小于半个像元的误差是能够被接受的(Bolch *et al.*, 2010), 并将解译误差控制在5%以内。故采用缓冲区分析方法创建7.5 m缓冲区评估解译结果(Granshaw & Fountain, 2006), 进行误差检验。即求取以每期高寒荒漠解译结果的边界为基准的半个像元缓冲区面积与其分布面积的比值, 经计算3期影像高寒荒漠边界提取误差分别为2.74%、2.73%、2.78%。

1.3.3 高寒荒漠分布时空变化分析

分别用1990S、2000S、2010S表示1990–1999、2000–2009、2010–2015三个年代际祁连山区高寒荒漠的稳定分布范围, 将不同年代际祁连山区高寒荒漠分布范围叠置分析, 得到高寒荒漠分布的未变化区域、萎缩区域、扩张区域, 并进行分段统计分析; 采用线性回归分析研究气候因子(气温、降水)在1990–2015年不同区段时间序列上的变化趋势与演变规律, 进而分析不同区段高寒荒漠分布范围变化与气候变化的关系; 并利用从DEM数据获取的地形要素数据, 分析不同区段高寒荒漠分布未变化区、萎缩区和扩张区在不同海拔高度、坡度、坡向指标上的分布特征, 探索高寒荒漠分布范围空间变化特征及差异; 分区段统计高寒荒漠分布下界(高寒草甸带-高寒荒漠带边界)的平均海拔, 并分析其变化情况; 综合对比分析近30年祁连山区高寒荒漠分布

表1 祁连山高寒荒漠2000–2006年GIMMS *NDVI*和MODIS *NDVI*数据一致性检验

Table 1 Correlation analysis of GIMMS *NDVI* and MODIS *NDVI* in 2000–2006 of the alpine desert belt in the Qilian Mountains

年份 Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
相关系数 Correlation coefficient	0.865**	0.886**	0.814**	0.736**	0.891**	0.893**	0.838**

NDVI, 归一化植被指数。

NDVI, Normalized differential vegetation index. **, $p < 0.01$.

特征和分布规律,并结合气候变化对其动态变化及空间差异原因进行综合分析。

2 结果

2.1 祁连山气候变化特征

由图2可知,近30年祁连山东、中、西段年平均气温均呈增加趋势,且波动趋势相似,分别以约每10年 0.43°C , 0.49°C , 0.19°C ($p < 0.05$)的速率增温,其中中段增温幅度最大。1990–2015祁连山年降水量呈微弱的增加趋势,且东、中、西段波动趋势相似,降水量由东向西递减。

从表2可以看出,研究区东段、中段和西段的多

年月平均气温在4至9月显著增加($p < 0.05$),月降水量变化未呈现显著性($p > 0.05$)。生长季气温变化显著,降水变化不显著,仅有个别月份降水通过显著性统计检验。

研究区整体上呈现出东段“暖湿”,中段“冷湿”,西段“冷干”的气候变化情况。明显不同地是,在1990–2015年间,研究区中段在低温的气候背景下,经历了显著增温和降水微弱增加的过程,而研究区西段在低温和较干旱的气候背景下,经历了增温和降水的微弱增加过程。在整个研究时期内,研究区增温变化在生长季尤为显著,而降水则未有明显的规律。

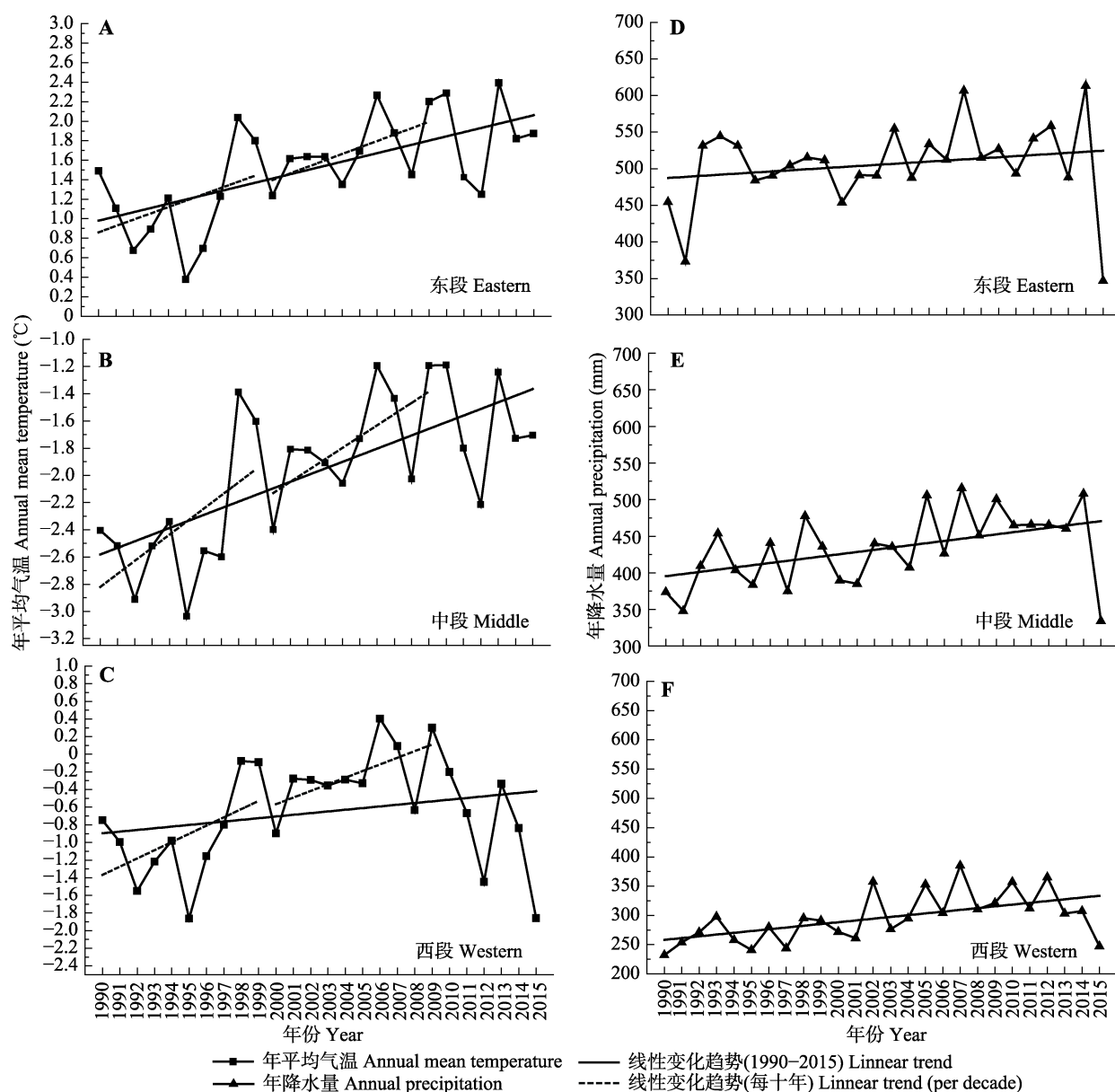


图2 1990–2015年祁连山年平均气温和年降水量变化。

Fig. 2 Variations in the annual mean temperature and annual precipitation measured in the Qilian Mountains for 1990–2015.

