

引用格式: 郑海亮, 房世峰, 刘成程, 等. 青藏高原月 NDVI 时空动态变化及其对气候变化的响应[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 201-214.  
[Zheng H L, Fang S F, Liu C C, et al. Dynamics of monthly vegetation activity and its responses to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(2): 201-214. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180458

# 青藏高原月 NDVI 时空动态变化及其对气候变化的响应

郑海亮<sup>1,2</sup>, 房世峰<sup>3</sup>, 刘成程<sup>1</sup>, 吴金华<sup>1</sup>, 杜加强<sup>1\*</sup>

1. 中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 2. 首都医科大学附属北京世纪坛医院, 北京 100038; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

## Dynamics of Monthly Vegetation Activity and Its Responses to Climate Change in the Qinghai-Tibet Plateau

ZHENG Hailiang<sup>1,2</sup>, FANG Shifeng<sup>3</sup>, LIU Chengcheng<sup>1</sup>, WU Jinhua<sup>1</sup>, DU Jiaqiang<sup>1\*</sup>

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Beijing Shijitan Hospital affiliated to Capital Medical University, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Understanding the spatial pattern and dynamic processes of vegetation changes and their causes is one of the key topics in research on global change of terrestrial ecosystems. Characterized by vulnerable alpine vegetation, which is sensitive to external disturbance, the Qinghai-Tibet Plateau is one of the ideal areas for studying the response of vegetation to climate change. It is necessary to investigate the impacts of climate change on vegetation in a short synthetic period because of the intense climate variations in the Qinghai-Tibet Plateau. Previous studies have not sufficiently investigated NDVI change comparisons between various periods and the persistence of NDVI trends. In this study, we investigated monthly vegetation dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau and their relationships with climatic factors over 15 progressive periods of 18-32 years starting in 1982. This was accomplished by using the updated Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) third generation global satellite Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dataset and climate data. The NDVI time-synthesis method of each season masks the trends of NDVI variations within the single month. Except for August, vegetation increased in other six months, with a significant increase occurring in April-July and September. The increase rate of NDVI in most months decreased significantly with the extension of the period, indicating that the increasing trend of NDVI slowed down. At pixel scale, the regions with significant changes (including both increase and decrease) in NDVI

收稿日期: 2018-09-11; 修回日期: 2018-11-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500401-5); 国家自然科学基金项目(41001055)。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0500401-5; National Science Foundation of China, No.41001055. ]

作者简介: 郑海亮(1979-), 男, 安徽淮南人, 高级工程师, 博士, 主要从事生态环境保护、医学影像技术、生物力学等研究。

E-mail: doczheng@126.com

\*通讯作者: 杜加强(1980-), 男, 山东临沂人, 研究员, 博士, 主要从事生态功能评估、生态规划与设计、生态恢复和生态遥感研究。E-mail: dujq@craes.org.cn

showed increasing trends in most months, but the range of significant decreases in NDVI expanded faster than that of significant increases. Vegetation activities in the Qinghai-Tibet Plateau are generally controlled by temperature changes, but the dominant climatic factors affecting vegetation are varied in different months and regions. The vegetation activities in April and July were mainly promoted by temperature and sunshine hours, and those in June and September were controlled by temperature, and in August were mainly affected by precipitation. The emergence of long time series NDVI data sets provides a precondition for application of nested time series to study the trend analysis of vegetation growth and change. The persistence of the trend of vegetation activity may help to visualize the process of vegetation change, understand the vegetation response to climate change, and to predict the vegetation growth trend. It is inferred that the increases of NDVI in the future tend to be more moderate in general, but areas with significant pixel-scale changes in NDVI tend to increase in most months.

**Key words:** NDVI; monthly scale; spatiotemporal changes; climate influences; trends in nested periods; the Qinghai-Tibet Plateau

**\*Corresponding author:** DU Jiaqiang, E-mail: dujq@craes.org.cn

**摘要:** 青藏高原脆弱的高寒植被对外界干扰十分敏感,使其成为研究植被对气候变化响应的理想区域之一。青藏高原气候变化剧烈,在较短的合成时间研究气候变化对植被的影响十分必要。因此,本文利用GIMMS NDVI时间序列数据集,研究了1982–2012年青藏高原生长季月尺度植被生长的时空动态变化,探讨了其与气温、降水量和日照时数等气候因子的响应关系。结果表明:在区域尺度上,除8月外,其他各月份植被均呈增加趋势,显著增加多发生在4–7月和9月;大部分月份的NDVI增加速率随着时段的延长显著减小,表明NDVI增加趋势放缓;在像元尺度上,月NDVI显著变化的区域多呈增加趋势,但显著减少范围的扩张多快于显著增加。4月和7月植被生长主要是受气温和日照时数共同作用,6月和9月受气温的控制,而8月则主要受降水量的影响。长时间序列NDVI数据集的出现为采用嵌套时段研究植被生长变化趋势奠定了前提,而植被活动变化趋势的持续性则有助于形象表征植被活动变化过程、深入理解植被对气候变化的响应和预测植被未来生长变化趋势。由此推测,青藏高原月NDVI未来增加趋势总体上趋于缓和,但在像元尺度显著变化的区域趋于增加。

**关键词:** NDVI; 月尺度; 时空变化; 气候影响; 嵌套时间序列趋势分析; 青藏高原

## 1 引言

作为生态功能的综合测量<sup>[1–2]</sup>,植被生产力的时空变化对于陆地碳汇估算、自然资源管理、生态学研究非常重要<sup>[3]</sup>,监测植被生长变化、理解其成因已经成为过去几十年全球变化的关键问题之一<sup>[4–6]</sup>。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为表征地表植被覆盖和植被生长状况的敏感度量参数,可以很好地反映地表植被覆盖与生长状况及其动态变化<sup>[7]</sup>,是公认的用于定量表征植被生长状态及植被覆盖度的最佳因子<sup>[8]</sup>;同时,NDVI也被认为是植被生产力的有效代理指标<sup>[1,2,9–12]</sup>,是土地退化的关键度量指标之一<sup>[11,13–14]</sup>,从区域到全球尺度均得到了非常广泛的关注和应用<sup>[15]</sup>。长时间序列的NDVI数据是了解植被过去、监测现状、迎接未来挑战的强有力工具<sup>[4,16–17]</sup>。

青藏高原是地球上最高的高原,具有独特的植被组成和气候特征,处于生物极限水平的水热条件

使得区域生态系统十分脆弱<sup>[18–19]</sup>,被认为是全球气候变化的敏感区<sup>[19,20–23]</sup>。最近几十年,青藏高原经历了比同纬度地区更剧烈的气候变化<sup>[20,24–25]</sup>,环境状况发生了较大改变<sup>[26–28]</sup>。在此情况下,青藏高原地表植被的变化及其对气候变化的响应受到了非常广泛的关注。在青藏高原应用较多的NDVI时间序列数据集包括GIMMS NDVI、MODIS NDVI和SPOT-VGT NDVI等。基于GIMMS NDVI数据集的研究,研究时段的起点多为1982年,结束点包括1999、2002、2003、2006、2008、2009、2012年等时段<sup>[12,21–22,29–34]</sup>;使用SPOT VGT和MODIS NDVI的研究起始点分别为1998年和2000年。研究时段的不同造成研究结果不完全相同,无法直接进行相互验证、对比,也缺乏多个时段之间的对比分析。在上述研究中,NDVI的合成时间多为生长季或季节,在月尺度上的研究较少,而不同的合成时段长度对结果有一定的影响。由于气候因子的年内变化和差异,植被在一年内的不同生长时期对气温、降水量等气候要素的需

求、对气候变化的敏感程度也可能不同,因此,需要在月尺度上进行植被与气候变化的关系研究。本文利用 GIMMS NDVI3g 数据集,分别在 1982–1999 年、1982–2000 年、……、1982–2012 年共 14 个时段研究青藏高原月尺度的植被生长动态变化,以及其对气候变化和人类活动的响应,识别显著的区域,尤其是植被覆盖明显降低的区域,以期指导区域未来的生态保护与恢复工作。

