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 [J]. 气候与环境研究，22 (3): 289−300. Liu Zhenyuan, Zhang Jie, Chen Li. 2017. The latest change in the Qinghai−Tibetan Plateau vegetation index and its relationship with climate factors [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (3): 289−300, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.14247.

青藏高原植被指数最新变化特征及其与气候因子的关系

刘振元[1, 2]　张杰[1]　陈立[3]

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害省部共建教育部重点实验室，南京 210044
2 天津市蓟州区气象局，天津 300074
3 福建省气候中心，福州 350001

摘　要　利用 GIMMS/NDVI（全球库存模拟和影像研究/归一化植被指数，Global Inventory Modeling and Mapping Studies，Normalized Difference Vegetation Index）和 MODIS/ NDVI 遥感数据以及青藏高原 6 个气象代表站的站点数据，结合多种统计和计算方法，分析了青藏高原植被 NDVI 变化规律及其影响因子。结果表明：1982～2013 年青藏高原多年平均植被 NDVI 的空间分布存在明显的区域差异，总体上呈从东南向西北递减的趋势，而且发现不同地区植被的时间变化规律也不尽相同。根据高原长势最好的 6～9 月植被 NDVI 进行经验正交分解，将青藏高原植被分为 5 个区，并进一步分析了不同分区内植被的变化规律，得出：青藏高原植被 NDVI 下降最明显的区域在二区的噶尔班公宽谷湖盆地地区和北羌塘高原地区，植被 NDVI 上升最明显的区域在四区的祁连山东部地区。为了探讨青藏高原不同分区内影响植被 NDVI 下降的因子，从青藏高原二区、四区、五区各选取 NDVI 处于下降趋势的两个代表站点。研究分析了各个站点植被 NDVI 与降水量、平均气温、平均最低气温、平均最高气温、日照百分率 5 个气象因子的关系，得出：在高原二区日照强度是其它分区的两倍左右，而降水量相对较少导致植被 NDVI 降低。高原四区由于降水量小、温度高、日照强，导致植被 NDVI 处于下降趋势；在青藏高原五区虽然降水充足，但日照较弱，限制了植被的正常成长导致 NDVI 处于下降趋势中；其结果为高原植被退化机制研究及高原植被对大气反馈等奠定了基础。

关键词　青藏高原　植被生长状况　NDVI　气候变化

文章编号　1006-9585（2017）03-0289-12　　**中图分类号**　P436.22　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.14247

The Latest Change in the Qinghai−Tibetan Plateau Vegetation Index and Its Relationship with Climate Factors

LIU Zhenyuan[1, 2], ZHANG Jie[1], and CHEN Li[3]

1 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Jizhou District Meteorological office*, *Tianjin* 300074
3 *Fujian Climate Center*, *Fuzhou* 350001

收稿日期　2014-11-20；**网络预出版日期**　2017-03-12

作者简介　刘振元，男，1988 年出生，硕士，主要从事气候模拟与陆气相互作用的研究。E-mail: 871523584@qq.com

通讯作者　张杰，E-mail：gs-zhangjie@163.com; 365443382@qq.com

资助项目　国家自然科学基金项目 91437107，国家杰出青年科学基金 41625019

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grant 91437107), National Science Foundations for Distinguished Young Scholars (Grant 41625019)

Abstract Based on the remote sensing data of GIMMS(Global Inventory Modeling and Mapping Studies) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI, as well as data collected at six meteorological stations in the Qinghai-Tibetan Plateau, the authors discussed the spatio-temporal variation of the vegetation in the Qinghai-Tibetan Plateau and its influencing factors using statistical and calculation methods. The results show some obvious differences in the spatial distribution of annual mean Qinghai-Tibetan Plateau vegetation NDVI from 1982 to 2013; the NDVI over all decreased from southeast to northwest. In addition, temporal variations of the vegetation index in different areas were not exactly the same. Using EOF (Empirical Orthogonal Function) analysis, the authors analyzed the regular changing patterns of vegetation coverage over five subregions, which were divided based on NDVI during the growing season from June to September. The results indicate that the largest decrease in NDVI over the Qinghai-Tibetan Plateau occurred in the area of Gar-Lake Bangong Gully and the northern Qiangtang Plateau, while increases in NDVI over the Qinghai-Tibetan Plateau was found in the eastern Qilian Mountain. In order to explore the factors affecting the decline of NDVI in different subregions, two representative stations were selected in subregions II, IV, and V of the Qinghai-Tibet Plateau, where the NDVI showed a declining trend. The authors also discussed the relationship between NDVI and total precipitation, average temperature, mean maximum temperature, and percentage of sunshine duration at each station. Preliminary results show that in subregion II of the Qinghai-Tibet Plateau, the sunshine duration was double that in other subregions while precipitation was relatively low, resulting in vegetation degradation. The vegetation degradation in subregion IV was attributed to limited precipitation, high temperature, and strong sunshine. In subregion V, precipitation was sufficient but sunshine was weak, which also caused the vegetation degradation. The above results lay a profound foundation for the mechanism study of vegetation degradation in the Qinghai-Tibetan Plateau and its feedback to the atmosphere.

Keywords Qinghai-Tibetan Plateau, Vegetation growth status, Normalized difference vegetation index (NDVI), Climate Change

1 引言

青藏高原地域辽阔，平均海拔在 4 km 以上，它是全球气候系统的重要组成部分。其气候因子、动力及热力作用对全球气候系统的变化有着深刻的影响（叶笃正和高由禧，1979）。受全球变暖的影响，青藏高原正处在一个不断升温的过程中（冯松等，2001；蔡英等，2003；姚檀栋等，2006），并且温度的增长率要高于中国其它地区（Piao et al., 2004）。在温度升高的同时，日照时数（华维等，2009）和风速（杨春艳等，2014）呈减小趋势，湿度和降水的总趋势在波动中逐步增加（牛涛等，2002），并且以唐古拉山为界，南北差异比较明显（段克勤等，2008）。青藏高原气候的改变势必会对高原的下垫面状态产生影响，而植被作为高原下垫面最重要的表现形式之一（周锁铨和陈万隆，1995），近年来普遍受到重视。

随着观测技术的不断成熟，利用遥感数据对植被生长状况的监测已经成为现实（武正丽等，2014）。丁明军等（2005）对青藏公路与铁路沿途植被覆盖研究发现，1981～2001 年植被覆盖程度总体呈减少趋势。杨富裕等（2003）在研究藏北牧场时，发现已有近 30%的草地出现了严重退化，局部植被覆盖度下降了近 80%。赵忠等（2002）通过定位监测，发现高原东缘不同草地类型植物多样性随退化程度的加重而降低，优良牧草呈现退化演替趋势。王谋等（2005）通过分析青藏高原碳同位素的组成，得出高原腹地植被表现出明显退化趋势的结果。以上研究表明，近年来青藏高原大部分地区的植被都表现出退化趋势。

除人类活动外，气候条件是影响植被生长的主要因素，其中空气温度、降水、日照、土壤温度、空气湿度、CO_2 浓度等的变化都会影响植被的正常生长（陈世强等，2007；王根绪等，2010）。植被指数作为一种描述植被生长的重要信息，在植被生长状态以及植物物候研究中得到广泛应用，近年来，国内外有诸多学者利用植被指数针对不同区域，研究了植被变化与气候因子的关系。在国外，Ichii et al.（2002）在全球尺度上分析了气候变化与植被的关系，结果表明在北半球中高纬度地区春秋季植被指数随温度的升高而升高。Weiss et al.（2004）分析了新墨西哥州不同季节以及年内植被与气候的相关性，发现冬春季变暖是植被变化的主要原因。在国内，Piao et al.（2006）分析认为在全国尺度上和区域尺度上影响植被变化的因子有所不同，在全国尺度上植被的增长源于温度的升高，区域尺度上则与降水的增加有关。朴世龙和方精云

