

西南地区灌丛归一化植被指数动态及其与气候因子的相关性^{*}

张笑鹤¹ 张远东^{1**} 顾峰雪² 刘世荣¹

(¹中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ²中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要 基于西南地区 1982—2006 年的归一化植被指数 (NDVI) 和气象数据, 使用 ANUSPLIN、ArcGIS 和 SPSS 软件分析了该区 6 种灌丛类型 NDVI 的季节和年际变化, 及其与气候因子的相关性。结果表明: 25 年来, 3 种高海拔亚高山灌丛 (亚高山常绿针叶灌丛、亚高山落叶阔叶灌丛、亚高山革质常绿阔叶灌丛) 年均 NDVI 显著增大, 其他 3 种中低海拔灌丛 (温带落叶灌丛、亚热带热带旱生肉质多刺灌丛和亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛) 增加不显著; 除亚热带热带旱生肉质灌丛外, 其他 5 种灌丛年均温均呈显著增加趋势; 亚高山常绿针叶灌丛年降水量呈增加趋势, 但不显著; 其他 5 种灌丛年降水量呈减少趋势, 其中温带落叶灌丛减少显著。3 种亚高山灌丛月 NDVI 与温度和降水均达到极显著正相关, 且与前一个月的温度、降水相关性最大, 存在明显的滞后效应; 位于中低海拔的其他 3 种灌丛 NDVI 与温度和降水的相关性明显降低。在高海拔亚高山区, 气候变暖导致了年均 NDVI 增加, 温度是 3 种亚高山灌丛 NDVI 年际变化的驱动因子; 在中低海拔, 温度的显著上升没有引起 NDVI 的显著增加。

关键词 灌丛; 归一化植被指数; 温度; 降水量; 气候变化

中图分类号 Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)11-2577-07

Dynamics of shrubs normalized difference vegetation index and its correlations with climatic factors in Southwest China. ZHANG Xiao-he¹, ZHANG Yuan-dong^{1**}, GU Feng-xue², LIU Shi-rong¹ (¹Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(11): 2577–2583.

Abstract: Based on the 1982–2006 normalized difference vegetation index (NDVI) and meteorological dataset of Southwest China, and by using ANUSPLIN, ArcGIS, and SPSS software, this paper analyzed the seasonal and annual variations of six shrubs' NDVI and their correlations with climatic factors in the area. In the past 25 years, the annual average NDVI of three subalpine shrubs at high altitude (subalpine needle-leaf evergreen shrubs, subalpine broadleaf deciduous shrubs, and subalpine sclerophylla broadleaf evergreen shrubs) increased significantly, whereas that of the other three shrubs at mid and low altitudes (deciduous shrubs in temperate zone, evergreen xeromorphic succulent thorny shrubs in subtropical and tropical zones, and broadleaf evergreen and deciduous shrubs in subtropical and tropical zones) had less increase. The mean annual air temperature in the six shrubs except the evergreen xeromorphic succulent thorny shrubs in subtropical and tropical zones had a significant increase, and the mean annual precipitation presented an increasing trend in subalpine needle-leaf evergreen shrubs but a decreasing trend in the

^{*} 国家自然科学基金项目 (31070398)、林业公益性行业重大科研专项 (201104006, 200804001) 和国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD03A0404) 资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: zyd@caf.ac.cn

收稿日期: 2011-04-09 接受日期: 2011-07-25

other five shrubs, reached a significant level in the deciduous shrubs in temperate zone. In the three subalpine shrubs at high altitude, the monthly NDVI was significantly positively correlated with mean monthly air temperature and monthly precipitation, and the correlations with the previous month's mean air temperature and precipitation were the highest, showing a remarkable lag effect. For the other three shrubs at mid and low altitudes, the correlations of NDVI with air temperature and precipitation decreased obviously. At the high altitude, climate warming caused an increase of mean annual NDVI, suggesting that air temperature was the driving factor of the annual NDVI variation of the three subalpine shrubs. At the mid and low altitudes, the significant increase of air temperature didn't cause a significant increase of NDVI.