## 2 研究区概况、数据源与研究方法

### 2.1 研究区概况

青藏高原位于中国西南部,地域辽阔( $73^{\circ}18'52''$  E– $104^{\circ}46'59''$  E,  $26^{\circ}00'12''$  N– $39^{\circ}46'50''$  N),面积约 257 万  $\text{km}^2$ ,东西长约 2945 km,南北宽达 1532 km。区域自然地理环境独特,地势高耸,山脉绵亘,地形复杂多样。青藏高原是中国最高的一级地形阶梯,也是中国乃至亚洲的重要生态屏障<sup>[35]</sup>。海拔、纬度和与海距离等因素的综合作用,造就了区域气候的水平地带分布:从东南部的温暖湿润转变为西北部的寒冷干燥,具有典型的高原气候特征。同时,由于区域内海拔的变化,植被分布也存在一定的垂直地带性。因此,青藏高原是研究植被对气候变化响应的理想区域之一。草地植被是本区的主要植被类型。

### 2.2 数据源

最新发布的 1982–2012 年的 GIMMS NDVI3g 数据来源于 NASA 戈达德航天中心全球监测与模拟研究组<sup>[36–37]</sup>,合成时间为 15 d,空间分辨率为  $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 。该数据集消除了火山爆发、太阳高度角和传感器灵敏度随时间变化等的影响,能够满足区域植被监测的需求<sup>[38–39]</sup>,具有数据质量较好、时间序列长、数据一致性好等特点,为植被动态变化监测研究提供了数据基础。

1982–2012 年气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网<sup>[40]</sup>,包括青藏高原及其周边的 142 个站点的月气温、降水量数据。

### 2.3 研究方法

一般认为,NDVI 为负值和较小值时,地表多为水体和裸地,非植被覆盖。青藏高原植被覆盖相对较差,若不排除非植被区域,则可能对结果产生较大影响。参考相关研究<sup>[4,20–21,41–42]</sup>,采用 0.1 的 NDVI

值作为植被阈值,排除非植被因素的干扰。

为了定量描述月 NDVI 的变化趋势,采用其与年份的线性回归系数和相关系数来表征变化量和变化趋势的显著性。利用月 NDVI 与气候因子的线性相关性判断植被与气候因子作用关系的性质和强度。

为深入探讨植被变化的动态过程、展望未来变化趋势,并与各种时段的已有研究便于对比,采用嵌套时段研究青藏高原的植被变化趋势,即在 1982–1999 年、1982–2000 年、……、1982–2012 年 14 个时间段上计算月 NDVI 的变化趋势及其与气候要素之间的相关性。14 个时段之间变化趋势的对比,有助于进一步理解植被动态变化过程。14 个时段 NDVI 变化量的变化趋势、强度,采用其与 1999–2012 年的 Pearson 相关系数、斜率来计算。对于上述所有趋势计算、相关性分析,根据显著性检验结果将变化趋势和相关性分为 3 个等级:极显著( $P < 0.01$ );显著( $P < 0.05$ );不显著( $P \geq 0.05$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 NDVI 变化

#### 3.1.1 区域尺度

1982–2012 年,各月份 NDVI 均呈增加趋势,尤其是 4 月和 9 月增加趋势显著。除 8 月大多数时段 NDVI 变化量为负值外,其他月份所有时段的变化量均为正值(表 1),总体呈波动增加趋势(图 1)。4 月的大部分时段、5–7 月的前几个时段和 9 月后 2 个时段变化显著(表 1)。4–7 月 NDVI 变化量随时段延长而持续显著减少( $R^2 = 0.69$ ,  $R^2 = 0.93$ ,  $R^2 = 0.787$ ,  $R^2 = 0.85$ ,  $n = 14$ ),8 月略有减少。9 月和 10 月 NDVI 变化量随时段延长呈不显著增加趋势(图 1)。

#### 3.1.2 像元尺度

除 5 月、8 月外,4–10 月所有时段 NDVI 呈增加趋势的面积均超过 50%,呈显著增加趋势的区域也远大于呈显著减少的区域(表 2,见第 205 页)。8–10 月显著增加的区域主要集中在东北部和西南部,4 月主要分布在东部地区,5–7 月则比较分散;5 月最后一个时段显著减少的像元较为集中,主要分布在西南和东北部分地区,其他月份显著减少范围较少,且分布较为分散(图 2,见第 206 页)。

4 月 NDVI 呈显著提升、显著减少的区域均呈随时段延长而极显著增加( $R^2 = 0.69$ ,  $R^2 = 0.82$ ,  $n =$

表1 青藏高原各时段月NDVI变化率

Tab. 1 Slopes in monthly NDVI during nested periods in the Qinghai-Tibet Plateau (10<sup>-4</sup>/yr)

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1982-1999	14.51**	13.72*	17.96*	13.37*	-1.15	6.32	0.51
1982-2000	9.96*	11.37*	20.68*	15.37*	-0.89	4.61	0.77
1982-2001	7.96	9.52*	16.36*	14.18**	-0.45	3.59	5.05
1982-2002	8.30*	9.42*	17.25*	12.31*	0.37	1.87	4.54
1982-2003	8.10*	7.83*	12.32	10.11*	-1.55	0.42	3.35
1982-2004	8.78*	6.18	8.18	7.50	-2.61	2.43	3.02
1982-2005	6.41	5.84	8.50	4.40	-4.70	5.24	3.61
1982-2006	6.18	5.55	7.53	5.23	-4.08	4.47	3.13
1982-2007	6.44*	5.69*	6.79	3.33	-4.33	5.29	2.71
1982-2008	5.64*	4.71	6.44	3.37	-6.38	3.38	3.02
1982-2009	6.71*	4.45	6.43	3.16	-4.27	4.33	2.45
1982-2010	6.00*	3.77	4.75	3.77	-2.17	6.14	3.98
1982-2011	5.42*	2.53	5.44	4.08	0.53	6.72*	3.82
1982-2012	4.78*	1.52	2.82	1.74	0.96	6.41*	2.94

注:\*和\*\*分别为统计显著性检验 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。

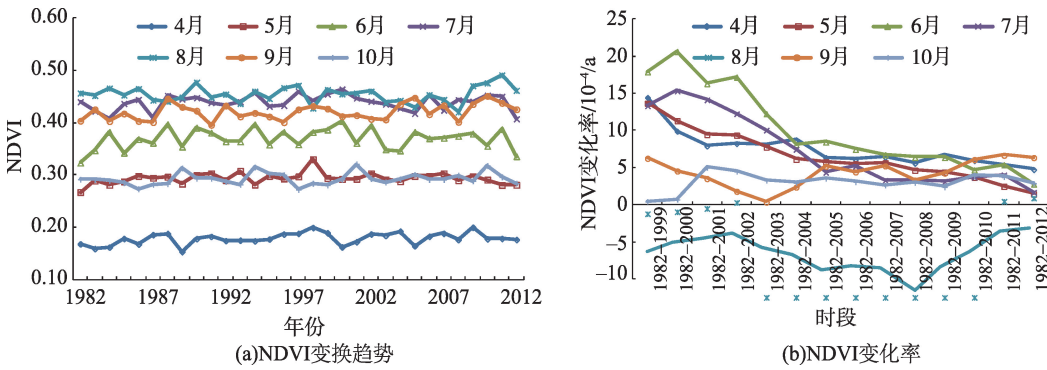


图1 青藏高原生长季月尺度NDVI变化趋势  
Fig. 1 Trends in monthly NDVI in the Qinghai-Tibet Plateau