（2003）对中国植被年际变化活动进行趋势分析，研究表明青藏高原植被对气候变化的响应最为明显。因此青藏高原更是成为了研究的热点区域。王谋等（2004）分析认为青藏高原高寒草甸植被群落退化、生物量减少的主要原因是气候暖干化。康悦等（2011）分析气候变化对植被变化的影响时发现，黄河源区植被对气温的响应最为敏感，对局地降水响应很小。丁明军等（2010）分析了青藏高原植被对水热条件变化的响应，发现青藏高原植被对气温和降水的响应有滞后效应。

综合以上可以看出，大多数对高原植被变化及其与气候因子的关系的研究，只是停留在青藏高原局部地区，且对于青藏高原整体的研究也较为笼统，没有进行合理的分区。本研究采用最新的植被指数数据和更加全面的青藏高原气象站的观测资料，根据高原各地区植被变化趋势的不一致性，将高原植被分成不同的气候分区，更新了高原不同区域植被最近的演变动态。并选用分别位于高原不同分区内具有代表性的站点，探讨分析了不同区域植被退化与气候因子的关系。对高原植被生长状况变化的准确监测及其与气候变化关系的研究，有助于我们预测未来高原植被的变化和分布情况，为青藏高原热力作用的研究、植被生产、生态建设和社会经济的可持续发展提供决策依据。

2 资料与方法

2.1 数据选取

本文所采用的是归一化植被指数 NDVI（Normalized Difference Vegetation index，记为 N_{DVI}）（James and Kalluri,1994；Townshend,1994），其定义式为

$$N_{DVI}=(P_{NIR}-P_{red})/(P_{NIR}-P_{red}), \quad (1)$$

其中，P_{NIR}、P_{red} 表示红外波段与红光波段的反射率。N_{DVI} 值介于−1 和 1 之间，负值表示地面覆盖为云、水、雪等；0 表示有岩石或裸土等；正值表示有植被覆盖，且正值越大表明绿色植被密度越大。

研究所用到的数据：1）植被数据，GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) NDVI 数据是由美国马里兰大学全球土地覆盖研究组发布，时间分辨率为半月，空间分辨率为 8 km，时间序列为 1981～2006 年（其中 1981 年为 7～10 月）；MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 数据是由 MODIS 陆地产品组按照一定算法开发的月最大合成 NDVI 植被指数，空间分辨率 1 km，时间序列为 2001～2013 年 5～10 月。现将 2001～2006 年 5～10 月的 MODIS NDVI 与同时相的 GIMMS NDVI 数据逐月建立两者的回归模型（表 1），根据每月的回归方程将 MODIS NDVI 数据转换成 GIMMS NDVI 数据，这样就使 GIMMS NDVI 数据的时间序列延长为 1982～2013 年 5～10 月。2）气象数据，1961～2013 年青藏高原 102 个气象台站观测的数据，为保证研究结果的可靠性，经过筛选，最终选定青藏高原及其周边附近地区的 74 个无缺测数据的有效站点。

表 1 青藏高原逐月 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 之间的回归模型

Table 1 Regression model between monthly GIMMS NDVI and MODIS NDVI over the Qinghai-Tibetan Plateau

月份	回归模型	决定系数 R^2
5	y=0.724 x +0.008	0.916*
6	y =0.828 x +0.014	0.887*
7	y =0.836 x +0.002	0.905*
8	y =0.849 x +0.019	0.837*
9	y =0.801 x +0.025	0.919*
10	y =0.764x+0.023	0.839*

注：x、y 分别代表 MODIS NDVI 和 GIMMS NDVI。

*表示显著性系数 P＜0.05。

2.2 数据验证

在利用遥感数据进行计算之前，本文首先选取青藏高原北部的柴达木盆地内裸地的 NDVI 值作为稳定的本底值，对原数据的可靠性进行检验。图 1 为柴达木盆地内裸地的 1982～2013 年 6～9 月平均植被 NDVI 变化曲线，可以看出柴达木盆地内 NDVI 平均变化率为 0.00009/a，变化幅度约为 0.02。在近 30 年间 NDVI 线性变化趋势不明显，

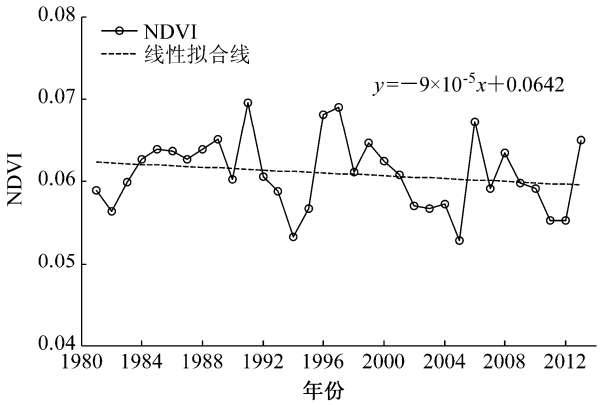

图 1 柴达木盆地 NDVI 的时间序列

Fig. 1 Changes in NDVI from 1982 to 2013 in the Qaidam basin

并且变化幅度较小。说明所选的 NDVI 数据完全满足计算的精度要求，表明本研究所利用的遥感数据在青藏高原存在很好的适用性及很高的可靠性。

在植被指数计算中，首先要确定植被与非植被的临界值，本文利用植被与非植被交界处，像素点的频率具有显著不同的特征，选取了 2002 年 8 月的 NDVI 数据，计算了 NDVI 的频率分布，发现植被指数频率分布的最大似然值为 0.079，将此值作为植被与非植被的临界值，来排除非植被因素对青藏高原植被变化的研究所带来的影响，下文所有计算全部把 NDVI 值低于 0.079 的视为非植被。

3 结果与分析

3.1 青藏高原植被多年平均 NDVI 空间分布

青藏高原独特的地理环境和其在全球气候变化以及区域气候变化中的重要地位，使得其植被变化特征成为全球研究的热点领域之一，本文的研究区域是青藏高原（25°N～40°N，68°E～105°E），所有绘图的青藏高底图为 2500 m 等高线以上的高原区域。多年平均的 NDVI 能够表征高原植被的整体状况，根据 NDVI 数据分析了 1982～2013 年 6～9 月平均植被的空间分布（图 2），从图 2 可以看出植被 NDVI 空间分布存在明显的区域差异，总体上呈从东南向西北递减的趋势，造成这种现象的主要原因是高原东部上空初夏受西南季风的影响，西南季风将孟加拉湾的暖湿空气源源不断地输送到高原的东部，使该地区的低空水汽条件充足，降水偏多，适合植被的生长（明庆忠，2007；王同美等，2008）。NDVI 的高值区位于青海、四川的交界处，由南至北主要包括岷山、邛崃山区针叶林地带、若尔盖丘状高原区灌丛地带、黄南山南部；NDVI 的最低值位于柴达木盆地附近地区，昆仑山南翼高原区为次低值区。

