2000—2015 年阜康林区植被覆盖变化及其对气候因子的响应

邢 菲[1]，李 虎[2]，李建贵[3]，张乃明[4]，陈冬花[2]，刘玉锋[2]，叶 春[2]，栗旭升[1]

(1.新疆农业大学 草业与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2.滁州学院 地理信息与旅游学院，安徽 滁州 239000；3.新疆农业大学 林业研究所，乌鲁木齐 830052；4.新疆师范大学 地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要：[目的] 分析阜康林区天保工程实施以来的植被覆盖变化、气温和降水变化及植被覆盖与气温和降水间的响应关系，为天保工程实施生态效益评价提供数据支持。[方法] 基于 2000—2015 年 MODIS/NDVI 数据及阜康林区气温和降水数据，结合均值法、回归分析法、距平波动法和相关分析法等方法，探讨阜康林区天保工程实施以来林区内植被覆盖特征、气候变化状况及二者间的响应关系。[结果] ①2000—2015 年，阜康林区植被覆盖整体处于较低水平且呈不明显的波动下降趋势。阜康林区植被覆盖在近 16 a 变化最为明显的为 NDVI>0.65 部分，是阜康林区 NDVI 下降的主要部分；“低”和“较高”水平 NDVI 虽有上升但不明显，而“中等”水平 NDVI 上升明显且占比较大。②天保工程实施以来，阜康林区年平均气温总体呈波动下降趋势，整体下降幅度不明显。年降水量总体呈显著的波动上升趋势，降水量表现为显著的上升趋势。③天保工程实施以来，植被覆盖变化与气温变化的相关系数仅为 0.053 9，而与降水变化显著相关。植被覆盖变化受气温变化影响强度小于受降水的影响。[结论] 天保工程实施以来，阜康林区植被覆盖总体呈波动下降趋势，但下降幅度并不显著；林区内气候总体由暖干向冷湿趋势发展，但变化趋势不明显；植被覆盖的波动与降水波动的关系要强于气温。阜康林区天保工程实施对周边气候改善具有一定作用，但仍需加强林区内植被保护与恢复工作。

关键词：遥感；天保工程；植被覆盖；归一化植被指数；气候变化；相关性分析；阜康林区

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)01-0244-06 **中图分类号**：P463.22，TP79

文献参数：邢菲，李虎，李建贵，等.2000—2015 年阜康林区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].水土保持通报，2019，39(1)：244-249. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.039；Xing Fei，Li Hu，Li Jiangui，et al. Vegetation cover change and its response to climate factors in Fukang forest farm from 2000 to 2015[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(1)：244-249.

Vegetation Cover Change and Its Response to Climate Factors in Fukang Forest Farm from 2000 to 2015

Xing Fei[1]，Li Hu[2]，Li Jiangui[3]，Zhang Naiming[4]，
Chen Donghua[2]，Liu Yufeng[2]，Ye Chun[2]，Li Xusheng[1]

(1. *College of Grassland and Environment Science of Xinjiang Agricultural University*，*Urumqi*，*Xinjiang* 830052，*China*；2. *College of Geographical Information and Tourism*，*Chuzhou University*，*Chuzhou*，*Anhui* 239000，*China*；3. *Institute of Forestry*，*Xinjiang Agricultural University*，*Urumqi*，*Xinjiang* 830052，*China*；4. *College of Geography and Tourism*，*Xinjiang Normal University*，*Urumqi*，*Xinjiang* 830054，*China*)

Abstract：[Objective] To analyze the response relationships between vegetation cover and temperature and precipitation since the implementation of natural forest protection program (NFPP) in Fukang forest farm，in order to provide data support for the ecological benefit evaluation of NFPP. [Methods] Based on the MODIS/NDVI data and the temperature & precipitation data from 2000 to 2015 in Fukang forest farm，the

收稿日期：2018-07-27 **修回日期**：2018-09-14

资助项目：安徽省高校学科优秀拔尖人才学术培育项目“高分卫星大数据平台建设与产业化应用”(gxbjZD44)；安徽省属公办普通本科高校领军人才团队项目“国产军民卫星星群数据综合处理关键技术及示范应用”；滁州学院科研启动基金资助项目“基于国产高分辨率卫星数据的西天山云杉林生物量/生产力反演与时空分析关键技术研究”(2017qd09)

