

三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系

刘正佳^{1,2}, 邵全琴¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为揭示气候变化对三江源地区草地生态系统的影响及适应机制,研究以 SPOT-VGT 为基础数据,利用像元二分模型估算了三江源地区 1998—2012 年的植被覆盖度,分析了年最大覆盖度的变异特征,并对植被覆盖度与气候因子之间的响应关系进行了深入探讨。结果表明:在区域尺度上,15 a 来研究区生长季植被覆盖度呈极显著增加的趋势($P < 0.01$),平均每年增加 0.004。在草地生态系统类型上,高寒草甸植被覆盖度与生长季温度的相关关系更加密切($r = 0.802, P < 0.01$);高寒草原植被覆盖度与生长季温度呈显著相关关系($r = 0.515, P < 0.05$)。与生长季降水量相比较,5—7 月降水量对高寒草原植被覆盖度变化的影响更加关键,但在高寒草甸上却不存在这种差异。

关键词:遥感; NDVI; 像元二分模型; 高寒草地; 三江源地区

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0334-06

Vegetation Coverage Change and Its Response to Climate Change in Three-River Headwaters Region

LIU Zheng-jia^{1,2}, SHAO Quan-qin¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vegetation plays a pivotal role in the interaction between the biosphere and the atmosphere. Previous studies have focused on monitoring changes in the fractional vegetation cover (FVC) on account of its important role in regulating the terrestrial carbon and water cycling during the past several decades. To reveal the effects and adaptation mechanism of climate change to grassland ecosystem in Three-River headwaters region (TRH), we firstly estimated FVC using SPOT-VGT datasets and dimidiate pixel model in TRH from 1998 to 2012. Secondly, the variation characteristics of annual FVC were analyzed. Discussions were finally carried out for the response on FVC to climate factors. The results showed that FVC of TRH during the past 15 years significantly increased ($P < 0.01$) in the growing season, with an annual increase of 0.004 at the regional scale. For the types of alpine grassland ecosystem, the relationship of FVC with temperature of the growing season in alpine meadow was better than that in alpine steppe (for alpine meadow: $r = 0.802, P < 0.01$; for alpine steppe: $r = 0.515, P < 0.05$). Compared precipitation in May-July with precipitation in growing season, the former had the more key impact on FVC in alpine steppe, but there were hardly any differences for alpine meadow.

Key words: remote sensing; NDVI; dimidiate pixel model; alpine grasslands; Three-River headwaters region

气候变化是植被年际动态变化的重要影响因素,且其与植被之间的相关关系已经在区域尺度和全球尺度上得到了广泛证明^[1-4]。植被作为联接陆地土壤、水体和大气之间物质循环和能量交换的关键环节,在地表能量交换、水分循环和碳—氮循环过程中起着至关重要的作用^[5]。植被覆盖度(Fractional

Vegetation Cover)是反映植被数量变化及生态系统变化的重要参数,同时也是评估生态工程成效的重要评价指标^[6]。因此,植被覆盖度变化研究一直是气候变化、生态模拟以及生态工程评估等中的热点科学问题之一。

三江源地区作为青藏高原的腹地和主体,它独特

和典型的高寒植被生态系统在全球气候变化及其气候变化响应研究中具有重要的地位^[7]。在过去的十几年里,由于受气候变化以及人类不合理的土地利用方式影响,三江源地区生态环境呈恶化趋势,这极大的威胁到该地区生态系统的稳定和可持续发展。独特的地理位置和生态环境问题,使该地区成为科学研究和生态治理的热点地区之一。2005年,国家启动了三江源生态环境保护与建设工程,开始实施退牧还草、黑土滩治理、人工增雨等一系列生态建设项目^[6,8]。在气候变化和人类工程措施的双重作用下,三江源地区的植被覆盖度如何变化?对气候变化的响应如何?这些科学问题亟待解决。

