

朱文会,毛飞,徐影,等,2019.三江源区植被指数对气候变化的响应及预测分析[J].高原气象,38(4):693-704. Zhu Wenhui, Mao Fei, Xu Ying, et al, 2019. Analysis on response of vegetation index to climate change and its prediction in the Three-Rivers-Source Region [J]. Plateau Meteorology, 38(4): 693-704. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00105.

三江源区植被指数对气候变化的响应及预测分析

朱文会^{1,2}, 毛飞², 徐影³, 郑军¹, 宋立雪⁴

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3. 中国气象局气候中心, 北京 100081;

4. 中国气象局资产管理事务中心工程咨询中心, 北京 100081)

摘要: 利用1989—2008年NOAA-AVHRR的NDVI旬合成资料和地面月降水量、平均气温等观测资料,分析了三江源区NDVI时空变化特征及其对气候要素变化的响应。通过建立不同季节NDVI统计预测模型,对未来40多年间不同排放情景下三江源区NDVI变化趋势进行预测分析。研究结果表明:(1)三江源区NDVI分布呈现由东南部、东部向西、向北逐渐变低的趋势。4—10月为植被生长季,8月NDVI达最大值。(2)针对春、夏、秋季,NDVI与气温、降水均呈显著正相关(夏季降水除外),春、秋季较为显著;NDVI对气温的响应显著高于降水;NDVI对前一个月的气温、降水时滞效应最为显著。(3)未来40年,在三江源区气温持续升高,降水微弱增加的气候背景下,源区平均NDVI呈显著上升趋势,前10年增速缓慢,后30年持续稳步上升,且增幅较大。源区NDVI空间分布格局基本不变,RCP8.5情景下NDVI的高值中心较RCP4.5范围更大。RCP4.5情景下NDVI迅速增长期为2026—2035年,高值中心位于澜沧江源区;RCP8.5情景下为2016—2025年和2036—2045年两阶段,高值中心均在长江源区。两种情景下,源区变率高值中心均表现出由北向南移动的趋势。

关键词: 三江源区; NDVI; 气候变化; 统计预测模型; 未来变化特征

文章编号: 1000-0534(2019)04-0693-12 中图分类号: 463.2 文献标志码: A

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00105

1 引言

三江源区位于青藏高原腹地,青海省南部,以山地地貌为主,山脉绵延,地形复杂,自西向东倾斜降低。西部极为高峻,中西部和北部起伏不大,多宽阔而平坦的滩地,东南部为高山峡谷地带。三江源区河流密布,湖泊、沼泽众多,雪山、冰川广布,是长江、黄河、澜沧江三条河流的发源地,源源不断地为其周边地区贡献着淡水资源,被誉为“中华水塔”。三江源独特的地形和气候条件导致了植被类型的多样性和独特性,植被类型有阔叶林、针叶林、草甸、草原、水生植被、垫状植被和稀疏植被等,水平分布和垂直分布均十分明显,原始

性、脆弱性十分突出(刘敏超等,2005),为全国乃至全球生态系统最敏感、脆弱的地区之一。随着全球气候变暖,三江源区冰川、雪山逐年萎缩;江河、湖泊和湿地面积缩小、干涸;沙化、水土流失面积不断扩大;荒漠化和草地退化问题日益突出,生态环境已明显恶化,形势严峻。因此,开展三江源区气候变化对生态环境影响的研究有着重要意义。

气候条件是决定植被生长和时空分布的重要因子(孙红雨,1998)。植被指数是反映植被生长状态和生态系统变化的常用指标,对气候变化较为敏感。基于植被指数,诸多学者已在三江源区域气候变化和生态环境方面做了大量的科学研究。徐新良等(2008)在多期遥感图像支持下,通过对生态系统

收稿日期: 2018-06-12; 定稿日期: 2018-09-25

资助项目: 财政部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001); 中国工程院咨询项目(2017-XY-21); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0104)

作者简介: 朱文会(1986—),女,山东临沂人,博士研究生,主要从事青藏高原水循环和大气环境研究。E-mail: lfzhuwenhui@163.com

通信作者: 毛飞(1958—),女,浙江宁波人,研究员,主要从事生态环境与农业气象研究。E-mail: maofei@cma.gov.cn

类型进行辨识分析了 20 世纪 70 年代中后期以来三江源区生态系统格局和空间结构的动态变化。赵静等(2008)综合分析温度、降水、湖泊、湿地和 NDVI 变化状况表明,源区在 20 世纪 90 年代环境恶化严重,NDVI 剧烈下降,随着 2000 年 8 月三江源自然保护区的建立,源区 NDVI 呈现稳定、略微增加趋势,但局部地区仍存在下降趋势。气候与植被的显著相关关系已经在各个尺度上得到了广泛证明(常国刚等,2005;丛楠等,2016;林振耀等,1996;刘正佳等,2014;唐红玉等,2006;杨英莲,2008)。其中,唐红玉等(2006)利用遥感 NDVI 及同期气象资料分析了 1982—2000 年三江源植被的时空变化特征及其对气候变化的响应。刘正佳等(2014)为揭示气候变化对三江源草地生态系统的影响及适应机制,利用像元二分模型估算了三江源区 1998—2012 年的植被覆盖度,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。杨英莲(2008)分析了青海省天然草地平均 NDVI、气温和降水的空间分布及变化趋势,并做了 NDVI 与气温和降水的相关性分析。丛楠等(2016)分析了 1982—2009 年基于卫星数据的北半球中高纬度地区植被春季物候动态及其与气候的关系。

随着全球气候变暖,青藏高原由于处于高海拔地区,对于全球气候变化的响应更加突出,增温趋势十分明显(林振耀等,1996)。气候变化与区域生态环境变化之间是相互影响、相互作用的,气候要

素的变化会直接影响地表植被的生长状况和分布格局(常国刚等,2005;邓振镛等,2010;李林等,2004)。而地表植被的变化也直接反应了不同的水热组合及其差异性,是地方、区域和全球尺度生态系统状况、环境压力和景观变化的指示器(Piao et al, 2011)。植被作为重要的生态因子,既是气候变化的承受者,同时又对气候变化产生积极的反馈作用。气温和降水作为表征气候最重要的因子,对植被生长的影响十分显著(刘雅勤等,2007)。前人的大部分研究主要集中在过去几十年间多尺度下三江源区 NDVI 时空分布、气候变化特征及生态与气候变化的相互影响等方面(陈琼等,2010;廉丽姝,2007;柳媛普等,2007;唐红玉等,2007;于伯华,2009;赵芳,2012;刘晓婉,2018),对于未来三江源区植被如何变化以及分布特征涉及较少。本文将利用归一化植被指数 NDVI 和地面气象观测资料,在分析三江源区 NDVI 的时空变化特征及其对不同气候要素的响应基础上,基于不同时间尺度,利用多元线性回归方法,建立三江源区逐像元的 NDVI 统计预测模型,并预测在 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下 2006—2050 年三江源区 NDVI 时空分布特征和变化趋势。

2 数据来源与研究方法

图 1 给出了研究区域在青藏高原的位置及三江源区 29 个气象站的分布,图中虚线框内(31°39′N—36°16′N, 89°24′E—102°23′E)为研究区域,包括