第一作者：邢菲(1993—)，男(汉族)，硕士研究生，研究方向为生态环境遥感。E-mail：XF19930427@aliyun.com。

通讯作者：李虎(1962—)，男(汉族)，博士，教授，博士生导师，主要从事资源环境遥感和高分卫星应用研究。E-mail：lihu2881@aliyun.com。

methods of mean value, regression analysis, distance fluctuation and correlation analysis was used to explore the vegetation cover characteristics, climate change status in the farm and the response relationships between them. [Results] ① From 2000 to 2015, the vegetation cover in the study area was at a low level and showed a slight fluctuating downward trend. By analyzing the changes of NDVI at different levels, the most obvious change of vegetation cover in the past 15 years was the part of NDVI>0.65, which was the main part of the decline of NDVI in the study area. The level of 'low' and 'high' NDVI increased but was not obvious, and the level of 'medium' NDVI increased obviously and accounted for a relatively large proportion. ② Since the implementation of NFPP, the annual average temperature in the study area showed a fluctuating downward trend. The annual precipitation showed a significant fluctuating upward trend. ③ Since the implementation of the NFPP, the correlation coefficient between vegetation cover change and temperature change was only 0.053 9, while the correlation coefficient between vegetation cover change and precipitation change showed a significant correlation. Vegetation cover change was less affected by temperature than by precipitation. [Conclusion] Since the implementation of the NFPP, the vegetation coverage in the Fukang forest farm has showed a fluctuating downward trend, but the decline is not significant. The climate tends to change from warm and dry to cold and wet, and the trend is not obvious. The relationship between vegetation cover fluctuations and precipitation fluctuations is significantly stronger than that of temperature. The implementation of the NFPP in the Fukang forest farm has improved the surrounding climate, but it is still necessary to strengthen the protection and restoration of the vegetation in this region.

Keywords: remote sensing; natural forest conservation project; vegetation; NDVI; climate change; correlation analysis; Fukang forest farm

气候因子是影响植被生长发育、地理分布、多样性和丰富度等的关键因素,对陆地植被类型及其功能特性起着决定性作用,全球地带性植被的分布都与气候要素密切相关[1]。归一化植被指数(NDVI)作为植被生长状况及植被覆盖度的最佳指示因子,在植被遥感中得到了广泛应用,被认为是表征地区或全球植被状况和生态环境变化的最有效指标[2-3]。对此国内外众多学者开展了一系列研究[4-11]。

天山是横亘在新疆南北荒漠地面上的一座"湿岛"。山区降水量丰富,成为准噶尔盆地南缘与塔里木盆地北缘众多河流、湖泊的发源地[12-13]。王新欣等[14]利用 EOS/MODIS 数据,对天山北坡中段草地生物量变化动态进行监测,并分析了草地植被指数的时空变化特征以及植被指数与草地生物量之间的关系;冯志敏等[15]基于 2000—2009 年 MODIS 数据,分析了天山山区草地类型植被指数变化特征及其与气候因子的关系。综上所述,广大学者关于天山的研究主要集中于草地植被类型上,且都是从大空间尺度来进行,无法准确的反映某一特定小区域内的植被变化状况。因此本文从阜康林区入手,探究该区域近 16 a 来植被和气候变化状况。

阜康林区位于天山北麓中段,自 2000 年以来开始实施天然林资源保护工程等一系列重大生态工程,对区内植被进行了一系列保护措施。在这一时期内阜康林区植被覆盖状况和气候发生了怎样的变化?变化的具体特征及规律如何?近几十年来遥感技术的成熟和相关数据的积累,为解决此问题提供了技术支持和数据支撑。本文拟利用 MODIS NDVI 时间序列数据,并结合研究区 2000—2015 年气温降水数据,对阜康林区近 16 a 来植被覆盖状况和气候变化规律及二者之间的内在响应关系进行了探究,进而为天保工程实施效益评价提供数据支撑,为林业部门制定植被恢复和保育措施提供科学决策依据。