遥感的 NDVI (Normal Difference Vegetation Index) 具有时效和尺度方面的优势,通常被用来进行植被覆盖度研究^[9-12]。陈琼等^[13]利用 1999—2008 年 NDVI 分析了三江源 NDVI 对气候因子变化的响应关系。唐红玉等^[14]利用卫星反演的 NDVI 和同期气象要素资料分析了 1982—2000 年三江源植被时空特征及其对气候变化的响应。于秀娟等^[15]利用 MODIS-NDVI 分析了 2000—2009 年三江源地区植被覆盖度的动态变化特征。然而,受研究数据时间尺度、空间分辨率选择等问题影响,对该地区近年来较高空间分辨率植被动态变化特征方面的认识还不够深刻。

借助高分辨率卫星数据诊断近年来植被覆盖度变化特征,不仅将为评估生态工程成效提供重要信息,而且为组织当地有序的人类活动(如:放牧),实现三江源可持续发展提供科学的决策依据。另外,在以往的研究中,特别注重年或季节降水量和温度对植被生长状况的影响,而很少关注植被生长在达到最旺盛时期以前(即生长季前半段)降水和温度对植被生长状况的影响。不同时期水热条件对高寒草地生态系统植被覆盖度变化影响如何尚不清晰。因此,本研究以 SPOT-VGT(1998—2012)1 km 年数据为数据源,以线性回归趋势分析、相关分析等为方法基础,试图揭示 15 a 来三江源地区植被覆盖度年际变异特征,阐明植被生长关键时期内植被覆盖度对气候变化的响应,找出驱动植被覆盖度变化的关键时期和主要气候因子。

1 研究区概况

三江源地区位于青海省南部,总面积约 35.7 万 km²,平均海拔 4 500 m 以上,是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地,是全国生态系统的天然屏障。该区的野生动植物资源丰富,但生态环境比较脆弱,故成为国家亟待治理和保护的区域之一。三江源地区

的气候属典型的高原大陆性气候:光照充足、日照强烈;冬寒夏凉,暖季短暂,冷季漫长;雨量偏少,雨热同期,干湿季分明。自然植被类型多样,植被以灌丛、高寒草甸、高寒草原和高山植被等植被类型为主,其中高寒草甸和高寒草原的面积占研究区总面积的 79% 以上,其生长季为 5—9 月。

2 数据与方法

2.1 遥感与植被空间分布数据

SPOT-VGT 和植被空间分布数据来自中科院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn)。其中,SPOT-VGT 数据的时间尺度为 1998—2012 年年数据;空间分辨率为 1 km。该数据已经过严格的处理,消除或降低了云、水汽及太阳高度角等对数据的影响,满足本研究需求。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委会,2001),已经过数字化、投影转换和格式变换等处理,得到本研究需要的 1 km 栅格数据,投影方式:Albers。

2.2 气象数据及处理

气象数据为中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)提供的 1998—2012 年 728 个气象站的日平均温度和降水量资料,该资料中还包含了台站号、经纬度、高程等信息。数据在使用前经过严格的数据检验,对缺测月份较多的台站予以剔除^[16]。最后,借助 Anusplin 软件^[17],以 1 km 的 DEM(来自中科院资源环境科学数据中心,投影方式为 Albers)为协变量,最终获得空间分辨率为 1 km、时间尺度为天的温度和降水量数据。以研究区边界数据和植被空间分布数据为掩膜,提取了研究区、高寒草甸和高寒草地的 5—7 月及生长季(5—9 月)的温度和降水量。

2.3 植被覆盖度计算与分析

2.3.1 像元二分模型原理 遥感传感器所获得的地面数据信息 S ,通常是混合像元信息,根据像元二分模型的原理^[18],可将此混合像元拆分为两部分:一部分可表达为绿色植被部分所贡献的信息 S_v ;另一部分则是由裸土部分所贡献的信息 S_s 。因此可将 S 线性分解为:

$$S = S_v + S_s \quad (1)$$

对于一个由植被和裸土两部分组成的混合像元,像元中有植被覆盖的面积比例部分即为该像元的植被覆盖度(公式中用变量 f_c 表示),而裸土的面积比例则为 $1 - f_c$ 。假设全部由植被所覆盖的纯像元所得的遥感信息为 S_{veg} ,全部由裸土所覆盖的纯像元所