14),呈增加趋势的区域极显著减少( $R^2 = 0.60, n = 14$ ,表2)。5月NDVI呈增加趋势、显著提升趋势的区域随时段延长分别呈极显著减少( $R^2 = 0.96, n = 14$ )和不显著减少,而显著减少区域极显著大幅增加( $R^2 = 0.82, n = 14$ )。6月和7月NDVI呈增长、显著提升的区域均呈随时段延长而显著减少(6月: $R^2 = 0.71, R^2 = 0.35$ ;7月: $R^2 = 0.74, R^2 = 0.65, n = 14$ ),显著减少区域呈极显著增加趋势( $R^2 = 0.78, R^2 = 0.71, n = 14$ )。8月NDVI呈增长、显著提升的区域随时段变化不显著,而显著减少区域则呈显著增加趋势( $R^2 = 0.32, n = 14$ )。尽管9月和10月NDVI呈显著提升、显著减少的区域均呈随时段延长而极显著增加(9月: $R^2 = 0.80, R^2 = 0.48$ ;10月: $R^2 = 0.88, R^2 = 0.76, n = 14$ ),但显著提升区域的增加速

率明显高于显著减少区域(9月:1.11%/yr/时段 vs 0.11%/yr/时段,10月:0.86%/yr/时段 vs 0.39%/yr/时段),呈增加趋势的区域也分别显著和不显著增加(9月: $R^2 = 0.74, n = 14$ ,表2)。

3.2 NDVI对气候变化的响应

3.2.1 区域尺度

除8月部分时段外,4-10月NDVI与气温的相关系数在所有时段均为正值,4月、6-7月和9月相关性较强,尤其是4月和6月在14个时段多呈显著正相关。10月的正相关均不显著,而8月则出现了负的相关系数,但相关性较弱(表3,见206页)。除5月外,其他6个月份NDVI与降水量的相关系数均为负值,显著负相关主要发生在4月、7月和8月,且



表2 青藏高原月 NDVI呈增加、显著增加和显著减少区域比例  
Tab. 2 Area proportions of significant increase and decrease in monthly NDVI (%)

时段	4月			5月			6月			7月		
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>
1982-1999	80.00	0.23	11.92	84.73	0.21	22.10	75.40	0.73	13.41	72.69	1.47	13.51
1982-2000	74.04	0.32	7.43	83.74	0.24	20.74	85.08	0.32	18.97	79.02	0.65	16.83
1982-2001	74.36	0.33	7.66	81.69	0.33	19.47	83.49	0.31	14.44	76.60	0.77	17.30
1982-2002	70.25	0.75	8.35	81.40	0.45	22.32	85.24	0.32	16.87	74.76	0.85	16.21
1982-2003	67.18	1.51	8.69	78.46	0.90	23.08	80.42	0.52	12.74	71.71	1.15	14.47
1982-2004	68.92	1.88	11.20	75.34	1.29	23.49	75.60	0.94	10.58	67.68	1.78	13.44
1982-2005	62.47	3.13	9.12	73.36	2.06	24.09	75.06	1.06	10.31	61.95	2.41	8.65
1982-2006	58.80	5.14	10.03	71.49	2.74	23.91	74.27	1.30	10.53	63.87	2.28	9.74
1982-2007	57.09	6.70	11.08	71.11	3.50	25.68	73.74	1.48	9.69	60.25	2.55	7.58
1982-2008	54.65	8.31	11.25	67.59	5.17	24.23	74.63	1.68	10.82	59.82	2.89	8.72
1982-2009	61.08	5.91	14.46	62.63	7.30	18.91	73.99	1.67	10.97	60.17	3.30	8.60
1982-2010	62.48	5.93	15.73	58.88	9.96	18.37	68.17	2.83	10.43	61.72	2.06	8.14
1982-2011	63.21	6.22	16.94	53.42	13.45	16.17	69.76	3.00	13.15	65.47	2.34	10.36
1982-2012	63.06	6.67	17.72	50.26	15.98	15.63	63.17	4.70	11.67	58.19	3.96	8.98
时段	8月			9月			10月					
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>			
1982-1999	54.84	1.99	4.38	62.30	1.14	3.23	53.69	1.42	2.64			
1982-2000	58.95	2.00	6.66	61.75	1.08	3.08	55.68	1.28	2.76			
1982-2001	57.73	2.30	7.44	61.78	1.04	3.77	63.73	0.67	4.43			
1982-2002	57.00	2.52	7.94	56.92	1.68	3.22	60.21	1.09	5.54			
1982-2003	51.82	4.13	6.26	53.89	2.06	3.03	59.05	1.51	5.58			
1982-2004	48.56	5.71	6.26	57.78	2.09	4.86	53.21	2.77	6.01			
1982-2005	44.81	7.74	6.22	63.67	2.02	8.44	55.55	3.32	7.75			
1982-2006	42.97	7.47	4.72	61.09	2.13	7.14	52.29	4.34	7.94			
1982-2007	40.32	8.42	3.57	61.94	2.22	8.94	53.45	4.82	7.47			
1982-2008	36.19	11.62	3.26	56.55	3.14	6.59	53.29	5.87	7.94			
1982-2009	42.19	8.47	4.43	59.13	3.23	8.60	52.79	6.06	8.07			
1982-2010	48.30	5.66	6.20	67.96	2.11	13.02	59.82	4.17	12.45			
1982-2011	56.42	4.31	9.53	71.46	2.02	16.65	61.36	4.32	13.37			
1982-2012	57.46	4.85	12.15	72.84	2.11	19.01	60.90	5.18	15.68			

注: *P*为呈正趋势的像元所占比例; *SN*为显著负趋势像元所占比例; *SP*为显著正趋势像元所占比例,下同。

14个时段基本均呈显著负相关(表4,见第207页)。NDVI与日照时数的相关性在8月和4月最强,多为极显著正相关,7月正相关性也较强,后几个时段达到了显著水平,其他月份相关性较弱(表5,见第207页)。

### 3.2.2 像元尺度

#### (1) 气温

除8月外,4-10月14个时段的NDVI与气温正相关区域面积均大于50%,呈显著正相关的区域面积远大于显著负相关区域,显著负相关的面积除8月外绝大部分时段均不超过2%(表6,见第208页)。

4-6月,显著正相关的区域主要分布在中东部,7-8月则较为分散,9-10月主要分布在腹地部分地区;显著负相关的区域主要分布在西藏南部(图3,见第209页)。NDVI与气温呈正相关区域随时段延长的变化模式为:4月和5月随时段延长显著减少( $R^2 = 0.34$ ,  $R^2 = 0.68$ ,  $n = 14$ ),9-10月呈极显著增加趋势( $R^2 = 0.65$ ,  $R^2 = 0.64$ ,  $n = 14$ ),其他月份变化趋势不显著。NDVI与气温显著正相关方面,除5月随时段延长极显著减少( $R^2 = 0.75$ ,  $n = 14$ )、8月不显著增加外,其他各月均极显著增加(4月:  $R^2 = 0.82$ , 6月:  $R^2 =$