表2 1990–2015年祁连山高寒荒漠研究区月平均气温(T)和月降水量(P)变化趋势

Table 2 Monthly mean air temperature (T) and precipitation (P) trends of the alpine desert belt in the Qilian Mountains during 1990–2015

	东段 Eastern		中段 Middle		西段 Western	
	T	P	T	P	T	P
1月 Jan.	0.022	0.016	0.053	−0.020	0.006	0.006
2月 Feb.	0.055	−0.021	0.088	0.070	0.059	0.018
3月 Mar.	0.051	−0.084	0.023	−0.185	0.041	−0.185
4月 Apr.	0.082*	−0.406	0.067	−0.030	0.067	0.053
5月 May	0.061*	0.273	0.050*	0.860*	0.059*	0.464*
6月 June	0.057**	0.357	0.052**	0.540	0.042*	0.653
7月 July	0.044*	−0.691	0.061*	0.383	0.059	0.295
8月 Aug.	0.040*	1.020	0.070**	0.731	0.075**	−0.102
9月 Sept.	0.030	1.633*	0.040	1.327**	0.022	0.479
10月 Oct.	0.072**	0.492	0.074**	0.133	0.071**	0.112
11月 Nov.	−0.002	0.130	0.012	0.007	0.023	−0.110
12月 Dec.	−0.045*	0.048	0.013	−0.008	−0.007	0.037

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$.

2.2 祁连山高寒荒漠的水平分布特征

1990–2015年祁连山高寒荒漠以萎缩变化为主, 局部地段存在扩张现象(图3), 萎缩线性速率约为 $348.3 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 萎缩变化量由大到小依次为西段>中段>东段(表3)。祁连山东段和西段高寒荒漠萎缩变化均表现为2000S vs. 1990S大于2010S vs. 2000S (图4; 表2), 而中段高寒荒漠萎缩变化呈现相反趋势(图4B; 表2)。值得注意的是, 2000S vs. 1990S 和 2010S vs. 2000S高寒荒漠萎缩变化幅度差异在东段并不大(图4; 表3), 而在中段和西段较为明显(图4; 表3)。前一时期高寒荒漠萎缩变化由大到小依次为西段>中段>东段, 2010S vs. 2000S高寒荒漠萎缩变化由大到小依次为中段>西段>东段(图4; 表3)。

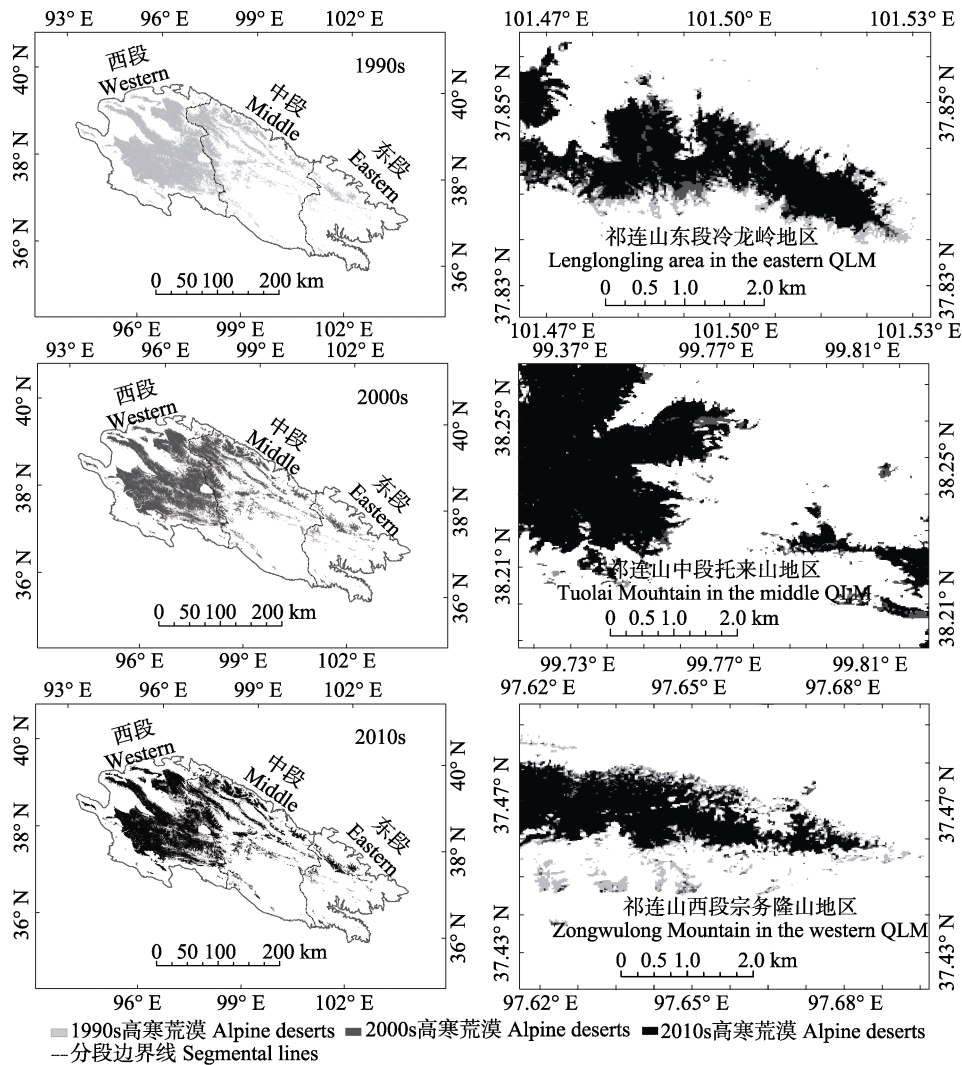


图3 1990S、2000S和2010S祁连山高寒荒漠分布变化。1990S、2000S、2010S分别表示1990–1999、2000–2009、2010–2015三个年代际祁连山区高寒荒漠的稳定分布范围。

Fig. 3 Distribution range of the alpine desert in the Qilian Mountains (QLM) in the 1990S, 2000S, and 2010S, respectively. 1990S, 2000S, 2010S indicate the stable distribution range of the alpine desert in 1990–1999, 2000–2009, 2010–2015, respectively.