3.2 青藏高原植被生长状况时间变化规律

植被的生长状况取决于植被对自然环境、气候条件以及人为干扰的适应能力，在受到外界条件的胁迫下，植被的健康状况会受到影响。青藏高原人为干扰相对平原而言较小，但是气候变率较大。因此，高原上植被生长状况存在显著的时空差异。施能（1996）用下式定义了一个要素序列的气候趋势相关系数，这个系数能定量给出某种要素时间序列的升降程度。当趋势相关系数为正时，表示该要素所在计算的 n 年内有线性增加的趋势，且越接近 1 时上升趋势越接近线性；当趋势相关系数为负时，表示有线性下降趋势，且越接近−1 时下降趋势接近于线性。显著性检验：

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \qquad (2)$$

（其中 r 表示趋势相关系数）符合自由度为 n−2 的 t 分布，从而可以检验这种趋势是否有意义。

图 3a 给出了青藏高原 6 月 NDVI 趋势相关系数分布图（空白地方趋势相关系数为 0），通过计算可以得出植被下降地区面积占高原总面积的 41.3%，上升地区面积占高原总面积的 45.4%。从图中可以看出，植被下降区域主要集中在羌塘高原大湖区，高原南部边缘雅鲁藏布江下游高山峡谷区线性下降趋势并不明显。高原的东北部有上升趋势，在东祁连山地区植被有明显的线性上升趋势。图 3b 为青藏高原 7 月植被趋势相关系数图，其中有 42.1%的地区植被 NDVI 表现出下降趋势，48.9%的地区植被 NDVI 表现出上升趋势。线性下降趋势比较明显的地区主要集中在青海湖附近地区。图 3c 为青藏高原 8 月植被趋势相关系数图，经计算可得，在青藏高原有 45.8%的地区植被 NDVI 表现出下降趋势，另有 46.0%的地区植被 NDVI 表现出上升趋势。在高原的东南部表现出明显的线性下降趋势，主要集中在高原的东南部横断山中部，岷山、邛崃山区附近。图 3d 为青藏高原 9 月植被趋势相关系数图，经计算可得，在青藏高原有 41.5%的地区植被 NDVI 表现出下降趋势，另有 46.2%的地区植被 NDVI 表现出上升的趋势。在青藏高原的中部长江源宽谷区和那曲当曲河源宽谷区表现出明显的线性下降趋势，并且在高原的东南部横断山中部也表现出退化趋势。

由图 3 可以看出，青藏高原 NDVI 的趋势相关系数在不同月份有显著差异，主要的原因可能与不同月份的植被生长限制因素有关，另外，同一地区的植被在不同月份表现出不同的变化趋势，特别是青藏高原腹地地区，造成这种现象的主要原因是人为因素的影响，人为种植的经济农作物存在时间差异，而牧草和草甸具有时间连续性，这就可能造成同一地区在不同月份表现出不同的变化趋势。这说明高原植被生长与气候条件以及其它因素关系密切。对比不同月份的趋势相关系数，可以看出植被

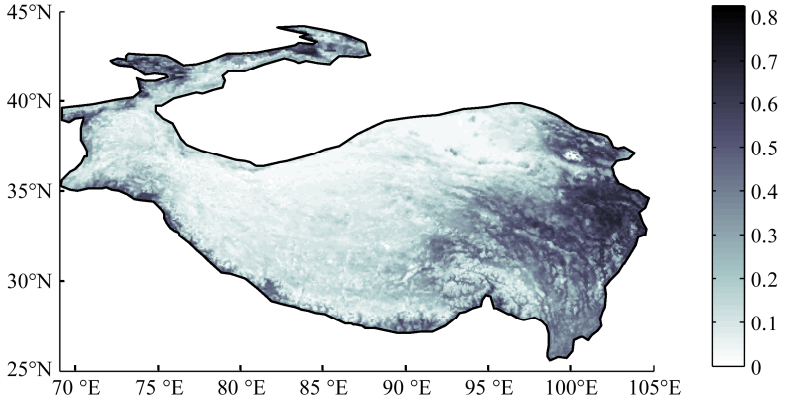

图 2 1982～2013 年 6～9 月青藏高原平均 NDVI 分布

Fig. 2 Average NDVI distribution over the Qinghai-Tibetan Plateau from Jun to Sep during 1982−2013

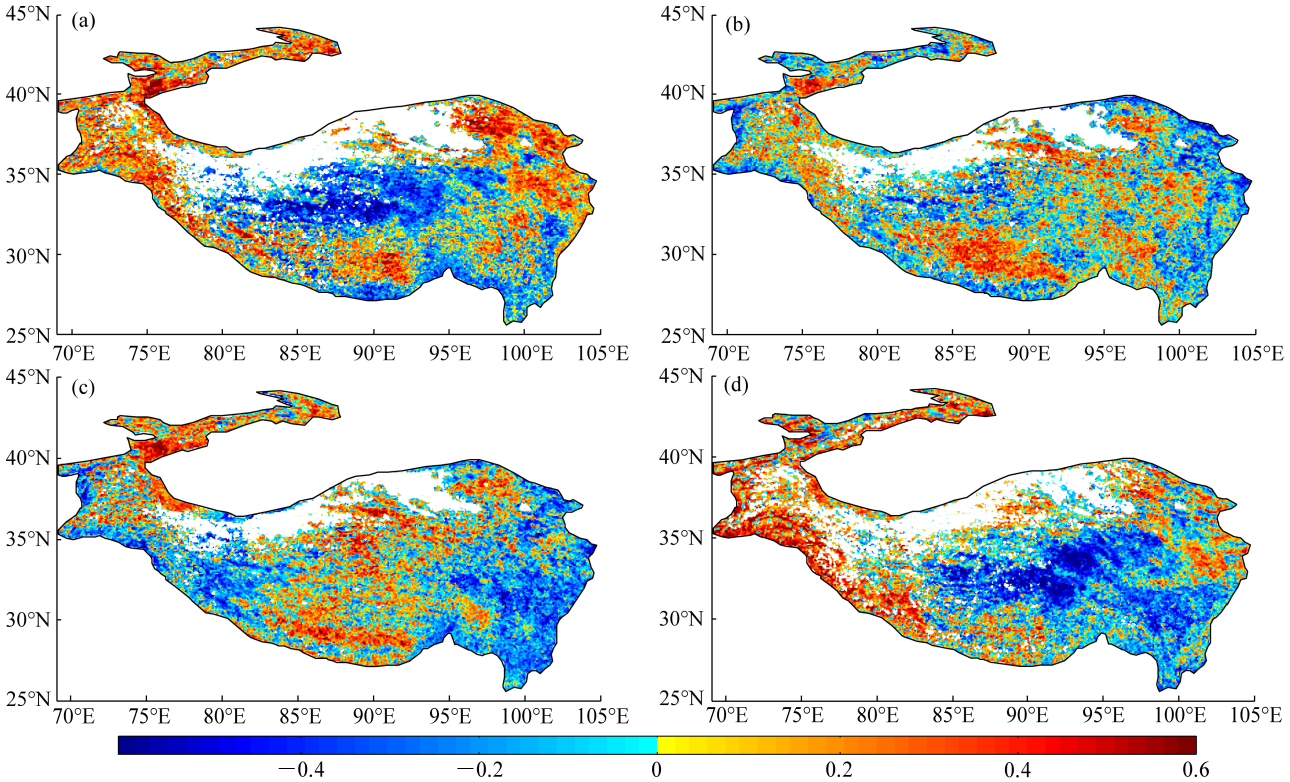

图 3 1982～2013 年（a）6 月、（b）7 月、（c）8 月、（d）9 月青藏高原植被 NDVI 趋势相关系数分布（相关系数大于 0.32 超过 90%的信度检验，大于 0.38 超过 95%的信度检验）

