

青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系

杨元合 朴世龙

(北京大学环境学院生态学系、北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要 为揭示气候变化对青藏高原草地生态系统的影响及其生态适应机制, 利用 1982~1999 年间的 NOAA/AVHRR *NDVI* 数据和对应的气候资料, 研究了近 20 年来青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系。结果表明, 18 年来研究区生长季 *NDVI* 显著增加($p = 0.015$), 其增加率和增加量分别为 $0.41\% \text{ a}^{-1}$ 和 0.0010 a^{-1} 。生长季提前和生长季生长加速是青藏高原草地植被生长季 *NDVI* 增加的主要原因。春季为 *NDVI* 增加率和增加量最大的季节, 其增加率和增加量分别为 $0.92\% \text{ a}^{-1}$ 和 0.0014 a^{-1} ; 夏季 *NDVI* 的增加对生长季 *NDVI* 增加的贡献相对较小, 其增加率和增加量分别为 $0.37\% \text{ a}^{-1}$ 和 0.0010 a^{-1} 。3 种草地(高寒草甸、高寒草原、温性草原)春季 *NDVI* 均显著增加($p < 0.01$; $p = 0.001$; $p = 0.002$); 高寒草甸夏季 *NDVI* 显著增加($p = 0.027$), 而高寒草原和温性草原夏季 *NDVI* 呈增加趋势, 但都不显著($p = 0.106$; $p = 0.087$); 3 种草地秋季 *NDVI* 则没有明显的变化趋势($p = 0.585$; $p = 0.461$; $p = 0.143$)。3 种草地春季 *NDVI* 的增加是由春季温度上升所致。高寒草地(高寒草甸和高寒草原)夏季 *NDVI* 的增加是夏季温度和春季降水共同作用的结果。温性草原夏季 *NDVI* 变化与气候因子并没有表现出显著的相关关系。高寒草地植被生长对气候变化的响应存在滞后效应。

关键词 青藏高原 高寒草甸 高寒草原 温性草原 *NDVI* 气候因子

VARIATIONS IN GRASSLAND VEGETATION COVER IN RELATION TO CLIMATIC FACTORS ON THE TIBETAN PLATEAU

YANG Yuan-He and PIAO Shi-Long

(Department of Ecology, College of Environmental Sciences & Key Laboratory for Earth Surface Process of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract To advance our understanding of the effects of climate change on grassland ecosystems, we used a time series (1982–1999) data set of the Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) together with historical climate data to analyze interannual variations in grassland vegetation cover and explore the relationships between *NDVI* and climatic factors on the grasslands of the Tibetan Plateau. The *NDVI* increased significantly by a ratio of $0.41\% \text{ a}^{-1}$ and a magnitude of 0.0010 a^{-1} during the growing season ($p = 0.015$). An increase in *NDVI* during the growing season resulted from both the advanced growing season and accelerated vegetation activity. The largest *NDVI* increase was in the spring with a ratio of $0.92\% \text{ a}^{-1}$ and a magnitude of 0.0014 a^{-1} . The *NDVI* increase in the summer was a secondary contributor to the *NDVI* increase during the growing season with a ratio of $0.37\% \text{ a}^{-1}$ and a magnitude of 0.0010 a^{-1} . In the spring, the *NDVI* increased significantly in the alpine grasslands (alpine meadow and alpine steppe) and temperate steppe ($p < 0.01$; $p = 0.001$; $p = 0.002$). During the summer, a significant *NDVI* increase was found in alpine meadows ($p = 0.027$). However, the *NDVI* increase in alpine and temperate steppe was not significant ($p = 0.106$; $p = 0.087$). In the autumn, no significant increase was found in the three grasslands ($p = 0.585$; $p = 0.461$; $p = 0.143$). In the spring, the *NDVI* increase in three grasslands was corresponded to an increase in temperature. In the summer, the *NDVI* was related to temperature and sensitive to precipitation in the spring in the alpine grasslands (alpine meadow and alpine steppe). However, no significant statistical relationship was found between *NDVI* and climatic factors in temperate steppe. Significant lagged correlations between precipitation and *NDVI* were found for alpine grasslands (alpine meadow, alpine steppe).