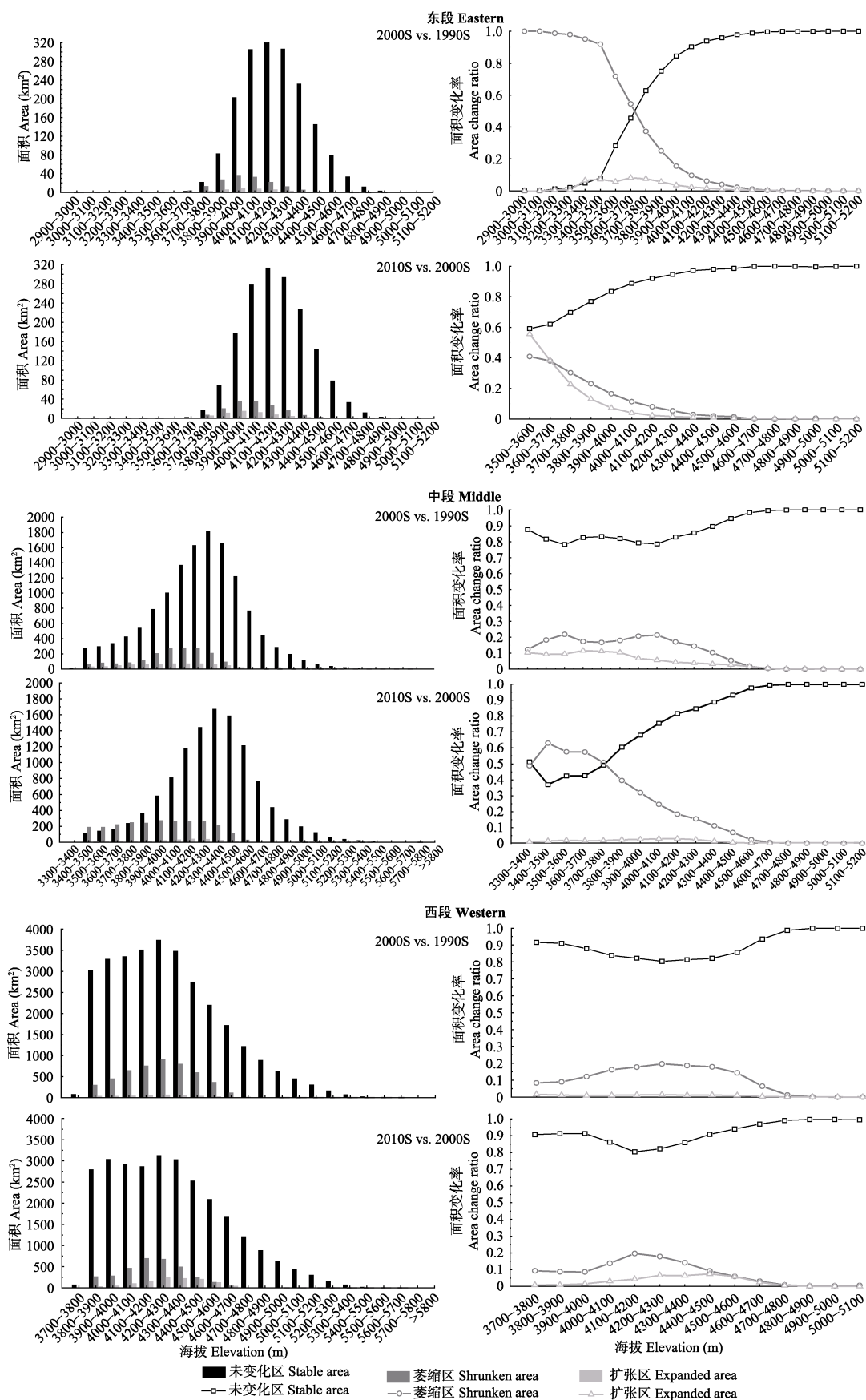


图4 1990S、2000S、2010S祁连山高寒荒漠在不同海拔高度带上的变化。1990S、2000S、2010S同图3。

Fig. 4 Changes in the distribution of the alpine desert at different elevations in the Qilian Mountains in the 1990s, 2000s and 2010s. The meanings of 1990S, 2000S, 2010S are shown in Fig. 3.

表3 1990S、2000S和2010S祁连山区高寒荒漠分布面积变化

Table 3 Area change in alpine deserts distribution in the Qilian Mountains (QLM) in the 1990S、2000S and 2010S

		年代 Years		
		1990S	2000S	2010S
祁连山区 QLM	高寒荒漠面积 Alpine desert area (km ²)	53 061.69	47 135.91	42 569.46
	萎缩量 Shrunk area of the alpine desert (km ²)	5 925.79	4 566.45	—
	面积变化率 Area change ratio of the alpine desert	0.11	0.10	—
东段 Eastern	高寒荒漠面积 Alpine desert area (km ²)	1 926.49	1 805.77	1 720.33
	萎缩量 Shrunk area of the alpine desert (km ²)	120.72	85.44	—
	面积变化率 Area change ratio of the alpine desert	0.06	0.05	—
中段 Middle	高寒荒漠面积 Alpine desert area (km ²)	15 221.68	14 019.75	11 710.50
	萎缩量 Shrunk area of the alpine desert (km ²)	1 201.92	2 309.26	—
	面积变化率 Area change ratio of the alpine desert	0.08	0.16	—
西段 Western	高寒荒漠面积 Alpine desert area (km ²)	35 936.33	31 310.39	29 138.63
	萎缩量 Shrunk area of the alpine desert (km ²)	4 625.94	2 171.75	—
	面积变化率 Area change ratio of the alpine desert	0.13	0.07	—

表4 1990S、2000S和2010S祁连山高寒荒漠下界平均海拔变化

Table 4 Average elevation of the lower boundary of the alpine deserts in the Qilian Mountains in the 1990S、2000S and 2010S.

年代 Years	东段 Eastern		中段 Middle		西段 Western	
	下界平均海拔 Average elevation (m)	向上推进 Upward moving (m)	下界平均海拔 Average elevation (m)	向上推进 Upward moving (m)	下界平均海拔 Average elevation (m)	向上推进 Upward moving (m)
1990S	3 914.45		4 042.80		4 159.05	
		33.83		8.25		59.51
2000S	3 948.28		4 051.05		4 218.56	
		6.40		26.97		3.31
2010S	3 954.68		4 078.02		4 221.87	
总计 Sum		40.23		35.22		62.82

近30年祁连山高寒荒漠下界平均海拔向更高海拔推进(表4), 向上推进速率约为每10年15.4 m, 向上推进幅度为西段(每10年62.82 m) > 东段(每10年40.23 m) > 中段(每10年35.22 m)。2000S vs. 1990S 表现为西段(每10年59.51 m) > 东段(每10年33.83 m) > 中段(每10年8.25 m), 2010S vs. 2000S 现为中段(每10年26.97 m) > 东段(每10年6.40 m) > 西段(每10年3.31 m)。东段和西段2000S vs. 1990S的推进速率大于2010S vs. 2000S, 中段2000S vs. 1990S的推进速率小于2010S vs. 2000S。

2.3 祁连山高寒荒漠的垂直分布特征

在研究区东段、中段和西段, 高寒荒漠主要分布于4 000–4 200、4 200–4 500和4 200–4 300 m海拔高度带上(图4)。从1990s以来, 研究区东段、中段和西段分别在高于4 300 m、高于4 500 m和高于4 600 m的海拔高度带上, 主要分布着高寒荒漠稳定区, 植被分布几乎无变化。

在研究区东段、中段和西段, 高寒荒漠萎缩与扩张变化主要分布海拔范围分别为3 700–4 300、3 800–4 500和3 800–4 600 m, 其中在研究区中段,

2010S vs. 2000S高寒荒漠萎缩变化在高寒荒漠海拔分布范围的下界就已大量存在(图4)。研究区高寒荒漠萎缩与扩张变化即动态变化集中在高寒草甸带-高寒荒漠带间的过渡带上。