Fig. 3 Distributions of trend correlation coefficient of NDVI over the Qinghai-Tibetan Plateau in (a) Jun, (b) Jul, (c)Aug, and (d) Sep during 1982−2013 (correlation coefficient greater than 0.32 exceeds the 90% confidence level, and that greater than 0.38 exceeds the 95% confidence level)

NDVI 的趋势相关系数在高原中东部、西南部以及北部的祁连山地区都表现为增加趋势，而在高原西北部、中西部、中部以及东南部分区域出现斑块状降低趋势。NDVI 在不同时间的演变规律反映了植被的演变与更替，特别是当 NDVI 的趋势相关系数为负值时，反映出植被正处于降低趋势中，其有可能与植被退化相联系，因此，更值得关注。

3.3 青藏高原植被的气候分区

综合分析 1982～2013 年 6、7、8、9 月 NDVI 的趋势相关系数分布图，可以得出：6、9 月青藏高原植被 NDVI 表现出下降趋势的地区主要集中在高原中部；7、8 月高原植被 NDVI 在不同地区表现出

下降趋势，其中线性下降比较明显的地区在高原东南部的边缘。造成这种空间变化不一致现象的主要原因是这些下降区域处在不同的气候区，受不同的气候系统和气候条件的影响。

青藏高原地区由于特殊的地理位置及地形，气象要素的变化受地形影响程度比其他地区要高，局地特征显著（张立新等，2001）。高原的温度和水分条件具有自西北向东南变化的特征，高原的西北部比较严寒干燥，东南部比较温暖湿润（林振耀和吴祥定，1981）。高原大部分地区属于干旱半干旱地区，一年当中的降水量主要集中在 5～10 月（韦志刚等，2003）。在具有地域分布特征的各自然因子及过程的影响下，植被空间分布及其变化也具有明显的地域分异特征（李晓兵等，2004）。NDVI 植被指数能够有效地反映植被的长势情况，并且能够侦查出植被随气候的变化而发生变化，可以合理地判断出植被变化是否鉴于植被类型的转变而产生的。因此可以根据高原植被不同地区的 NDVI 变化情况对高原植被进行分区，本文通过经验正交函数（Empirical Orthogonal Function，EOF）分析方法对青藏高原植被生长季长势最好的6～9月NDVI进行时空分离，结果表明：青藏高原植被 NDVI 信息主要集中在前几个模态，其中前 5 个模态的累计方差贡献率达 55.31%，由此说明植被 NDVI 一半以上的信息都包含在前 5 个模态之中。对特征向量进行 North 检验（魏凤英，2007），发现只有前 2 个模态能够有效地分离，因此在 EOF 分析的基础上，进行了旋转经验正交函数（Rotated Empirical Orthogonal Function，REOF）分析，根据 REOF 前五个旋转模态的空间分布，可以将高原分成如图 4 所示的 5 个不同的植被分区。由图 4 可以看出青藏高原植被的分区基本上分出了高原地区不同的植被类型，一、二区为高原中西部荒漠区，三区为高寒草原、草甸的过渡区，四区为青海省东部的草甸灌木以及高原北部的荒漠区，五区为高原东南部的森林灌木区。

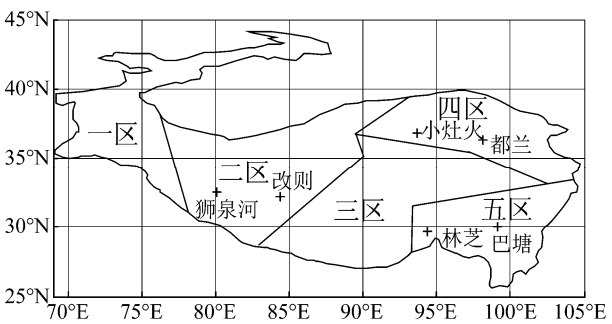

图 4 青藏高原植被分区图

Fig. 4 Subregions over the Qinghai-Tibetan Plateau based on NDVI

为了探讨不同分区植被的变化规律，对青藏高原 5 个分区植被生长季 NDVI 的变化规律分别进行了研究，分析了 1982～2013 年 6～9 月平均 NDVI 的时间变化规律，如图 5 所示，四区和五区的平均 NDVI 值要明显高于其他分区的平均 NDVI 值，平均 NDVI 的次高值在三区，而二区的 NDVI 值最低。经计算可得一至五区植被 NDVI 的趋势相关系数分别为 0.6243、−0.4187、0.3774、−0.4293、−0.5108。因此可以看出，在青藏高原一区和三区的 NDVI 值表现出上升趋势，而二、四、五区出现下降趋势，其中线性下降最明显的为第五区。

由于植被的生长变化存在周期性，为了进一步确定青藏高原不同地区 NDVI 的具体变化情况，对 1982～2013 年 6、7、8、9 月青藏高原植被 NDVI 进行分析研究，如图 6a 所示，为青藏高原 1982～2013 年 6～9 月 NDVI 的趋势相关系数全部小于 0 的区域，由图可以看出近 30 年间青藏高原植被退化比较明显的区域分布在高原的西北部和东南部。青藏高原植被 NDVI 下降最明显的区域在高原西北部的噶尔—班公宽谷湖盆地地区和北羌塘高原地区；青藏高原北部柴达木盆地地区植被 NDVI 有下降趋势，下降趋势最明显的在柴达木盆地东南部地区；青藏高原东南部出现大面积的植被 NDVI 退化趋势，但退化趋势并不明显。如图 6b 所示，为青藏高原 1982～2013 年 6～9 月 NDVI 的趋势相关系数全部大于 0 的区域，青藏高原植被 NDVI 上升趋势最明显的区域在祁连山东部地区；其次是在柴达木盆地东南部的阿尔金—祁漫塔格山区，另外高原东部的若尔盖丘状高原区和高原南部雅鲁藏布江中上游宽谷区，尤其在雅鲁藏布江中游宽谷区附近地区的植被 NDVI 有明显的上升趋势。

3.4 青藏高原植被退化成因相关分析

植被的变化是在地球内部作用（土壤母质和土壤类型）和外部作用（气温和降水等）共同影响下造成的（陈永金等，2010），并且植被能够影响太阳辐射吸收、潜热和感热通量以及碳循环等（黄方等，2008）。许多研究表明，在过去的几十年中，以气候变暖为主要特征的气候变化已经导致了植被生长的显著变化，并且植被的变化在区域上存在很大的差异性。高原的东南部在夏季受西南季风影

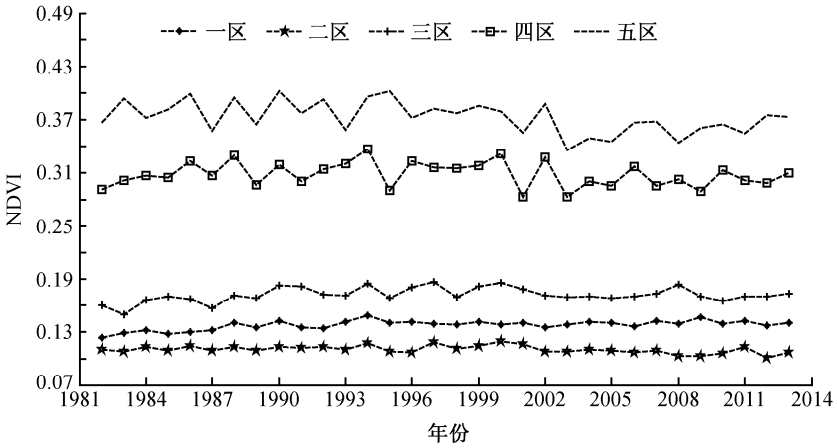

图 5 青藏高原各分区内 6～9 月平均 NDVI 时间序列

Fig. 5 Time sequences of average NDVI in each subregion over the Qinghai-Tibetan Plateau from Jun to Sep

