

# 开都—孔雀河流域 NDVI 动态变化及其与 气温和降水的联系

何金苹<sup>1,2</sup>, 徐长春<sup>1,2</sup>, 李晓菲<sup>1,2</sup>, 杨童童<sup>1,2</sup>, 何旦旦<sup>1,2</sup>, 鲁斯达姆<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 基于 2000—2014 年开都—孔雀河流域的 MODIS NDVI 数据, 采用最大合成法、偏相关分析法, 结合气象站同期降水与气温数据, 研究流域近 15 年 NDVI 时空动态, 并分析了其与气温和降水的关系。结果表明: (1) 研究区 NDVI 多年平均呈北部和中部高, 南部和东部低的空间分布态势; (2) 近 15 年开都—孔雀河流域植被退化区域大于植被改善区域, 退化区域面积占研究区总面积的 9.1%, 主要集中在和静县山区; 改善区域面积占总面积的 6.33%, 主要集中于博湖绿洲和库尔勒市及周边; 84.57% 的区域 NDVI 基本保持不变, 主要集中于尉犁县; (3) 植被覆盖 2002 年与 2010 年有明显改善, 2001 年、2004 年有明显退化, 其他年份退化和改善程度不一; (4) 研究区 NDVI 对降水和气温变化均具滞后性且滞后水平存在显著的空间差异; (5) 气温对 NDVI 的影响明显高于降水对 NDVI 的影响。

**关键词:** NDVI; 时空特征; 相关分析; 开都—孔雀河

中图分类号: TP79; P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0329-06

## Change Trend of NDVI and Its Response to Temperature and Precipitation in Long Time Series in Kaidu—Kongqi River Basin

HE Jinping<sup>1,2</sup>, XU Changchun<sup>1,2</sup>, LI Xiaofei<sup>1,2</sup>, YANG Tongtong<sup>1,2</sup>, HE Dandan<sup>1,2</sup>, Lusidamu<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The MODIS NDVI data were selected from 2000 to 2014 in Kaidu—Kongqi River Basin. We used MVC, partial correlation analysis, precipitation and temperature data of meteorological stations in the same period to analyze the annual and inter-annual change trend of NDVI in recent 15 years in the region and the response to precipitation and temperature changes. The results showed that: (1) NDVI presented a high trend in the north and middle in the study area, the lower levels in the parts of the south and the east from the point of view of space distribution; (2) during the last 15 years, the vegetation degradation area was larger than that of the vegetation improvement area in Kaidu—Kongqi River Basin with respect to inter-annual change trend, the degradation area accounted for 9.1% of the study area, mainly concentrated in the mountains of Hejing County; the improved area percentage was 6.33% of the total area, mainly concentrated in the Bohu Oasis and the Korla City and the surrounding areas; and 84.57% of the region where NDVI was basically unchanged mainly concentrated in Yuli County; (3) NDVI improved significantly in 2002 and 2010 in terms of the annual change trend, but NDVI showed different degrees of degradation in the other years; (4) NDVI in the study area had hysteresis to precipitation and temperature, and the lag levels had obvious spatial differences; (5) the influence of temperature on NDVI was significantly higher than that of precipitation.

**Keywords:** NDVI; spatiotemporal characteristics; correlation analysis; Kaidu—Kongqi River

植被是连接土壤、大气和水分的中枢系统,是组成整个生态系统的自然纽带,在全球变化研究中往往扮演着“指示器”的作用<sup>[1-4]</sup>。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与植被覆盖度、叶面积指数、生物量和生产力等地表参数联系较为紧密<sup>[5-6]</sup>,并且被广泛应用于大尺度、长时间序列的植被趋势变化研究中<sup>[7]</sup>。植被的生长受温度、降水等气候因子制约并对其变化表现出显著的响应特征<sup>[7-8]</sup>。研究 NDVI 与气候因子的关系在全球变化研究具有重要意义。