同时, 随着海拔的升高, 高寒荒漠萎缩面积变化率逐渐减小, 其萎缩变化主要分布在海拔相对较低的地区。

2.4 祁连山高寒荒漠的坡度坡向分布特征

在不同区段上, 2000S vs. 1990S高寒荒漠萎缩变化集中分布在低坡度地区(图5), 随着坡度增加, 高寒荒漠分布动态变化幅度逐渐减小。在低坡度地区也存在高寒荒漠扩张现象, 但其变化幅度远远小于高寒荒漠萎缩幅度。在研究区东段和西段, 2000S vs. 1990S高寒荒漠在不同坡度梯度上的萎缩变化幅度大于2010S vs. 2000S高寒荒漠萎缩变化幅度。而在研究区中段呈现相反的变化规律。

同时, 2000S vs. 1990S祁连山高寒荒漠在不同坡向上均存在不同幅度的萎缩与扩张变化(图6)。在研究区东段和中段, 高寒荒漠萎缩变化集中分布在阳坡。而在研究区西段, 高寒荒漠萎缩变化集中分

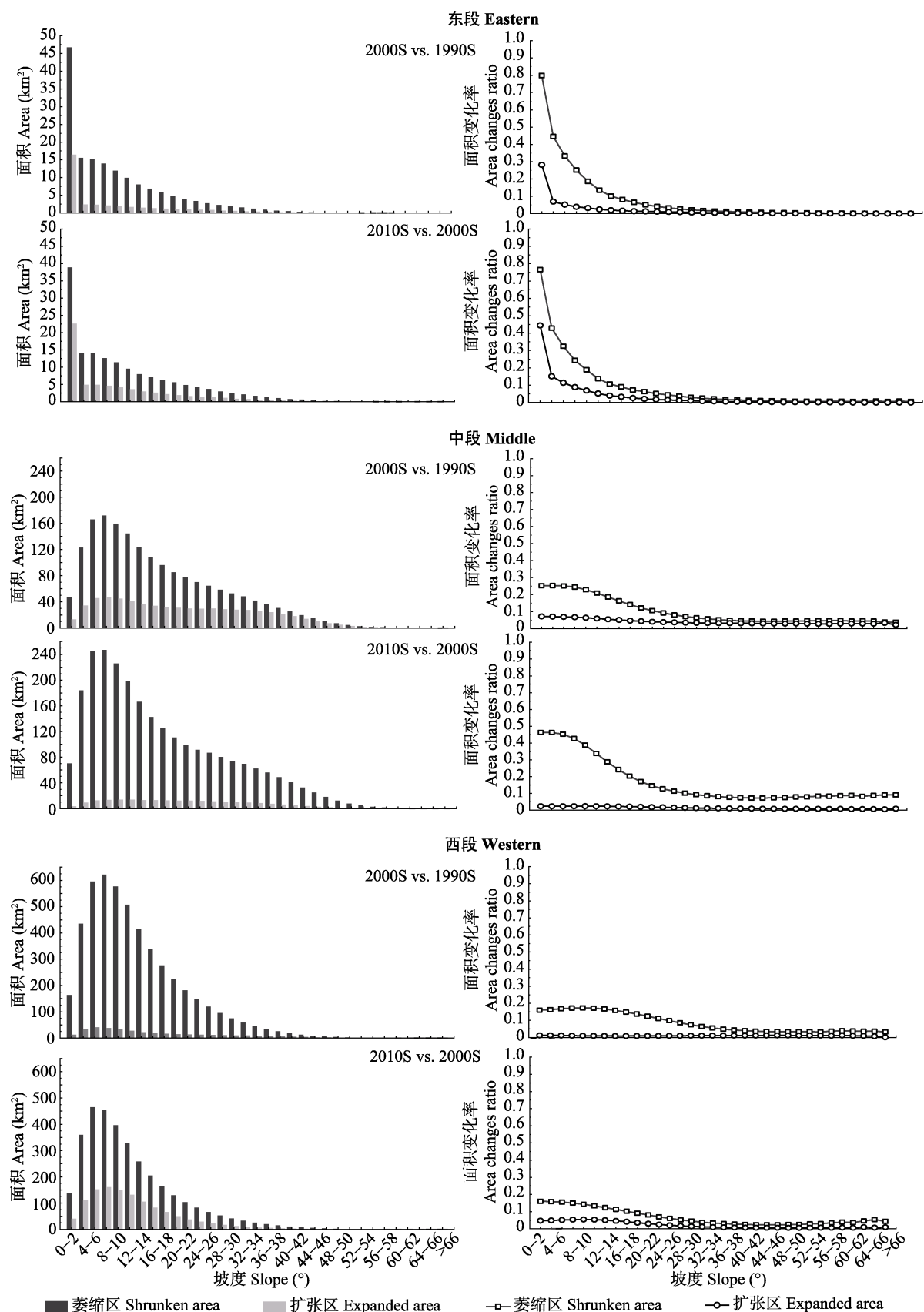


图5 1990S、2000S、2010S祁连山高寒荒漠在不同坡度带上的变化。1990S、2000S、2010S同图3。

Fig. 5 Changes in the distribution of the alpine desert at different slopes in the Qilian Mountains in the 1990S, 2000S and 2010S. The meanings of 1990S, 2000S, 2010S are shown in Fig. 3.