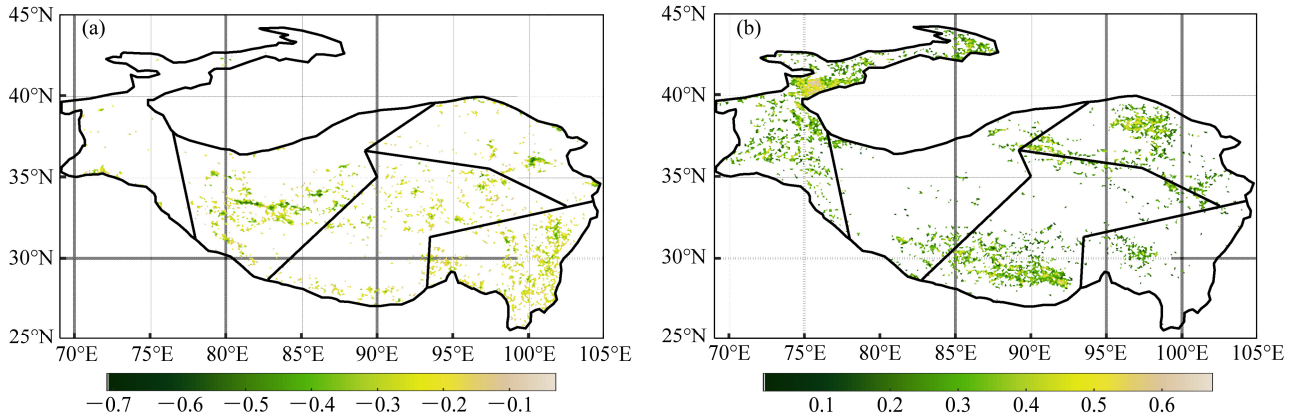

图 6 1982～2013 年 6～9 月青藏高原植被 NDVI（a）下降和（b）上升区域分布（阴影为趋势相关系数）

Fig. 6 NDVI distributions in the regions with (a) decreasing NDVI and (b) increasing NDVI over the Qinghai-Tibetan Plateau from Jun to Sep during 1982−2013 (shadings denote trend correlation coefficients)

响，北部和西部受西风带影响，这就导致东南部较湿润，西部及西北部相对干燥并且由于复杂的气候与较大的地形差异，使区域降水量和温度有很大的差异。

由图 6b 可以看出，青藏高原第三分区属于高寒草原、草甸的过渡区，植被表现出不同程度的增加趋势，另外在高原四区高原北部荒漠地带和一区的低植被覆盖区域也出现植被 NDVI 增加现象，在植被相对比较稀疏的地区降水的变化是引起植被变化的主要因素（李晓兵等，2002；王青霞等，2014）。

为了探讨青藏高原不同地区植被 NDVI 出现下降趋势的成因，在青藏高原植被 NDVI 表现出下降趋势的二区、四区和五区分别选取 2 个代表站点作为研究对象，所选站点首先要根据图 6a 选取 NDVI 下降趋势比较集中地区的站点，其次站点的植被 NDVI 指数下降趋势比较明显（NDVI 趋势相关系数小于−0.3），并且站点的植被变化受人类活动的影响相对较小。综合以上考虑，最终决定在青藏高原四区选取小灶火和都兰两个站点，在五区选取林芝和巴塘两个站点，在二区选取狮泉河和改则两个站点。根据 6 个气象站的地理位置，从 1982～2013 年青藏高原植被 NDVI 数据中提取与站点位置相对应的最近邻格点的 NDVI 值，作为该站点的植被指数。考虑到影响青藏高原植被生长变化的气候因子比较复杂多样，本文选取了月平均降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温和日照百分率 5 个因子，分别计算青藏高原二区、四区和五区各个代表站 6、7、8、9 月植被 NDVI 和 5 个气候因子的相关系数如表 2 所示。

表 2　青藏高原各分区代表站植被 NDVI 和 5 个气象要素的相关系数

Table 2　Correlation coefficients between NDVI and five meteorological elements at the representative stations of each subregion over the Qinghai-Tibetan Plateau

		与 NDVI 的相关系数				
月份	地区	降水量	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	日照百分率
6 月	二区	−0.3731*	−0.2876	−0.3976*	0.2841	0.2962
	四区	0.5042**	−0.4657**	−0.4355*	−0.4651*	−0.3524
	五区	−0.4326*	0.4468*	0.5037**	0.4238*	0.5106**
7 月	二区	−0.2184	−0.2126	−0.3640*	−0.1641	0.2796
	四区	0.2327	−0.4683**	−0.3768*	−0.3801*	0.4973**
	五区	0.4233*	−0.3587	0.2001	−0.4564*	−0.4522*
8 月	二区	−0.1517	0.1908	0.1513	0.3591	−0.2657
	四区	0.4711**	−0.4136*	−0.4055*	−0.1294	0.3893*
	五区	0.4113*	−0.2014	−0.1055	−0.3257	−0.1175
9 月	二区	−0.3649*	0.2435	−0.3296	−0.3054	0.3578
	四区	0.4956**	−0.4377*	−0.3921*	0.1324	−0.5067**
	五区	0.4632**	0.3489	0.4793**	0.3068	−0.4762**

*表示 $P \leqslant 0.05$ 具有统计学意义。

**表示 $P \leqslant 0.01$ 具有高度的统计学意义。

从表 2 可以看出，青藏高原中西部二区 6 月植被 NDVI 与降水量、平均最高气温表现出负相关，与日照呈正相关，高原中西部 6 月多年平均降水量在 13 mm 左右，平均最高气温在 17 ℃ 左右，而日照相对其他两区较为强烈，是同时期五区的两倍左右，因此地表蒸发量大，使植被生长得不到足够水分；7 月平均降水量在 37 mm 左右，但温度升高，日照基本不变，使降水很快在地表蒸发土壤中缺少水分，此时植被生长仍然得不到充足水分供应；8 月降水量继续增加，平均降水量在 40 mm，但日照也在增强，所以植被 NDVI 并没有增加的趋势；9 月平均降水量在 13 mm 左右，在降水量减少的同时平均气温降到 10 ℃ 以下，但是日照比前几个月都要强烈，不利于植被的生长。

从表 2 可以看出，位于青藏高原北部的四区 6 月植被 NDVI 与降水量成正相关，相关系数达 0.5 以上，与平均气温、平均最低气温、平均最高气温成负相关，相关系数在 0.5 左右，由于青藏高原北部 6 月代表站多年平均降水量在 28 mm 左右，降水量处于较低值，同时温度的升高和日照的增强也加大了地表蒸发量，不利于土壤中水分的保存，进而对植被的生长产生了不利的影响；7 月降水量相比 6 月略有增加，但由于平均气温相比 6 月增长了 4 ℃，平均最高气温增长了 3 ℃，且平均最低气温也增长了 3 ℃ 左右，不利于植被的生长；8 月相对于 7 月平均温度略有下降，但平均最高气温要比 7 月还高出 5 ℃，而且降水量（15 mm 左右）相对于前两个月份都要低，温度高、日照强和降水少使得土壤中水分减少，使植被生长得不到充足的水分供应；9 月降水量为四个月份中最低的在 9 mm 左右，温度有所降低，而日照却是最强烈的不利于植被的生长。