Key words: shrub; normalized difference vegetation index; temperature; precipitation; climate change.

灌丛是自然界中一种广泛分布的陆地生态系统类型,具有种类繁多、分布广泛、生命力强、萌生力强、生产力高、适生范围宽等特点,不仅在群落的演替过程中扮演着极其重要的角色,而且在区域生态环境保护 and 替代能源方面也起着非常重要的作用(刘国华,2004)。根据中国科学院中国植被图编辑委员会(2001)编制的1:100万中国植被图计算,西南地区灌丛占全国灌丛的50%以上,是中国灌丛的主要分布区。该区分布着大面积亚高山灌丛,其变化是山地林线动态的重要标志,对全球气候变化有重要的指示作用。以往对灌丛的研究主要集中在某种灌丛生物学特性以及其防风固沙、持水性能(张远东等,2006;曹文侠等,2008;张萍等,2008;贾丽娜,2010)、灌丛植物分类(曾绮微等,2007;杨钦周,2007)、灌丛生物量和群落特征(刘国华等,2003;治民生等,2004;李月丛等,2007)、小区域灌丛景观特征(李斌和张金屯,2009)等方面,而大尺度上不同灌丛与气候相互关系的研究却鲜为报道。

基于遥感影像反演的植被信息具有时间尺度长、覆盖范围广、数据获取方便、空间分辨率高等优点,在较大时空尺度的相关研究中已得到广泛应用,目前多采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)来表征区域植被覆盖及生长状况(张学霞等,2005;刘绿柳和肖风劲,2006)。该指数是基于绿色植物叶绿素对可见光波段的强吸收和植物细胞组织对近红外波段强反射的原理计算得到,通常选用可见光红波段(red)和近红外波段(infrared)组合计算,NDVI计算公式为: $NDVI = (\text{infrared} - \text{red}) / (\text{infrared} + \text{red})$ 。某时段NDVI的平均值可代表该时段内植被的平均生长状况(李晓兵等,2002)。本文基于1982—2006年GIMMS NDVI数据,利用Anusplin、ArcGIS、ENVI、SPSS等软件,分析

长时间序列西南地区不同类型灌丛NDVI变化规律及其与气候因子的相关性,揭示该区灌丛生长变化规律及其驱动机制,为应对全球气候变化提供相应科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西南地区(21°06'N—36°26'N, 78°46'E—112°04'E)包括西藏、四川、云南、贵州、重庆和广西6省、市、自治区。由于青藏高原的隆起,研究区从东南到西北,温度和降水都有很大差异。东部年均温达24℃,西部年均温最低可达0℃下;降水量相差上千毫米,时空分布极不均匀。气候类型由温暖湿润的海洋气候到四季如春的高原季风气候,再到亚热带高原季风湿润气候以及青藏高原独特的高原气候,从而形成了独特的植被分布格局。按照中国科学院中国植被图编辑委员会(2001)编制的1:100万中国植被图二级分类,西南地区灌丛从低海拔到高海拔包括亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛、亚热带热带旱生肉质多刺灌丛、温带落叶灌丛、亚高山革质常绿阔叶灌丛、亚高山落叶阔叶灌丛和亚高山常绿针叶灌丛6类,其地形分布、海拔分布以及气候状况见图1和图2。

各灌丛主要优势种如下:亚高山常绿针叶灌丛主要有香柏(*Thuja occidentalis*)、高山柏(*Sabina squamata*)、方枝柏(*Sabina saltuaria*)、地盘松(*Pinus yunnanensis* var. *pygmaea*)等;亚高山落叶阔叶灌丛主要有锦鸡儿(*Caragana sinica*)、硬叶柳(*Salix sclerophylla*)、乌饭叶矮柳(*Salix vaccinioides*)、金缕梅(*Hamamelis mollis*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等;亚高山革质常绿阔叶灌丛为各类杜鹃(*Rhododendron* spp.)灌丛;以上3种灌丛位于青藏高原东