Key words Tibetan Plateau, Alpine meadow, Alpine steppe, Temperate steppe, *NDVI*, Climatic factors

全球变化与陆地生态系统(Global change and terrestrial ecosystem, GCTE)是全球变化研究的重要

内容,而气候变化对陆地生态系统的影响及其反馈是 GCTE 研究的热点(IPCC, 2001)。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, *NDVI*)能反映吸收的光合有效辐射、叶绿素密度、叶面积以及蒸发速率等植被参数(DeFries *et al.*, 1995),因此 *NDVI* 数据已经广泛应用于植被覆盖(Myneni *et al.*, 1997; Tucker *et al.*, 2001)、生物量(Myneni *et al.*, 2001)、*NPP* (Net primary production)(Hicke *et al.*, 2002)以及物候(Jenkins *et al.*, 2002)等方面的研究。

气候变化是植被活动年际变化的重要影响因素(Keeling *et al.*, 1996; Weltzin *et al.*, 2003)。*NDVI* 与气候因子之间的相关关系已经在区域尺度(Li & Kafatos, 2000)和全球尺度(Schultz & Halpert, 1995)上得到广泛证明。总体上,*NDVI* 与气候因子的关系研究可以大致分为两类:一类是基于 *NDVI* 与气候因子空间变化的空间相关模型(Wang *et al.*, 2001; Jobbagy *et al.*, 2002);另一类则是基于 *NDVI* 与气候因子时间变化的时间相关模型(李晓兵和史培军, 2000; Jobbagy *et al.*, 2002; Piao *et al.*, 2003, 2004; Wang *et al.*, 2003)。两者的区别在于:空间相关模型描述了不同生态系统的空间变化,反映了气候变化对植被的长期效应;而时间相关模型描述了同一生态系统的时间变化,反映了气候变化对植被的短期效应(Jobbagy *et al.*, 2002)。

已有的研究表明,草地植被对气候变化反应敏感(Zavaleta *et al.*, 2003a, 2003b)。青藏高原属于气候变化的敏感区和生态脆弱带(孙鸿烈和郑度, 1998),是研究陆地生态系统对气候变化响应机制的理想场所。草地植被占青海-西藏高原植被总面积的63.9%,是高原最重要的植被类型(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2001)。因此,青藏高原草地植被覆盖变化及其气候驱动机制已成为人们十分关注的问题。但是,截至目前尚未报道过类似的研究。为此,我们利用较长时间序列(1982 ~ 1999 年)的 *NDVI* 数据及其所对应的温度和降水资料,试图揭示 18 年来青藏高原 3 种草地(温性草原、高寒草原、高寒草甸)植被覆盖的年际变化,阐明驱动研究区 3 种草地植被覆盖变化的主要气候因子。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于中国西南部,平均海拔 4 000 m 以上,属于中国大陆地势最高的一级台阶。具有构

造地貌、河流地貌、冰川地貌、湖泊地貌等多种地貌类型。太阳辐射量达 0.586 1 ~ 0.795 4 MJ·cm⁻²·a⁻¹,是我国太阳总辐射值最高的地区。其地形复杂,海拔变化大,地面气温区域差异显著;温度季节差异明显。降水主要受西南季风控制,自东南向西北方向逐渐减少;降水季节分配极不均匀,雨季和旱季分异明显。需要说明的是,本文的研究区域仅包括青海和西藏两省。研究区草地植被的覆盖面积为 117.7 万 km²,占其植被总面积的 63.9%,约相当于中国国土面积的 1/10(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2001)。研究区草地植被主要包括高寒草甸、高寒草原、温性草原 3 种类型(图 1)。其中,高寒草甸主要分布于高原东部,分布区海拔为 3 200 ~ 5 200 m,年均温 0 °C 以下,年降水量为 400 ~ 700 mm;高寒草原主要分布于高原中西部以及昆仑山和祁连山等地区,分布区海拔高、寒冷而干旱;温性草原主要分布于高原东部的湟水流域,分布区气温较高,年降水量为 350 mm 左右(李文华和周兴民, 1998)。

1.2 数据来源

1.2.1 *NDVI* 数据

本研究所用的 *NDVI* 数据为 GIMMS(Global inventory monitoring and modeling studies)研究组提供的 1982 ~ 1999 年的每旬 *NDVI* 数据。时间分辨率为 15 d,空间分辨率为 8 km × 8 km(Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001)。该 *NDVI* 数据集消除了火山爆发、太阳高度角、传感器灵敏度随时间变化等影响,因此在全球及区域大尺度植被活动变化研究中应用广泛(Myneni *et al.*, 2001; Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001, 2003; Piao *et al.*, 2003)。

每月的 *NDVI* 数据通过国际通用的 MVC(Maximum value composition)法(式 1)获得,该法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰(Holben, 1986)。

$$NDVI_i = \text{Max} (NDVI_{ij}) \tag{1}$$

式中,*NDVI_i* 为第 *i* 月的 *NDVI* 值,*NDVI_{ij}* 为第 *i* 月第 *j* 旬的 *NDVI* 值。

对通过 MVC 法获得的图像进行投影变换,获得空间分辨率为 0.1° × 0.1°、投影方式为经纬网投影的栅格图像。然后结合 3 种草地植被的空间分布数据,计算每种草地类型的月 *NDVI*。在此基础上计算不同季节的 *NDVI*。需要说明的是:1)在植被覆盖率低的地区,*NDVI* 值受下垫面因素的影响较大,因此我们只考虑 *NDVI* 平均值大于 0.1 的像元。2)