基于当前先进的卫星遥感技术,NDVI 作为一种描述植被覆盖的地表参量,可以获取丰富的植被指数信息,揭示区域乃至全球的植被覆盖的动态变化,为植被覆盖的区域性和空间异质性研究提供可能<sup>[9-11]</sup>。已有研究表明,NDVI 与气候因子(如降水、气温等)之间关系的响应特征有利于探寻陆地生态系统碳循环变化的关键因素,并且有利于了解陆地生态系统碳储量对气候变化的响应机制<sup>[12-15]</sup>。NDVI 的趋势变化特征及与气候因子的响应特征随着气候区、植被类型和研究时期的不同等而有所差异<sup>[16-18]</sup>。干旱与半干旱区的 NDVI 与降水呈现正相关,尤其是在中亚<sup>[19]</sup>、南非与澳大利亚地区<sup>[20]</sup>。NDVI 对降水量的响应存在一定的时间延迟<sup>[21-23]</sup>。NDVI 的垂直变化特征能够揭示植被长势的垂直梯度变化及分水岭所在<sup>[24]</sup>;降水因素对 NDVI 变化的影响在年际变化上高于温度,在月际变化上低于温度<sup>[25]</sup>。

鉴于以上研究,本文针对地处中国西部干旱与半干旱区的开都—孔雀河流域,分析近年来 NDVI 的趋势变化及其对降水和温度的响应特征。根据 MODIS—NDVI 数据大尺度和高时间分辨率的优势,选用 2000—2014 年 NDVI 数据,结合同期降水与温度数据,分析 NDVI 的时空变化及其对降水和温度的响应,揭示不同环境、不同时间和空间尺度下自然驱动因素对植被的影响效果,以期对区域的生态环境监测与改善起到一定的指示作用。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 研究区概况

开都—孔雀河(以下简称开孔河)流域位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州(简称巴州)境内,地处天山南麓,塔里木盆地东北部(82°56′—88°12′E, 40°48′—43°20′N)。开孔河流域由开都河流域、孔雀河流域和博斯腾湖共同组成。其中,开都河全长 560

km,孔雀河全长 420 km,博斯腾湖湖水面在平水期约为 980 km<sup>2</sup>。

开孔河流域地处中国西北干旱区腹地,远离海洋,降水较少,高温少雨,蒸发量大,光热资源丰富;流域内植被物种丰富,地面高程差较大,自然带变化多样,有沙漠、荒漠、荒漠戈壁、草原、灌木、湿地、林地、高山林地、高山草甸等<sup>[26]</sup>。

### 1.2 研究资料与数据处理

本文所用数据主要为:2000—2014 年每年 4—10 月的 MOD11A2—NDVI 数据,轨道号为 H24V04,空间分辨率为 1 km×1 km,共计 405 期;气象数据为 2000—2014 年开孔河流域及其周边的 15 个气象站点的月降水量及月平均气温数据。

利用 MRT 软件将 MODIS 数据的正弦曲线投影(SIN)转换为通用横轴墨卡托投影(UTM),并进行图像镶嵌和格式转换等处理<sup>[27]</sup>,运用 ENVI 软件批量裁剪出流域的 MODIS—NDVI 数据。将 NDVI 数据利用国际通用 MVC(Maximum Value Composites)法进行年最大值合成<sup>[28-29]</sup>,以消除大气和云层的部分信号干扰,减少噪声,提高数据的可信度。

$$Y_{NDVI_i} = \max(NDVI_{ij}) \quad (1)$$

式中: $Y_{NDVI_i}$ 表示*i*年份的年 NDVI 最大合成值(*i*为 2000 年、2001 年、…、2014 年); $NDVI_{ij}$ 表示*i*年份*j*月的 NDVI(*j*为 4 月、5 月、…、10 月)。在计算过程中,水体及 NDVI 值小于 0.1 的网格单元一般认为没有 NDVI<sup>[29]</sup>,赋值为 0。计算流域 4—10 月的月平均 NDVI 值,及近 15 年流域各年的 NDVI 平均值。

降水和气温数据来源于中国气象数据共享网提供的 2000—2014 年全国 722 个标准气象站点的月平均温度和月降水量资料,其中研究区域共覆盖 15 个站点。利用 ArcGIS Spatial Analyst Tools 模块对气温和降水数据进行 IDW 空间插值,采样成 1 km×1 km 空间分辨率,并采用 Albert 投影,以获取与 NDVI 数据像元大小一致、投影相同的气象栅格数据。通过数据裁切获取开孔河流域的月平均温度和月降水量的栅格图像<sup>[30]</sup>。