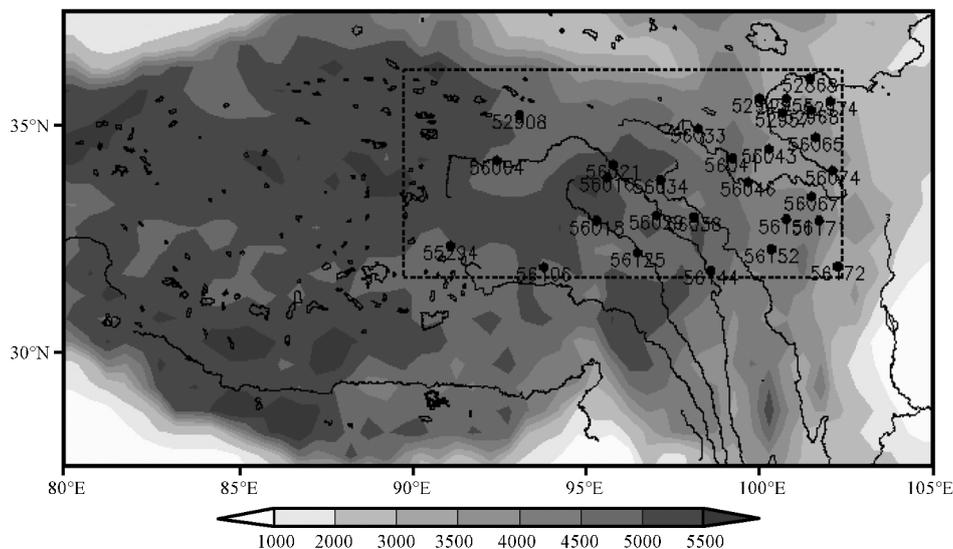


图 1 三江源区地理位置(虚线框)和 29 个气象站分布
背景填色为海拔(单位: m),实线为高原河流、湖泊分布状况

Fig. 1 Geographical location of the Three-Rivers-Source Region (the dashed box) on Qinghai-Tibetan Plateau and the distribution of 29 meteorological stations. The background color is altitude (unit: m), the solid line is the distribution of rivers and lakes on the plateau

了三江源区。该区域观测站分布不均,主要在东部和东南部地区。

地面观测数据选用源区 29 个气象站 1989—2008 年月降水量、平均气温等资料,数据来自国家气象信息中心;植被指数数据为 1989—2008 年 NOAA-AVHRR 旬 NDVI,来自国家卫星气象中心,范围为 65°E — 145°E , 10°N — 60°N ,分辨率 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$;气候模式数据来自国家气候中心中国地区气候变化预估数据集(Version3.0),是由区域气候模式 RegCM4 模拟的月资料,数据集分两部分:历史(1961—2005 年)模拟数据与 RCP4.5、RCP8.5 情景下未来(2006—2050 年)气候预测数据,要素包含平均气温、平均最高(低)气温、降水量等量。模式中心点为 105°E , 35°N ,东西方向格点数为 160,南北方向为 109,水平分辨率为 50 km,范围覆盖整个中国及周边地区。因气候模式产品年限限制,文中以 2005 年前作为历史时段,2006 年后作为未来预测时段。文中在使用气候模式数据、NDVI 遥感数据建立 NDVI 统计预测模型并对其进行检验时,因气象数据空间分辨率较 NDVI 粗,为保持二种数据分辨率一致,采用了气候模式的粗网格分辨率(50 km),而相应的 NDVI 值则选用最近邻该网格中心点的值。历史时期(2005 年前)气象数据则以观测站点(图 1)分布为准,NDVI 数据选该气象站最邻近格点的数据进行分析。另外,采用一元线性回归方程的斜率(变率)描述年际变化;采用皮尔逊相关系数(魏凤英,2007)分析 NDVI 对各气候要素变化的响应;采用多元线性回归方法建立 NDVI 与气候要素的统计预测模型。

为预估未来全球和区域的气候变化,必须事先提供未来温室气体和硫酸盐气溶胶等的排放情况,即所谓的排放情景。第五次 IPCC(2013)评估报告采用了新一代情景,称为“典型浓度目标”情景(RCPs)。受采用模式数据限制,本文使用了两种排放情景:(1)RCP4.5 情景:该情景是 2100 年辐射强迫稳定在 $4.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,用全球变化评估模式模拟,考虑了全球经济框架相适应的,长期存在的全球温室气体和生存期短的物质排放,以及土地利用、陆面变化;(2)RCP8.5 情景:该情景是 2100 年辐射强迫上升至 $8.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这是最高的温室气体排放情景,假定人口最多、技术革新率不高、能源改善缓慢,所以收入增长慢。这将导致长时间高能源需求及高温室气体排放,而缺少应对气候变化的政策(沈永平,2013)。本文以 RCP4.5 情景为

主,两种情景相互结合方式分析未来三江源区 NDVI 的变化特征。每个情景下均考虑了土地利用情况,包括林木砍伐、土地退化、城市用地变化等方面。

3 NDVI 时空分布特征及其与气候变化关系

3.1 NDVI 时空分布特征

从三江源区 1989—2008 年不同季节多年平均 NDVI 空间分布情况(图 2)可知,三江源区不同季节多年平均 NDVI 空间分布均表现为:NDVI 高值区分布在源区东部、东南部,向西北逐步降低,在西北高寒地区降到 0.1 以下。高值区分布范围和强度有着显著季节变化特征,冬季由于受积雪和冻土影响较大,缺乏与其他季节的可比性,但 NDVI 分布仍能反映出一定的规律。

分析三江源区 NDVI 年变化(图略)可知,冬季过后,NDVI 由 4 月开始缓慢增长,5—8 月为植被快速生长期,8 月达到峰值,此时 NDVI 约为 0.313。此后迅速降低,11 月后变化缓慢。植被停止生长期间,由于受积雪和冻土影响,植被指数出现一些小的波动。由此可知,植被生长季节主要在 4—10 月,其中 7—8 月为生长旺季。该结果与杨莲英(2008)、宋冬梅等(2011)和钱拴等(2010)对植被指数的研究结果基本一致。因此文中对三江源区 NDVI 的变化分析主要集中在夏、秋季节,且以夏季为主。

从 1989—1998 年、1999—2008 年和 1998—2008 年三江源区夏季平均 NDVI 年变率分布(图 3)分析可知,1998—2008 年 20 年间源区 10 年变率在 $-0.44\sim 0.57(10\text{a})^{-1}$,绝大多数地区为正值,植被指数为增长趋势[图 3(c)],正高值区主要在东部和长江上游地区;前 10 年(1989—1998 年)变率在 $-0.76\sim 1.41(10\text{a})^{-1}$ [图 3(a)],植被指数增长幅度普遍较高,正高值区主要在黄河源区及三江源中部地区,南部有零散区域植被表现为退化趋势;后 10 年(1999—2008 年)变率在 $-0.49\sim 1.45(10\text{a})^{-1}$ [图 3(b)],正高值区主要在源区东部和南部地区,中北部黄河源区和西南地区则分布着零星植被退化区,西部大部分地区植被指数增长幅度较前 10 年小。