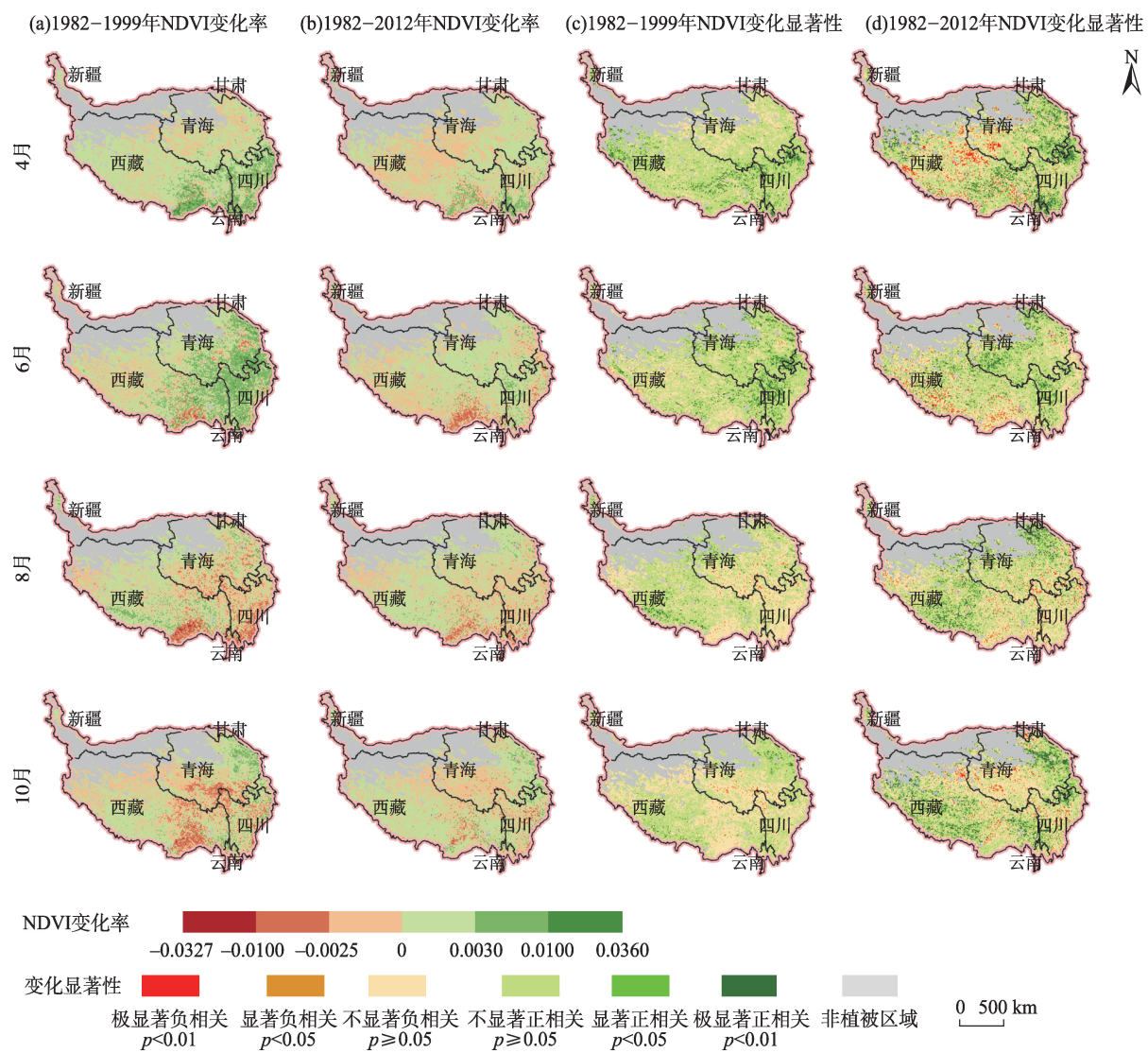


图2 青藏高原部分月份NDVI变化的空间格局

Fig. 2 Spatial patterns of monthly NDVI changes in the Qinghai-Tibet Plateau

表3 研究区域NDVI与气温的相关系数

Tab. 3 Relationships between monthly NDVI and temperature in the Qinghai-Tibet Plateau

时段	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1982-1999	0.55**	0.40	0.36	0.38	0.08	0.46	0.32
1982-2000	0.56**	0.39	0.40	0.48*	0.07	0.46*	0.32
1982-2001	0.56**	0.39	0.41	0.47*	0.08	0.41	0.38
1982-2002	0.58**	0.29	0.44*	0.46*	0.10	0.41	0.38
1982-2003	0.59**	0.30	0.47*	0.45*	-0.07	0.35	0.33
1982-2004	0.62**	0.28	0.48*	0.47*	-0.12	0.39	0.32
1982-2005	0.58**	0.27	0.49*	0.33	-0.24	0.49*	0.33
1982-2006	0.58**	0.27	0.48*	0.38	-0.20	0.47*	0.33
1982-2007	0.60**	0.31	0.48*	0.36	-0.24	0.49*	0.30
1982-2008	0.58**	0.27	0.48*	0.37	-0.16	0.43*	0.29
1982-2009	0.64**	0.28	0.48**	0.35	-0.11	0.48*	0.27
1982-2010	0.63**	0.26	0.45*	0.39*	0.03	0.52**	0.29
1982-2011	0.63**	0.22	0.46*	0.39*	0.07	0.54**	0.29
1982-2012	0.63**	0.16	0.36*	0.29	0.09	0.54**	0.30

注: \*和 \*\*分别为统计显著性检验  $P<0.05$  和  $P<0.01$ 。

表4 研究区域NDVI与降水量的相关系数

Tab. 4 Relationships between monthly NDVI and precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau

时段	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1982-1999	-0.56*	0.08	-0.25	-0.56*	-0.77**	-0.22	-0.16
1982-2000	-0.61**	0.07	-0.10	-0.57*	-0.75**	-0.23	-0.17
1982-2001	-0.60**	0.06	-0.12	-0.58**	-0.74**	-0.23	-0.19
1982-2002	-0.56**	0.10	-0.11	-0.57**	-0.75**	-0.22	-0.19
1982-2003	-0.57**	0.09	-0.18	-0.57**	-0.76**	-0.25	-0.18
1982-2004	-0.51*	0.06	-0.22	-0.59**	-0.74**	-0.32	-0.18
1982-2005	-0.51*	0.06	-0.24	-0.58**	-0.76**	-0.36	-0.13
1982-2006	-0.49*	0.08	-0.24	-0.60**	-0.75**	-0.35	-0.13
1982-2007	-0.48*	0.10	-0.23	-0.62**	-0.75**	-0.33	-0.13
1982-2008	-0.48*	0.08	-0.22	-0.60**	-0.74**	-0.32	-0.09
1982-2009	-0.51**	0.09	-0.24	-0.60**	-0.69**	-0.38*	-0.09
1982-2010	-0.50**	0.06	-0.23	-0.60**	-0.59**	-0.30	-0.07
1982-2011	-0.50**	0.03	-0.20	-0.57**	-0.62**	-0.26	-0.08
1982-2012	-0.49**	0.07	-0.22	-0.62**	-0.62**	-0.27	-0.06

注: \*和 \*\*分别为统计显著性检验  $P<0.05$  和  $P<0.01$ 。

表5 研究区域NDVI与日照时数的相关系数

Tab. 5 Relationships between monthly NDVI and sunshine hour in the Qinghai-Tibet Plateau

时段	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1982-1999	0.60**	0.07	0.04	0.45	0.69**	-0.05	0.28
1982-2000	0.61**	0.07	-0.05	0.38	0.67**	-0.03	0.28
1982-2001	0.60**	0.07	0.00	0.39	0.66**	-0.03	0.27
1982-2002	0.54*	0.04	-0.01	0.38	0.66**	0.02	0.27
1982-2003	0.53*	0.06	0.04	0.39	0.68**	0.03	0.25
1982-2004	0.53**	0.05	0.06	0.41	0.68**	0.10	0.25
1982-2005	0.53**	0.05	0.06	0.43*	0.70**	0.16	0.19
1982-2006	0.52**	0.05	0.06	0.44*	0.70**	0.15	0.19
1982-2007	0.50**	0.06	0.06	0.44*	0.71**	0.14	0.19
1982-2008	0.49**	0.08	0.07	0.43*	0.66**	0.16	0.17
1982-2009	0.55**	0.06	0.08	0.42*	0.64**	0.19	0.16
1982-2010	0.55**	0.07	0.09	0.42*	0.57**	0.13	0.11
1982-2011	0.54**	0.07	0.07	0.38*	0.59**	0.12	0.11
1982-2012	0.54**	0.02	0.10	0.44*	0.58**	0.13	0.11