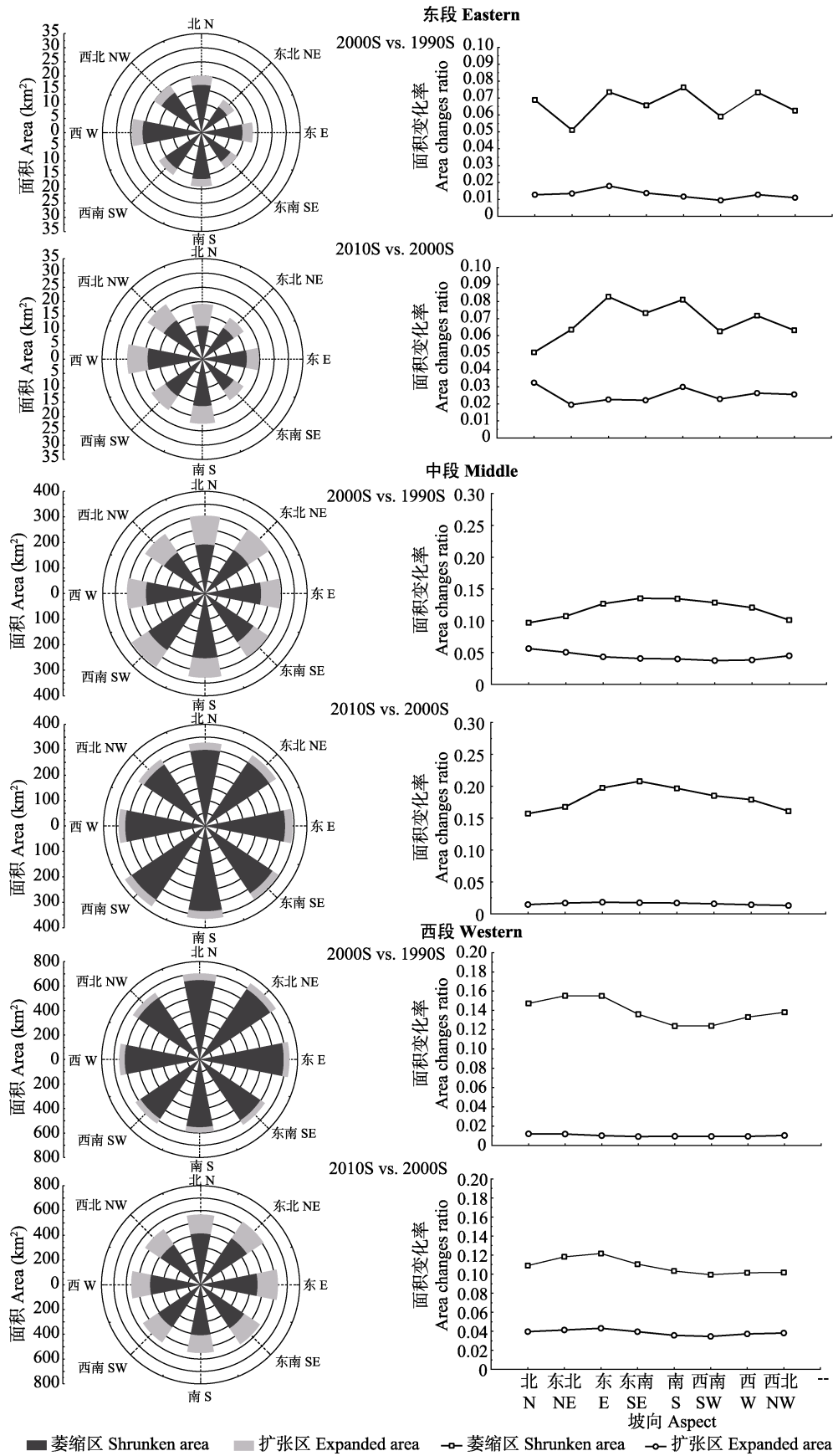


图6 1990S、2000S和2010S祁连山高寒荒漠在不同坡向上的变化。1990S、2000S、2010S同图3。
Fig. 6 Changes in the distribution of the alpine desert at different aspects in the Qilian Mountains in the 1990S, 2000S and 2010S. The meanings of 1990S, 2000S, 2010S are shown in Fig. 3.

布在阴坡。近30年祁连山高寒荒漠在不同坡向上扩张变化的分布无明显的规律。

2.5 过渡带上NDVI与气候变量关系

在高寒草甸带-高寒荒漠带间过渡带上, 基于高寒荒漠下界创建垂直高度上50 m的缓冲区域(高寒荒漠下界下部50 m间隔的海拔高度带区域)。以缓冲区范围的NDVI变化表征过渡带上高寒草甸生长变化情况。

由图7可知, 1990–2015年祁连山东段、中段和西

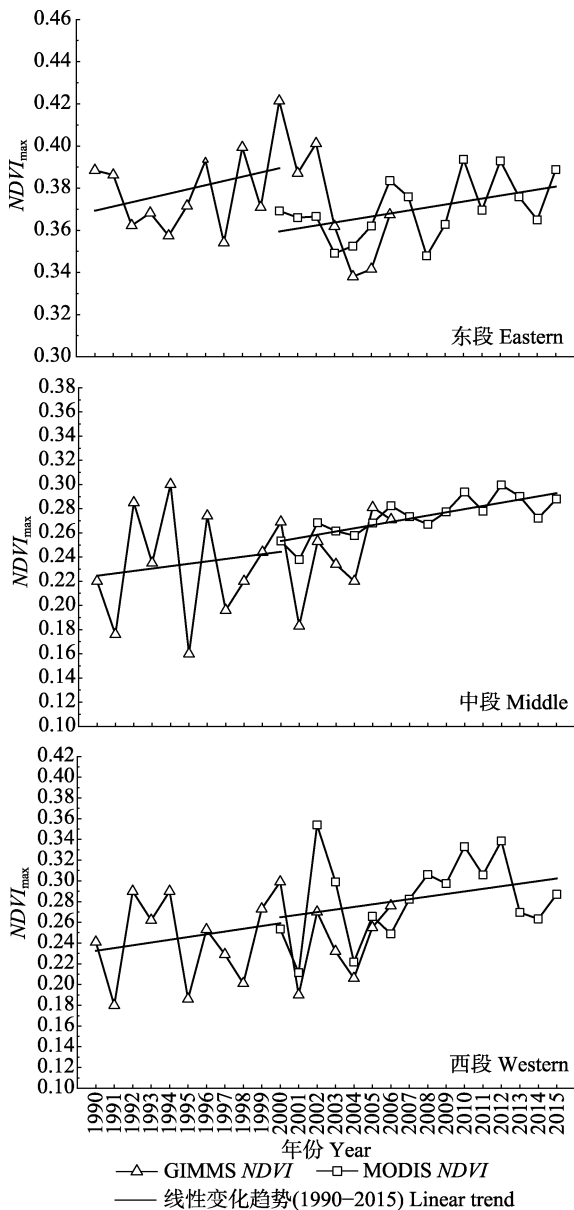


图7 1990–2015年祁连山东段、中段和西段高寒草甸带-高寒荒漠带间过渡带归一化植被指数最大值($NDVI_{max}$)变化。
Fig. 7 Variations of maximum normalized differential vegetation index ($NDVI_{max}$) in the transition zone between alpine meadow and alpine desert belt in the Qilian Mountains for 1990–2015.

段高寒草甸带-高寒荒漠带间过渡带上 $NDVI_{max}$ 均呈显著增加趋势, 这与高寒荒漠萎缩变化趋势是一致的。

分别计算研究区过渡带上 $NDVI_{max}$ 与月平均气温(T)和月降水量(P)之间的简单相关系数、偏相关系数和复相关系数。

由表5可以看出, 近30年研究区东段、中段和西段过渡带上 $NDVI$ 与气温和降水均呈正相关关系, 复相关系数分别为0.862、0.669和0.600。 $NDVI$ 与同一时期气温和降水量的正相关系数和偏相关系数均呈显著相关关系($|R| > 0.5$)。在相关分析结果中, 研究区东段、中段和西段的过渡带上 $NDVI$ 与气温的正相关系数均大于其与降水量的相关系数。它表明气温和降水量增加促进研究区过渡带上高寒植被生长, 但气温对过渡带上高寒植被生长的影响大于降水量对其影响。增温对研究区过渡带上高寒植被生长的影响更为密切和有效。

3 讨论

3.1 气候变化对高寒荒漠分布动态变化的影响

气候因子中以气温和降水对植被生长的影响最为直接和重要(Nemani *et al.*, 2003; Fang *et al.*, 2004; 崔林丽等, 2009; Jin *et al.*, 2016), 温度、降水通过影响植物的光合作用、呼吸作用及土壤有机碳分解等过程进而影响植物的生长和分布。特别是当温度低于植被维持生长所需的最低温度时, 植被生长受到限制(严岳鸿等, 2004; Krishnaswamy *et al.*, 2014; Shen *et al.*, 2016)。

表5 1990–2015年祁连山高寒草甸带-高寒荒漠带间过渡带上归一化植被指数($NDVI$)与平均气温(T)和降水量(P)相关关系

Table 5 Correlation between climatic variables and normalized differential vegetation index ($NDVI$) in the transition zone between alpine meadow and alpine desert belt in the Qilian Mountains from 1990 to 2015

	相关分析 Correlation coefficient		偏相关 Partial correlation coefficient		复相关 Complex correlation coefficient
	T	P	T/P	P/T	
东段 Eastern	0.848**	0.806**	0.518**	0.292**	0.862**
中段 Middle	0.649**	0.638**	0.265**	0.215**	0.669**
西段 Western	0.587**	0.564**	0.246**	0.160**	0.600**

偏相关分析(T/P)表示在不考虑降水条件影响情况下, 研究区过渡带上 $NDVI_{max}$ 与月平均气温间的相关关系。类似地, (P/T)表示在不考虑气温条件影响情况下, 研究区过渡带上 $NDVI_{max}$ 与月降水量间的相关关系。**, $p < 0.01$ 。

Partial correlation analysis (T/P) is related to temperature and $NDVI$ under rainfall stationary conditions. Similarly, partial correlation analysis (P/T) is related to precipitation and $NDVI$ under temperature fixation. **, $p < 0.01$.