1　材料与方法

1.1　材 料

研究区阜康林区位于天山北麓中段,范围在 88°00′—88°42′E,43°48′—44°05′N 之间,阜康林区始建于 1956 年 3 月,海拔 758～4 016 m,总面积 92 750.86 hm^2。研究区东与吉木萨尔林场相连,西与米泉林场相邻,南为东天山主峰博格达峰,北接准噶尔盆地。阜康林区是天池国家自然保护区重要水源地及三工河、四工河、五工河、白杨河及甘河子等河流的发源地。研究区属于温带大陆性干旱、半干旱气候,年平均温度 1.2 ℃,年降水量为 400 mm,降水年内分配不均,主要分布在夏季和冬季。研究区土壤分布呈明显的垂直地带性,由低到高依次为:山地栗钙土、山地灰褐色森林土、高山草甸土和高山石质带。

本文所采用 MODIS 16 d 合成 NDVI 数据来源于 NASA 网站(https://modis.gsfc.nasa.gov/),时

间序列为 2000—2015 年 6—8 月植被生长旺盛期的数据，空间分辨率 250 m，时间分辨率 16 d。数据处理使用 MODIS 批处理工具 MRT 对其进行拼接与重投影，再利用 ENVI5.3 软件（美国 ESRI 公司 2015 年发布的 5.3 版本）根据研究区矢量范围进行批量裁剪得到研究区 NDVI 时间序列数据。气象资料为位于阜康林区内的天池气象站 2000—2015 年气温降水年值数据，数据来源于新疆维吾尔自治区气象局。气温、降水数据处理在 Excel 软件下进行。

1.2 研究方法

（1）均值法[16]。采用取平均值法计算研究区每年夏季[15]NDVI 来反映研究区内本年度的植被生长状况，进而用于分析研究区内 NDVI 年际变化特征，并根据阜康林区植被覆盖实际状况将 NDVI 分为“低”、“中等”、“较高”和“高”4 个等级（见表 1）。

表 1 2000－2015 年阜康林区不同等级 NDVI 变化

NDVI 值	等级	比例/%	变化率	变化趋势
0～0.25	低	11.30	0.019 6/a	波动上升
0.25～0.45	中等	34.50	0.107 5/a	波动上升
0.45～0.65	较高	45.69	0.073 4/a	波动上升
＞0.65	高	8.52	－2.004 0/a	波动下降

NDVI 均值计算方法如下：

$$\overline{NDVI_k}=(\sum_{6}^{8}NDVI_q)/T$$

式中：$\overline{NDVI_k}$——第 k 年平均 NDVI；$k=2000,\cdots,2015$；$NDVI_q$——每年 6 月初至 8 月底各旬 NDVI 值；T——NDVI 求和数，取值 6。

（2）回归分析法[17]。采用一元线性回归分析研究区内 NDVI，气温及降水年际变化变化趋势，从而掌握近 16 a 来研究区内 NDVI 及气温和降水变化特征。计算方法为：

$$y_j=k_j+b$$

式中：y_j——待分析的变量；j——年份；b——常数；k——斜率（回归系数）。其中 $k>0$ 表示待分析变量在分析时间段内呈上升趋势，反之呈下降趋势。回归分析和显著性检验借助 SPSS（美国 IBM 公司 20.0 版本）进行，并定义 $p<0.05$ 为显著变化。

（3）距平波动法。采用距平波动法分析研究区内 NDVI，年均气温，年均降水的波动变化特征，具体为使用近 16 a 来研究区内 NDVI、年均气温和年均降水与各要素均值的差值来反映各要素波动情况，计算方法如下：

$$W_{ij}=A_{ij}-\overline{B_{ij}}$$

式中：W_{ij}——各要素波动值；A_{ij}——i 要素第 j 年的值；$\overline{B_{ij}}$——i 要素第 j 年的均值；i 分别取 NDVI，年均气温，年均降水；$j=2000,\cdots,2015$。

（4）相关分析法[18]。采用相关分析法研究植被 NDVI 与气候因子间的响应关系，通过计算 NDVI 波动与气温、降水波动的相关系数，分析研究区内植被 NDVI 波动对气候因素波动的响应。计算公式为：

$$R=\frac{\sum(x_i-y_i)(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2\sum(y_i-\bar{y})^2}}$$