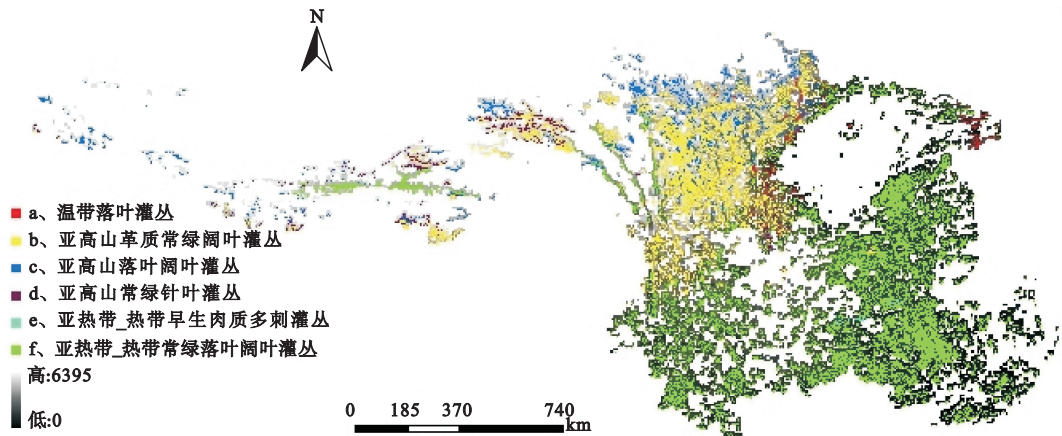


图1 中国西南地区灌丛地形分布示意图

Fig.1 Topography distribution of different shrub types in southwest China

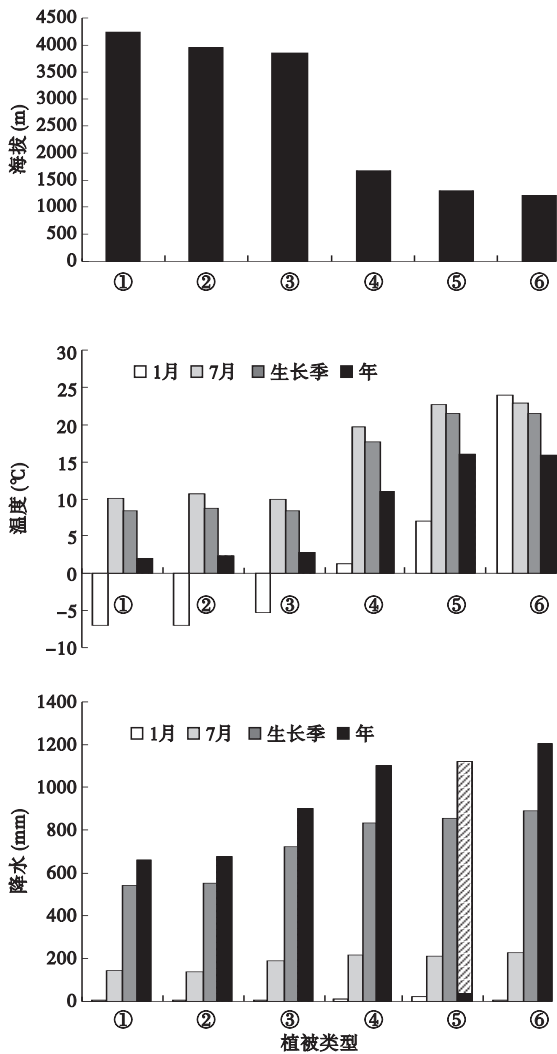


图2 中国西南地区不同灌丛类型海拔、气候概况

Fig.2 Elevation and climate of different shrub types in Southwest China

①亚高山常绿针叶灌丛,②亚高山落叶阔叶灌丛,③亚高山革质常绿阔叶灌丛,④温带落叶灌丛,⑤亚热带热带早生肉质多刺灌丛,⑥亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛。