### 1.3 研究方法

1.3.1 NDVI 变化趋势 基于像元的一元线性回归方程,模拟 2000—2014 年的各年最大合成 NDVI 的变化趋势,公式为:

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

$$b = \bar{x} - s \bar{n}$$

式中: $S$  为趋势斜率, $S$  值为负表示 NDVI 呈下降趋势,反之上升; $n$  为样本个数; $b$  为线性方程常量; $i$  为 2000—2014 年序号( $i=1,2,\dots,14$ ); $\text{NDVI}_i$  表示第  $i$  年的最大合成 NDVI 值; $\bar{x}$  表示 15 年植被 NDVI 平均值; $\bar{y}$  表示第  $i$  年 NDVI 的平均值。利用 NDVI 序列与时间序列的线性回归方程来判断 NDVI 年际变化的显著性。

1.3.2 偏相关分析 地理要素之间相关关系密切程度的测定,主要是通过对相关系数的计算与检验来完成的。在多要素所构成的地理系统中,不考虑其他要素的影响,而单独研究两个要素之间的相互关系的密切程度,称为偏相关。用以度量偏相关程度的统计量,称为偏相关系数<sup>[31]</sup>。首先计算相关系数,其次固定变量由相关系数得到偏相关系数。相关系数计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: $r_{xy}$  是变量  $x$  和  $y$  的偏相关系数,表示两要素之间的相关程度,介于  $[-1, 1]$ 。 $r_{xy} > 0$ , 表示正相关; $r_{xy} < 0$ , 表示负相关。其绝对值越接近于 1, 表明要素间的关系越密切;越接近于 0, 表明要素间的关系越不密切。 $n$  为样本数目; $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为变量  $x$  和  $y$  的均值。 $x_i$  和  $y_i$  分别代表第  $i$  年的 NDVI 及温度或降水量; $\bar{x}$  为 15 年 NDVI 的平均值; $\bar{y}$  为 15 年温度或者降水量的平均值。

基于降水量的 NDVI 与温度的偏相关系数及基于温度的 NDVI 与降水量的偏相关系数计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} - r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: $r_{xy,z}$  为变量  $z$  固定后变量  $x$  和  $y$  的偏相关系数; $r_{xy}, r_{xz}, r_{yz}$  分别为变量  $x$  和  $y$ 、变量  $x$  与  $z$ 、变量  $y$  与  $z$  的相关系数。偏相关系数的显著性检验,一般采用  $t$  检验法,其统计量计算公式为:

$$t_p = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (5)$$

式中: $t_p$  为偏相关系数显著性检验所构建的统计量; $r_{xy,z}$  为偏相关系数; $r_{xy}$  为变量  $x$  和  $y$  的偏相关系数; $n$  为样本数目; $m$  为自变量数目。

## 2 结果与分析

### 2.1 NDVI 时间变化特征

2000—2014 年开孔河流域 NDVI 呈波动变化,但总

体趋势并不明显(图 1)。其主要原因可能一方面波动是由研究区降水和温度本身的波动变化所导致,当然也可能存在人为的干扰;另一方面,研究区地形较为复杂,不同地形下的植被长势空间差异极为显著。研究区北部的和静县主要以山区为主,植被长势较好,NDVI 较大;研究区南部的尉犁县主要以沙漠和荒漠为主,植被覆盖稀疏,NDVI 值较小。北部 NDVI 的较大变化可能会被南部较小的变化拉平,从而在长时间上看并不显现十分明显的趋势。由 NDVI 最大合成年均值可以看出,研究区 NDVI 较大年均值出现在 2000 年、2002 年、2003 年、2010 年和 2014 年,较小年均值出现在 2001 年、2004 年、2009 年。