式中：i——年份，x_i——第 i 年 NDVI，$\bar{x}$——NDVI 均值，$\bar{y}$——年均气温、年均降水均值。R——变量间相关系数；R 取值范围为[－1，1]。（其中 $R>0$ 表示变量间呈正相关，且趋向于 1 相关性越强，反之呈负相关；$R=0$ 则不相关；$R=1$ 完全相关。）

2 结果与分析

2.1 近 16 a 植被覆盖空间分布及变化特征

阜康林区 2000—2015 年来植被覆盖以中等及以上为主，垂直分布特征明显。其中低覆盖区主要分布在海拔 800～1 500 m 海拔范围内，少量分布在海拔 3 100 m以上区域。低海拔区的低植被覆盖主要是处于温带荒漠带，高海拔低植被覆盖区则主要为高山草甸带，在这两个范围内环境相对恶劣，都不利于植被生长。中等植被覆盖区主要分布于海拔 1 000～1 900 m范围内，此海拔范围处于山地草原及天山北坡独特的低山草甸带，随着海拔的上升，水分条件逐渐趋好，植被生长旺盛。较高和高覆盖区主要分布于海拔 1 300～3 100 m 范围内，此海拔范围内主要为天山云杉（*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*）林带及与云杉交错分布的亚高山草甸，同时也是地形降雨集中区，森林自身特性及其涵养水源、调节气候的功能为自身及草地的生长提供了优质的水热条件，植被生长旺盛，植被覆盖高值区出现于此。

图 1 为 16 a 来阜康林区 NDVI 年际变化特征，由图 1 可以看出。阜康林区 16 a 来 NDVI 值在 0.22～0.28 间波动且呈下降趋势。总体来看，16 aNDVI 均值为 0.25，极差为 0.06，下降率为 0.000 5/a，植被覆盖总体水平偏低，但波动变化幅度不大，下降趋势不明显。NDVI 变化总体可以分为两个阶段：第一阶段为 2000—2004 年的 5 a 间，在此阶段内 NDVI 变化幅度较大，首先从 2000 年的 0.26 下降到最低值 0.22，而后从 2001 年稳步上升，在 2003 年出现的第一个峰值 0.28，并在 2004 年回到 0.25 均值水平；第二阶段为 2004—2015 年 12 a 间，在此阶段内 NDVI 值在 0.24～0.26 间变化，波动幅度较小，总体处于稳定状态，只在 2007 年和 2012 年出现一个峰值和一个谷值。

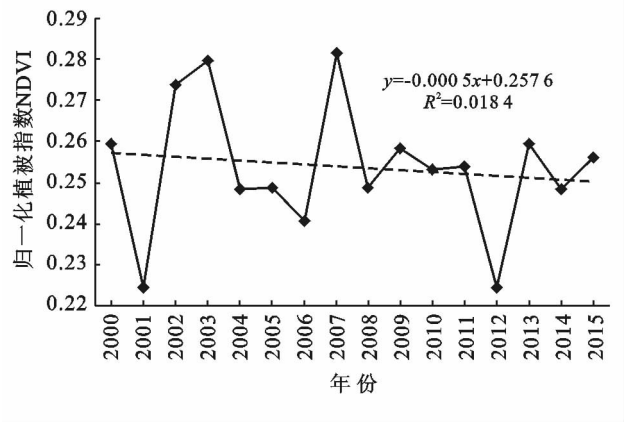


图 1　2000－2015 年 NDVI 年际变化特征

2.2　不同等级植被覆盖变化

从表 1 可以看出,2000—2015 年 NDVI 值各等级所占比例为:“较高”>“中等”>“低”>“高”,主要以“中等”和“较高”两个等级为主,所占比例达 80.49%;从各等级 2000—2015 年年变化率和变化趋势来看,处于“低”、“中等”和“较高”3 个等级 NDVI 总体呈波动上升趋势,年变化率分别为 0.019 6/a,0.107 5/a和 0.073 4/a($p<0.05$),其中“低”等级 NDVI 年变化率最大且波动显著(图 2a),“中等”等级虽然年变化率最小但波动幅度却较为明显(图 2b);“较高”等级 NDVI 变化率高于“中等”等级,但低于“低”等级,且近 16 a 来最为平稳(图 2c);近 16 a 来“高”等级 NDVI 从总体上看呈波动下降趋势,年变化率在 4 个等级中最为显著 2.004/a($p<0.05$),且波动明显(图 2d)。