图 1 青海-西藏高原草地分布图
Fig.1 Distribution of grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau

考虑到青藏高原特殊的气候环境以及植被的生长情况,本文对季节作如下规定:生长季为 5~9 月,春季为 5 月,夏季为 6~8 月,秋季为 9 月。3)文中出现的 *NDVI* 年平均增加量定义为 *NDVI* 与年份的回归直线的斜率,*NDVI* 年平均增加率定义为年平均增加量与 *NDVI* 平均值的比值。

1.2.2 气候数据

所用的气候数据为国家气象局提供的 1982~1999 年 680 个气象站的月平均气温和月降水资料。首先对 680 个气象站点的气候数据进行 Kriging 插值,然后将通过插值获得的图像进行投影变换,转换为空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 、投影方式为经纬网投影的栅格图像(Piao *et al.*, 2003)。利用 3 种草地植被的空间分布数据,分别计算每种草地类型的月平均气温和月降水。在此基础上计算不同季节的气候数据。

1.2.3 植被空间分布数据

所用的植被空间分布数据为 1:100 万中国植被图(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2001)。首先利用方正智绘 5.01 数字化 1:100 万中国植被图,然后对数字化的植被图进行投影变换和格式变换,将其转换成空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 、投影方式为经纬网投影的栅格图像。最后,将栅格格式植被图中的草地植被划分为高寒草甸、高寒草原和温性草原 3 个类型。

2 结 果

2.1 生长季 *NDVI* 的年际变化

图 2 显示 1982~1999 年间研究区生长季 *NDVI*、温度和降水的变化趋势。从图中可以看出,18 年来研究区生长季 *NDVI* 呈显著增加趋势($p = 0.015$),即从 1982 年的 0.23 增加到 1999 年的 0.26,平均每年增加 0.001 0,年平均增加率为 0.41%。18 年来研究区生长季温度虽然有所波动,但增加趋势十分明显,平均每年增加 0.071 $^{\circ}\text{C}$ 。生长季降水量的年际变化波动较大,没有明显的趋势。

为了比较不同草地类型生长季 *NDVI* 的变化情况,我们分别计算了 3 种草地类型(高寒草甸、高寒草原、温性草原)的生长季 *NDVI*,并给出了其变化趋势(图 3)。如图 3 所示,18 年来 3 种草地类型的生长季 *NDVI* 均显著增加($p < 0.05$)。其中,高寒草甸生长季 *NDVI* 的增加趋势最为显著($p = 0.011$),并且其年平均增加量最大,平均每年增加 0.001 3。温性草原生长季 *NDVI* 年平均增加率最大,平均每年增加 0.42%。高寒草原生长季 *NDVI* 年平均增加量和增加率分别为 0.000 7 和 0.41%。

2.2 不同季节 *NDVI* 的年际变化

为了分析青藏高原草地植被不同季节 *NDVI* 变化对生长季 *NDVI* 增加的贡献,我们给出了 18 年来不同季节 *NDVI* 的变化趋势(图 4),并计算了 1982~

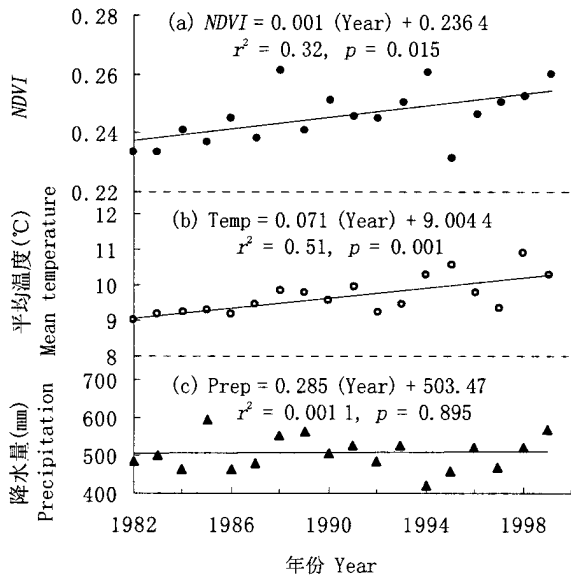


图2 1982~1999年青藏高原草地生长季平均NDVI、平均温度和降水量的年际变化
Fig.2 Interannual variations in growing season's mean NDVI, mean temperature, and precipitation of grasslands on the Tibetan Plateau over the period of 1982–1999