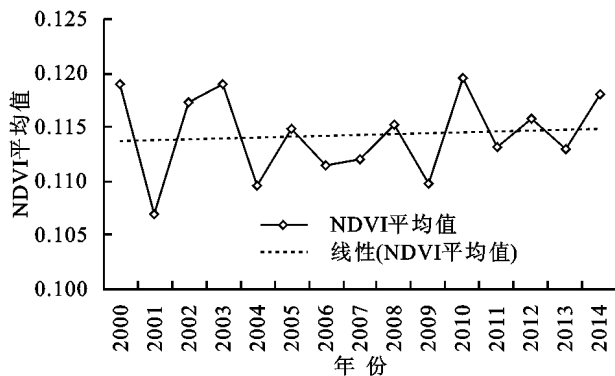


图 1 开孔河流域 2000—2014 年 NDVI 动态变化

### 2.2 NDVI 空间变化特征

2.2.1 NDVI 年际变化 开孔河流域 NDVI 整体上呈西北高东南低的空间分布特征,研究区内植被覆盖呈现极为严重的两极分化现象,其中植被覆盖度较高的区域位于和静县大部、博湖流域绿洲、库尔勒市东部等,其他区域则为荒漠戈壁和沙漠等土地类型,NDVI 极低。由于气候与地形的影响,地处山区的和静县 NDVI 最高,较为丰沛的降水和高海拔处的空气湿度,以及光热条件充足,为植被生长提供了良好的条件;博湖流域绿洲充分借助博湖湿地的优势,植被易于生长;在孔雀河流域内,NDVI 高值区域主要集中在库尔勒市及周边区域,流域下游也存在较为丰富的植被覆盖。

为了进一步分析开孔河流域 NDVI 年际变化程度在空间上的分布状况,本文根据公式(2)对研究区内每个像元的 NDVI 变化趋势进行了计算和分析,可更加细致地展示研究区内不同区域 NDVI 在 15 年内发生退化、增长或者保持不变的态势。首先,利用 ArcGIS 软件下标准差重分类的功能,将研究区自动划分为 7 个等级<sup>[31]</sup>,然后依次计算出不同 NDVI 变化下的面积(表 1)。

由表 1 可以看出,在近 15 年间开孔河流域内 NDVI 退化面积大于改善面积,可见生态环境不容乐观。流域 NDVI 变化程度中,有 84.57% 为基本不变;退化总面积占到研究区的 9.1%,其中轻微退化为 6.8%,中度退化面积为 1.81%,严重退化面积较少,仅占到研究区总面积的 0.49%;改善总面积为 6.33%,其中轻微改善、中度改善和明显改善的面积分别占到研究区总面积的 3.72%,1.11% 和 1.50%。

开孔河流域 NDVI 变化程度呈现较为明显的空间差异性,由研究区西北向中部再向东南方向延伸,NDVI 变化程度依次为退化区域、改善区域、基本不变区域。造成这种现象的原因可能有气候、人为和地理环境多方面的因素。退化区域中,由于近年来人口增加,当地居民的生态环保意识不足,对和静县山区林草地破坏严重,资源利用不够合理导致 NDVI 出现了大面积的退化现象;博湖绿洲和库尔勒市及周边的 NDVI 改善较好,可以认为在原有的博湖湿地利于植被生长的地理环境的影响下,区域植被长势较好,另外,由于库尔勒市为巴州重点城市,政府对基础生态恢复和生态改善建设较多,在 15 年间,整体上呈现植被改善较好的趋势。研究区 NDVI 基本不变区域主要集中在尉犁县,由于该区域土地类型大部分为荒漠和沙漠地带,仅有少量的绿洲分布于孔雀河流域下游,所以在 NDVI 趋势变化中基本不变的面积占比较多。

表 1 开孔河流域 NDVI 趋势变化等级划分及统计特征

变化程度	等级	像元数	面积比/%
严重退化	$-0.056 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq -0.038$	1181	0.49
中度退化	$-0.038 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq -0.0148$	4382	1.81
轻微退化	$-0.0148 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq -0.003$	16426	6.80
基本不变	$-0.003 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq 0.002$	204385	84.57
轻微改善	$0.002 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq 0.011$	8997	3.72
中度改善	$0.011 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq 0.026$	2678	1.11
明显改善	$0.026 < \text{NDVI}_{\text{slope}} \leq 0.054$	3618	1.50

2.2.2 NDVI 年内变化 对年内的月 NDVI 数据进行统计分析,由附图 3 可以看出,研究区各年内 NDVI 变化差异较大,NDVI 改善区域、退化区域以及基本不变区域的空间分布差异性显著且分布特征较为明显。NDVI 改善较为明显的年份为 2002 年与 2010 年,主要分布于和静县。2000—2001 年、2003—2004 年以及 2010—2011 年的 NDVI 退化现象较为严重,退化区域由和静县大部扩展到和硕县北部;由于地理环境和土地利用类型的影响,尉犁县大部分区域在 15 年间一直以 NDVI 基本不变占主导。