注: \*和 \*\*分别为统计显著性检验  $P<0.05$  和  $P<0.01$ 。

0.91, 7月:  $R^2=0.97$ , 8月  $R^2=0.93$ , 9月:  $R^2=0.97$ ,  $n=14$ )。NDVI与气温显著负相关方面, 5-6月和9-10月随时段延长变化不显著, 4月、7-8月均显著增加(4月:  $R^2=0.85$ , 7月:  $R^2=0.42$ , 8月:  $R^2=0.49$ ,  $n=14$ )。

## (2) 降水量

NDVI与降水量的相关性以负相关为主, 所有月份正相关的区域比例均不足50%, 除个别月份少数时段外, 显著负相关的区域面积也多大于显著正相关(表7, 见第210页)。除5月显著正相关的区域主要集中分布在东部、6月分布在东部和西

南外, 其他月份显著正相关占比均较少, 而显著负相关的区域主要集中在研究区域腹部和南部(图3)。7-9月NDVI与降水量正相关区域随时段延长而极显著减少( $R^2=0.86$ ,  $R^2=0.60$ ,  $R^2=0.50$ ,  $n=14$ ), 其他月份变化不显著。除10月NDVI与降水量显著负相关的区域随时段增加而快速减少( $R^2=0.32$ ,  $n=14$ )外, 其他月份均显著增加(4月:  $R^2=0.41$ , 5月:  $R^2=0.78$ , 6月:  $R^2=0.74$ , 7月:  $R^2=0.47$ , 8月:  $R^2=0.89$ , 9月:  $R^2=0.61$ ,  $n=14$ )。显著正相关方面, 4月和6月显著增加( $R^2=0.46$ ,  $R^2=0.84$ ,  $n=14$ )、7月和10

表6 月NDVI与气温正相关、显著负相关和显著正相关的区域面积比例

Tab. 6 Area proportions of different correlations between monthly NDVI and temperature (%)

时段	4月			5月			6月			7月		
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>
1982-1999	81.57	0.21	16.93	80.63	0.21	15.47	70.80	1.01	9.21	63.03	0.87	3.49
1982-2000	82.51	0.28	17.02	79.84	0.24	16.14	76.06	0.57	10.57	67.37	0.85	6.15
1982-2001	82.63	0.23	16.93	78.92	0.19	14.53	75.56	0.51	11.14	66.50	0.87	4.55
1982-2002	80.85	0.22	15.78	73.31	0.57	11.09	77.20	0.54	13.12	65.86	0.87	4.63
1982-2003	79.83	0.22	15.55	72.92	0.66	11.55	78.30	0.30	14.44	66.36	0.83	4.61
1982-2004	80.59	0.27	17.22	74.01	0.52	11.75	78.35	0.30	15.74	68.10	0.65	5.30
1982-2005	79.68	0.33	16.72	74.14	0.52	11.95	78.08	0.31	16.59	61.77	1.06	3.97
1982-2006	80.07	0.30	16.82	74.08	0.53	12.03	78.68	0.35	16.59	64.82	0.53	4.58
1982-2007	77.13	0.40	17.10	75.77	0.44	11.92	78.63	0.34	16.90	62.89	0.63	4.50
1982-2008	75.19	0.47	17.24	73.77	0.65	11.19	78.82	0.37	17.22	63.04	0.68	4.56
1982-2009	79.92	0.48	22.42	74.39	0.39	10.94	78.16	0.50	17.64	62.65	1.10	5.47
1982-2010	79.18	0.64	23.80	71.96	0.42	10.67	75.42	0.74	17.27	64.41	2.14	9.08
1982-2011	79.61	0.65	24.34	69.55	0.42	9.62	76.04	0.63	17.90	65.29	1.81	9.12
1982-2012	80.01	0.64	24.33	65.61	0.73	8.49	73.34	1.22	17.04	62.34	2.09	8.05
时段	8月			9月			10月					
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>			
1982-1999	52.11	1.83	2.05	68.81	1.50	4.59	68.24	1.39	12.28			
1982-2000	47.84	3.03	1.84	67.84	1.44	4.72	69.08	1.36	13.16			
1982-2001	48.96	2.65	1.92	67.13	1.63	5.63	73.23	1.20	14.48			
1982-2002	49.20	3.03	1.92	67.76	1.34	5.73	73.22	1.35	14.64			
1982-2003	41.42	4.59	1.28	66.07	1.43	5.61	72.33	1.51	14.84			
1982-2004	39.64	5.11	1.32	66.96	1.50	6.92	72.87	1.55	15.27			
1982-2005	35.71	6.48	1.18	71.94	1.49	10.93	72.85	1.64	15.13			
1982-2006	35.46	7.11	1.32	70.49	1.61	10.28	73.45	1.63	15.65			
1982-2007	32.91	8.70	1.27	70.45	1.75	11.10	73.09	1.26	15.18			
1982-2008	34.86	7.76	1.29	68.57	1.85	9.60	73.28	1.49	14.92			
1982-2009	37.41	6.71	1.45	70.62	1.76	11.36	72.71	1.50	14.86			
1982-2010	48.72	5.66	2.87	75.79	1.42	14.93	75.29	1.40	16.19			
1982-2011	50.40	4.53	3.30	77.59	1.22	17.60	75.55	1.43	16.29			
1982-2012	52.01	3.85	4.10	78.04	1.28	18.05	74.66	1.40	14.39			

月显著减少( $R^2 = 0.90$ ,  $R^2 = 0.66$ ,  $n = 14$ ),其他月份变化不显著。

### (3)日照时数

NDVI与日照时数以正相关为主,各月份所有时段正相关的面积均大于60%,显著正相关的区域面积也远大于显著负相关区域,显著负相关的面积绝大部分时段均不超过2%(表8,见第211页)。6-8月显著正相关主要集中在东南,显著负相关集中在西南,4月、10月正相关集中在研究区域腹地,其他月份显著相关的区域相对较为分散(图3)。

除5月和6月外,其他月份NDVI与日照时数正相关的区域随时段延长而显著增加(4月:  $R^2 = 0.56$ , 7月:  $R^2 = 0.43$ , 8月:  $R^2 = 0.89$ , 9月:  $R^2 = 0.82$ , 10月:  $R^2 = 0.30$ ,  $n = 14$ );显著负相关的面积除6月极显著增加( $R^2 = 0.93$ ,  $n = 14$ )、4月不显著增加外,其他月份均减少,其中9月和10月减少显著( $R^2 = 0.62$ ,  $R^2 = 0.88$ ,  $n = 14$ );而显著正相关面积则均极显著增加(4月:  $R^2 = 0.88$ , 5月:  $R^2 = 0.60$ , 6月:  $R^2 = 0.83$ , 7月:  $R^2 = 0.77$ , 8月:  $R^2 = 0.94$ , 9月:  $R^2 = 0.96$ , 10月:  $R^2 = 0.67$ ,  $n = 14$ )。