高寒气候背景下,青藏高原发育了以高山草原、高寒草甸和高寒荒漠为代表的自然景观。复杂的生态环境为众多植物的生长发育提供了有利条

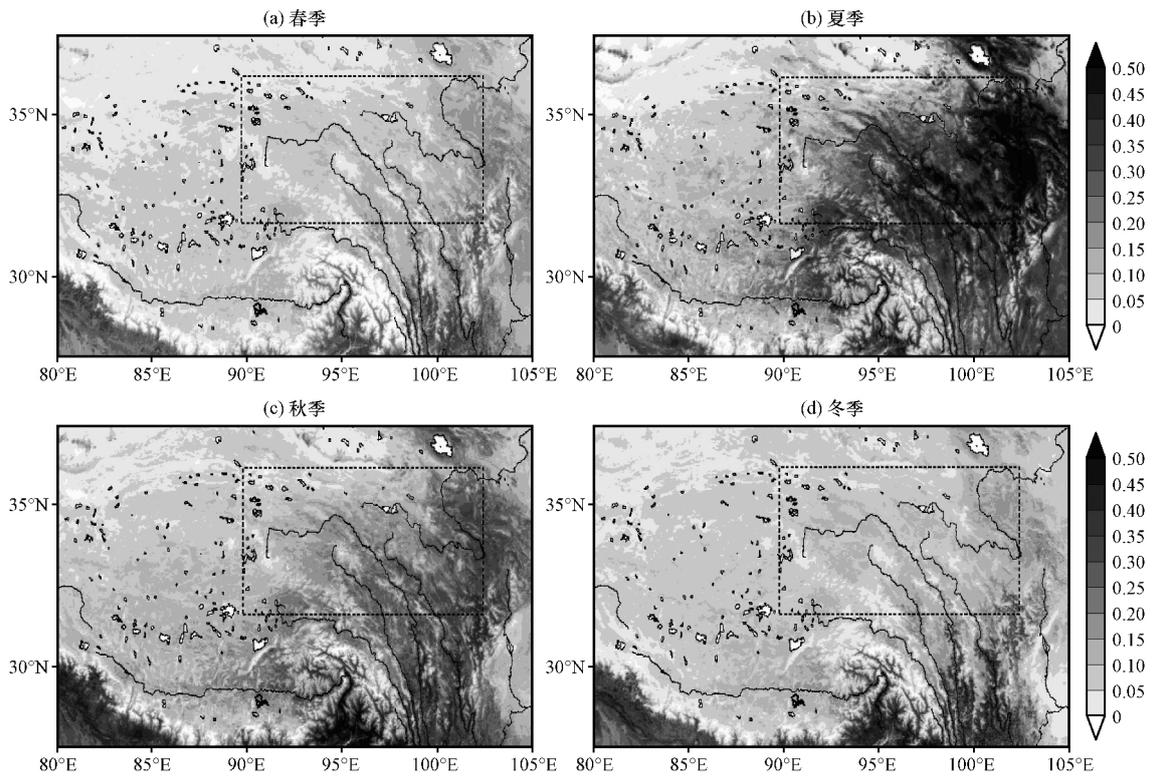


图 2 1989—2008 年青藏高原不同季节 NDVI 分布特征

虚线框内为研究区域

Fig. 2 Distribution characteristics of NDVI on Three-Rivers-Source Region in different seasons from 1989 to 2008.

The dotted box was research region

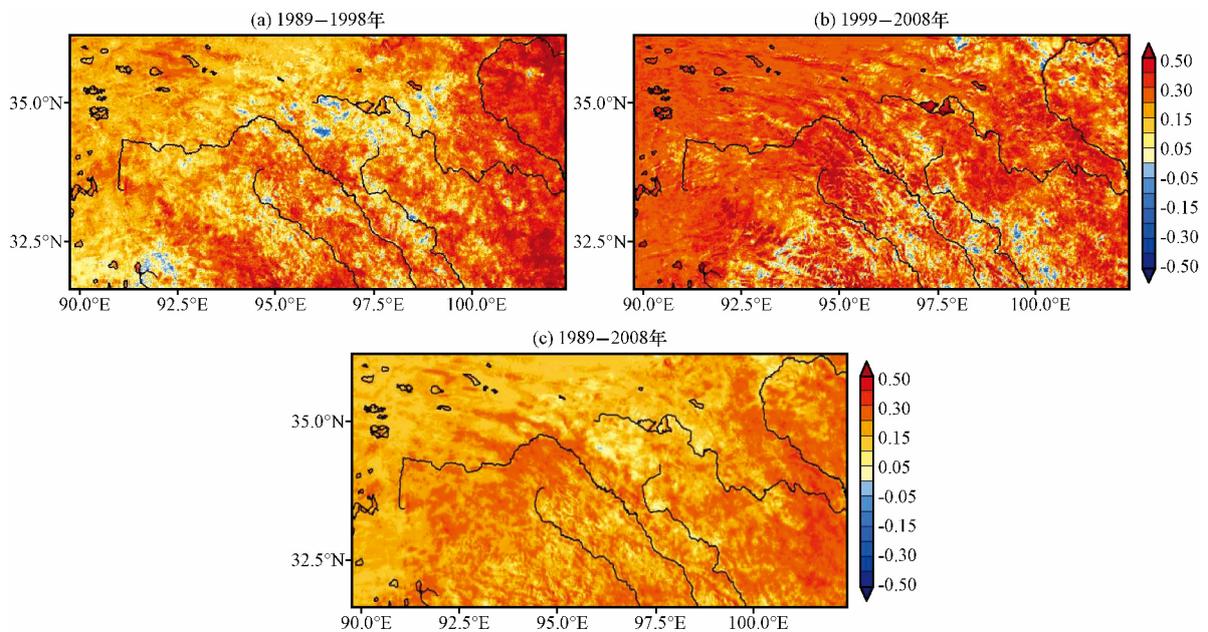


图 3 1989—2008 年间不同阶段三江源区夏季 NDVI 10 年变率分布 [单位: $(10a)^{-1}$]

Fig. 3 Distribution of NDVI variability in decades in Three-Rivers-Source Region during 1989—2008. Unit: $(10a)^{-1}$

件,植物种类繁多,植物地理成分交错,植被类型复杂,呈现出明显的区域差异(李娜,2014)。三江源区南部、东南部以高山草甸为主,西北部为高山

草原,东北部包括高山草甸、草甸及高山草原等多种植被类型。选择源区 NDVI 高值区(32°N—35°N,95°E—102.5°E)为研究对象,该区以高山草

甸为主要植被类型,分析 1989 年来该区域夏季 NDVI 变化特征(图 4)。

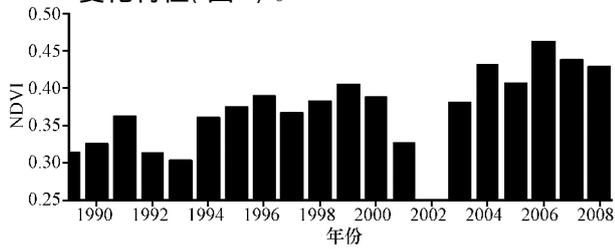


图 4 1989—2008 年三江源植被指数高值区域(32°N—35°N, 95°E—102.5°E)夏季 NDVI 年际变化

Fig. 4 Histogram of interannual variation in the area (32°N—35°N, 95°E—102.5°E) with high NDVI in Three-Rivers-Source Region from 1989 to 2008

自 2000 年以来,三江源区相继实施了一系列生态保护与建设工程,植被主要生长季 NDVI 明显高于工程实施前。20 世纪 90 年代中期以及进入 21 世纪的前几年植被指数处于低值期,2004 年以来植被指数增高明显,相对处于高值期(图 4)。这与王江山等(2005)、徐兴奎等(2008)和唐红玉等(2006)

利用 1982—2000 年江河源区年 NOAA/AVHRR 植被指数分析得出的三江源区植被覆盖总体保持原状的结论基本一致。工程实施后,各自然保护区的土地覆被指数明显增加,生态系统宏观状况好转。

在 10 年时间尺度上,人类活动可在短期内加快植被变化速率,但气候变化是影响植被生长的决定性因素,人类活动和气候要素对植被生长的贡献分别为 20.68% 和 79.32%。由于生态保护与建设工程的实施面积占三江源区全区总面积比例较小,对三江源区整体植被变化的影响也非常有限(孙庆龄,2016),并非影响植被整体变化的决定因素。

3.2 NDVI 与气候变化关系

从 1989—2008 年三江源区夏季和秋季 NDVI 与同期气温相关系数分布情况(图 5)可知,夏、秋季节三江源区 NDVI 与同期气温均呈较显著正相关(填色区全部通过了 90% 的信度检验),其中夏季相关系数高值中心位于源区中部及东部,对比分析高值区强度和范围,秋季相关最强、范围最大,其次为夏季;高值中心随季节变化自东向西移动。