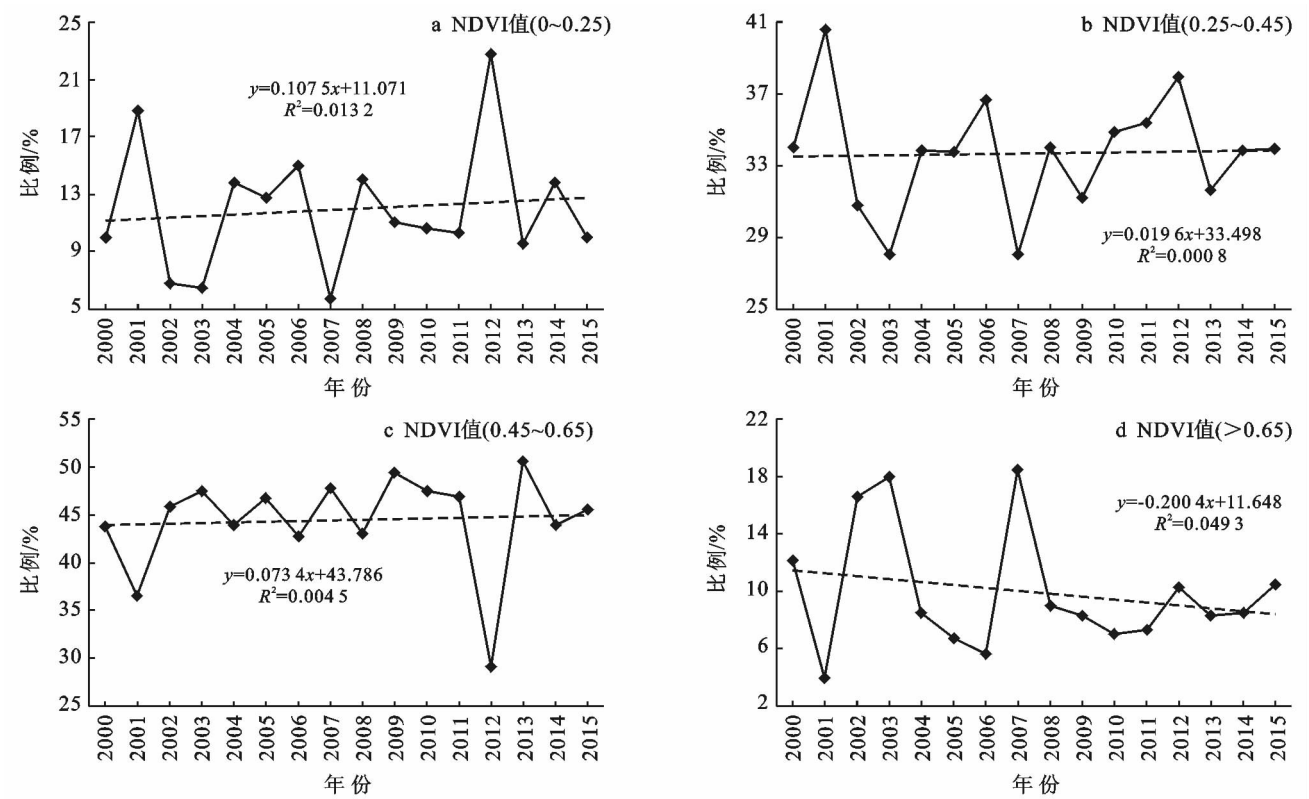


图 2　2000－2015 年阜康林区不同等级 NDVI 变化波动

2.3　年平均气温、年平均降水变化情况

研究区 2000—2015 年年平均气温总体呈波动下降趋势,16 a 间年平均气温为 2.6 ℃,年平均气温最高值出现在 2006 年为 3.3 ℃,最低值出现在 2011 年为 1.9 ℃,极差为 1.4 ℃,波动幅度较大,但从线性拟合结果来看年平均气温下降率为 0.016 9 ℃/a($p>0.05$),天保工程实施以来林区内气温下降幅度不显著(图 3a)。近 16 a 间年平均气温变化可以分为 3 个阶段:第一阶段为 2000—2003 年的 4 a 间,年均气温从 2000 年的 2.2 ℃上升到 2002 年的 3 ℃后达到第一个峰值,并在 2003 年下降到 2 度;第二阶段为 2003—2011 年的 9 a 间,年平均气温先从 2003 年的 2 ℃上升到 2006 年的最大值 3.3 ℃,达到第 2 个峰值,而后从 2006 年开始直线下降到 2011 年的最小值 1.9 ℃,6 a 间极差达到 1.4 ℃;第三阶段为 2011—2015 年 5 a 间,年平均气温从 2011 年的最低值 1.9 ℃逐步回升到 2015 年的 3 ℃,达到第 3 个峰值。

2000—2015 年来年平降水量总体呈波动上升趋势,16 a 间年平均降水量为 595.3 mm,年均降水量最大为 874.7 mm,最小为 352.9 mm,极差为

521.8 mm，总体波动幅度较大；从线性拟合结果来看，年平均降水量增加率为 6.754 1 mm/a（$p<0.05$），说明天保工程实施以来林区内年降水量增加趋势显著（图 3b）。从 2000—2015 年，年平均降水量变化可以分为两个阶段：第一阶段为 2000—2008 年，在此 9 a 间年平均降水量波动幅度最大，从 2000 年开始下降到 2001 年的最小值，而后从 2001—2003 年呈直线上升趋势达到第一个峰值；2003—2004 年第二次下降并在 2004—2006 年保持稳定后在 2007 年达到第 2 个峰值；第二阶段为 2008—2015 年，在此阶段内年平均降水波动相对稳定，变化幅度不大，只在 2015 年出现峰值并达到最大。