从表 2 可以看出，位于青藏高原东南部的五区 6 月植被 NDVI 与降水量表现出负相关，与平均气温、平均最高气温、平均最低气温和日照百分率都表现出正相关，由于青藏高原东部 6 月降水量多年平均值较高，保持在 120 mm 左右，虽然为植被的生长提供了充足的水分，但是由于平均温度在 17 ℃ 左右，并不是植被生长的最佳温度，日照相比北部地区也有所不足，不能让植被很好地进行光合作用积累有机物；青藏高原东部地区 7 月植被 NDVI 与降水正相关，与平均气温、平均最高气温、平均最低气温和日照百分率呈负相关，高原东部 7 月多年平均降水量在 140 mm 左右，能够为植被的生长提供水分，但日照的强度不能为植被的光合作用提供充足的光照，不利于植被生长；青藏高原东部地区 8 月平均气温有所升高，日照与前两个月相比基本没变，但是降水量有所下降，平均在 100 mm 左右，这是植被下降的原因；9 月植被 NDVI 与降水量和平均最高气温表现出正相关，与日照表现出负相关，因为 9 月平均降水量最少在 95 mm 左右，而日照为几个月当中最强的，使植被不能正常生长，出现下降趋势。

植被 NDVI 与气候因子的相关系数，可以在一定程度上反映出植被 NDVI 与气候因子的关系，从表 2 及多年平均状态的气候特征可以看出植被 NDVI 的退化与气候因子存在一定的联系，而植被指数的减小也可能是植被类型的转变，在高原主要的植被类型包括高山灌木，高寒草地等。高原植被由灌木向草地的转变也是植被退化的一种表现形式，并且通过 NDVI 的变化能较好地侦查到植被类型的转变。考虑到气候的变化存在年际变化特征，所以对每个代表站近 30 年的 NDVI 和气象要素进行去趋势处理后，得到 NDVI 和 5 个气象要素的时间序列，将 NDVI 的波动序列分别与去趋势之后的气象要素进行相关分析，相关系数如表 3 所示。

从表 3 可以看出，在高原中西部的二区 6 月植被 NDVI 与降水量相关系数为－0.36（$P \leqslant 0.05$），

表 3 青藏高原各分区代表站植被 NDVI 和 5 个气象要素去趋势以后的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between detrended NDVI and five meteorological factors at the representative stations over the Qinghai-Tibetan Plateau

		去趋势后的相关系数				
月份	地区	降水量	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	日照百分率
6 月	二区	−0.3671*	−0.2851	−0.3014	0.1093	0.0314
	四区	0.3324	−0.4127*	−0.3830*	−0.3498	−0.3147
	五区	−0.2036	0.4537*	0.4762**	0.2163	0.5011**
7 月	二区	−0.1576	−0.0479	−0.0772	−0.1532	0.2234
	四区	0.1225	−0.3749*	−0.2396	−0.3128	0.4067*
	五区	0.3985	−0.3174	0.2051	−0.4019*	−0.3952*
8 月	二区	−0.0840	0.1538	0.1414	0.3425	−0.2575
	四区	0.4001*	−0.2835	−0.3961*	−0.0654	0.3628*
	五区	0.3936*	−0.0864	−0.0756	−0.1958	−0.3279
9 月	二区	−0.3739*	0.1615	−0.4123	−0.3174	0.3624*
	四区	0.4639**	−0.4128*	−0.3629*	0.2061	−0.4934**
	五区	0.4529*	0.3185	0.4826**	0.4965**	−0.4625**

*表示 $P\leqslant 0.05$ 具有统计学意义。

**表示 $P\leqslant 0.01$ 具有高度的统计学意义。

植被指数降低的时候高原西部 6 月降水量随时间在增加，尽管如此西部的降水量仍然很低，是控制植被生长的主要因子。7 月平均气温在不断增加，日照基本没有太大变化，降水量也随时间有所增加，由于日照的最低值都要比高原其他地区强烈，所以使水分迅速蒸发，不利于植被生长，使 NDVI 表现出下降趋势；8 月高原的平均气温、平均最高气温、平均最低气温都在下降，日照在增强，与此同时植被 NDVI 表现出下降趋势；9 月的降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温相对前几个月继续下降，日照继续增强，结合表 3 可以看出，降水量和日照是限制 9 月高原中西部二区植被生长的主要因素。

从表 3 可以看出，在青藏高原北部的四区，代表站 6 月植被 NDVI 指数随着时间在减小，6 月的平均气温和最高气温都在不同程度的升高，并且 NDVI 与平均气温和平均最高气温相关系数都在 0.41 左右（$P\leqslant 0.05$），虽然在 6 月高原北部的四区降水较少，但是植被正处于生长开始阶段，所需水分并不是限制植被生长的主要因素，在四区影响 6 月植被生长的主要气候因子是温度；代表站 7 月的平均温度和日照随着时间都在增强，增加的速度要强于 6 月，并且 NDVI 与平均气温和日照百分率的相关系数在 0.40 左右（$P\leqslant 0.05$），温度和日照的同时增强导致地表蒸发量在增加，植被生长缺少水分，所以在四区影响 7 月植被生长的主要气候因子是温度和日照；8 月代表站 NDVI 与降水量的相关系数为 0.4（$P\leqslant 0.05$），代表站 8 月的 NDVI 在减小，降水同时也在不断减少，而 NDVI 与平均最高气温相关性在−0.39（$P\leqslant 0.05$），随着 NDVI 的减小平均最高气温在升高，这就使植被生长可吸收到的水分减少，导致 NDVI 在降低；9 月代表站 NDVI 与降水量相关系数为 0.46（$P\leqslant 0.01$），代表站 NDVI 与日照的相关系数在−0.49（$P\leqslant 0.01$），降水量的减少和日照的增强使得高原北部的四区 9 月 NDVI 出现下降趋势。

从表 3 可以看出，在高原东南部的五区，6 月植被 NDVI 与平均气温的相关系数为 0.45（$P\leqslant 0.05$），NDVI 与平均最高气温的相关系数为 0.47（$P\leqslant 0.01$），可以看出在代表站植被 NDVI 下降的同时，平均气温和平均最高气温都在随时间表现出不同程度的下降，NDVI 与日照的相关系数在 0.5（$P\leqslant 0.01$），降水量随着时间没有明显变化，基本上维持在较高的值，所以控制五区 6 月植被生长的主要气候因子为平均气温和日照；7 月 NDVI 与平均最低气温和日照的相关系数都在 0.4（$P\leqslant 0.05$）左右，说明在近几十年高原东南部 7 月的气温在降低，温度的降低不利于植被生长，并且日照的减弱使植被白天不能有效地进行光合作用积累有机物供呼吸消耗，所以在五区影响 7 月植被生长的主要气候因子为平均最低气温和日照；8 月 NDVI 与降水量的相关系数在 0.39（$P\leqslant 0.05$），在 NDVI 下降的同时降水量也在减少，并且下降速度明显，所以在高原东南部影响 8 月植被生长的主要气候因子为

表 4 青藏高原各分区代表站气象要素的月平均值

Table 4 Meteorological elements on average at the representative stations over the Qinghai-Tibetan Plateau