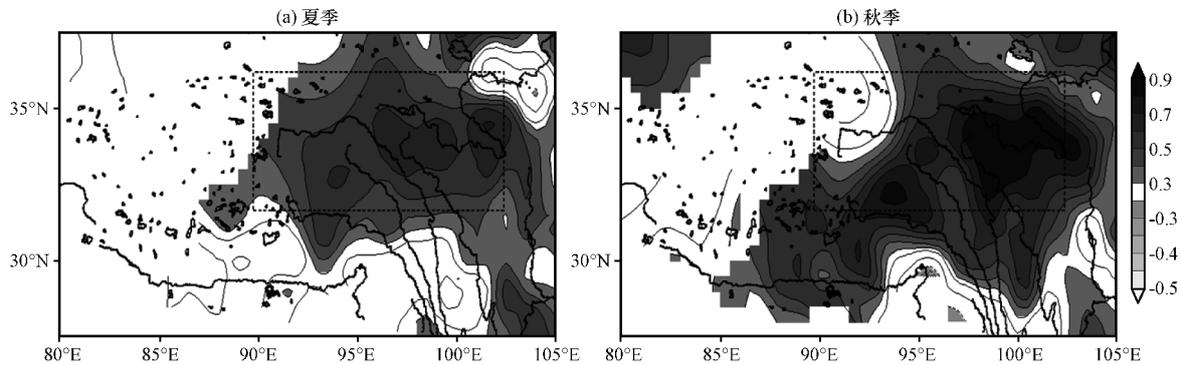


图 5 1989—2008 年青藏高原夏(a)、秋(b)季 NDVI 与同期气温相关系数分布
虚线框内为研究区域

Fig. 5 Correlation coefficients between NDVI and temperature of Three-Rivers-Source Region in summer (a) and autumn (b) from 1989 to 2008. The dotted box was research region

源区 NDVI 与气温在夏、秋季均呈较显著正相关特征,而与降水却有所不同。从 1989—2008 年三江源区夏季和秋季 NDVI 与同期降水相关系数分布情况(图 6)可知,降水与 NDVI 在秋季呈较显著正相关(填色区域全部通过 90% 信度检验),高值中心主要分布在源区东部及南部。夏季降水与 NDVI 相关特征并不显著,呈现出小范围正、负相关零散分布的特征。另外,分析 1989—2008 年三江源区夏季 NDVI、气温和降水年际变化趋势可知,随着气温升高,降水量不断增加,NDVI 也逐渐上升;当源区平均气温达到峰值时,NDVI 也达到峰值或较高值,而当降水量较高且达到峰值时,NDVI 反

而会降低(图 7 中虚线框区域)。其原因可能是夏季三江源区水分充足,降水量不再是植被生长的主要限制因子,且降水较多会使源区光照时间缩短、气温有所降低,反而不利于植被生长,导致 NDVI 降低。Davenport et al (1993) 研究也同样表明,降水量在某一范围内与 NDVI 存在较强的线性关系或对数关系,但若降水量超过一定的阈值,降水不再是植被生长的限制因子,随着降水增多 NDVI 增加非常缓慢。综上所述,不同季节气候对植被生长的影响差异较大,且影响效果气温大于降水,说明气温是决定三江源区植被生长的主要气候因素。唐红玉等(2006)和刘正佳等(2014)也认为,在三江源区,与降水

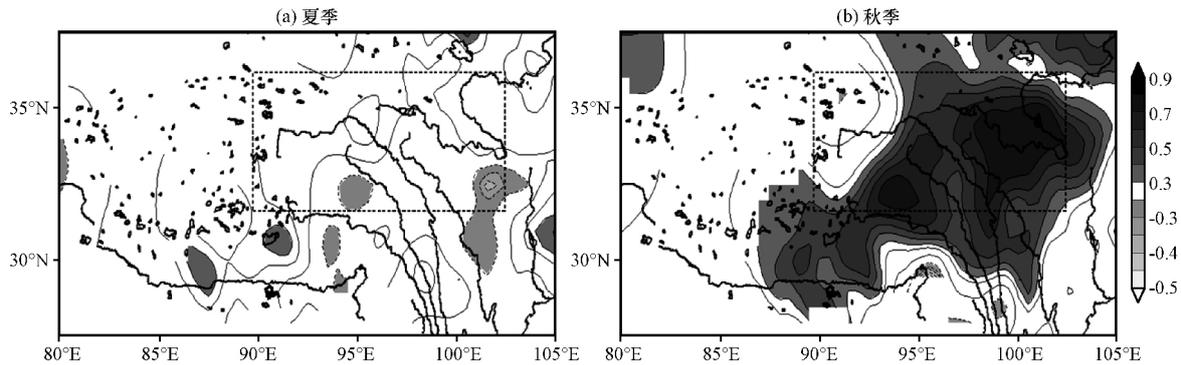


图 6 1989—2008 年青藏高原夏 (a)、秋 (b) 季 NDVI 与降水相关系数分布
虚线框内为研究区域

Fig. 6 Correlation coefficients between NDVI and precipitation of Three-Rivers-Source Region in summer (a) and autumn (b) from 1989 to 2008. The dotted box was research region

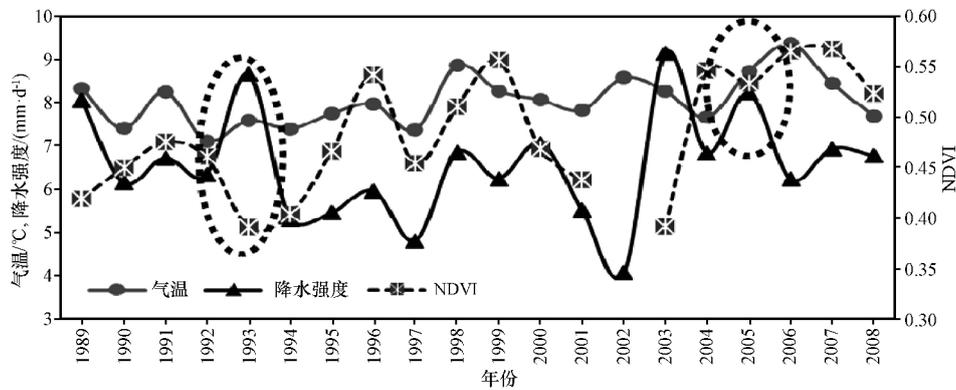


图 7 1989—2008 年三江源区夏季 NDVI 与气温、降水(2 倍: 为使量级一致,降水数据乘 2) 的 annual 变化
Fig. 7 Interannual change of NDVI, temperature and precipitation (doubleness) in the Three-River-Source Region from 1989 to 2008

量相比,植被长势对气温变化的响应更为敏感。

3.3 NDVI 对气候因子的时滞性分析

植被对气候要素变化的响应具有累积效应。除当时气候状况影响外,前期气候状况对植被生长也有显著影响(Zhang et al, 2005)。表 1 计算了三江源区各气象站 1989—2008 年历年各月 NDVI 与该站同期及前期气温、降水之间的相关系数,在

不同时间尺度下,分析 NDVI 受气候条件影响的强度及其时滞效应。计算中分别用各站历年夏季、秋季和全年尺度中逐月 NDVI 值和相应月份的气候要素为样本,以一个月为增量,将气候要素时段由与 NDVI 同期逐月向前推,分别与 NDVI 求相关系数,直至 75% 以上站未通过 90% 显著性水平检验为止。

表 1 不同时间尺度气温、降水变化对 NDVI 生长时滞效应

Table 1 Time-lag effect of climate change on NDVI in various temporal scales

| NDVI 时间尺度 | 气温 | | 降水 | |
|------------|--------|-------------|--------|-------------|
| | 相关系数最高 | 通过 90% 信度检验 | 相关系数最高 | 通过 90% 信度检验 |
| 全年(1—12 月) | 1 个月 | 3 个月 | 1 个月 | 2 个月 |
| 夏季(6—8 月) | 1 个月 | 5 个月 | 1 个月 | 4 个月 |
| 秋季(9—11 月) | 1 个月 | 2 个月 | 1 个月 | 2 个月 |

由表 1 可知,三江源区不同时间尺度下 NDVI 对各气候要素的时滞响应略有差异。当 NDVI 滞后气温、降水一个月时相关性最高(相关系数均大于

0.8),即前一个月的气候要素变化对 NDVI 影响最为显著。而随着时间推移,前期气候要素对 NDVI 的影响逐渐减弱,以相关系数通过 90% 信度检验为

标准, 全年尺度下, 气温比降水长, 前者约 3 个月, 后者约 2 个月; 夏季 NDVI 对气温的时滞响应约 5 个月, 降水约 4 个月; 秋季的气温和降水均为 2 个月。不同时间尺度下, 影响强度气温均高于降水。上述结论与前人(安如等, 2014; 李霞等, 2007; 李晓兵等, 2000) 结论基本一致。