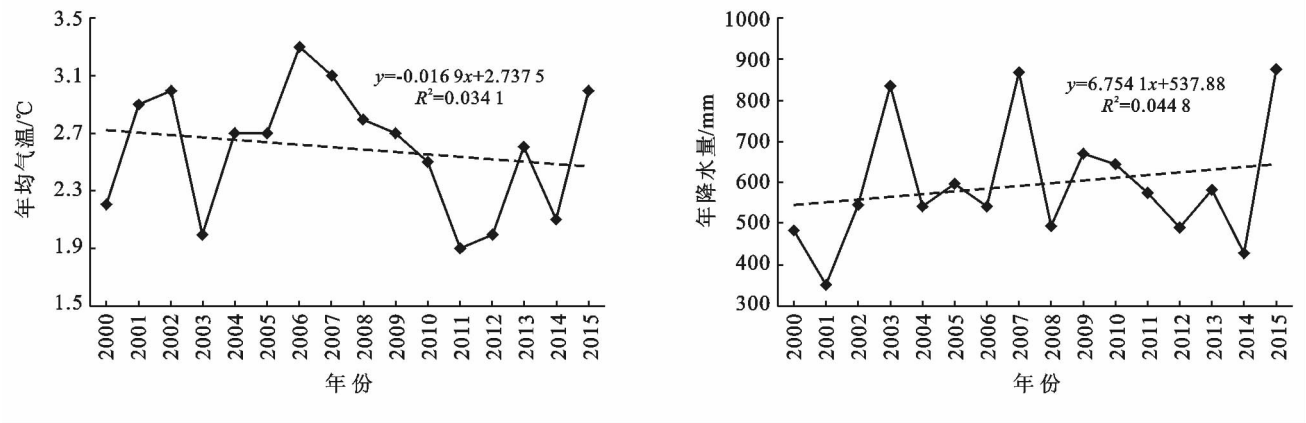


图 3 2000－2015 年阜康林区年均气温、降水变化

2.4 植被覆盖变化与气候要素相关性分析

图 4 为 NDVI 波动与气温、降水波动的关系。从图 4 可以看出，2000—2015 年 NDVI 的年际波动与年平均气温的年际波动在 2007 年以前表现为相反的趋势，只在 2002 年表现出一致性；从 2007 年后至 2015 年，NDVI 的年际波动与年平均气温的年际波动趋势表现出一致性，但二者相关性不强，只在 2007 年、2009 年、2010 年和 2012 年和 2013 年表现出较强的相关性，其余年份相关性很弱。在 95%置信度下，NDVI 的年际波动与年均气温波动的相关系数为 0.053 9，说明 NDVI 的波动变化对年均气温的波动变化响应不明显。2000—2015 年 NDVI 的波动趋势与年均降水的波动趋势在总体上具有同步性，只在 2011 年表现出不一致性。NDVI 波动与年均降水波动相关系数为 0.693 35 且在 0.05 水平下相关性显著。表明 NDVI 的波动变化对年均降水的波动变化响应强烈。综合上述分析结果可知，在 2000—2015 年的 NDVI 年际变化中，2001 年、2003 年、2007 年和 2012 年出现的“跳跃”现象主要是受到当年降水的影响，而受气温影响不大。