得的遥感信息为 S_{soil} 。混合像元中植被部分和裸土部分则分别可表示为:

$$S_v = f_c \times S_{\text{veg}} \quad (2)$$

$$S_s = (1 - f_c) \times S_{\text{soil}} \quad (3)$$

将公式(2)(3)代入公式(1),可得:

$$S = f_c \times S_{\text{veg}} + (1 - f_c) \times S_{\text{soil}} \quad (4)$$

对公式(4)进行变换,便可以得到植被覆盖度的计算公式:

$$f_c = (S - S_{\text{soil}}) / (S_{\text{veg}} - S_{\text{soil}}) \quad (5)$$

大量研究表明 S_{veg} 和 S_{soil} 可表示为固定的参数。因此,可以借助此公式方便的计算植被覆盖度。

2.3.2 利用 NDVI 估算植被覆盖度 NDVI 被广泛应用于计算植被覆盖度,它能够反映地表植被的生长状况、覆盖状况、生物量、光合有效辐射、叶面积等植物物理特征。大量研究^[9-10]证实 NDVI 与植被覆盖度有很好的相关性。根据像元的二分模型,一个像元的 NDVI 可以分解为绿色植被贡献部分 NDVI_{veg} 与裸土贡献部分 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$, 同样满足公式(4)的条件,因此可以将 NDVI 代替 S 代入公式(5),得出:

$$f_c = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (6)$$

式中: $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ ——全裸土的 NDVI 值,在本研究中

取 0.1^[19-20]; NDVI_{veg} ——全植被的 NDVI 值,本研究取 0.95。在此, $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 和 NDVI_{veg} 为固定参数,以便在年际尺度上比较最大植被覆盖度之间的差异。

3 结果与分析

3.1 生长季植被覆盖度的年际变化

图 1 为 1998—2012 年研究区生长季植被覆盖度、温度和降水量的变化趋势。从图中可以看出,15 a 来研究区生长季植被覆盖度呈极显著增加的趋势 ($P < 0.01$), 平均每年增加 0.004。生长季降水量呈显著增加的趋势 ($P < 0.01$), 平均每年增加 4.6 mm。生长季温度呈波动的增加趋势,但增加趋势不具有统计的显著性。

高寒草甸和高寒草原的面积占研究区总面积的 79% 以上,分别统计了这两种主要草地类型的植被覆盖度。如图 2 所示,1998—2012 年,研究区两种主要草地类型植被覆盖度均表现出极显著的增加趋势 ($P < 0.01$),这与研究区总体植被覆盖度的变化趋势相一致。其中,高寒草甸植被覆盖度的年均增加量较大,为 0.004 2;高寒草原植被覆盖度的年均增加量为 0.003 8。