4 NDVI 未来变化特征

4.1 模型建立与检验

由上述分析可知, 三江源区 NDVI 与气候变量相关显著, 气温、降水分布与变化决定着植被的生长和分布格局, 且季节差异较大。在此基础上, 以季节(春、夏、秋季) 为时间尺度, 数据格点为基本单位, 共建立了 3213 个 NDVI 与气温和降水的统计预测模型。为了验证预测模型的合理性和可用性, 以 NDVI 与气温和降水相关性相对不显著的夏季为例, 分析三江源区 2004—2005 年 NDVI 模型拟合值与卫星监测值平均偏差场空间分布特征(图 8)。由图 8 可知, 偏差场有正有负, 以负值为主, 拟合值整体较监测值偏低, 大部分区域绝对误差在 $-0.05 \sim 0.02$ °C。除源区中部区域拟合值偏大外, 其他地区拟合值均偏小。根据上述对气候模式产品

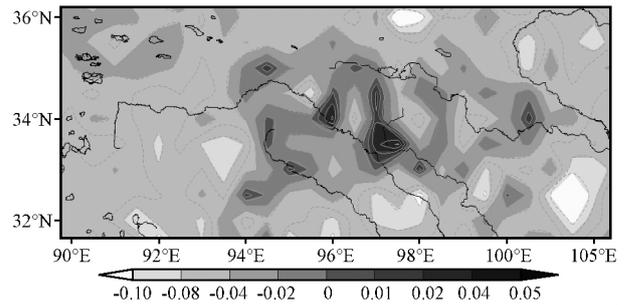


图 8 2004—2005 年夏季三江源区统计预测模型 NDVI 拟合值与卫星监测值偏差场空间分布

Fig. 8 The deviation of NDVI from satellite monitoring data and simulate data in Three-Rivers-Source Region from 2004 to 2005

数据的检验分析可知, 气候模式对源区气温模拟偏低, 降水模拟偏高, 又因夏季三江源区气温与 NDVI 成正相关, NDVI 对气温变化响应较降水更为显著, 气温的气候模式模拟结果对 NDVI 影响较大, 因此, 气候模式气温模拟值偏低可能是导致大部分地区 NDVI 统计预测模型拟合值偏低的主要原因。综上所述, 源区多数情况下 NDVI 拟合值小于卫星监测值, 相对误差在合理范围内, 模型是可用的。春、秋两季的 NDVI 与气温和降水相关性相对较显著, NDVI 预测模型的误差较小(图 9)。

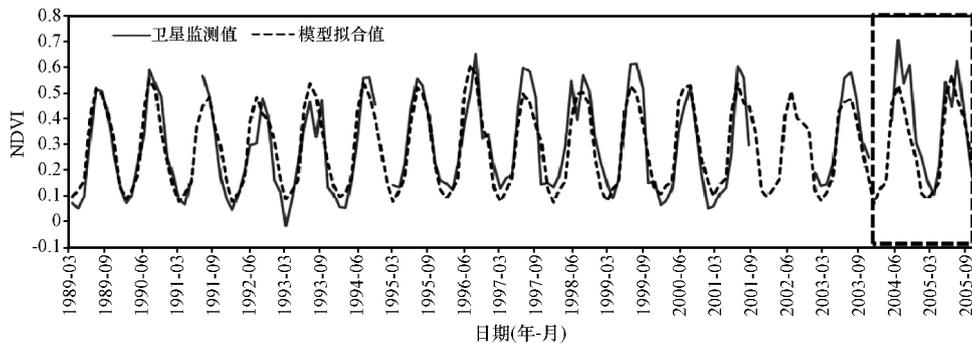


图 9 1989—2005 年青海站 3—11 月 NDVI 卫星监测值与统计预测模型拟合值变化
虚线框内为模型拟合值

Fig. 9 Fitting values and observed values of NDVI at Qinghai station from March to November during 1989 to 2005.

Fitting value of model in the dashed line frame

4.2 模型预测结果分析

根据上述统计模型结合 RegCM4 气候模式预报产品, 图 10 给出了 RCP4.5 情景下三江源区不同季节 2006—2050 年平均 NDVI 分布状况。未来 40 多年三江源区各季分布格局较 1989—2005 年变动不大, 2006—2050 年, 春、夏、秋季 NDVI 高值中心仍主要分布在源区的东南部和东部。夏季植被生长最为旺盛, 三江源高值中心位于黄河源区, NDVI 大于 0.5, 长江源区 NDVI 较高, 在 0.3~

0.45; 秋季三江源区 NDVI 高值中心为 0.3~0.35; 春季则降低到 0.15~0.2。RCP8.5 情景下各季 NDVI 分布规律与 RCP4.5 基本一致, 只高值范围略大。

从三江源地区区域平均值角度来分析, 2006—2050 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下年平均 NDVI 年际变化以及 RCP4.5 情景下春、夏、秋季 NDVI 年际变化情况(图 11) 可知, 未来 40 多年, 在气温持续上升, 降水变化不大(微弱上升趋势) 气候背景

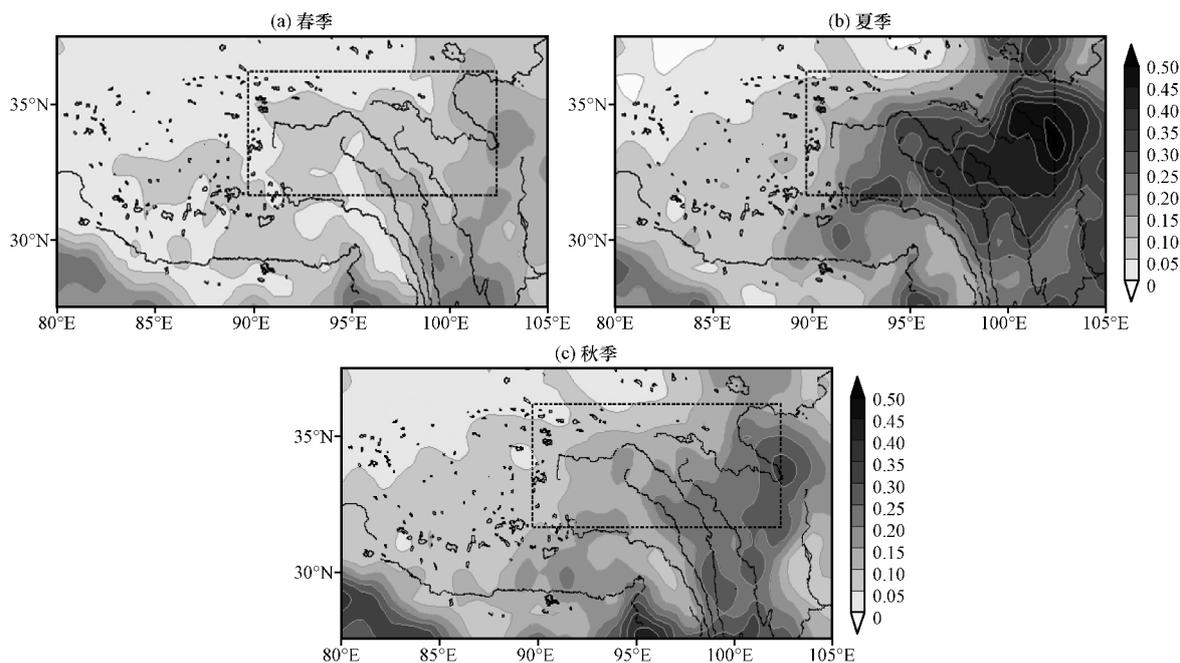


图 10 RCP4.5 情景下 2006—2050 年青藏高原不同季节平均 NDVI 分布
虚线框内为研究区域

Fig. 10 Distribution of NDVI under RCP4.5 scenario in seasons of Three-Rivers-Source Region from 2006 to 2050. The dotted box was research region