DOI: 10.17521/cjpe.2018.0241

气候变化背景下祁连山高寒荒漠分布的动态变化与气候变化间并非呈简单的线性关系(表6), 还要考虑局部地形和土壤等因素的影响。由海拔高度和局部地形差异引起的土壤特征(水分和养分)差异, 能在很大程度上影响植被分布及其与气候变化间的关系(Zhang *et al.*, 2012)。

祁连山高寒荒漠垂直分布现象(图4)表明高寒荒漠下界在高海拔地区萎缩可能受到山体地形特征的较强限制。海拔的变化会导致气温、大气CO₂浓度和地势等的变化, 且高海拔地区坡度一般更大, 水分条件差, 土壤基础差, 植被活动强度更弱或不存在(Zhang *et al.*, 2012; 张微笑, 2015)。同时其萎缩变化主要分布在海拔相对较低的地区, 这可能意味着高寒地区海拔相对较低的下部区域, 有着更加温暖的气候背景, 它更有可能使影响高寒草甸生长的低温限制得到有效释放, 高寒草甸得以生长和扩张, 进而导致高寒荒漠萎缩。

近30年来升温趋势显著, 降水无显著变化趋势(图2; 表2)。且同期NDVI变化与气温变化相关性大于其与降水量相关性, 其对气温变化更为敏感(表5)。2000S vs. 1990S祁连山高寒草甸带-高寒荒漠带间过渡带上高寒荒漠分布变化和NDVI增加趋势表明, 在近30年增温为主的气候变化背景下, 低温对过渡带上高寒草甸的生长限制得到有效释放, 高寒草甸迅速生长。它导致高寒荒漠萎缩及其分布下界平均海拔向更高海拔推进(表4)。该结果与Zeng和Yang (2009)高海拔地区植被生长主要受限于温度因子, 而增温促进了这些地区近几十年来的植被改善的结论一致。同时由于地形对区域水热条件再分配, 导致局部地段存在高寒荒漠的扩张现象。当然, 寒冻风化作用加强也会导致高寒荒漠扩张。

3.2 气候变化下祁连山高寒荒漠分布动态变化的时空差异影响机制

2000S vs. 1990S祁连山高寒荒漠分布呈现萎缩

趋势, 前后两个时期其总的萎缩幅度由大到小依次为西段>中段>东段, 而2000S vs. 1990S和2010S vs. 2000S研究区中段和西段年平均气温增幅均大于研究区东段气温增加幅度(图2)。前后两个时期持续的增温, 高寒草甸生长的低温胁迫得到有效的释放。适度增温能够对植被活动的增强产生积极作用(焦珂伟等, 2018)。在适宜高寒草甸生长的温度阈值范围内, 温度增幅愈大, 高寒草甸生长的低温限制愈能得到更充分有效地释放。另外, 研究区中段海拔较高且气温背景值较低(图2B), 而研究区西段较研究区中段气温背景稍暖一些(图2B、2C)。在相同增温幅度下, 研究区西段高寒草甸生长的低温胁迫的释放程度大于中段。且较干旱的研究区西段(图2F), 同时伴随降水量微弱增加, 可以更好地补充高寒草甸生长所需的水分。在水热条件均满足高寒草甸生长所需的条件下, 研究区高寒草甸快速生长和扩张。同时考虑到祁连山高寒草甸带分布在海拔较高的地区, 其扩张变化势必会受到山体地形限制, 即随海拔增高, 实际地表绝对面积较小, 无法满足高寒草甸继续生长或生存的要求。研究区东段前后两个时期增温幅度相当, 而高寒荒漠萎缩变化幅度差异并不大(图4; 表3), 该现象表明后一时期高寒荒漠萎缩趋势并未变弱, 山体地形可能限制高寒荒漠萎缩。且祁连山东段山体海拔低于祁连山中段和西段山体海拔, 其受到山体地形限制的海拔上限低于祁连山中段和西段。在相同的气温变化幅度下, 祁连山东段山体地形对增温效应(增温促进高寒草甸扩张)的限制影响大于祁连山中段和西段(表6)。在气候变化影响过程中, 同时受到山体地形的限制, 祁连山高寒荒漠萎缩变化幅度表现出从东到西增大的空间差异性(表3)。

由于研究区三部分水热条件背景差异, 以及前后两个时期增温幅度不同(图2), 导致相同幅度增温变化下高寒草甸生长的低温胁迫的释放程度不同。

表6 祁连山高寒荒漠下界分布变化与气候变化间的非线性关系

Table 6 Nonlinear relationship between distribution of the lower boundary of the alpine desert and climatic variables in the Qilian Mountains from 1990 to 2015

	气温垂直递减率 Vertical lapse rate of temperature (°C·100 m ⁻¹)	1990–2015增温幅度 Warming temperature (°C)	等效向上推进高度 Equivalent upward moving (m)	实际向上推进高度 Actual upward moving (m)	过渡带上平均坡度 Average slope (°)
东段 Eastern	0.53	1.12	211.32	40.23	26.76
中段 Middle	0.49	1.26	257.14	35.22	18.06
西段 Western	0.51	0.50	98.04	60.82	13.60

气温垂直递减率来源于张虎等(2001)、王海军等(2009)、贾文雄(2010)、牛赞等(2013)、卿文武等(2018)。等效向上推进高度是指单纯气温驱动下高寒荒漠下界相应于增温幅度的向上推进的等效高度。

The adiabatic rate is referred to previous studies: Zhang *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2009; Jia, 2010; Niu *et al.*, 2013; Qing *et al.*, 2018. The equivalent upward moving refers to the upward-shifting amplitude corresponding to the warming amplitude, which was driven by temperature alone.