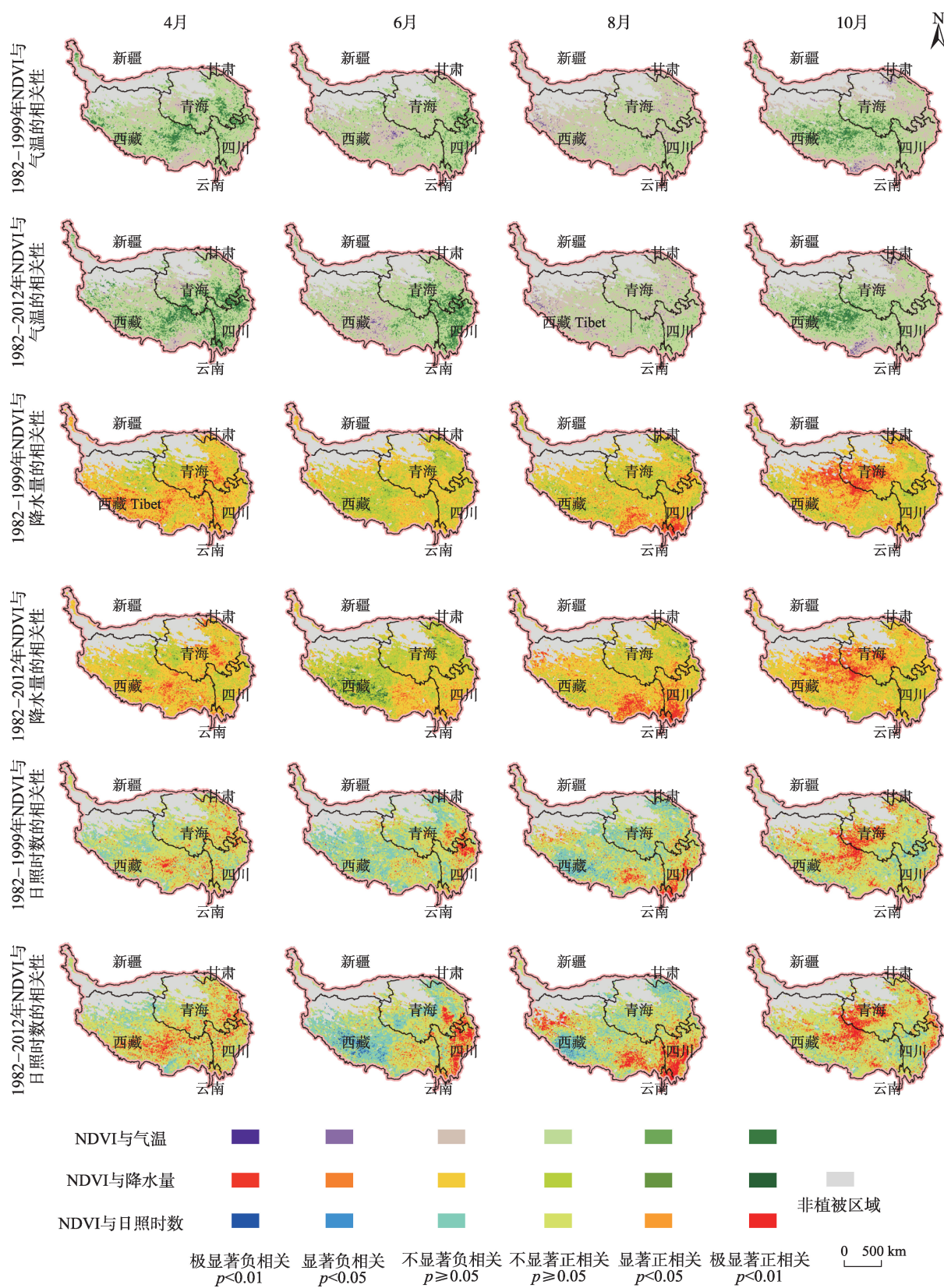


Fig. 3 Correlations between monthly NDVI and climate factors in the Qinghai-Tibet Plateau

表 7 月 NDVI 与降水量正相关、显著负相关和显著正相关的区域面积比例  
Tab.7 Area proportions of different correlations between monthly NDVI and precipitation (%)

时段	4月			5月			6月			7月		
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>
1982-1999	24.19	11.74	0.54	39.58	5.33	3.58	40.81	2.74	1.21	34.30	6.83	1.03
1982-2000	21.64	13.88	0.43	42.68	5.22	4.98	49.20	1.78	2.35	32.90	7.06	1.06
1982-2001	23.02	12.87	0.43	46.21	4.68	5.91	50.29	1.83	3.34	34.21	5.97	1.08
1982-2002	22.88	11.75	0.52	46.07	4.75	5.67	50.84	1.76	3.44	34.08	6.03	1.03
1982-2003	23.57	11.86	0.54	46.52	4.96	5.97	48.79	2.44	3.46	33.74	6.37	1.04
1982-2004	22.92	11.13	0.42	46.62	5.29	5.86	47.90	3.00	3.38	32.99	6.56	0.92
1982-2005	22.02	11.96	0.44	46.30	5.54	5.96	47.42	3.47	3.60	32.99	6.42	0.92
1982-2006	21.76	13.75	0.46	45.70	6.35	6.29	47.73	3.11	3.47	31.52	6.89	0.82
1982-2007	24.93	12.18	0.71	46.28	6.19	5.78	46.95	3.48	3.46	30.33	7.18	0.69
1982-2008	26.36	11.86	0.86	45.61	7.89	5.99	47.52	3.45	4.71	29.96	7.59	0.62
1982-2009	23.24	13.38	0.65	40.08	11.24	5.37	46.92	3.66	4.39	30.60	7.44	0.59
1982-2010	21.50	15.63	0.71	39.56	11.36	5.49	47.82	3.44	5.57	28.63	7.36	0.47
1982-2011	21.46	15.62	0.72	37.91	11.75	5.39	49.62	3.55	5.03	29.88	7.19	0.56
1982-2012	20.34	15.65	0.61	38.30	11.02	4.93	48.51	4.32	5.54	27.05	10.02	0.54

时段	8月			9月			10月		
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>
1982-1999	32.93	10.85	1.42	33.87	4.47	0.65	24.01	18.48	0.64
1982-2000	33.50	10.91	1.49	34.50	4.50	0.75	23.44	19.20	0.59
1982-2001	32.97	11.03	1.39	33.75	5.14	0.77	22.47	19.76	0.49
1982-2002	33.42	10.45	1.53	32.32	5.51	0.72	22.06	19.60	0.47
1982-2003	27.59	11.72	1.09	31.81	5.78	0.69	21.87	20.08	0.40
1982-2004	27.29	11.72	1.16	30.38	6.43	0.61	22.42	20.37	0.39
1982-2005	26.91	12.60	1.21	29.07	7.51	0.67	23.85	18.99	0.42
1982-2006	27.39	13.22	1.26	29.85	7.45	0.73	23.97	18.08	0.41
1982-2007	26.13	13.84	1.26	30.46	7.26	0.77	22.69	18.65	0.44
1982-2008	25.04	15.61	1.23	29.12	6.64	0.56	25.50	18.11	0.47
1982-2009	27.45	14.78	1.36	26.32	9.18	0.53	23.75	18.18	0.43
1982-2010	28.80	14.46	1.33	29.58	7.06	0.74	23.59	17.79	0.37
1982-2011	26.48	15.81	1.04	32.98	6.71	0.82	22.45	17.88	0.34
1982-2012	25.87	16.18	1.06	27.83	7.30	0.55	19.92	18.97	0.19

4 讨论

月 NDVI 的变化趋势总体上与已有研究各月份所属季节的变化趋势一致<sup>[4,5,9,13,17,43-44]</sup>,但部分月份存在较大差异。尽管在季节尺度上,NDVI 变化均为增加趋势<sup>[4,5,9,13,17,43-44]</sup>,但是在月尺度上,8月则多为减少趋势。空间分布上月份与季度之间的结果既有相似性<sup>[4,5,11,16,20,43-44]</sup>,也多存在一定差异。这种差异的原因可能是一定时间跨度的 NDVI 合成方法,掩盖了该时段内部分时点的 NDVI 变化趋势。因此,开

展更精细时段植被变化趋势的研究是十分必要的,尤其是对于指导生态保护与恢复工作的时点安排。区域尺度与像元尺度所反映的植被变化趋势也存在明显差异。在区域尺度青藏高原绝大多数月份的 NDVI 呈增加趋势,且随时段延长变化量变小,NDVI 趋于稳定,但在像元尺度,显著增加和显著减少的面积多呈增加趋势,NDVI 变化存在“两极化”趋势。生长季各月 NDVI 显著减少范围的明显增加,需要引起足够的关注和进一步的深入研究探讨,尤其是 5 月,随时段延长显著减少范围的快速增加。