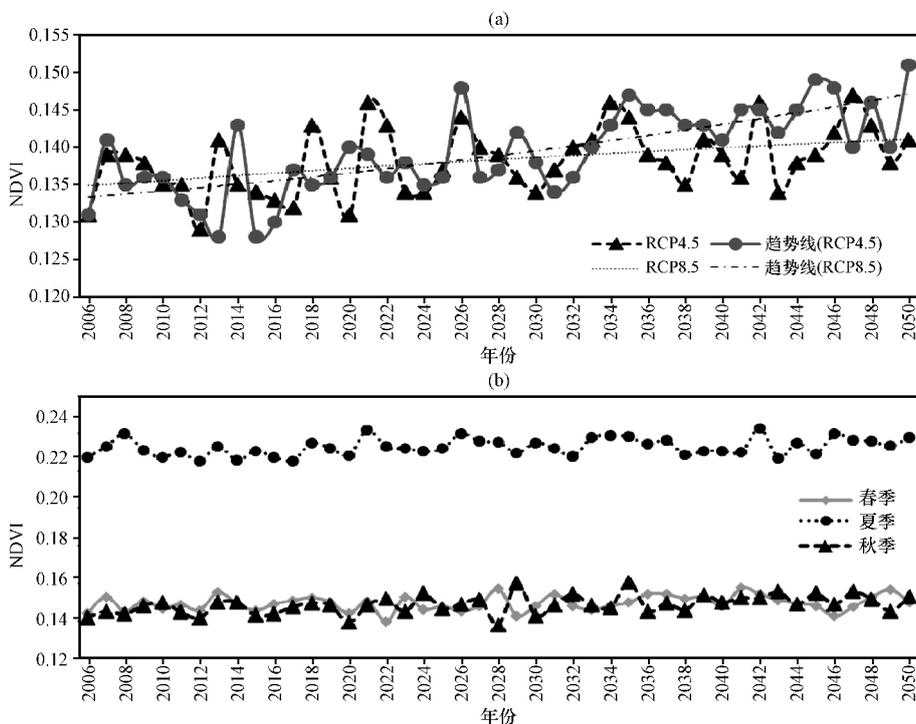


图 11 2006—2050 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下三江源区年平均 NDVI 年际变化 (a)
与 RCP4.5 情景下源区春、夏、秋季 NDVI 变化 (b)

Fig. 11 Interannual variation of NDVI under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios (a) and seasonal variation of NDVI under RCP4.5 scenarios (b) in Three-Rivers-Source Region from 2006 to 2050

下,三江源区平均植被指数在两种情景下均呈稳定上升趋势。前 10 年增速缓慢,后 30 年增幅较大。

RCP8.5 情景下植被指数上升趋势较 RCP4.5 更显著。前 10 年 RCP8.5 情景下 NDVI 上升幅度略大

于 RCP4.5 情景, 后 30 年前者上升幅度加大, 显著超过后者。2006—2050 年三江源区 NDVI 在不同季节均表现出较为明显的增长趋势 [图 11(b)], 但相位变化并不一致。以 RCP4.5 情景为例, 夏、秋季较为相似, 春季差异较大。秋季 NDVI 增长最为显著, 后 30 年增速高于前 10 年; 夏季状态与秋季相反, 前 20 年增速较快, 后 20 年增速放缓。春季变化幅度较小, 后 20 年呈略微增加趋势。分析三江源 NDVI 高值区 ($32^{\circ}\text{N}-35^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}-102.5^{\circ}\text{E}$) 也可得到上述结论, 夏季 NDVI 预测误差较其他季节大, 模型对源区 NDVI 预测整体偏低。

从 RCP4.5 排放情景下 2006—2045 年及其三江源区每 10 年平均 NDVI 的年变率分布 (图 12) 可知, 2006—2045 年绝大部分地区 NDVI 呈增长趋势, 但不同地区、不同时段年变率差异较大。其中, 2006—2015 年增长幅度最小, 空间变化不明显, 正、负变率区域各占一半, 植被生长状况较差, 此时段长江源区为 NDVI 增长区, 西北部黄河源区

为植被退化区, 对应气候要素变化可知, 2006—2015 年三江源区气温波动较大, 但趋势线基本处于同一水平, 对源区植被生长没有明显促进作用。2016—2025 年源区 NDVI 持续缓慢增长, 正变率高值中心位于源区北部及西部地区; 2026—2035 年 NDVI 增幅和范围均大于其他三个时段, 正变率高值中心主要在源区南部偏西区域。比较气候要素变化, 这两个时间段气温和降水均处于快速上升期, 相较于其他阶段, 波动较少, 增幅较大, 因而三江源区在较高气温和充足降水情况下, 源区植被生长茂盛, NDVI 指数升高。正变率高值中心 2026—2035 年较 2016—2025 年开始往东往南伸展, 最高值可达 $0.25 (10\text{a})^{-1}$ 。2036—2045 年, 气温和降水增长速度变缓, 植被生长相应受到抑制, 正变率值变低, 此时段高值中心主要分布在源区西南区域, 最大值约为 $0.15 (10\text{a})^{-1}$ 。RCP4.5 情景下 2006—2045 年间正变率高值中心由北向南转移。

相较 RCP4.5 情景, RCP8.5 情景下未来三江

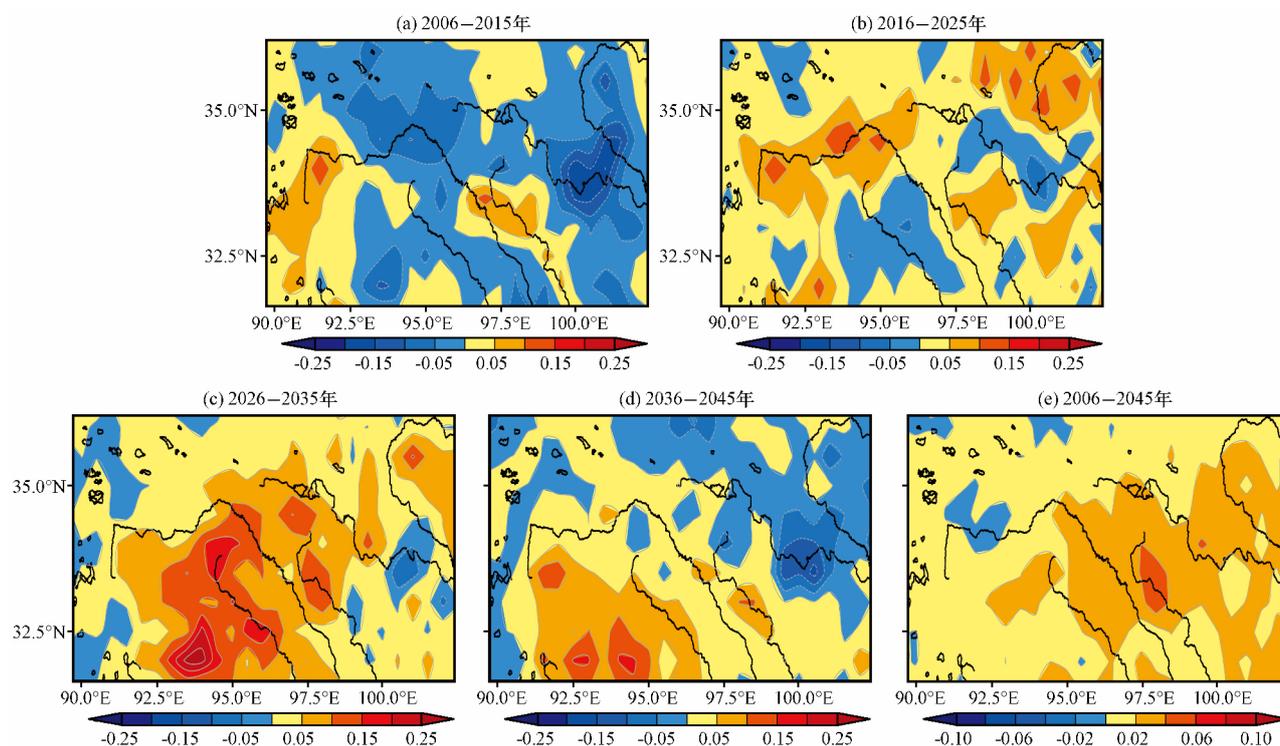


图 12 RCP4.5 情景下三江源区不同时段年平均 NDVI 年变率分布 [单位: $(10\text{a})^{-1}$]