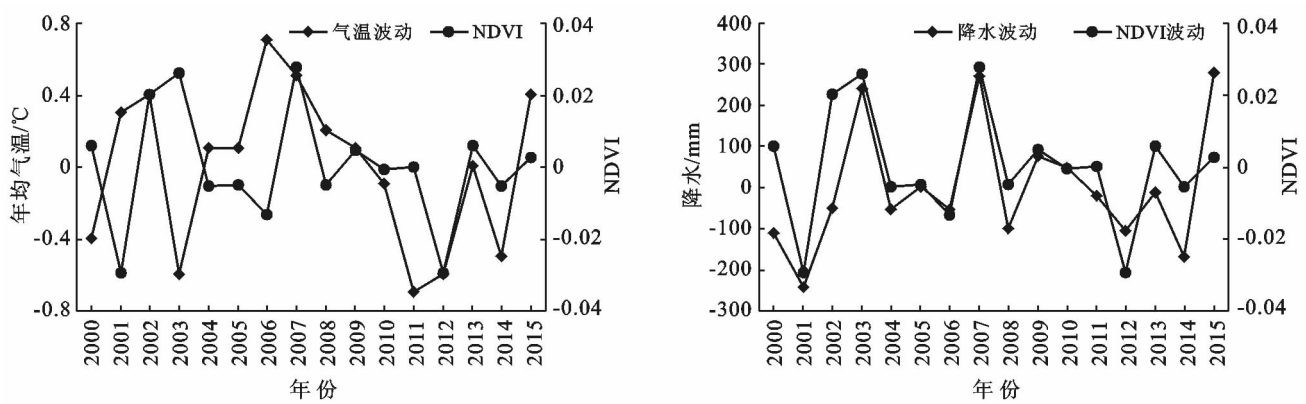


图 4 2000－2015 年阜康林区 NDVI 波动与年均气温、降水波动的关系

3 讨 论

研究对近 16 a 来阜康林区内年均气温和年均降水进行了一元线性回归分析发现：近 16 a 来林区内气候总体有从暖干向冷湿转变的趋势，这与施雅风[19-20]等关于中国西北气候由暖干向暖湿转型的研究结果有出入。可能的原因是阜康林区整体处于海拔较高的山地地区，独特的地形形成了局地的小气候；同时，随着天保工程等一系列重大生态工程的实施，植被的作用尤其是森林调节气候的功能得到了发挥。近 16 a 来植被覆盖总体呈不明显的下降趋势，可能的原因是生态工程在短时期内对某一区域内的

植被覆盖影响无法显现,说明以自然恢复为主的生态工程是一项长期工程,而生态工程本身没有进行有效实施也是可能的原因之一。

研究利用 MODIS NDVI 时间序列数据和气象资料进行均值法、回归分析、距平波动分析及相关性分析,探究了植被覆盖变化与气温、降水变化间的响应关系,而植被生长过程中还受如光照、土壤、二氧化碳含量等多种因素的影响,这些因素并不被考虑在本研究范围内,本研究也没有考虑不同植被类型自身生理特征对气温及降水的响应关系,这些都是下一步的主要研究方向和内容。