通过分析各年内 NDVI 的变化及空间分布可

知,整体上 NDVI 变化程度的空间分布特征与年际变化的空间分布特征相似,都表现为研究区北部为退化区域,中部为改善区域,南部为基本不变区域。

### 3 降水、气温的时空分布及其与 NDVI 的相关性

#### 3.1 降水、气温的时空分布特征

选用开孔河流域及周边气象站点 15 a 的月降水量与月均温数据,利用 ArcGIS 软件下反距离加权插值(Inverse Distance Weighted, IDW)模块对月降水量与月均温数据进行年际空间插值。最后利用研究区边界裁剪得到本文开孔河流域各县市的月降水量与月均温的年际空间差值(附图 4)。由附图 4 可以看出,月均降水量和月均气温呈现相反的空间分布特征,降水量较高的区域主要集中在研究区北部,气温较高的区域主要集中在研究区南部;由于研究区地势高程落差较大,北部的和静县主要为山区区域,海拔较高,植被覆盖度大,而研究区南部主要以干旱沙漠和荒漠为主,降水稀少,导致北部的降水量大于南部的降水量,其中月均降水量最大值达到 19.9 mm(附图 4A);同时由于研究区主要以干旱与半干旱的荒漠和沙漠地带为主,下垫面吸收地表太阳辐射较多,其次由于植被稀疏,降水量较少,导致研究区南部的气温较高于北部区域,月均温最高达到 13.3℃(附图 4B);另外,在研究区中部的库尔勒市和博斯腾湖绿洲形成典型的热岛和冷岛效应,使得研究区中部的降水和气温相对性较高,差异性较大。

#### 3.2 NDVI 与气象因子的相关性

3.2.1 偏相关分析 计算开孔河流域 15 年间 NDVI 与月平均气温和月降水偏相关系数,得出该区域温度和 NDVI 偏相关系数  $r_1$  及降水和 NDVI 偏相关系数  $r_2$  的空间分布图(附图 5)。其中,NDVI 与月降水和月均温的最大偏相关系数分别为 0.81, 0.88, 与月降水和月均温的最小偏相关系数分别为 -0.76 和 -0.91。NDVI 与降水和气温均存在不同程度的正负相关关系,但其分布空间有所差异。

由附图 5A 可以看出,在研究区北部和中部区域的偏相关系数主要为正,表明降水对植被起到促进作用,且正相关系数大于负相关系数;北部和中部的温度对 NDVI 表现出极高的负相关性,其作用面积可占到和静县的大部分区域(附图 5B)。在研究区南部,降水的偏相关系数主要为负,而气温的偏相关系数主要为正。北、中部与南部呈现出了相反的态势。

表 2 为通过  $t$  检验的  $r_1$  和  $r_2$  的空间分布状况以及不同检验程度的面积百分比。对研究区中 NDVI 对降水量和气温的偏相关关系分布图进行空间统计分析,发现 NDVI 与气温负相关关系的面积为 77.64%,并有 1.02%和 4.15%的面积分别通过  $p<0.01$  和  $p<0.05$  的显著性检验;NDVI 与降水的正相关关系的面积为 72.79%,并有 0.89%和 5.15%的面积分别通过  $p<0.01$  和  $p<0.05$  的显著性检验;另外,NDVI 与气温正相关关系的面积和 NDVI 与降水的负相关关系的面积分别为 22.36%与 27.21%。对整个研究区进行空间统计后发现,同一像元符合  $r_1>r_2$  的区域占整个研究区域的 66.24%,表明植被变化对温度的响应程度高于对降水的响应程度。综上,整个研究区 NDVI 对气温要素主要表现为负相关,对降水要素主要表现为正相关,且温度影响大于降水影响。

表 2 不同类别面积百分比

类别	面积百分比/%
温度通过 $p<0.01$ 检验	1.02
温度通过 $p<0.05$ 检验	4.15
降水通过 $p<0.01$ 检验	0.89
降水通过 $p<0.05$ 检验	5.15
NDVI 与降水正相关	72.79
NDVI 与降水负相关	27.21
NDVI 与气温正相关	22.36
NDVI 与气温负相关	77.64
$r_1>r_2$	66.24

4 讨论与结论

4.1 讨论

陈欢等<sup>[32]</sup>对中国大陆植被对降水和温度的变化响应特征进行了研究,NDVI 与降水和温度之间有较显著的相关性,中国大陆植被 NDVI 对气温和降水有滞后效应,并且滞后水平存在着明显的空间差异,植被对温度具有较强的敏感性和依赖性,同时温度的季节性变动对植被生长有重要性的影响;另外,由于植被在生长过程中需要经历从土壤中吸收水分,而土壤获得水分的主要途径是通过大气降水,所以导致降水对植被有较为明显的滞后性。在中国干旱与半干旱地区,降水量的多少是限制植被长势的重要因子,新疆虽然降水稀少,但是天山融水丰沛,所以表现出 NDVI 对温度的响应特征较为敏感<sup>[33-34]</sup>。