月份	地区	降水量/mm	平均气温/°C	平均最高气温/°C	平均最低气温/°C	日照百分率
6 月	二区	13.1	10.09	17.87	2.35	76.96%
	四区	27.6	12.14	20.31	7.23	61.46%
	五区	119.8	17.66	25.10	12.39	38.66%
7 月	二区	36.3	13.45	20.23	6.63	74.68%
	四区	28.5	16.45	23.87	10.56	62.84%
	五区	140.5	17.79	24.82	13.16	38.32%
8 月	二区	40.3	12.59	19.43	6.34	77.04%
	四区	15.5	15.51	25.26	8.45	67.76%
	五区	104.8	19.18	25.38	12.59	40.1%
9 月	二区	13.4	8.94	15.98	1.69	80.28%
	四区	9.0	10.78	18.68	3.95	71.44%
	五区	95.2	15.22	22.71	10.64	43.02%

降水量；9 月 NDVI 与降水量相关系数在 0.45（$P\leqslant 0.05$），NDVI 与平均最高气温、平均最低气温的相关系数都要大于 0.47（$P\leqslant 0.01$），与日照的相关系数在 0.46（$P\leqslant 0.01$），可以看出在高原五区导致植被 NDVI 处于下降趋势的主要因素为降水量和温度的降低，同时日照的增强也不利于植被的生长。

4 讨论与总结

本文利用 GIMMS NDVI 遥感数据（1982～2006 年）和经 MODIS NDVI 繁衍得到的 GIMMS NDVI 数据（2007～2013 年）以及青藏高原 6 个气象代表站的站点数据，结合多种统计和计算方法，分析了青藏高原植被覆盖变化规律和空间分布格局，主要探讨了青藏高原不同分区内导致植被下降的影响因子，得出以下结论：

（1）青藏高原多年平均植被 NDVI 空间分布存在明显的区域差异，总体上从东南向西北递减的趋势，植被 NDVI 的高值区位于青海、四川、宁夏的交界处，由南至北主要包括岷山、邛崃山区针叶林地带、若尔盖丘状高原区灌丛地带、黄南山南部；NDVI 的最低值位于柴达木盆地附近地区，昆仑山南翼高原区为次低值区。

（2）1982～2013 年青藏高原 NDVI 变化规律：6 月青藏高原植被 NDVI 下降区域主要集中在羌塘高原大湖区，高原南部边缘雅鲁藏布江下游高山峡谷区出现略微下降的趋势。高原的东北部有上升趋势，其中东祁连山地区植被有明显的上升趋势；7 月下降比较明显的地区主要集中在青海湖附近地区；8 月在高原的东南部横断山中部，岷山、邛崃山区附近出现明显的下降趋势。9 月在青藏高原中部的长江源宽谷区和那曲当曲河源宽谷区植被 NDVI 表现出明显的下降趋势，且在高原的东南部横断山中部也表现出退化趋势。

（3）对青藏高原长势最好的 6～9 月植被 NDVI 进行经验正交分解，将青藏高原植被分为五个区，对五个分区植被 NDVI 进行研究分析发现，下降趋势最明显的区域在二区的噶尔—班公宽谷湖盆地地区和北羌塘高原地区，其次为四区的柴达木盆地地区，主要集中在盆地的东南部地区。上升趋势比较明显的是四区的祁连山东部地区和柴达木盆地东南部的阿尔金—祁漫塔格山区，其次是在三区的雅鲁藏布江中游宽谷区附近地区。

（4）在青藏高原北部的四区 6、7 月影响植被生长的主要因子是温度和日照，随着温度的升高，日照的增强，植被 NDVI 表现出下降趋势，8、9 月日照继续增强，并且降水量减少迅速，使植被不能正常生长；在青藏高原东南部的五区各月份降水量充足，但是由于温度比较低并且日照较弱，致使植被不能通过光合作用积累足够的有机物供呼吸作用消耗，导致 NDVI 下降。在高原中西部的二区，各个月份的日照强度是其它地区的两倍左右，而降水量相对较少导致植被 NDVI 降低。

统计分析表明：不同气候区域的高原植被变化受不同气候条件的影响，20 世纪 80 年代之后的气候变暖背景改变了高原及周边的气候条件，使得高原植被出现了退化现象，不同区域植被退化成因也有所不同，本项目组将对上述的统计分析进行模拟研究，进一步解释高原植被退化的物理机理。

参考文献（References）

蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 2003. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化 [J]. 高原气象, 22 (5): 464–470. Cai Ying, Li Dongliang, Tang Maocang, et al. 2003. Decadal temperature changes over Qinghai−Xizang Plateau in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (5): 464–470.

陈世强, 文莉娟, 吕世华, 等. 2007. 黄河上游玛曲县植被指数与气候变化研究 [J]. 冰川冻土, 29 (1): 131–136. Chen Shiqiang, Wen Lijuan, Lü Shihua, et al. 2007. Study of NDVI and climate change in Maqu County, upstream of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 29 (1): 131–136.

陈永金, 陈亚宁, 刘加珍. 2010. 塔里木河下游植被覆盖度变化与地下水质关系 [J]. 环境科学, 31 (3): 612–617. Chen Yongjin, Chen Yaning, Liu Jiazhen. 2010. Correlationships between the coverage of vegetation and the quality of groundwater in the lower reaches of the Tarim River [J]. Environmental Science (in Chinese), 31 (3): 612–617.

丁明军, 沈振西, 张镱锂, 等. 2005. 青藏公路与铁路沿途 1981 年–2001 年植被覆盖变化 [J]. 资源科学, 27 (5): 128–133. Ding Mingjun, Shen Zhenxi, Zhang Yili, et al. 2005. Vegetation change along the Qinghai-Xizang highway and railway from 1981 to 2001 [J]. Resources Science (in Chinese), 27 (5): 128–133.

丁明军, 张镱锂, 刘林山, 等. 2010. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征 [J]. 地理科学进展, 29 (4): 507–512. Ding Mingjun, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. 2010. Seasonal time lag response of NDVI to temperature and precipitation change and its spatial characteristics in Tibetan Plateau [J]. Progress in Geography (in Chinese), 29 (4): 507–512.

段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 2008. 青藏高原南北降水变化差异研究 [J]. 冰川冻土, 30 (5): 726–732. Duan Keqin, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. 2008. The difference in precipitation variability between

the north and south Tibetan Plateaus [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 30 (5): 726–732.

冯松, 姚檀栋, 江灏, 等. 2001. 青藏高原近 600 年的温度变化 [J]. 高原气象, 20 (1): 105–108. Feng Song, Yao Tandong, Jiang Hao, et al. 2001. Temperature variations over Qinghai-Xizang Plateau in the past 600 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (1): 105–108.

华维, 范广洲, 周定文, 等. 2009. 青藏高原四季日照时数年际、年代际变化趋势分析 [J]. 自然资源学报, 24 (10): 1810–1817. Hua Wei, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen, et al. 2009. Analysis on the variation trend of interannual and interdecadal seasonal sunshine duration over Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 24 (10): 1810– 1817.

黄方, 王平, 刘权. 2008. 松嫩平原西部植被覆盖动态变化研究 [J]. 东北师大学报 (自然科学版), 40 (4): 115–120. Huang Fang, Wang Ping, Liu Quan. 2008. Analysis of vegetation change in west Songnen plain since 1998 [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition) (in Chinese), 40 (4): 115–120.

Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. 2002. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 [J]. Int. J. Remote Sens., 23 (18): 3873–3878, doi: 10.1080/01431160110119416.

James M E, Kalluri S N V. 1994. The Pathfinder AVHRR land data set: An improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring [J]. Int. J. Remote Sens., 15 (17): 3347–3363, doi: 10.1080/01431169408954335.

康悦, 李振朝, 田辉, 等. 2011. 黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 505–512. Kang Yue, Li Zhenchao, Tian Hui, et al. 2011. Trend of vegetation evaluation and its responses to climate change over the source region of the Yellow River [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 505–512, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.04.11.