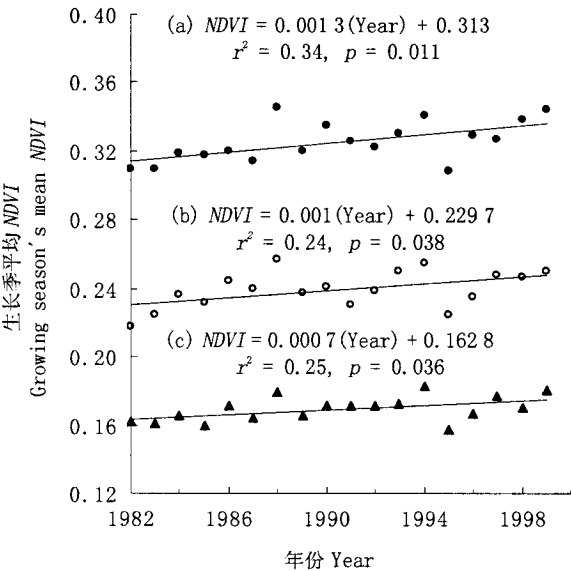


图3 1982~1999年高寒草甸(a)、温性草原(b)和高寒草原(c)生长季平均NDVI的年际变化
Fig.3 Interannual variations in growing season's mean NDVI over the period of 1982–1999 for alpine meadow (a), temperate steppe (b), and alpine steppe (c)

1999年间不同季节NDVI的变化量和变化率(表1)。

图4给出了整个研究区和不同草地类型的不同季节NDVI变化趋势。从图中可以看出,研究区春季和夏季NDVI均显著增加($p < 0.01$; $p = 0.042$),而秋季NDVI则没有明显的变化趋势($p = 0.451$)。

不同季节NDVI变化情况(变化量和变化率)有所差异。其中春季NDVI年平均增加量和增加率均为最大,分别为0.0014和0.92%。夏季NDVI的变化对生长季NDVI增加的贡献相对较低,其增加量为 0.0010 a^{-1} 。

3种草地植被春、夏、秋季NDVI变化趋势大致相同(图4)。如图4所示,高寒草甸春季和夏季NDVI均显著增加($p < 0.01$; $p = 0.027$),而秋季NDVI则没有明显的变化趋势($p = 0.585$)。温性草原和高寒草原春季NDVI显著增加($p = 0.002$; $p = 0.001$);夏季NDVI呈增加趋势,但都不显著($p = 0.087$; $p = 0.106$);而秋季NDVI变化不明显($p = 0.143$; $p = 0.461$)。表1给出了18年来青藏高原草地不同季节NDVI的变化量和变化率。从表中可以看出,春季为3种草地植被(高寒草甸、高寒草原、温性草原)NDVI增加最快的季节,增加率分别为1.10%、0.72%和0.92% a^{-1} ;春季还是3种草地植被(高寒草甸、高寒草原、温性草原)NDVI增加量最大的季节,增加量分别为0.0019、0.0009和0.0015 a^{-1} 。

2.3 NDVI变化与气候的关系

为了揭示青藏高原草地植被不同季节NDVI年际变化与气候因子的关系,我们对春、夏、秋季NDVI和对应的温度、降水进行了相关分析。同时考虑到植被生长对气候变化存在滞后效应(Braswell *et al.*, 1997),我们还对不同季节NDVI与其所对应前一季节的气候因子作了相关分析。

对于整个研究区而言,春季NDVI与春季温度显著正相关($r = 0.64$, $p = 0.004$),而与春季降水没有显著的相关关系($r = -0.20$, $p = 0.425$)。夏季温度的增加有利于夏季NDVI的增加($r = 0.40$, $p = 0.097$),而夏季降水和春季降水对夏季植被的生长影响不大($r = -0.30$, $p = 0.229$; $r = 0.36$, $p = 0.148$)。秋季NDVI与秋季温度显著正相关($r = 0.56$, $p = 0.016$),而与夏季降水和秋季降水均没有表现出明显的相关关系($r = 0.28$, $p = 0.267$; $r = -0.26$, $p = 0.307$)。可见,研究区春季、夏季NDVI的增加是由温度上升所致。特殊的是,虽然秋季温度与秋季NDVI的关系密切,但秋季NDVI却没有表现出显著的变化趋势。

高寒草地(高寒草甸和高寒草原)春季NDVI与春季温度均显著正相关($r = 0.69$, $p < 0.001$; $r = 0.51$, $p = 0.032$),而与春季降水不相关($r = -0.10$, $p = 0.699$; $r = -0.25$, $p = 0.308$)。夏季