Fig. 12 Distribution of NDVI variability in decades under RCP4.5 emission scenarios. Unit: $(10\text{a})^{-1}$

源区 NDVI 增长幅度更大, 高值分布范围更广。从 RCP8.5 排放情景下 2006—2045 年及其源区每 10 年 NDVI 变率分布 (图 13) 可知, 2006—2045 年大部分地区 NDVI 呈显著上升趋势。2006—2015 年大部分地区 NDVI 年变率为负值, 植被在退化, 尤

以东北部黄河源区最严重, RCP4.5 情景下该地区 NDVI 有同样变化; 西部为正值, 植被生长状况变好。后 30 年大部分地区 NDVI 为显著上升期, 这与 RCP4.5 情景下 NDVI 年际变化情况类似, 不同之处在于每个时间段上升幅度和高值中心分布的差

异。RCP8.5 情景下源区 NDVI 上升幅度较大、增长速度较快时段为 2016—2025 年和 2036—2045 年。年变率的正高值中心 2016—2025 年位于源区中部偏西 [图 13(b)]、2026—2035 年位于东部中间位置 [图 13(c)]、2036—2045 年位于中部偏南

[图 13(d)], 以上高值中心均分布在长江源区, 增幅较大。2036—2045 年黄河源区 NDVI 在 RCP8.5 情景下呈显著升高趋势, 而 RCP4.5 情景下则相反。同样, RCP8.5 情景下 2006—2045 年间变率高值中心也表现出由北向南转移的趋势。

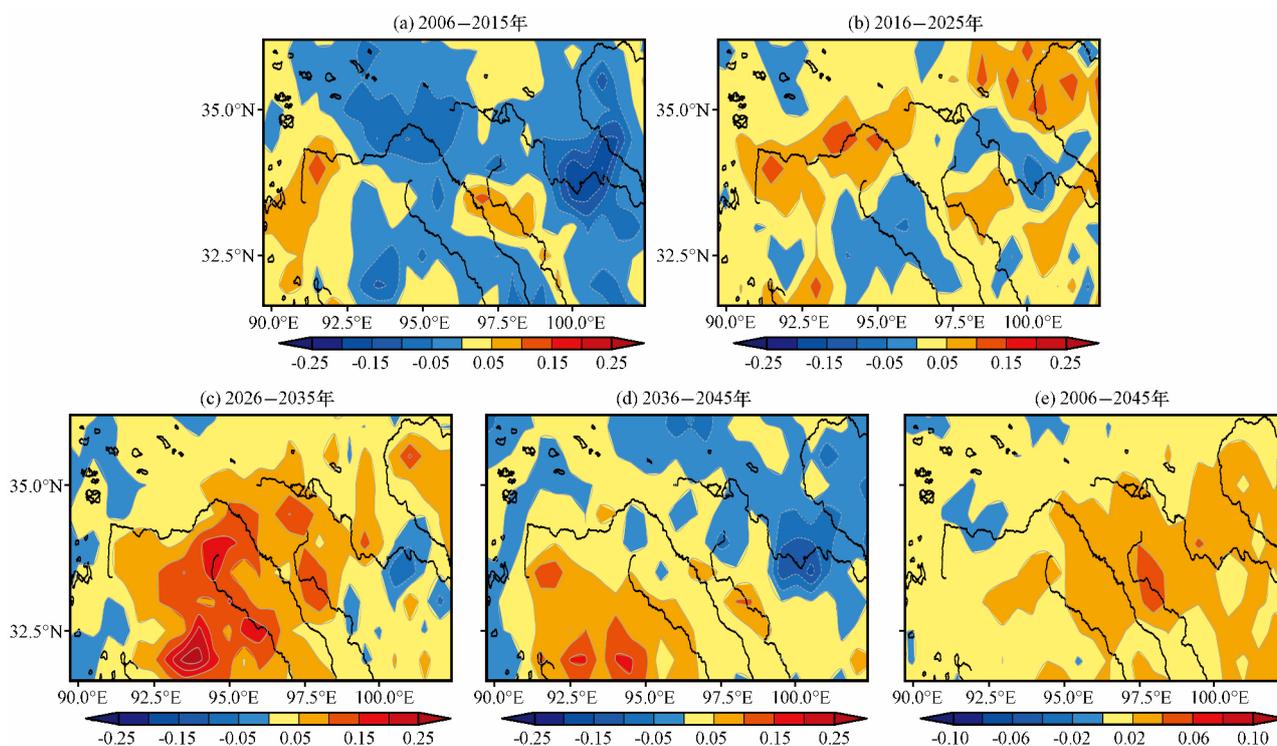


图 13 RCP8.5 情景下三江源区不同时段年平均 NDVI 年变率分布 [单位: $(10a)^{-1}$]

Fig. 13 Distribution of NDVI variability in decades under RCP8.5 emission scenarios. Unit: $(10a)^{-1}$

5 结论

为分析三江源区 NDVI 的时空变化特征及气候变化对该地区生态的影响特征, 利用 1989—2008 年 NOAA-AVHRR 的 NDVI 旬合成资料和地面气候观测数据, 分析了三江源区 NDVI 时空变化特征及其对气候要素变化的响应。通过建立不同季节 NDVI 与各气候要素的统计预测模型, 对未来 40 多年间不同排放情景下三江源区 NDVI 变化趋势进行预测分析。得出主要结论如下:

(1) 1989—2008 年三江源区 NDVI 呈显著区域分布和季节变化特征。源区东南部、东部为 NDVI 高值区, 由东南往西北逐渐降低。夏季 NDVI 值最高, 其次为秋季, 春季较低, 冬季受积雪和冻土影响较大, 缺乏可比性, 但 NDVI 分布仍能反映出一定的规律。

(2) 影响三江源区植被指数的主要气候因子是气温, 其次是降水。不同时间尺度、不同区域

NDVI 对气温和降水响应差异较大。源区 NDVI 与气温在春、夏、秋季均呈显著正相关; 与降水在春、秋季呈显著正相关; 对 NDVI 的影响强度和范围, 气温明显高于降水, 秋季尤其显著。夏季 NDVI 与降水无明显相关性, 当降水达到高值时, NDVI 不增反降, 其可能原因是在雨水比较充足的夏季, 地表植被的生长对降水敏感度并不高, 且随着降水增多, 光照时间缩短、气温有所降低, 反而不利于植被的生长, 导致 NDVI 降低。三江源区 NDVI 对气候要素变化的响应具有滞后性, 不同时间尺度的 NDVI 均对前一个月气温和降水时滞效应较为显著。

(3) RCP4.5 情景下, 2006—2050 年三江源区 NDVI 空间分布格局变动不大, 由东南向西北逐渐变小; 源区平均 NDVI 呈显著增长趋势, 波动幅度较大。2006—2015 年源区 NDVI 正、负变率值均有分布, 增长幅度较小, 长江源区为正变率, 黄河源区为负变率区。2016—2025 年 NDVI 增速变快,

源区北部和西北部增速相对较快。2026—2035 年, NDVI 增长进一步加速, 此时气温和降水均处于快速上升期, 相较于其他阶段, 波动较少, 增幅较大, NDVI 最高变率达 $0.25 (10a)^{-1}$ 。2036—2045 年, 气温和降水增长速度有所减缓, 植被生长相应受到抑制, NDVI 增速变缓, 最高变率约 $0.15 (10a)^{-1}$ 。2006—2050 年, 不同季节的源区平均 NDVI 年际变化规律并不一致, 夏、秋季较为相似, 春季差异较大。秋季增长最为显著, 后 30 年增长速度高于前 10 年; 夏季与秋季相反, 前 20 年增速较快, 后 20 年增速放缓。春季变化幅度较小, 整体呈小幅度增加趋势。