南缘高山林草交错带,对气候变化和人为干扰具有高度的敏感性,是全球变化生态学研究热点区域 (Körner, 1999)。温带落叶灌丛包括多种蔷薇 (*Rosa* spp.)、榛子 (*Corylus heterophylla*)、黄栌 (*Cotinus coggygria* var. *cinerea*)、绣线菊 (*Spiraea* spp.) 等;亚热带热带早生肉质灌丛主要优势种有仙人掌 (*Opuntia stricta*)、金合欢 (*Acacia farnesiana*)、量天尺 (*Hyloteris undatus*)、仙巴掌 (*Opuntia dillenii*) 等;亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛主要是以栎类 (*Quercus* spp.)、马桑 (*Coriaria sinica*)、黄荆 (*Vitex negundo*)、余甘子 (*Phyllanthus emblica*) 等为主的暖性落叶阔叶灌丛,这 3 种灌丛位于中山和低山丘陵区。

1.2 NDVI 数据与处理

NDVI 数据由美国航空航天局 (NASA) 全球监测与模型研究组 (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, GIMMS) 发布,空间分辨率为 8 km × 8 km,时间范围从 1982—2006 年共 25 年,已采用最大值合成法 (maximum value composite, MVC) 处理后的半月 NDVI 数据集。该数据经过几何精纠正、辐射校正、大气校正等预处理 (McVicar & Bierwirth, 2001; Tucker et al., 2005)。本研究在 ENVI 软件中采用 MVC 方法将每月 2 期半月 NDVI 合成月 NDVI,以进一步消除云、大气、太阳高度角的部分干扰。取一年 12 个月 NDVI 平均值,来代表年均 NDVI;取 5—9 月 NDVI 平均值,代表生长季 NDVI。利用国家自然科学基金“中国西部环境与生态科学数据中心”1 : 100 万数字化中国植被图,提取并计算 6 种灌丛 NDVI 的时间序列。

1.3 气象数据及处理

气象数据来源于国家气象信息中心,包括西南

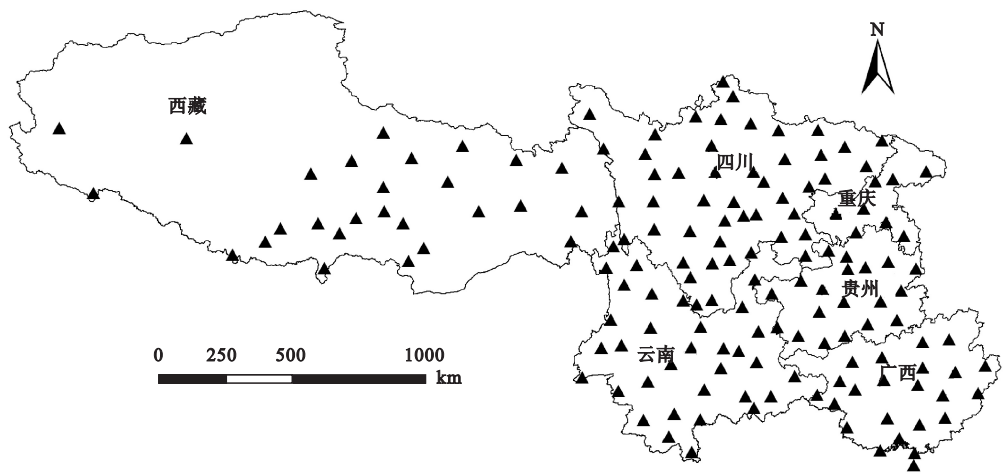


图3 中国西南地区气象站点的分布示意图
Fig.3 Distribution of weather stations in southwest China

6省区的158个地面气象站(图3)1982—2006年的观测数据。气象因子包括月均温、月降水量。利用Anusplin对月均温、降水量进行插值生成各指标栅格图,投影方式与NDVI图一致。然后依据西南地区6种灌丛的空间分布图,提取和计算各类型的月均温、月降水量,进而计算出各时期的平均温度和降水量。