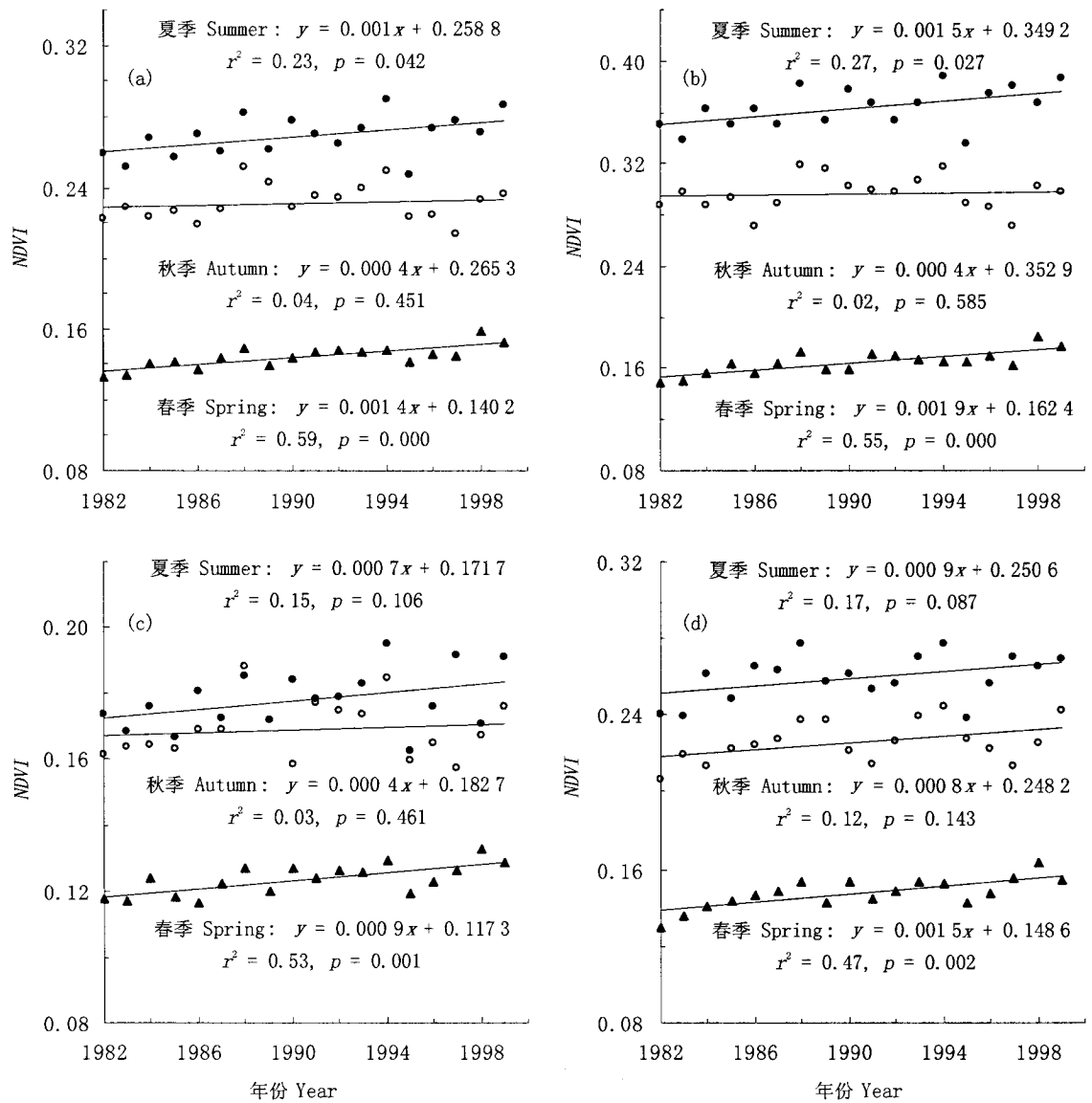


图 4 1982 ~ 1999 年整个研究区(a)、高寒草甸(b)、高寒草原(c)和温性草原(d)不同季节平均 NDVI 的变化
Fig.4 Interannual variations in seasonal mean NDVI over the period of 1982 – 1999 for study area (a),
alpine meadow (b), alpine steppe (c), and temperate steppe (d)

表 1 1982 ~ 1999 年间不同季节 NDVI 的变化量和变化率
Table 1 NDVI changing magnitude and changing ratio in different season during 1982 – 1999

	NDVI 变化量 NDVI changing magnitude (a ⁻¹)				NDVI 变化率 NDVI changing ratio (a ⁻¹)			
	生长季 Growing season	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	生长季 (%) Growing season	春季 (%) Spring	夏季 (%) Summer	秋季 (%) Autumn
研究区域 Study area	0.001 0	0.001 4	0.001 0	0.000 4	0.41	0.92	0.37	0.15
高寒草甸 Alpine meadow	0.001 3	0.001 9	0.001 5	0.000 4	0.39	1.10	0.41	0.11
高寒草原 Alpine steppe	0.000 7	0.000 9	0.000 7	0.000 4	0.41	0.72	0.39	0.22
温性草原 Temperate steppe	0.001 0	0.001 5	0.000 9	0.000 8	0.42	0.92	0.35	0.31