表8 月 NDVI与日照时数正相关、显著负相关和显著正相关的区域面积比例  
Tab. 8 Area proportions of different correlations between monthly NDVI and sunshine hours (%)

时段	4月			5月			6月			7月		
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>
1982-1999	82.39	0.11	11.84	72.23	0.84	7.16	66.96	0.71	9.05	69.98	0.89	7.86
1982-2000	83.05	0.12	13.31	70.58	0.84	6.59	62.97	0.79	7.71	67.55	1.70	8.05
1982-2001	79.67	0.18	12.25	68.07	1.26	6.61	62.87	1.12	8.34	65.86	1.72	7.22
1982-2002	81.12	0.22	13.46	67.44	1.13	6.33	62.70	1.19	8.91	66.08	1.75	7.23
1982-2003	81.73	0.20	14.29	66.67	1.20	6.34	64.12	1.24	10.22	66.34	1.82	7.53
1982-2004	82.90	0.18	14.58	67.50	1.15	6.64	64.63	1.45	11.68	66.71	1.53	7.56
1982-2005	83.09	0.18	15.61	67.74	1.17	6.97	64.34	1.49	11.96	67.67	1.38	7.66
1982-2006	83.27	0.17	15.80	68.67	1.20	6.68	64.13	1.41	11.65	68.91	1.34	8.52
1982-2007	81.88	0.22	14.93	68.13	1.10	6.68	64.51	1.46	12.14	69.74	1.26	9.03
1982-2008	81.41	0.24	15.12	67.83	1.03	7.50	65.57	2.12	12.19	69.78	1.36	9.62
1982-2009	85.49	0.18	18.29	73.51	0.84	10.55	65.22	2.23	11.95	68.68	1.49	10.02
1982-2010	85.46	0.19	19.69	73.79	0.83	10.80	64.94	2.53	12.14	70.93	1.15	10.57
1982-2011	85.99	0.18	19.77	74.30	0.68	10.67	64.51	2.59	12.49	69.28	1.26	10.13
1982-2012	87.14	0.16	21.09	72.31	0.71	9.49	65.18	2.78	14.37	71.44	1.14	12.32
	8月			9月			10月					
	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>	增加 <i>P</i>	显著减少 <i>SN</i>	显著增加 <i>SP</i>			
1982-1999	67.69	1.45	11.45	69.02	0.34	5.25	85.97	0.45	19.93			
1982-2000	66.81	3.07	12.67	68.50	0.39	5.81	86.35	0.45	20.63			
1982-2001	66.79	3.15	12.62	68.41	0.41	5.87	87.71	0.38	21.39			
1982-2002	66.06	3.11	12.55	71.35	0.36	7.09	87.75	0.36	21.95			
1982-2003	70.06	2.84	14.28	72.31	0.33	7.70	87.78	0.33	22.19			
1982-2004	71.06	2.91	14.80	73.52	0.30	7.86	88.58	0.32	23.08			
1982-2005	71.83	3.00	16.14	75.24	0.30	9.56	87.34	0.27	21.08			
1982-2006	71.87	3.02	17.31	74.89	0.32	9.44	87.62	0.27	22.17			
1982-2007	73.17	2.87	18.17	74.91	0.33	10.07	87.88	0.25	23.52			
1982-2008	74.99	2.37	20.52	76.38	0.30	10.26	87.30	0.26	23.87			
1982-2009	74.05	2.19	19.36	77.74	0.29	12.13	88.13	0.23	24.39			
1982-2010	74.16	1.93	19.41	75.44	0.30	10.99	87.34	0.26	23.09			
1982-2011	75.82	1.34	20.41	74.67	0.31	11.70	87.59	0.25	23.11			
1982-2012	74.83	1.33	20.62	78.10	0.24	12.62	88.57	0.18	23.47			

青藏高原植被活动主要受到热量因子调节,尤其是气温的影响显著,但不同月份之间存在一定差异。4月和7月主要是受气温和日照时数共同作用,表明热量和光照制约着青藏高原植被的生长;6月和9月则主要是气温,8月份因为阴雨天气较多,日照较少,日照时数成为主要限制因子,而植被与降水量呈负相关。5月和10月NDVI与3个气候因子的关系则较为复杂,没有哪种气候因子起主导作用,可能是受到3个气候因子综合作用的影响。水分丰富、日照时数相对不足的东南部植被NDVI

则主要受日照时数限制,而与降水量显著负相关;青藏高原西南部和东北部夏季NDVI则主要受到水分条件的限制。

嵌套时间序列趋势分析的方法可能面临着统计学上的“可塑性时间单元问题”(the Modifiable Temporal Unit Problem, MTUP)<sup>[45-47]</sup>,即该方法可能对月植被NDVI增加量随时段延长而减小有所贡献。本文的研究结果显示,4月和6-10月均存在NDVI显著增加和或显著减少的区域随时段延长不但符合MTUP的减少趋势,反而呈极显著增加趋



势,表明MTUP对该方法的影响较小。况且,已有研究证明,嵌套时间序列方法在应用到NDVI变化趋势时,MTUP效应可以忽略不计<sup>[45-47]</sup>。同时,该方法在反映NDVI动态变化过程、变化趋势的持续性与稳定性等方面具有突出能力,因此,该方法仍不失为研究植被时空变化趋势的重要方法之一。

植被变化趋势的非线性、影响因素复杂及其对气候变化可能存在的滞后效应,加上气候变化的不确定性,导致植被变化趋势的预测成为相关研究的难点之一。深入理解植被活动的长期变化趋势及其成因是合理预测未来动态、减少预测不确定性的基础<sup>[4,20,43]</sup>。跨越整个时段的线性趋势分析计算简单、结果可读性高,但有可能掩盖短时间的变化特征,且缺乏对变化过程的描述<sup>[4,6,12]</sup>。基于多个嵌套时段的NDVI长时间序列分析,有助于深入理解植被NDVI变化过程和变化趋势的持续性,能够在一定程度上反映植被系统的弹性和对外界干扰的抵抗力,据此开展植被活动的趋势外推更为合理。况且,这种方法或许能够提供植被覆盖变化近期的未来轨迹。由此可以推测,青藏高原多数月份植被活动显著增加和显著降低的区域范围将继续扩大,但显著降低区域的扩大速率明显高于显著增加区域;这一现象反映在区域整体上,即多数月份的NDVI增长将逐渐趋于平稳。

## 5 结论

本文基于1982-2012年的GIMMS NDVI3g长时间序列数据集和气候数据,综合运用嵌套时间序列趋势分析技术和相关分析方法,研究了青藏高原近30年来月尺度地表植被活动的变化趋势及变化过程,分析了生长季各月、不同地区影响区域植被生长的主要气候因素,探讨了嵌套时间序列趋势分析技术的适用性,主要结论如下:

(1)在区域尺度上,青藏高原月NDVI变化多为增加趋势,其中4月和9月增加趋势显著,1982-2012年NDVI变化率分别为 $4.78 \times 10^{-4}/\text{yr}$ 和 $6.41 \times 10^{-4}/\text{yr}$ ;随着时段的延长,多数月份NDVI增加幅度趋窄,增长的趋势趋于平缓;但在像元尺度上,NDVI显著变化的区域,尤其是显著降低的区域在增加,需要引起足够的重视。由此可见,区域平均NDVI的变化趋势,掩盖了像元尺度的变化特征。

(2)青藏高原各月植被活动总体上受热量因子变化调控,但不同月份、不同地区影响植被的主导

气候因子存在差异;4月和7月NDVI变化主要受植被气温、日照时数和降水量影响,其中前两个因子主要表现为正面影响,而降水量为负面影响;6月和9月主要受气温的控制;8月则主要受到日照时数的促进和降水量的制约作用影响;东南部NDVI主要受日照时数和降水量影响,而东北部和西南部则主要受水分条件的限制。