利用阜康林区 MODIS NDVI 时间序列数据和气温及降水资料分析了林区内自天保工程实施以来植被覆盖、气候变化及植被覆盖与气候变化间的响应特征,研究结果可以为研究植被与气候变化响应关系提供参考,同时可以为研究天保工程实施的生态效益评价提供支持,对其他重大生态工程的实施,调整生态工程实施的措施,进一步保护和改善生态环境具有重要的现实和理论指导意义。

4　结 论

(1) 从 2000—2015 年阜康林区植被覆盖整体处于较低水平且呈不明显的波动下降趋势。变化最为明显的为 NDVI>0.65 部分,是阜康林区 NDVI 下降的主要部分,变化率为−2.004/a。

(2) 近 16 a 来,阜康林区年平均气温总体呈波动下降趋势,下降率为 0.016 9 ℃/a,整体下降幅度不明显。年均降水量总体呈波动上升趋势,年均增长 6.754 1 mm,降水量表现为明显上升的趋势,气候有从暖干向冷湿趋势发展。

(3) 从 NDVI 波动与气候因子波动的关系来看,植被覆盖变化受气温变化影响强度小于受降水的影响,这与水是干旱区植被生长的主要限制因素这一结论相符。

(4) 在天保工程实施期间虽然 NDVI 呈下降趋势,但植被生长受到多种因素影响,因此,阜康林区天保工程实施对周边气候改善具有一定作用,生态效益有所显现,但仍需加强林区内植被保护措施。

[参 考 文 献]

[1] 贾文雄,陈京华. 1982—2014 年祁连山植被生长季NDVI变化及其对气候的响应[J]. 水土保持研究,2018,25(2):264-268.

[2] 武正丽,贾文雄,赵珍,等. 2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1242-1252.

[3] 白建军,白江涛,王磊. 2000—2010 年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系[J]. 地理科学,2014,34(7):882-888.

[4] Eklundh L. Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in East Africa at 10-days and monthly time scales[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(3):563-568.

[5] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends-comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,119(3):131-147.

[6] Ding Mingjun, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007,17(3):259-268.

[7] 闫俊杰,乔木,周宏飞,等. 基于 MODIS/NDVI 的新疆伊犁河谷植被变化[J]. 干旱区地理,2013,36(3):512-519.

[8] 宋富强,邢开雄,刘阳,等. 基于 MODIS_NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J]. 生态学报,2011,31(2):354-363.

[9] 徐丽萍,郭鹏,王玲,等. 天山北麓中段植被 NDVI 变化及其对气候因子的响应[J]. 水土保持研究,2013,20(6):158-167.

[10] 慈晖,张强. 新疆 NDVI 时空特征及气候变化影响研究[J]. 地球信息科学,2017,19(5):662-671.

[11] 石玉琼,郑亚云,李团胜. 榆林地区 2000—2014 年NDVI时空变化[J]. 生态学杂志,2018,37(1):211-218.

[12] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004:342-348.

[13] 马建勇,潘婕,姜江,等. 北疆地区 1955—2009 年气温—降水变化特征的时间序列分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2012,6(2):18-24.

[14] 王新欣,朱进忠,范艳敏,等. 基于 MODIS-NDVI 的天山北坡中段草地动态估产模型研究[J]. 草业科学,2009,26(7):24-27.

[15] 冯志敏,赵玲,安沙舟,等. 基于 MODIS 的天山山区草地类型植被指数变化特征及其与气候因子的关系[J]. 沙漠与绿洲气象,2015,9(2):57-62.

[16] 穆振侠,姜卉芳,刘丰. 2001—2008 年天山西部山区积雪覆盖及 NDVI 的时空变化特性[J]. 冰川冻土,2010,32(5):875-881.

[17] 白淑英,王莉,史建桥. 长江流域 NDVI 对气候变化响应的时滞效应[J]. 中国农业气象,2012,33(4):579-586.

[18] 陈彦光. 地理数学方法:基础和应用[M]. 北京:科学出版社,2011:47-48.

[19] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219-226.

[20] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(2):152-164.