NDVI 的变化与夏季温度密切相关($r = 0.61$, $p = 0.007$; $r = 0.40$, $p = 0.099$), 而与夏季降水没有明
显的相关关系($r = -0.24$, $p = 0.35$; $r = -0.29$, $p = 0.23$)。但是, 夏季 NDVI 与春季降水关系密切(r

$= 0.49$, $p = 0.038$; $r = 0.51$, $p = 0.032$)。高寒草地(高寒草甸、高寒草原)春、夏季 *NDVI* 变化均受温度的影响。这意味着温度是高寒草地植被生长的限制因子,温度上升能促进草地植被的生长。夏季 *NDVI* 与春季降水的正相关关系表明,高寒草地植被的生长对降水变化存在滞后效应。两种草地秋季 *NDVI* 与气候的相关关系不尽相同。高寒草甸秋季 *NDVI* 与秋季温度密切相关($r = 0.68$, $p = 0.002$),而与秋季降水和夏季降水没有明显的相关关系($r = -0.05$, $p = 0.846$; $r = 0.33$, $p = 0.185$)。高寒草原秋季 *NDVI* 与秋季温度、秋季降水以及夏季降水均没有显著的统计关系($r = 0.28$, $p = 0.268$; $r = -0.37$, $p = 0.130$; $r = 0.17$, $p = 0.502$)。

温性草原春季 *NDVI* 与春季温度显著正相关($r = 0.54$, $p = 0.021$),而与春季降水没有显著的相关关系($r = 0.17$, $p = 0.490$)。夏季 *NDVI* 的变化和夏季温度、夏季降水以及春季降水都没有表现出显著的相关关系($r = 0.30$, $p = 0.226$; $r = 0.21$, $p = 0.406$; $r = 0.36$, $p = 0.141$)。秋季 *NDVI* 受秋季温度影响($r = 0.40$, $p = 0.097$),而与秋季降水没有明显的相关关系($r = 0.19$, $p = 0.45$)。但是,秋季 *NDVI* 却与夏季降水显著正相关($r = 0.52$, $p = 0.028$)。

3 讨 论

青藏高原作为地球上独特的自然区域,其气候变化与中国其它地区相比存在明显差异,同时又具有一定联系(汤懋苍和李存强, 1992)。18 年来研究区生长季温度平均每年增加 $0.071\text{ }^{\circ}\text{C}$,高于全国的 $0.046\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Piao *et al.*, 2004)。冰芯记录的结果显示青藏高原古代气温和现代气温变化幅度均比低海拔地区大(姚檀栋等, 2000)。冻土退化的研究结果也证实了青藏高原气温转暖的事实(南卓铜等, 2003)。可以看出,近 20 年来青藏高原的气温变化与全国一致,表现为升温,但升温幅度较大。高寒草地属于对全球变化较为敏感的生态系统类型(Zhang *et al.*, 1996)。我们的研究表明,18 年来研究区生长季 *NDVI* 显著增加($p = 0.015$),年平均增加率为 0.41% ,与全国平均值相当($0.44\% \text{ a}^{-1}$) (Piao *et al.*, 2004)。定位观测的数据也支持这一观点。定位研究的结果显示,1980~1990 年间高寒草甸(以矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸为例)的地上生物量显著增加(李文华和周兴民, 1998)。

导致北半球陆地植被生长季 *NDVI* 增加的因素

理论上主要来自 3 方面:生长季的提前、生长季的生长加速以及生长季的延长(Myneni *et al.*, 1997; Piao *et al.*, 2003)。研究区春季和夏季 *NDVI* 均显著增加($p < 0.01$; $p = 0.042$),而秋季 *NDVI* 则没有明显的变化趋势($p = 0.451$)。可以看出,生长季提前和生长季生长加速是青藏高原草地植被生长季 *NDVI* 增加的主要原因。春季为 *NDVI* 增加量和增加率最大的季节,而夏季 *NDVI* 的增加对生长季 *NDVI* 增加的贡献相对较小。这与 Zhou 等(2001)得出的春季提前是导致北半球植被活动增强的主要原因的结论一致。但青藏高原秋季植被活动变化不显著,而 Zhou 等(2001)在北半球尺度($40^{\circ} \sim 70^{\circ} \text{ N}$)上以及 Piao 等(2003)在国家尺度上的研究则显示北半球和中国的秋季植被活动在增强。