1.4 分析方法

1.4.1 趋势倾向率计算 选择趋势倾向率分析25年来NDVI和气象因子的变化趋势。趋势倾向率计算见式(1)(杨英莲,2008):

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n t_i)^2} \tag{1}$$

式中:变量*i*为1~25年的年序号;*x_i*为第*i*年的NDVI值;*t_i*为*x_i*对应的时间;*n*为所研究的时间序列长度。*b*>0说明NDVI在25年的变化趋势是增加的,反之则是减少的。年均温、降水量趋势倾向率计算同上。

1.4.2 相关系数计算 25年来NDVI和气象因子的相关分析使用Pearson相关系数。其计算方法见式(2):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \tag{2}$$

式中:*r*为变量*x*与*y*的相关系数;*n*为样本数; \bar{X} 为变量*x*的均值; \bar{Y} 为变量*y*的均值。

2 结果与分析

2.1 6种灌丛NDVI、温度和降水的变化趋势

从表1可以看出,25年来,6种灌丛年均NDVI呈增大趋势,其中亚高山常绿针叶灌丛和亚高山落叶阔叶灌丛年均NDVI增大显著(*P*<0.05),而亚高山革质常绿阔叶灌丛趋势倾向率显著性检验的*P*值为0.057,接近于显著。另外3种中低海拔灌丛NDVI趋势倾向率显著性检验的*P*值分别是0.092、0.337和0.115,增加不显著。6种灌丛的年均温均呈较明显的增加趋势;除亚热带热带旱生肉质灌丛之外,其他5种趋势达到显著性水平。亚高山常绿针叶灌丛年降水量呈增加趋势,但不显著;其他5种灌丛年降水量呈减少趋势,其中温带落叶灌丛显著减少。

1982—2006年,亚高山常绿针叶灌丛生长季的NDVI显著增加,其他5种增加不显著。亚高山落叶阔叶灌丛和温带落叶灌丛生长季温度显著增加,其他4种增加不显著。温带落叶灌丛生长季降水极显著减少,可能是导致温带落叶灌丛生长季NDVI无明显变化的主要原因。

25年来,亚高山常绿针叶灌丛和亚高山落叶阔叶灌丛以及温带落叶灌丛7月NDVI显著增加,且后两者增加趋势达到极显著水平,其他3种变化不

表 1 1982—2006 年 6 种灌丛各时期 NDVI、温度、降水趋势倾向率
Table 1 Tendency rate of NDVI, temperature and precipitation at different stages for six shrubs during 1982–2006 in South-west China

		亚高山常绿 针叶灌丛	亚高山落叶 阔叶灌丛	亚高山革质常 绿阔叶灌丛	温带落叶灌丛	亚热带热带 旱生肉质多刺灌丛	亚热带热带常 绿落叶阔叶灌丛
NDVI	年	0.001 *	0.0008 *	0.0005	0.0003	0.0002	0.0004
	生长季	0.0012 *	0.0004	0	0	0.0002	0.0002
	7 月	0.0010 *	0.0020 **	0	0.0030 **	0	0.0003
	1 月	0.003	0.003	0	0.0026	0	0.0003
温度	年	0.043 **	0.0334 *	0.0327 *	0.048 **	0.023	0.036 **
	生长季	0.033	0.033 *	0.021	0.042 **	0.001	0.012
	7 月	0.032	0.041 *	0.03	0.076 **	−0.002	0.016
	1 月	0.101 **	0.095 **	0.082 *	0.115	0.03	0.049
降水	年	0.115	−0.629	−1.884	−5.351 *	−0.567	−0.578
	生长季	0.115	−1.163	−1.794	−6.496 **	−0.407	−0.415
	7 月	−0.286	−1.107	−0.92	−2.146 *	1.679	1.222
	1 月	0.028	−0.053	0.014	−0.149	−0.022	0.033

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

明显;温带落叶阔叶灌丛 7 月降水显著下降,3 种亚高山灌丛生长季降水呈下降趋势,但不显著;亚热带热带旱生肉质和亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛 7 月降水呈增加趋势,但不显著。