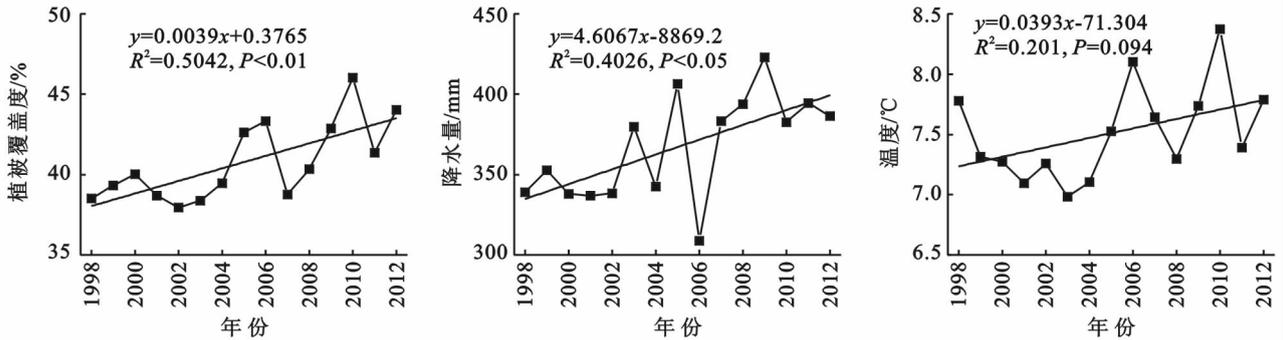


图 1 1998—2012 年研究区生长季植被覆盖度、温度和降水量的年际变化

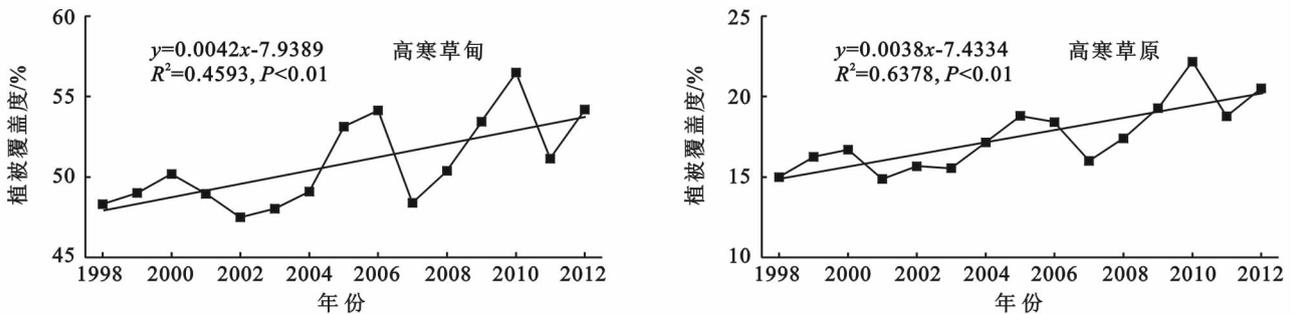


图 2 1998—2012 年高寒草甸和高寒草原生长季植被覆盖度的年际变化

3.2 气候因子对植被覆盖度年际变化的影响

为了研究三江源地区不同时期气候因子对植被覆盖度变化的影响,我们分别对比了生长季的降水量和温度以及植被生长达到最旺盛时期以前(即 5—7 月,这个时段下文简称“5—7 月”)的降水量和温度年