草地 *NDVI* 与气候关系密切(Jobbagy *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003)。我们的研究显示,3 种草地春季 *NDVI* 变化与春季温度显著正相关,这意味着春季 *NDVI* 的增加是由春季温度上升所致。春季温度增加导致植被生长季提前(Keeling *et al.*, 1996; Myneni *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2001),从而使得春季植被活动增强。高寒草地(高寒草甸、高寒草原)夏季 *NDVI* 的增加是夏季温度和春季降水共同作用的结果。温度通过生物地球化学反馈影响养分有效性,进而影响植被生长(Zhou *et al.*, 2003);降水通过影响土壤水分有效性,进而影响植被生长(Jobbagy *et al.*, 2002)。一方面,夏季温度增加导致土壤温度增加,进而加速了土壤有机质分解和营养元素释放,从而提高了土壤养分有效性;另一方面,春季降水的增加提高了土壤水分有效性。无疑,较高的土壤养分有效性和水分有效性将加速植被生长。特殊的是,温性草原夏季 *NDVI* 变化与气候因子并没有表现出显著的相关关系。

植被对气候变化的响应往往表现出一定的滞后效应(Braswell *et al.*, 1997; Piao *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2003)。Braswell 等(1997)在全球尺度上的研究显示,*NDVI* 与温度之间存在滞后。Piao 等(2003)在生物群区尺度上发现,中国植被对温度升高的响应存在滞后。另外,Wang 等(2003)在美国中部大平原 *NDVI* 与气候之间关系研究中发现,*NDVI* 与降水之间存在滞后。我们的研究同样支持植被对气候变化的响应存在滞后效应的结论。高寒草地(高寒草甸、高寒草原)植被夏季 *NDVI* 与春季降水显著正相关,表明两者之间存在滞后效应。植被对气候的长期适应和水分循环、生物地球化学循环的限制均有

可能减缓植被对气候变化的响应(Potter & Brooks, 1998)。并且, 植被对气候变化响应的滞后时间与生物地球化学循环的调解时间一致(Braswell *et al.*, 1997)。青藏高原的低温环境使得土壤有机氮和有机磷的矿化速率慢, 因此缺乏能为植被吸收利用的速效氮和有机磷(周兴民, 2001), 尤其是在春季, 植被生长受到 N、P 的限制。这可能导致了夏季植被生长对春季降水的滞后效应。对于高寒草地植被而言, 微生物调解 N、P 循环后, 降水才能促进植被生长。

气候变化会改变陆地生态系统的结构(Zavaleta *et al.*, 2003a), 同时会影响陆地生态系统的功能(Cao *et al.*, 2001)。Ni (2000) 利用 BIOME3 模拟了在未来气候、CO₂ 浓度变化后青藏高原不同植被类型分布以及生产力的变化情况。结果显示, 荒漠面积大幅度减少、植被带向西北方向推移, 11 种植被的净第一性生产力都显著增加。我们的结果表明 18 年来青藏高原草地植被活动在增强, 并且植被活动的变化与气候变化(尤其是温度上升)密切相关。可见, 过去 20 年的气候变化以及未来的气候变化都有利于草地植被生长。除气候因素之外, CO₂ 施肥效应(Dijkstra *et al.*, 2002)、大气 N 沉降(Magill *et al.*, 2004)等都会影响植被生长。但本文仅考虑了气候变化对草地植被覆盖的影响, 没有涉及 CO₂ 施肥效应、大气 N 沉降等方面。如果将来能够综合考虑气候变化、CO₂ 施肥效应、大气 N 沉降等因素, 将有助于更好地理解全球变化对青藏高原草地生态系统的影响。