同时受山体地形限制, 在不同时期, 祁连山东、中、西段高寒荒漠分布动态变化差异也很明显。

上述过渡带上高寒荒漠萎缩和扩张现象导致了高寒荒漠下界平均海拔向更高海拔推进(表4)。区域地形差异会导致高寒荒漠萎缩面积变化幅度与其下界向上推进变化幅度呈现非等量关系。受地形因素及其影响的水热条件的控制, 祁连山高寒荒漠下界向更高海拔推进, 向上推进幅度表现为西段>东段>中段。

此外, 近30年祁连山高寒荒漠萎缩变化集中分布在低坡度地区, 该地区良好的土壤基础和水分条件, 更有利于高寒草甸的生长和扩张。在“暖湿”的祁连山东段和“冷湿”的祁连山中段, 阳坡上接受的光照较多, 辐射总量和温度较高, 更有利于高寒草甸生长的低温胁迫的释放, 为高寒草甸扩张提供有利的条件。而在“冷干”的祁连山西段, 增温促使高寒草甸生长的低温限制得到释放的同时, 高寒草甸的生长和扩张对水分条件也较为敏感。阴坡上湿度高, 土壤持水性好。在一定温度条件下, 良好的水分条件更有利于高寒草甸的生长和扩张。

综上所述, 水热条件与局部地形差异导致祁连山高寒荒漠下界分布动态变化的空间差异, 气温是高寒荒漠萎缩与扩张变化的主要限制因子。植被活动随气候因子的变化过程存在明显的阈值(Krishnaswamy *et al.*, 2014), 随水热组合变化存在一个适宜的温度区间(Zeng & Yang, 2009; Fridley *et al.*, 2016; 焦珂伟等, 2018)。在一定条件下, 气温升高, 高于某一特定阈值, 低温对高寒草甸生长限制得到释放, 高寒草甸加速扩张, 致使高寒荒漠下界平均海拔向更高海拔推进。反之, 当气温低于该阈值时, 高寒草甸生长受到限制, 出现高寒荒漠扩张现象。在气候变化驱动下, 高寒荒漠的扩张与萎缩变化的地理过程是可逆的, 且气温对其分布动态变化起主要影响作用。

4 结论

本文基于近30年祁连山高寒荒漠分布动态变化和过渡带上NDVI年际变化趋势, 结合气候变化, 综合分析了祁连山东段、中段和西段高寒荒漠分布动态变化空间格局的差异性原因。

在增温气候背景下, 近30年祁连山高寒荒漠呈萎缩变化趋势, 其萎缩变化幅度大小依次为西段>中段>东段, 局部地段也存在扩张现象。上述现象导

致高寒荒漠下界向更高海拔推进, 平均向上推进线性速率为每10年15 m, 表现为西段>东段>中段。受水热条件控制, 祁连山高寒荒漠下界扩张变化集中分布在低坡度地区。由于水热背景的差异, 祁连山东段和中段阳坡上高寒荒漠分布变化大于阴坡, 而在祁连山西段表现相反。在东段“暖湿”、中段“冷湿”和西段“冷干”的水热条件背景下, 同期持续增温和降水量微弱增加, 以及区域地形限制导致了祁连山高寒荒漠分布动态变化及其空间差异。气温对其起主要影响作用, 显著的增温促进了高寒草甸生长。

参考文献

- Aerts R, Cornelissen JHC, Dorrepaal E (2006). Plant performance in a warmer world: General responses of plants from cold, northern biomes and the importance of winter and spring events. *Plant Ecology*, 182, 65–77.
- Arnell A (2015). Climate science: Uncertain future for vegetation cover. *Nature*, 524, 44–45.
- Bolch T, Yao T, Kang S, Buchroithner MF (2010). A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976–2009. *The Cryosphere*, 4, 419–433.
- Chen GC, Peng M (1994). Vegetation characteristics and its distribution of Qilian Mountain region. *Acta Botanica Sinica*, 36, 63–72. [陈桂琛, 彭敏 (1994). 祁连山地区植被特征及其分布规律. *植物学报*, 36, 63–72.]
- Chen J, Yang YA, Sun H (2011). Advances in the studies of responses of alpine plants to global warming. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 17, 435–446.
- Cui LL, Shi J, Yang YM, Fan WY (2009). Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 64, 850–860. [崔林丽, 史军, 杨引明, 范文义 (2009). 中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征. *地理学报*, 64, 850–860.]
- Dai SP, Zhang B, Wang HJ, Wang YM, Li D, Wang XM (2010). Spatiotemporal variation of vegetation NDVI in the Qilian Mountains during the period from 1999 to 2007. *Arid Zone Research*, 27, 585–591. [戴声佩, 张勃, 王海军, 王亚敏, 李丹, 王兴梅 (2010). 1999–2007年祁连山区植被指数时空变化. *干旱区研究*, 27, 585–591.]
- Deng SF (2013). *Vegetation Responses to Climate Change on the Qilian Mountains 2000–2011*. PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [邓少福 (2013). 祁连山气候变化对植被的影响研究(2000–2011). 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Eklundh L, Jönsson P (2010). *Timesat 3.0 Software Manual*. Lund University, Lund, Sweden.

- Fang JY, Piao SL, He JS, Ma WH (2004). Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982–1999. *Science in China*, 47, 229–240.
- Fridley JD, Lynn JS, Grime JP, Askew AP (2016). Longer growing seasons shift grassland vegetation towards more-productive species. *Nature Climate Change*, 6, 865–868.
- Granshaw FD, Fountain AG (2006). Glacier change (1958–1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA. *Journal of Glaciology*, 52, 251–256.
- Jahan N, Gan TY (2011). Modelling the vegetation-climate relationship in a boreal mixed wood forest of Alberta using normalized difference and enhanced vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 313–335.
- Jia QY, Wang XY, LÜ GH, Xie YB (2010). Research advances in effects of climate change on the vegetation zone. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 21, 11305–11307. [贾庆宇, 王笑影, 吕国红, 谢艳兵 (2010). 气候变化对植被带影响研究进展, 安徽农业科学, 21, 11305–11307.]
- Jia WX (2010). Study on the relationships between regional climatic difference, geographical location and terrain in the Qilian Mountains. *Arid Zone Research*, 27, 607–615. [贾文雄 (2010). 祁连山气候的空间差异与地理位置和地形的关系. 干旱区研究, 27, 607–615.]
- Jiao KW, Gao HB, Wu SH, Hou WJ (2018). Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 2229–2238. [焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟 (2018). 植被活动对气候变化响应过程的研究进展. 生态学报, 38, 2229–2238.]
- Jin X, Wang S, Wang S, Xia W (2016). Vegetation dynamics and their response to groundwater and climate variables in Qaidam Basin, China. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 710–728.
- Krishnaswamy J, John R, Joseph S (2014). Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions. *Global Change Biology*, 20, 203–215.
- Liu J, Liu XL, Hou LM (2012). The changes and ecological vulnerability of landscape patterns in the eastern Qilian Mountains. *Arid Land Geography*, 35, 795–805. [刘晶, 刘学录, 侯莉敏 (2012). 祁连山东段山地景观格局变化及其生态脆弱性分析. 干旱区地理, 35, 795–805.]
- Liu ZY, Zhang J, Chen L (2017). The latest change in the Qinghai-Tibetan Plateau vegetation index and its relationship with climate factors. *Climatic and Environmental Research*, 22, 289–300. [刘振元, 张杰, 陈立 (2017). 青藏高原植被指数最新变化特征及其与气候因子的关系. 气候与环境研究, 22, 289–300.]
- Ma YM, Hu ZY, Tian LD, Zhang F, Duan AM, Yang K, Zhang YL, Yang YP (2014). Study progresses of the Tibet Plateau climate system change and mechanism of its impact on East Asia. *Advances in Earth Science*, 29, 207–215. [马耀明, 胡泽勇, 田立德, 张凡, 段安民, 阳坤, 张懿铨, 杨永平 (2014). 青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展. 地球科学进展, 29, 207–215.]
- Mu SJ, Yang HF, Li JL, Chen YZ, Gang CC, Zhou W, Ju WM (2013). Spatio-temporal dynamics of vegetation coverage and its relationship with climate factors in Inner Mongolia, China. *Journal of Geographical Sciences*, 23, 231–246.
- Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani RR (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386, 698–702.
- Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H, Jolly WM, Piper SC, Tucker CJ, Myneni RB, Running SW (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560–1563.
- Ni J (2011). Impacts of climate change on Chinese ecosystems: Key vulnerable regions and potential thresholds. *Regional Environmental Change*, 11, 49–64.
- Niu Y, Liu XD, Jing WM, Lei J, Che ZX (2013). Comparative study on climate gradient changes in the north slope of Qilian Mountains. *Journal of Gansu Agricultural University*, 48(2), 86–91. [牛赞, 刘贤德, 敬文茂, 雷军, 车宗玺 (2013). 祁连山北坡气候梯度变化对比研究. 甘肃农业大学学报, 48(2), 86–91.]
- Qin JH, Zhang WX, Sun H, Wang Q (2013). Temperature sensitivity of enzyme activity in subalpine forest soil in Southwest China. *Acta Pedologica Sinica*, 50, 1241–1245.
- Qing WW, Han CT, Liu JF (2018). A study on temperature lapse rate in Hulugou watershed, Qilian Mountains. *Journal of Lanzhou University natural sciences*, 54(1), 44–50. [卿文武, 韩春坛, 刘俊峰 (2018). 祁连山葫芦沟流域气温直减率变化特征. 兰州大学学报(自然科学版), 54(1), 44–50.]
- Shen XJ, Liu BH, Li GD, Yu PJ, Zhou DW (2016). Impacts of grassland types and vegetation cover changes on surface air temperature in the regions of temperate grassland of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 126, 141–150.
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, New York, USA. 3–29.
- Sun J, Cheng GW (2014). Mountain altitudinal belt: A review. *Ecology and Environment*, 23, 1544–1550. [孙建, 程根伟 (2014). 山地垂直带谱研究评述. 生态环境学报, 23, 1544–1550.]
- Tchebakova NM, Rehfeldt GE, Parfenova EI (2010). From vegetation zones to climatypes: Effects of climate warming on siberian ecosystems. *Ecological Studies*, 209, 427–446.
- Teste FP, Kardol P, Turner BL, Wardle DA, Zemunik G, Renton M, Laliberté E (2017). Plant-soil feedback and the maintenance of diversity in mediterranean-climate shrublands. *Science*, 355, 173.
- Tucker CJ (1986). Cover Maximum normalized difference