际变异,并分析了植被覆盖度与生长季的降水量和温度以及 5—7 月的降水量和温度的相关关系。

图 3 为 5—7 月降水与温度的变化趋势,与生长季的降水量和温度(图 1)的变化趋势相比,两者各有异同。在降水量的年际变化方面,两者均表现出极显

著的增加趋势($P < 0.01$);但生长季降水量的年均增加量要高于 5—7 月降水量的年际增加量。

在温度的年际变化方面,两者均呈增加的趋势,但都不具有统计上的显著性($P > 0.05$);生长季的

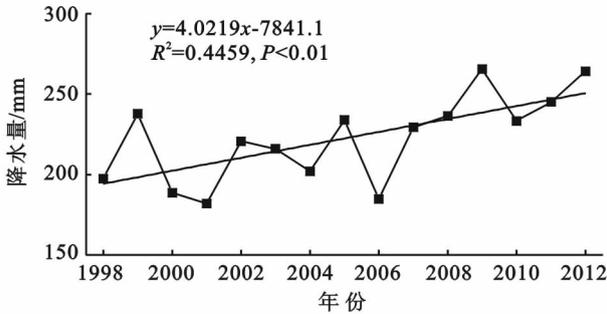


图 3 1998—2012 年研究区 5—7 月降水量和温度的年际变化

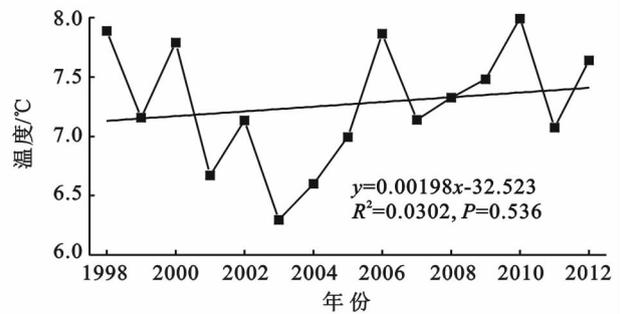
利用 SigmaPlot 11.0 软件分析了研究区 1998—2012 年植被覆盖度(研究区所有植被、高寒草甸和高寒草原)与生长季的降水量和温度以及 5—7 月的降水量和温度的相关关系,见表 1。无论对于整个研究区的植被还是高寒草甸或高寒草原而言,它们的植被覆盖度与生长季的降水量和温度以及 5—7 月的降水量和温度均呈现正相关的关系。

对于整个研究区的植被而言,植被覆盖度与生长季温度呈极显著的正相关($P < 0.01$),与 5—7 月温度呈显著地正相关关系($P < 0.05$),相关分析表明,生长季温度的增加更加有利于研究区植被覆盖度的提高。植被覆盖度与生长季降水量和 5—7 月降水量没有显著地相关关系(分别为 $P = 0.180$ 和 $P = 0.116$),但与生长季降水量相比,5—7 月降水量对植被覆盖度提高有更大的影响。由此可见,研究区植被覆盖度增加是由于生长季温度上升所致;尽管 5—7 月降水量与植被覆盖度相关系数较大,但这种相关关系却不具有统计上的显著性。

高寒草甸植被覆盖度与温度和降水量的关系与研究区所有植被表现出的结果相一致,这可能与高寒草甸是研究区主要生态系统类型有关。高寒草甸植被覆盖度与生长季温度的相关关系更加密切($r = 0.802, P < 0.01$)。与温度上升相比,降水量增加对植被覆盖度提高影响甚微(植被覆盖度与生长季降水量和 5—7 月降水量的相关关系分别为: $r = 0.363, P = 0.184; r = 0.377, P = 0.166$)。

高寒草原植被覆盖度与温度和降水量的关系较差。植被覆盖度与生长季温度呈显著相关关系($P < 0.05$),但与 5—7 月温度呈不显著的相关关系($P = 0.369$)。然而,与生长季降水量相比较,5—7 月降水量对高寒草原植被覆盖度变化的影响更加关键($r = 0.485, P = 0.067$)。生长季降水量对高寒草原植被

增温趋势要明显高于 5—7 月的增温趋势,然而,5—7 月多年的平均温度的变异范围要远远大于生长季多年的平均温度,两者标准差分别为 0.51°C 和 0.39°C 。



覆盖度的影响($r = 0.374, P = 0.169$)表现出与对研究区所有植被和高寒草甸植被覆盖度的影响(分别为 $r = 0.366, P = 0.180; r = 0.363, P = 0.184$)相一致的关系。

综上所述,不论研究区所有植被还是高寒草甸或高寒草原,其植被覆盖度变化与生长季温度上升及 5—7 月降水增加有密切关系,然而,生长季温度的上升可能对植被覆盖度提高更加关键。

表 1 植被覆盖度与生长季的降水量和温度以及 5—7 月的降水量和温度的相关关系

项目	研究区植被		高寒草甸		高寒草原	
	r	P	r	P	r	P
生长季降水量	0.366		0.363		0.374	
生长季温度	0.774	**	0.802	**	0.515	*
5—7 月降水量	0.423		0.377		0.485	
5—7 月温度	0.559	*	0.617	*	0.250	