参 考 文 献

- Academician of Chinese Academy of Sciences (中国科学院中国植被图编辑委员会) (2001). *Vegetation Atlas of China* (中国植被图集). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Braswell BH, Schimel DS, Linder E, Moore B (1997). The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science*, 238, 870–872.
- Cao MK, Zhang QF, Shugart HH (2001). Dynamic responses of African ecosystem carbon cycling to climate change. *Climate Research*, 17, 183–193.
- DeFries R, Field C, Fung I, Justice CO, Los S, Matson PA, Matthews E, Mooney HA, Potter CS, Prentice K, Sellers PJ, Townshend JRG, Tucker CJ, Ustin SL, Vitousek PM (1995). Mapping the land-surface for global atmosphere-biosphere models, toward continuous distributions of vegetations functional properties. *Journal of Geophysical Research*, 100, 20867–20882.
- Dijkstra P, Hymus G, Colavito D, Vieglais DA, Cundari CM, Johnson DP, Hungate BA, Hinkle CR, Drake BG (2002). Elevated atmospheric CO₂ stimulates aboveground biomass in a fire-regenerated scrub-oak ecosystem. *Global Change Biology*, 8, 90–103.
- Hicke JA, Asner GP, Randerson JT, Tucker C, Los S, Birdsey R, Jenkins JC, Field C (2002). Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982–1998. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, doi: 10.1029/2001GB001550.
- Holben BN (1986). Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1435–1445.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001, Impact, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jenkins JP, Braswell BH, Frolking SE, Aber JD (2002). Detecting and predicting spatial and interannual patterns of temperate forest springtime phenology in the eastern US. *Geophysical Research Letters*, 29, doi:10.1029/2001GL014008.
- Jobbagy EG, Sala OE, Paruelo JM (2002). Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, 83, 307–319.
- Keeling CD, Chin JFS, Whorf TP (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 382, 146–149.
- Li WH (李文华), Zhou XM (周兴民) (1998). *Ecosystems of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Approach for Their Sustainable Management* (青藏高原生态系统及优化利用模式). Guangdong Science & Technology Press, Guangzhou. (in Chinese)
- Li XB (李晓兵), Shi PJ (史培军) (2000). Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 379–382. (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Kafatos M (2000). Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 71, 239–247.
- Magill AH, Aber JD, Currie WS, Nadelhoffer KJ, Martin ME, McDowell WH, Melillo JM, Steudler P (2004). Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. *Forest Ecology and Management*, 196, 7–28.
- Myneni RB, Dong J, Tucker CJ, Kaufmann RK, Kauppi PE, Liski J, Zhou L, Alexeyev V, Hughes MK (2001). A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 14784–14789.
- 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.
- Nan ZT (南卓铜), Gao ZS (高泽深), Li SX (李述训), Wu TH (吴通华) (2003). Permafrost changes in the northern limit of

- permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 30 years. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 58, 817 – 823. (in Chinese with English abstract)
- Ni J (2000). A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their responses to global climate change. *Mountain Research and Development*, 20, 80 – 89.
- Piao SL, Fang JY, Zhou LM, Guo QH, Henderson M, Ji W, Li Y, Tao S (2003). Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi: 10.1029/2002JD002848.
- Piao SL, Fang JY, Ji W, Guo QH, Ke JH, Tao S (2004). Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China. *Journal of Vegetation Science*, 15, 219 – 226.
- Potter CS, Brooks V (1998). Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2921 – 2948.
- Schultz PA, Halpert MS (1995). Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land-surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2755 – 2777.
- Sun HL (孙鸿烈), Zheng D (郑度) (1998). *Formation, Evolution and Development of Tibetan Plateau* (青藏高原形成演化与发展). Guangdong Science & Technology Press, Guangzhou. (in Chinese)
- Tang MC (汤懋苍), Li CQ (李存强) (1992). An analysis on the Qinghai-Xizang Plateau as "a disturbing source region" for climatic changes. In: China Society of the Qinghai-Xizang Plateau Research(中国青藏高原研究会) ed. *Proceedings of the First Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau* (中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文选). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Tucker CJ, Slayback DA, Pinzon JE, Los SO, Myneni RB, Taylor MG (2001). Higher northern latitude NDVI and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45, 184 – 190.
- Wang J, Price KP, Rich PM (2001). Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3827 – 3844.
- Wang J, Rich PM, Price KP (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2345 – 2364.
- Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, Williams DG, Fay PA, Haddad BM, Harte J, Huxman TE, Knapp AK, Lin GH, Pockman WT, Shaw MR, Small EE, Smith MD, Smith SD, Tissue DT, Zak JC (2003). Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 53, 941 – 952.
- Yao TD (姚檀栋), Liu XD (刘晓东), Wang NL (王宁练) (2000). The range of climatic change on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 45, 98 – 106. (in Chinese)
- Zavaleta ES, Shaw MR, Chiariello NR, Mooney HA, Field CB (2003a). Additive effects of simulated climate changes, elevated CO₂, and nitrogen deposition on grassland diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 7650 – 7654.
- Zavaleta ES, Shaw MR, Chiariello NR, Thomas BD, Cleland EE, Field CB, Mooney HA (2003b). Grassland responses to three years of elevated temperature, CO₂, precipitation, and N deposition. *Ecological Monographs*, 73, 585 – 604.
- Zhang XS, Yang DA, Zhou GS, Liu CY, Zhang J (1996). Model expectation of impacts of global climate change on biomes of the Tibetan Plateau. In: Omasa K, Kai K, Taoda H, Uchijima Z, Yoshino M eds. *Climate Change and Plants in East Asia*. Springer-Verlag, Tokyo.
- Zhou LM, Tucker CJ, Kaufmann RK, Slayback D, Shabanov NV, Myneni RB (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 106, 20069 – 20083.
- Zhou LM, Kaufmann RK, Tian Y, Myneni RB, Tucker CJ (2003). Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi: 10.1029/2002JD002510.
- Zhou XM (周兴民) (2001). *Kobresia Meadow of China* (中国嵩草草甸). Science Press, Beijing. (in Chinese)