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 [J]. 地球科学进展, 17 (2): 254–261. Li Xiaobing, Chen Yunhao, Zhang Yunxia, et al. 2002. Impact of climate change on desert steppe in northern China [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 17 (2): 254–261.

李晓兵, 陈云浩, 王宏, 等. 2004. 中国土地覆盖动态变化幅度的区域分异规律 [J]. 地理科学, 24 (3): 270–274. Li Xiaobing, Chen Yunhao, Wang Hong, et al. 2004. Regional distribution of land cover change amplitude in China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 24 (3): 270–274.

林振耀, 吴祥定. 1981. 青藏高原气候区划 [J]. 地理学报, 36 (1): 22–32. Lin Zhenyao, Wu Xiangding. 1981. Climatic regionalization of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 36 (1): 22–32.

明庆忠. 2007. 西南季风对中国自然环境影响的区域变化研究 [J]. 云南地理环境研究, 19 (4): 93–96. Ming Qingzhong. 2007. A study on regional change of natural environment of China influenced by Southwest monsoon [J]. Yunnan Geographic Environment Research (in Chinese), 19 (4): 93–96.

牛涛, 陈隆勋, 王文. 2002. 青藏高原冬季平均温度、湿度气候特征的 REOF 分析 [J]. 应用气象学报, 13 (5): 560–570. Niu Tao, Chen Longxun, Wang Wen. 2002. REOF analysis of climatic characteristics of winter temperature and humidity on Xizang-Qinghai Plateau [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (5): 560–570.

Piao S L, Fang J Y, Ji W, et al. 2004. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China [J]. Journal of Vegetation Science, 15: 219–226.

Piao S L, Mohammat A, Fang J Y, et al. 2006. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. Global Environmental Change, 16 (4): 340–348, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.002.

朴世龙, 方精云. 2003. 1982～1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异 [J]. 地理学报, 58 (1): 119–125. Piao Shilong, Fang Jingyun. 2003. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (1): 199–125.

施能. 1996. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系 [J]. 气象学报, 54 (6): 675−683. Shi Neng. 1996. Secular variation of winter atmospheric teleconnection pattern in the Northern Hemisphere and its relation with China's climate change [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (6): 675−683.

Townshend J R G. 1994. Global data sets for land applications from the Advanced Very High Resolution Radiometer: An introduction [J]. Int. J. Remote Sens., 15 (17): 3319–3332.

王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 2010. 青藏高原河源区地表过程与环境变化 [M]. 北京: 科学出版社, 20–35. Wang Genxu, Li Yuanshou, Wang Yibo, et al. 2010. Landsurface Processes and Environmental Changes in River Headwater Regions of Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 20–35.

王谋, 李勇, 白宪洲, 等. 2004. 全球变暖对青藏高原腹地草地资源的影响 [J]. 自然资源学报, 19 (3): 331–336. Wang Mou, Li Yong, Bai Xianzhou, et al. 2004. The impact of global warming on vegetation resources in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 19 (3): 331–336, doi: 10.11849/zrzyxb.2004.03.009.

王谋, 李勇, 黄润秋, 等. 2005. 青藏高原腹地植物碳同位素组成对环境条件的响应 [J]. 山地学报, 23 (3): 274–279. Wang Mou, Li Yong, Huang Runqiu, et al. 2005. The responses of floral carbonate isotopic compositions of the central Qinghai-Tibet Plateau plants to environmental conditions [J]. Journal of Mountain Science (in Chinese), 23 (3): 274–279.

王青霞, 吕世华, 鲍艳, 等. 2014. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析 [J]. 高原气象, 33 (2): 301–312. Wang Qingxia, Lü Shihua, Bao Yan, et al. 2014. Characteristics of vegetation change and its relationship with climate factors in different time-scales on Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (2): 301–312, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00002.

王同美, 吴国雄, 万日金. 2008. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响 [J]. 高原气象, 27 (1): 1–9. Wang Tongmei, Wu Guoxiong, Wan Rijin. 2008. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (1): 1–9.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术（第 2 版）[M]. 北京: 气象出版社, 1–298. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology (2nd ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–299.

韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 2003. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化 [J]. 大气科学, 27 (2): 157–170. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. 2003. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (2): 157–170, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.02.03.

Weiss J L, Gutzler D S, Allred Coonrod J E, et al. 2004. Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA [J]. Journal of Arid Environments, 57 (4): 507–534, doi: 10.1016/S0140-1963(03)00113-7.

武正丽, 贾文雄, 刘亚荣, 等. 2014. 近 10a 来祁连山植被覆盖变化研究 [J]. 干旱区研究, 31 (1): 80–87. Wu Zhengli, Jia Wenxiong, Liu Yarong, et al. 2014. Change of vegetation coverage in the Qilian mountains in recent 10 years [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 31 (1): 80–87.

杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 2014. 西藏高原气候变化及其差异性 [J]. 干旱区地理, 37 (2): 290–298. Yang Chunyan, Shen Weitao, Lin Naifeng. 2014. Climate change and its regional differences over the Tibet Plateau [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 37 (2): 290–298.

杨富裕, 张蕴薇, 苗彦军, 等. 2003. 藏北高寒退化草地植被恢复过程的障碍因子初探 [J]. 水土保持通报, 23 (4): 17–20. Yang Fuyu, Zhang Yunwei, Miao Yanjun, et al. 2003. Main limiting factors for deteriorated grasslands vegetation restoration of Northern Tibet Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation (in Chinese), 23 (4): 17–20.

姚檀栋, 郭学军, Thompson L, 等. 2006. 青藏高原冰芯过去 100 年 $\delta^{18}O$ 记录与温度变化 [J]. 中国科学（D 辑: 地球科学）, 36 (1): 1–8. Yao Tandong, Guo Xuejun, Thompson L, et al. 2006. $\delta^{18}O$ record and temperature change over the past 100 years in ice cores on the Tibetan Plateau [J]. Science in China (Ser. D), 49 (1): 1–9, doi: 10.1007/s11430-004-5096-2.

叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 1–278. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Qinghai-Xizang Plateau Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–278.

张立新, 徐学祖, 马巍. 2001. 青藏高原多年冻土与天然气水合物 [J]. 天然气地球科学, 12 (1–2): 22–26. Zhang Lixin, Xu Xuezu, Ma Wei. 2001. The Qinghai Tibet Plateau permafrost and natural gas hydrate [J]. Natural Gas Geoscience (in Chinese), 12 (1–2): 22–26, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2001.01.22.

赵忠, 王安禄, 马海生, 等. 2002. 青藏高原东缘草地生态系统动态定位监测与可持续发展要素研究Ⅱ高寒草甸草地生态系统植物群落结构特征及物种多样性分析 [J]. 草业科学, 19 (6): 9–13. Zhao Zhong, Wang Anlu, Ma Haisheng, et al. 2002. Studies on dynamics monitor and sustainable development in eastern edge of Qinghai−Tibetan alpine grassland Ⅱ Analysis of plant community structural features and grass species diversity [J]. Pratacultural Science (in Chinese), 19 (6): 9–13, doi: 10.3969/j.issn.1001-0629.2002.06.004.

周锁铨, 陈万隆. 1995. 青藏高原植被下垫面对东亚大气环流影响的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 18 (4): 536–542. Zhou Suoquan, Chen Wanlong. 1995. Numerical experiments with effect of Tibetan vegetation on East Asian atmospheric circulations [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18 (4): 536–542.