(3)嵌套时间序列趋势分析方法能够有效地反映长时间序列植被变化的过程 and 变化趋势的稳健性,便于开展不同时段计算结果之间的对比分析,并为未来趋势分析提供支撑。据此预测,青藏高原月NDVI未来增加趋势总体上趋于缓和,但在像元尺度显著变化的区域倾向于增加。

## 参考文献(Reference):

- [1] Buyantuyev A, Wu J. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009,73(4-5):512-520.
- [2] Pettorelli N, Chauvenet A L, Duffy J P, et al. Tracking the effect of climate change on ecosystem functioning using protected areas: Africa as a case study[J]. *Ecological Indicators*, 2012,20(9):269-276.
- [3] Cao M K, Prince S D, Small J, et al. Remotely sensed inter-annual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000[J]. *Ecosystems*, 2004,7(3):233-242.
- [4] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011,17(10):3228-3239.
- [5] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent[J]. *Ecological Indicators*, 2012,14(1):28-39.
- [6] De Jong R, De Bruin S, Schaepman M, et al. Quantitative mapping of global land degradation using Earth observations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011,32(21):6823-6853.
- [7] 林金煌,张岸,邓超,等.闽三角城市群地质灾害敏感性评价[J]. *地球信息科学学报*, 2018,20(9):1286-1297. [Lin J H, Zhang A, Deng C, et al. Sensitivity assessment of geological hazards in urban agglomeration of Fujian Delta Region[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(9):1286-1297.]
- [8] 冀欣阳,骆磊,王心源,等.基于“DEM-NDVI-土地覆盖分类”的天山博格达自然遗产地植被垂直带提取与变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2018,20(9):1350-1360. [Ji X Y, Luo L, Wang X Y, et al. Identification and change



- analysis of mountain altitudinal zone based on DEM-NDVI- Land cover classification in Tianshan Bogda Natural Heritage site[J]. Journal of Geo- information Science, 2018,20(9):1350-1360. ]
- [9] Prince S D, Becker-Reshef I, Rishmawi K. Detection and mapping of long- term land degradation using local net production scaling: Application to Zimbabwe[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,113(5):1046-1057.
- [10] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007,68(2):271-297.
- [11] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007: An earth observing satellite based analysis of trends and drivers[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,121(6):144-158.
- [12] Shen M G, Tang Y H, Chen J, et al. Influence of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(12):1711-1722.
- [13] Bai Z G, Dent D. Recent Land Degradation and Improvement in China. AMBIO[J]. A Journal of the Human Environment, 2009,38(3):150-156.
- [14] Fensholt R, Rasmussen K. Analysis of trend in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(2):438-451.
- [15] 翟雅倩,张翀,周旗,等.秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化特征及其相互关系[J].地球信息科学学报,2018,20(7):967-977. [ Zhai Y Q, Zhang C, Zhou Q, et al. Spatio-temporal variation and interrelationship of vegetation cover and soil moisture in Qinling- Daba Mountains[J]. Journal of Geo- information Science, 2018,20(7):967-977. ]
- [16] Van L W, Orr B J, Marsh S E, et al. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,100:67-81.
- [17] Shen M G, Zhang G X, Cong N, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,189-190:71-80.
- [18] Ding M J, Zhang Y L, Sun X M, et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009[J]. Chinese Science Bulletin, 2013,58(3):396-405.
- [19] 孟梦,牛铮,马超,等.青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):360-365,372. [ Meng M, Niu Z, Ma C, et al. Variation trend of NDVI and response to climate change in Tibetan Plateau[J]. 2018,25(3):360-365,372. ]
- [20] Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(12):1599-1608.
- [21] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. Proceeding of the National Academy of Science, 2013,110(11):4309-4314.
- [22] Zhou D W, Fan G Z, Huang R H et al. Interannual variability of the normalized difference vegetation index on the Tibetan plateau and its relationship with climate change[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007,24(3):474-484.
- [23] Zhang L, Guo H D, Lei L P, et al. Monitoring vegetation greenness variations in Qinghai-Tibet Plateau with MODIS vegetation index[J]. IEEE, 2011,760-762.
- [24] Yang K, Ye B S, Zhou D G, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. Climate Change, 2011,109(3-4):517-534.
- [25] Qin J, Yang K, Liang S L, et al. The altitudinal dependence of recent rapid warming over the Tibetan Plateau [J]. Climatic Change, 2009,97(1-2):321-327.
- [26] Lei Z, Su Z B, Ma Y M, et al. Accelerated changes of environmental conditions on the Tibetan Plateau caused by climate change[J]. Journal of Climate, 2011,24:6540-6550.
- [27] Huang L, Liu J Y, Shao Q Q, et al. Changing inland lakes responding to climate warming in Northeastern Tibetan Plateau[J]. Climatic Change, 2011,109(3-4):479-502.
- [28] Chen H, Zhu Q A, Wu N, et al. Delayed spring phenology on the Tibetan Plateau may also be attributable to other factors than winter and spring warming[J]. Proceeding of the National Academy of Science, 2011,108(19):E93.
- [29] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent[J]. Ecological Indicators, 2012,14(1):28-39.
- [30] 丁明军,张懿铨,刘林山,等. 1982-2009年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J].自然资源学报,2010,25(12):2114-2122. [ Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, et al. Temporal and spatial distribution of grassland coverage change in Tibetan Plateau since 1982[J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(12):2114-2122. ]
- [31] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,等.基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J].地理研究,2010,

- 29(11):2004-2016. [ Zhang G L, Ouyang H, Zhang X Z, et al. Vegetation change and its responses to climatic variation based on eco-geographical regions of Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2010,29(11):2004-2016. ]
- [32] 杨元合,朴世龙.青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].*植物生态学报*,2006,30(1):1-8. [ Yang Y H, Piao S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006,30(1):1-8. ]
- [33] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. *Proceeding of the National Academy of Science*, 2010,107(51):22151-22156.
- [34] Yu H Y, Xu J C, Erick O, et al. Seasonal response of grasslands to climate change on the Tibetan Plateau[J]. *Plos One*, 2012,11(7):e49230.
- [35] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].*地理学报*,2012,67(1):3-12. [ Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(1):3-12. ]
- [36] Pinzon J, Tucker C. A Non- Stationary 1981- 2012 AVHRR NDVI3g time Series [J]. *Remote Sensing*, 2014,6(8):6929-6960.
- [37] <https://nex.nasa.gov/nex/projects/1349/> [EB/OL].
- [38] Wang J, Dong J, Liu J, et al. Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in southeast asia[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(3):2108-2133.
- [39] Zeng F W, Collatz G, Pinzon J, et al. Evaluating and quantifying the climate-driven interannual variability in global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3g) at global scales[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(8):3918-3950.
- [40] <http://data.cma.cn/> [EB/OL].
- [41] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwest China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011,75(10):946-952.
- [42] Mohammad A, Wang X H, Xu X T, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013,178-179(9):21-30.
- [43] Du J Q, He P, Fang S F, et al. Autumn NDVI contributes more and more to vegetation improvement in the growing season across the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2017,10(11):1-20.
- [44] Du J Q, Zhao C X, Shu J M, et al. Spatiotemporal changes of vegetation on the Tibetan Plateau and relationship to climatic variables during multiyear periods from 1982-2012[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016,75(1):1-18.
- [45] De Jong R, De Bruin S. Linear trends in seasonal vegetation time series and the modifiable temporal unit problem [J]. *Biogeosciences*, 2012,9:71-77.
- [46] Cheng T, Adepeju M. Modifiable temporal unit problem (MTUP) and its effect on space-time cluster detection[J]. *Plos One*, 2014,9(6):e100465.
- [47] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, et al. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015,38:216-228.