25 年来,6 种灌丛 1 月 NDVI 均呈增加趋势,但都未达到显著性水平;亚高山 3 种灌丛 1 月温度显著增加,且亚高山常绿针叶灌丛和亚高山落叶阔叶灌丛增加趋势达到极显著水平;其他较低海拔的 3 种灌丛增加趋势不明显;各植被类型 1 月降水变化不明显,其中,亚高山常绿针叶灌丛和亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛呈增加趋势,其余 4 种呈不明显减少趋势。

2.2 6 种灌丛月均 NDVI 与温度和降水的相关性

从表 2 可以看出,3 种亚高山灌丛月 NDVI 与温度和降水均达到极显著相关,且与前一个月的温度、降水相关性最大,普遍高于与同期、前 2 个月及前 3 个月温度的相关性,与前 3 个月温度相关性明显降低。温带落叶灌丛和亚热带热带旱生肉质灌丛 NDVI 与温度的相关性明显减低,但都与前一个月

温度相关性最大且与降水相关性不显著;亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛 NDVI 与温度和降水相关性明显,且达到显著性水平,但其相关性低于 3 种亚高山灌丛,高于温带落叶灌丛和亚热带热带旱生肉质灌丛。

2.3 6 种灌丛 NDVI 变化的驱动因子

从表 3 可以看出,25 年来,西南地区灌丛 NDVI 的变化主要与温度相关性较强,与降水的相关性不明显。6 种灌丛年均 NDVI 的变化与年均温显著相关,相关系数均达到 0.4 以上。除亚高山常绿针叶灌丛和亚热带热带常绿落叶阔叶灌丛外,其他 4 种灌丛年均 NDVI 的变化与 1 月温度也呈显著相关,并且亚热带热带旱生肉质年均 NDVI 与 1 月温度相关性要高于与年均温的相关性,这说明冬季温度对年 NDVI 也有较大的影响。25 年来,西南地区灌丛 NDVI 的变化与降水相关性不明显,只有亚高山革质常绿阔叶灌丛 1 月和 7 月 NDVI 变化与该月的降水变化呈显著负相关;亚热带旱生肉质多刺灌丛 1 月 NDVI 变化与当月降水呈显著负相关;亚热

表 2 西南地区 6 种灌丛月平均 NDVI 与温度和降水的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between monthly NDVI and temperature, precipitation for six shrubs in Southwest China

灌丛类型	月平均气温				月降水量			
	同期	滞后 1 个月	滞后 2 个月	滞后 3 个月	同期	滞后 1 个月	滞后 2 个月	滞后 3 个月
亚高山常绿针叶	0.793 **	0.932 **	0.830 **	0.517 **	0.755 **	0.851 **	0.715 **	0.405 *
亚高山落叶阔叶	0.763 **	0.918 **	0.842 **	0.544 **	0.746 **	0.849 **	0.737 **	0.452 *
亚高山革质常绿阔叶	0.693 **	0.867 **	0.826 **	0.565 **	0.649 **	0.770 **	0.696 **	0.467 *
温带落叶	0.483 *	0.520 **	0.417 *	0.187	0.367	0.393	0.343	0.211
亚热带热带旱生肉质多刺	0.463 *	0.562 **	0.510 *	0.287	0.297	0.376	0.363	0.282
亚热带热带常绿落叶阔叶	0.655 **	0.734 **	0.617 **	0.309	0.479	0.572 **	0.533 **	0.350

* $P<0.05$, ** $P<0.01$;同期、滞后 1 个月、滞后 2 个月和滞后 3 个月的样本数分别为 300、299、298 和 297。

表 3 25 年来 6 种灌丛 NDVI 与温度和降水相关系数
Table 3 Correlation coefficient between temperature, precipitation and NDVI of six shrubs during the past 25 years