注:**表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$ 。

4 讨论

前人的研究为我们认识和了解三江源地区植被覆盖变化提供了很好的理论基础,本研究在前人研究的基础上,进一步深入探讨与分析三江源地区植被覆盖度变化对气候变化的响应机理,试图回答植被生长不同关键时期水热条件如何影响该地区高寒草地生态系统植被覆盖度变化等问题。与先前研究不同^[13-14],本研究重点分析近 15 a 三江源地区植被覆盖变化状况,研究时间尺度更长(1998—2012 年),更加有利于我们认识和了解三江源地区近年来植被覆盖度的变化状况。其次,在本研究中,不但分析了生长季温度和降水量对植被覆盖度变化的影响,而且分析了 5—7 月温度和降水量对植被覆盖度变化的影响,更加深入的研究了气候要素对植被覆盖度变化影响的驱动机制。再次,更加细致的研究了高寒草甸和

高寒草原两种高寒草地生态系统类型的植被覆盖度对温度和降水量变化的响应机制。

三江源地区是中国面积最大的天然湿地分布区,同时也是国家开展生态建设的重点区域,高、寒的特点使其与中国其他地区相比存在较大差异。我们的研究表明,研究时段内三江源地区植被活动在增强,并且植被活动变化与生长季气温上升密切相关。相关研究^[8]也同样指出,气候变化是影响三江源地区植被生长的决定性因素,气候暖湿化趋势决定了三江源地区植被增长的方向。温度的升高可导致土壤温度的增加,进而加速了土壤中有有机物质的分解和营养元素的释放,从而为植被生长提供了更加丰富的土壤养分。

不同高寒草地生态系统类型与温度和降水量的相关分析结果同样表明,温度是高寒草地植被覆盖度变化的重要限制因子,该结论与前人研究相一致^[4,8,13-14]。高寒草甸植被覆盖度与生长季温度的相关关系更加显著。这意味着生长季温度上升更加有利于高寒草甸植被覆盖度的提高。而对于高寒草原,除生长季温度对高寒草原植被覆盖度变化影响较大外,5—7月降水量也是高寒草原植被覆盖度变化的重要限制因子。然而,我们的结论也与前人研究也存在分异。在降水量与植被覆盖度相关关系方面,本研究发现降水量与植被覆盖度呈正相关关系,该结论与文献^[8]的结论一致,而不同于文献^[13-14]。可能存在的问题:除文献^[8]中描述的原因外,研究时间尺度(降水具有较大的空间变异、年内变异和年际波动,在不同的时间尺度上,降水的时空差异和年际变化趋势可能截然不同)和采用遥感数据的空间分辨率不同可能也是造成结果差异的重要原因之一。但与文献^[8]在降水对植被覆盖度影响显著性方面又存在分异(主要是高寒草甸),研究时间尺度内气候因子的波动和变化趋势差异可能是更加关键的分异原因;本研究时间尺度更长(1998—2012年);分析时间段也不同,本研究更加关注生长季和5—7月气候因子与植被覆盖度的关系。

此外,除自然因素外,三江源地区植被覆盖度的提高还得力于一系列生态保护与建设工程的成功实施。相关研究^[8]指出,在近年气候条件利好的情况下,人类活动对生态环境表现出正影响,表明生态保护与建设行为取得了初步成效。我们的研究表明,生长季和5—7月降水量均呈显著增加的趋势,降水量的增加可能更加得利于人工增雨工程的成效。尽管降水量与植被覆盖度同样表现出了较好的相关性,但这种相关关系并不具有统计上的显著性。这可

能是由于降水得不到有效利用造成的。三江源地区高、寒的自然环境使得土壤有机氮、磷的矿化速率较慢,缺乏能被植物生长所直接吸收和利用的速效氮和有机磷。对于高寒草地植被,细菌等微生物降解氮、磷循环后,降水才能促进植被生长。研究结果也间接的反映了“生态保护与建设工程是一项伟大的战略工程,需要进行长期的艰苦努力”的事实。