- vegetation index images for sub-Saharan Africa for 1983–1985. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1383–1384.
- Tucker CJ, Sellers PJ (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395–1416.
- Walther GR (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 2019–2024.
- Wang GX, Bai W, Li N, Hu HC (2011). Climate changes and its impact on tundra ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau, China. *Climatic Change*, 106, 463–482.
- Wang HJ, Zhang B, Jin XH, Zhang H, Liu JF, Dai SP (2009). Spatio-temporal variations analysis of air temperature and precipitation in Qilian Mountains Region based on GIS. *Journal of Desert Research*, 29, 1196–1202. [王海军, 张勃, 靳晓华, 张华, 柳景峰, 戴声佩 (2009). 基于GIS的祁连山区气温和降水的时空变化分析. 中国沙漠, 29, 1196–1202.]
- Wang YK, Jia WX, Liu CH, Chen W, Zhao CZ, Wang QY, Wang J (2012). Ecological environment change in the north slope of the Qilianshan Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(4), 21–26. [汪有奎, 贾文雄, 刘潮海, 陈文, 赵成章, 王启尤, 汪杰 (2012). 祁连山北坡的生态环境变化. 林业科学, 48(4), 21–26.]
- Yan YH, Yi QF, Huang ZL, Xing FW (2004). The ecological response of fern diversity to vegetation succession in Gudoushan Nature Reserve, Guangdong. *Chinese Biodiversity*, 12, 339–347. [严岳鸿, 易绮斐, 黄忠良, 邢福武 (2004). 广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性对植被不同演替阶段的生态响应. 生物多样性, 12, 339–347.]
- Yang YT, Guan HD, Shen MG, Liang W, Jiang L (2015). Changes in autumn vegetation dormancy onset date and the climate controls across temperate ecosystems in China from 1982 to 2010. *Global Change Biology*, 21, 652–665.
- Yao JQ, Yang Q, Chen YN, Hu WF, Liu ZH, Zhao L (2013). Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1283–1291. [姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 胡文峰, 刘志辉, 赵玲 (2013). 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响. 生态学杂志, 32, 1283–1291.]
- Yu HY, Xu JC (2009). Effects of climate change on vegetations on Qinghai-Tibet Plateau: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 747–754. [于海英, 许建初 (2009). 气候变化对青藏高原植被影响研究综述. 生态学杂志, 28, 747–754.]
- Zeng B (2008). *Vegetation Responses to Climate Change on the Tibetan Plateau 1982–2003*. PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [曾彪 (2008). 青藏高原植被对气候变化的响应研究(1982–2003). 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Zeng B, Yang TB (2009). Impacts of climate warming on vegetation in Qaidam area from 1990 to 2003. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144, 403–417.
- Zhang H, Wen YL, Ma L, Chang ZQ, Wang JY (2001). The climate features and regionalization of vertical climatic zones in the northern slope of Qilian Mountains. *Journal of Mountain Research*, 19, 497–502. [张虎, 温娅丽, 马力, 常宗强, 王金叶 (2001). 祁连山北坡中部气候特征及垂直气候带的划分. 山地学报, 19, 497–502.]
- Zhang HY, Qian YB, Wu ZN, Wang ZC (2012). Vegetation-environment relationships between northern slope of Karlik Mountain and Naomahu Basin, East Tianshan Mountains. *Chinese Geographical Science*, 22, 288–301.
- Zhang WX (2015). Effects of terrain factors on plant growth in mountain area. *National Geographic*, (3), 76–77. [张微笑 (2015). 地形因子对山区植物生长的影响. 华夏地理, (3), 76–77.]
- Zhou W, Gang CC, Li JL, Zhang CB, Mu SJ, Sun ZG (2014). Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982–2010. *Acta Geographica Sinica*, 69, 15–30. [周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国 (2014). 1982–2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. 地理学报, 69, 15–30.]
- Zhu WQ, Pan YZ, Yang XQ, Song GB (2007). Impact of climate change on net primary productivity of land vegetation in China. *Chinese Science Bulletin*, 52, 2535–2541. [朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 宋国宝 (2007). 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. 科学通报, 52, 2535–2541.]
- Zou C (2011). *Research on Vegetation Change and Climate Response Based on the SPOT-NDVI During the Period of 1998 to 2009 in Qinghai Province*. Master degree dissertation, Qinghai Normal University, Xining. [邹婵 (2011). 基于SPOT-NDVI的青海省1998–2009年植被变化及气候响应研究. 硕士学位论文, 青海师范大学, 西宁.]

责任编辑: 张扬建 责任编辑: 李 敏

扫码加入读者圈
听语音, 看问答

DOI: 10.17521/cjpe.2018.0241