灌丛类型	NDVI	温度				降水			
		1 月	7 月	生长季	年	1 月	7 月	生长季	年
亚高山常绿针叶	1 月	0.484 *				0.054			
	7 月	0.369	0.504 *			0.127	-0.396		
	生长季	0.375	0.378	0.410 *		-0.028	-0.226	0.082	
	年	0.393	0.329	0.313	0.408 *	0.056	-0.138	0.231	0.159
亚高山落叶阔叶	1 月	0.705 **				-0.233			
	7 月	0.177	0.333			-0.188	-0.349		
	生长季	0.139	0.173	0.257		-0.165	-0.061	-0.050	
	年	0.543 **	0.365	0.351	0.598 **	-0.272	-0.347	-0.086	-0.097
亚高山革质常绿阔叶	1 月	0.563 **				-0.457 *			
	7 月	0.165	0.405 *			0.271	-0.602 **		
	生长季	0.026	0.207	0.266		0.171	-0.088	-0.219	
	年	0.552 **	0.150	0.163	0.581 **	-0.251	0.028	0.098	0.053
温带落叶	1 月	0.546 **				-0.111			
	7 月	-0.079	0.200			0.136	-0.158		
	生长季	0.162	0.118	0.117		0.019	-0.043	0.020	
	年	0.568 **	0.496 *	0.432 *	0.639 **	-0.297	-0.147	-0.166	-0.181
亚热带热带旱生肉质多刺	1 月	0.501 *				-0.434 *			
	7 月	0.312	0.082			-0.011	-0.270		
	生长季	-0.004	-0.087	0.120		0.066	0.034	-0.040	
	年	0.617 **	-0.190	0.198	0.547 **	0.037	0.264	-0.017	-0.037
亚热带热带常绿落叶阔叶	1 月	-0.127				0.353			
	7 月	0.100	0.264			-0.089	-0.472 *		
	生长季	-0.237	0.251	0.168		-0.008	-0.257	-0.033	
	年	0.204	0.091	0.156	0.545 **	0.432 *	-0.053	-0.262	-0.183

* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

表 4 西南地区 6 种灌丛月均 NDVI 与温度和降水的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between monthly NDVI and temperature, precipitation for six shrubs in Southwest China

灌丛类型	月平均气温				月降水量			
	同期	滞后 1 个月	滞后 2 个月	滞后 3 个月	同期	滞后 1 个月	滞后 2 个月	滞后 3 个月
亚高山常绿针叶	0.355	0.244	0.108	0.029	-0.166	-0.022	0.007	0.103
亚高山落叶阔叶	0.416 *	0.223	0.094	0.054	-0.088	-0.071	0.011	0.088
亚高山革质常绿阔叶	0.449 *	0.281	0.155	0.054	-0.238	-0.072	-0.007	0.065
温带落叶	0.325	0.150	0.074	0.005	-0.053	0.006	-0.009	0.019
亚热带热带旱生肉质多刺	0.257	0.053	0.066	-0.015	-0.036	0.036	-0.039	-0.043
亚热带热带常绿落叶阔叶	0.314	0.120	0.085	0.042	-0.046	0.040	0.004	-0.041

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; NDVI 与温度和降水的相关系数是去除季节性的影响。

带热带常绿落叶阔叶灌丛 7 月的 NDVI 与该月降水呈显著负相关,而其年均 NDVI 变化与 1 月降水呈显著正相关。

3 讨 论

25 年来,3 种亚高山灌丛温度显著升高,NDVI 显著增大。由于亚高山灌丛位于高山林草过渡带,温度是植被生长的主要限制因子,因而 NDVI 的增加主要是由于升温引起的,温度是 NDVI 变化的主要驱动因子。Moseley (2006) 对滇西北林线研究表明,近百年来随着温度的升高,灌木种类入侵到高山

草甸,林线海拔增加,大约每 10 年上移 8.5 m,这从地面观测角度验证了本文的研究结果。而在中低海拔,温度的显著升高并没有引起 NDVI 的显著增大;灌丛生长受温度和降水的双重影响,只有温度和降水都表现出同向的变化趋势时,NDVI 才会有显著的变化趋势。