5 结论

本研究以1998—2012年的SPOT-VGT为基础数据,利用像元二分模型估算了三江源地区的植被覆盖度,进而分析了年最大覆盖度的年际变化特征,并对植被覆盖度与气候因子之间的响应关系进行了深入分析。得到了以下结论:

(1) 在区域尺度上,1998—2012年研究区生长季植被覆盖度呈极显著增加的趋势($P < 0.01$),平均每年增加0.004。生长季降水量呈显著增加的趋势($P < 0.01$),平均每年增加4.6 mm。生长季温度呈波动的增加趋势,但增加趋势不具有统计的显著性。植被覆盖度与气候因子的相关分析表明,与降水量增加相比,生长季温度上升对三江源地区植被覆盖度提高影响更大。

(2) 在草地生态系统类型上,高寒草甸植被覆盖度与生长季温度的相关关系更加密切($r = 0.802, P < 0.01$);高寒草原植被覆盖度与生长季温度呈显著相关关系($r = 0.515, P < 0.05$)。这意味着温度是高寒草地植被覆盖度变化的重要限制因子。

(3) 与生长季降水量相比较,5—7月降水量对高寒草原植被覆盖度变化的影响更加关键($r = 0.485, P = 0.067$),但在高寒草甸上却不存在这种差异(生长季: $r = 0.363$;5—7月: $r = 0.377$)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 Sciences of the United States of America*, 2012, 110(11): 4309-4314.
- [3] 李小亚, 张勃, 靳自宝. 基于MODIS-NDVI的甘肃河东地区植被覆盖度动态监测[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 112-115.

- [4] 王兮之,梁钊雄,周显辉,等. 黄河源区玛曲县植被覆盖度及其气候变化研究[J]. 水土保持研究,2012,19(2):57-65.
- [5] 刘纪远,邵全琴,延晓冬,等. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探[J]. 地球科学进展,2011,26(10):1015-1022.
- [6] 邵全琴,赵志平,刘纪远,等. 近30a来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征[J]. 地理研究,2010,29(8):1439-1451.
- [7] 刘纪远,徐新良,邵全琴. 近30a来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. 地理学报,2008,63(4):364-376.
- [8] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报,2011,31(19):5495-5504.
- [9] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*,1997,62(3):241-252.
- [10] 刘正佳,于兴修,李蕾,等. 基于SRP概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报,2011,22(8):2084-2090.
- [11] 韦振锋,任志远,张翀. 近12a广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征[J]. 水土保持研究,2013,20(5):33-44.
- [12] 王灿,任志远,张翀. 陕北地区NDVI对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J]. 水土保持研究,2014,21(1):173-182.
- [13] 陈琼,周强,张海峰,等. 三江源地区基于植被生长的NDVI对气候因子响应的差异性分析[J]. 生态环境学报,2010,19(6):1284-1289.
- [14] 唐红玉,肖风劲,张强,等. 三江源植被变化及其气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展,2006,2(4):177-180.
- [15] 于秀娟,燕琴,刘正军,等. 三江源区植被覆盖度的定量估算与动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(1):66-74.
- [16] 刘正佳,于兴修,王丝丝,等. 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的降水量插值精度比较[J]. 地理科学进展,2012,31(1):56-62.
- [17] Hutchinson M, Mckenny D, Lawrence K, et al. Development and Testing of Canada-Wide InterPolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961—2003[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,2009,48(4):725-741.
- [18] 吴云,曾源,赵炎,等. 基于MODIS数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学,2010,32(7):1417-1424.
- [19] 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.
- [20] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Spatiotemporal pattern of terrestrial carbon cycle during the 20th century [J]. *Global Biogeochemical Cycles*,2009,23(4):GB4026.