(4) RCP8.5 情景下未来三江源区 NDVI 增长幅度更为显著, 高值中心范围和强度均高于 RCP4.5 情景。RCP4.5 情景下 NDVI 迅速增长期为 2026—2035 年, 高值中心位于澜沧江源区; RCP8.5 情景下为 2016—2025 年和 2036—2045 年两个阶段, 高值中心均在长江源区。两种情景下的相似变化特征: 2006—2045 年源区平均 NDVI 均呈显著上升趋势, 且后 30 年增幅较前 10 年更为显著; 2016—2025 年长江源区 NDVI 均为增长趋势, 植被生长状况转好, 黄河源区均表现为退化趋势; 2026—2035 年源区 NDVI 均为快速增长阶段; 2036—2045 年源区 NDVI 整体均表现为持续增长趋势; 2006—2045 年源区 NDVI 变率高值中心均表现为由北向南转移的趋势, 造成此现象的原因尚需进一步分析。

致谢: 感谢国家气候中心提供的利用区域气候模式所进行的中国区域未来气候变化模拟结果。

参考文献:

- Davenport M L, Nicholson S E, 1993. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 14(12): 2369-2389.
- IPCC, 2013. *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Piao S, Wang X, Ciais P, et al, 2011. Changes in satellite derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 17(10): 3228-3239.
- Zhang X, Ge Q, Zheng J, 2005. Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 24(2): 123-130.
- 安如, 徐晓峰, 杨仁敏, 等, 2014. 三江源区植被 NDVI 对区域气候的时滞效应分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 37(2): 1-5.
- 常国刚, 李凤霞, 李林, 2005. 气候变化对青海生态与环境的影响及对策[J]. *气候变化研究进展*, 1(4): 172-175.
- 陈琼, 周强, 张海峰, 等, 2010. 三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究[J]. *生态环境学报*, 19(6): 1284-1289.
- 丛楠, 沈妙根, 2016. 1982—2009 年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系[J]. *应用生态学报*, 27(9): 2737-2746.
- 邓振镛, 张强, 宁惠芳, 等, 2010. 西北地区气候暖干化对作物气候生态适应性的影响[J]. *中国沙漠*, 30(3): 633-639.
- 李林, 朱西德, 周陆生, 等, 2004. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响[J]. *气象*, 30(8): 18-22.
- 李娜, 谢虹, 2014. 青藏高原 NDVI 对 ENSO 事件的响应[J]. *遥感技术与应用*, 29(5): 818-822.
- 李霞, 李晓兵, 陈云浩, 等, 2007. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J]. *植物生态学报*, 31(6): 1054-1062.
- 李晓兵, 史培军, 2000. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. *植物生态学报*, 24(3): 379-382.
- 刘晓婉, 彭定志, 徐宗学, 2018. 雅鲁藏布江流域 NDVI 对高程与降水的相依性研究[J]. *高原气象*, 37(2): 349-357. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00048.
- 廉丽妹, 2007. 三江源地区土地覆被变化的区域气候响应[D]. 上海: 华东师范大学.
- 林振耀, 赵昕奕, 1996. 青藏高原气温降水变化的空间特征[J]. *中国科学*, 26(4): 354-358.
- 刘敏超, 李迪强, 栾晓峰, 等, 2005. 三江源地区生态系统服务功能与价值评估[J]. *植物资源与环境学报*, 14(1): 40-43.
- 刘雅勤, 范广洲, 周定文, 等, 2007. 青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系[J]. *气象学报*, 65(6): 959-967.
- 刘正佳, 邵全琴, 2014. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 21(6): 334-339.
- 柳媛普, 吕世华, 李锁锁, 等, 2007. 近几十年黄河源区气候与植被变化及相关分析[J]. *高原气象*, 26(5): 1045-1051.
- 钱拴, 伏洋, Pan F F, 2010. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应[J]. *中国科学(地球科学)*, 40(10): 1439-1445.
- 宋冬梅, 张茜, 杨秀春, 等, 2011. 三江源区 MODIS 植被指数时空分布特征[J]. *地理研究*, 30(11): 2067-2075.
- 孙红雨, 1998. 我国地表植被覆盖变化及其与环境因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. *遥感学报* 2(3): 204-209.
- 孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 等, 2016. 2000—2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析[J]. *地球信息科学学报*, 18(12): 1707-1716.
- 沈永平, 王国亚, 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. *冰川冻土*, 35(5): 1068-1076.
- 唐红玉, 肖风劲, 张强, 等, 2006. 三江源区植被变化及其对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2(4): 177-180.
- 唐红玉, 杨小丹, 王希娟, 等, 2007. 三江源地区近 50 年降水变化分析[J]. *高原气象*, 26(1): 47-54.

- 王江山,殷青军,杨英连,2005. 利用 NOAA/AVHRR 监测青海省草地生产力变化的研究[J]. 高原气象,24(1): 117-122.
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版) [M]. 北京: 气象出版社.
- 徐新良,刘纪远,邵全琴,2008. 30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J]. 地理研究,27(4): 829-838.
- 徐兴奎,陈红,Levy J K,2008. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析[J]. 科学通报,53(4): 456-462.
- 杨英莲,2008. 青海省天然草地 NDVI 的时空化与气温和降水的关系分析[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 于伯华,吕昌河,吕婷婷,等,2009. 青藏高原植被覆盖变化的地域分异特征[J]. 地理科学进展,28(3): 391-397.
- 赵芳,2009. 三江源区草地 MODIS 植被指数时空变异及驱动因子分析[D]. 西宁: 青海大学.
- 赵静,姜琦刚,李卫东,等,2008. 基于 NDVI 变化的三江源生态环境演变分区研究[J]. 世界地质,27(4): 427-431.

Analysis on Response of Vegetation Index to Climate Change and Its Prediction in the Three-Rivers-Source Region

ZHU Wenhui^{1,2}, MAO Fei², XU Ying³, ZHENG Jun¹, SONG Lixue⁴

(1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

3. National Climate Center, Beijing 100081, China;

4. Asset Management Center, Beijing 100081, China)

Abstract: To analyze the response of NDVI to climate change and its time-lag effect in multi-time scales, synthetic data NDVI detected by NOAA-AVHRR, monthly observed data of precipitation and temperature from 1989 to 2008 were used in this paper. On this bases, we built NDVI prediction models to forecast trends of NDVI under different emission scenarios in the future. Results showed that: (1) NDVI high value areas existed in south-eastern and eastern Three-Rivers-Source Region, and gradually become lower to West-north direction. Months from April to August were growing seasons for vegetation, when NDVI reached maximum in August. (2) Variations of NDVI in spring, summer, autumn displayed an obvious positive phase with temperature and precipitation excluding the summer precipitation; correlation features in spring and autumn were especially remarkable; the response of NDVI to temperature was higher than that to precipitation. Time-leg effect of NDVI in the current month showed most significant correlation feature with the last month's temperature and precipitation. (3) Under the background of Three-Rivers-Source Region's climate warming and slightly increasing precipitation from 2006 and 2050, average NDVI increased significantly, slower in the first decade, and faster in the next three decades with large growth rate. Distribution of NDVI was essentially constant in spatial, and increasing centers with high-intensity and large-range under RCP8.5 scenario were much prominent than that under RCP4.5 scenario. Years of 2016—2035 were rapid growth phase with increasing center of Lancangjiang source region under RCP4.5 scenario. Periods of 2016—2025 and 2036—2045 were rapid increasing time with high variability center of yangtze river source region under RCP8.5 scenario. Location of high variability center in coming multi-decades shifted from north to south in Three-Rivers-Source Region under both scenarios.

Key words: Three-Rivers-Source Region; NDVI; climate change; statistical prediction model; future features