NDVI、温度和降水均有季节性特征,当去除这种特征的影响时,灌丛 NDVI 与温度和降水的相关性会发生变化。去除季节性的方法很多,一种简单的方法是用偏离值 (Departure): $Departure = NDVI_i - NDVI_{i,m}$,其中 $NDVI_i$ 为 i 月份的 NDVI 值, $NDVI_{i,m}$ 为

i 月份历年 $NDVI$ 平均值。使用偏离值计算 $NDVI$ 、温度和降水之间的相关关系,其结果表明,当去除季节性影响时,灌丛 $NDVI$ 与温度和降水的相关性明显降低(表4),但亚高山落叶阔叶灌丛和亚高山革质常绿阔叶灌丛 $NDVI$ 与月均温仍显著正相关,这也进一步证明了温度是亚高山灌丛生长的主要驱动因子。

参考文献

- 曹文侠,张德罡,徐长林,等. 2008. 杜鹃灌丛草地响应休牧的植被特征变化. 中国草地学报, **30**(6): 94-98.
- 贾丽娜. 2010. 几种不同灌木矮林防风阻沙效能对比研究(硕士学位论文). 北京:北京林业大学.
- 李斌,张金屯. 2009. 黄土高原灌丛景观斑块形状的指数和分形分析. 中国农学通报, **25**(22): 296-300.
- 李晓兵,陈云浩,张云霞,等. 2002. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, **17**(2): 254-261.
- 李月丛,许清海,肖举乐,等. 2007. 中国北方几种灌丛群落表土花粉与植被关系研究. 地理科学, **27**(2): 205-210.
- 刘国华,马克明,傅伯杰,等. 2003. 岷江干旱河谷主要灌丛类型地上生物量研究. 生态学报, **23**(9): 1757-1764.
- 刘国华. 2004. 以中国为例,岷江上游灌丛地上生物量以及其与环境因子之间关系的研究(博士学位论文). 北京:中国科学院生态环境研究中心.
- 刘绿柳,肖风劲. 2006. 黄河流域植被 $NDVI$ 与温度、降水关系的时空变化. 生态学杂志, **25**(5): 477-481.
- 杨钦周. 2007. 岷江上游干旱河谷灌丛研究. 山地学报, **25**(1): 1-32.
- 杨英莲. 2008. 青海省天然草地 $NDVI$ 的时空化与气温和降水的关系分析(硕士学位论文). 南京:南京信息工程大学.
- 冶民生,关文彬,谭辉,等. 2004. 岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析. 生态学报, **24**(6): 1123-1130.
- 曾绮微,李海生,陈桂珠,等. 2007. 香港灌丛植被的数量分类与环境关系分析. 环境科学研究, **20**(5): 45-49.
- 张萍,哈斯,岳兴玲,等. 2008. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征. 干旱区地理, **31**(6): 926-932.
- 张学霞,葛全胜,郑景云. 2005. 近50年北京植被对全球变暖的响应及其时效:基于遥感数据和物候资料的分析. 生态学杂志, **24**(2): 123-130.
- 张远东,刘世荣,马姜明. 2006. 川西高山和亚高山灌丛的地被物及土壤持水性能. 生态学报, **26**(9): 2775-2782.
- 中国科学院中国植被图编辑委员会. 2001. 1:1000000 中国植被图. 北京:科学出版社.
- Körner C. 1999. *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Berlin: Springer-Verlag.
- McVicar TR, Bierwirth PN. 2001. Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **22**: 2109-2128.
- Moseley RK. 2006. Historical landscape change in Northwestern Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, **26**: 214-219.
- Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, et al. 2005. An extended AVHRR 8-km $NDVI$ data set compatible with MODIS and SPOT vegetation $NDVI$ data. *International Journal of Remote Sensing*, **26**: 4485-4498.

作者简介 张笑鹤,女,1985 生,硕士研究生。主要从事植被恢复研究。E-mail: popoxiaohe@126.com

责任编辑 李凤芹