2000—2014 年新疆开孔河流域 NDVI 有所波动但变化趋势较小,气候因子(降水量、温度)对研究区 NDVI 变化的驱动力不同,其中温度对 NDVI 的主导

促进因素较大于降水;由于流域 NDVI 的退化和改善是由多方面驱动力共同决定的,非气候驱动力因素也会对研究区 NDVI 变化起到不同程度的影响,例如,植树造林、耕地改良、退耕还林、人口增加、过度放牧等人为因素都会影响流域 NDVI 的改善与退化;另外本研究在分析 NDVI 与气候因子的响应特征时仅选用了月降水量与月均温气象数据,虽然在消减气候因子对 NDVI 的滞后性时有一定的促进作用,但为了将影响因素考量地更加全面,后期研究应扩展为年降水量和年气温数据并实现更大空间尺度的研究。鉴于以上讨论,在后续研究中将进一步对以上问题进行分析,以期更科学地评定人类活动和气象因子对 NDVI 时空格局变化的影响及各自贡献值的大小。

4.2 结论

(1) 从空间分布上看,新疆开孔河流域 NDVI 从 2000—2014 年有波动但无明显趋势,植被覆盖呈现西北高东南低的空间分布特征。

(2) 从变化趋势的空间分布看研究区 NDVI 退化面积区域大于改善面积区域,退化面积为 9.1%,主要集中在研究区北部,而改善面积为 6.33%,主要集中在研究区中部;在年内变化中,NDVI 在 2002 年和 2010 年有较为明显的改善外,其他年份均出现不同程度的退化现象。

(3) 从对气象因子的响应特征上看,Pearson 相关分析和偏相关分析结果相同,同一像元符合  $r_1>r_2$  的区域占整个研究区域的 66.24%;NDVI 对温度的负相关的区域面积要大于 NDVI 对降水负相关的区域面积,且温度通过  $p<0.01$  的像元面积大于降水通过  $p<0.01$  的像元面积,NDVI 变化对温度的响应特征高于对降水的响应特征。

参考文献:

[1] 孙红雨,李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系[J]. 遥感学报,1998,2(3):204-210.

[2] Meyer W B, Turner B L. Human population growth and global land-use/cover change[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1992,23(23):39-61.

[3] 孙艳玲,郭鹏. 1982—2006 年华北植被指数时空变化特征[J]. 干旱区研究,2012,29(2):187-193.

[4] Jackson R B, Randerson J T, Canadell J G, et al. Protecting climate with forests[J]. Environmental Research Letters, 2008,3(4):269.

[5] Prince S D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991,12(6):1313-1330.

- [6] 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.
- [7] Fang J, Piao S, He J, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999[J]. *Science in China*, 2004, 47(3): 229-240.
- [8] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [9] 朱吉生, 李纪人, 黄诗峰, 等. 近30年十大孔兑流域植被覆盖度空间变化的遥感调查与分析[J]. *中国水土保持*, 2015(7): 68-70.
- [10] 姚峰, 古丽·加帕尔, 包安明, 等. 基于遥感技术的干旱荒漠区露天煤矿植被群落受损评估[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 707-713.
- [11] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, et al. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends: Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1886-1898.
- [12] Potter C S, Brooks V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(15): 2921-2948.
- [13] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(11): 2345-2364.
- [14] Piao S, Mohammad A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 340-348.
- [15] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J]. *Nature*, 2013, 501(7465): 88-92.
- [16] 李晓兵, 史培军. 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*, 2000, 24(3): 379-382.
- [17] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 898-902.
- [18] 范锦龙, 李贵才, 张艳. 阴山北麓农牧交错带植被变化及其对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1528-1532.
- [19] 索玉霞, 王正兴, 刘闯, 等. 中亚地区 1982—2002 年植被指数与气温和降水的相关性分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(8): 1422-1429.
- [20] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982—1990 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(18): 3873-3878.
- [21] Yang W, Yang L, Merchant J W. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U. S. A. [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(10): 2161-2180.
- [22] Martiny N, Richard Y, Camberlin P. Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24): 348-362.
- [23] Camberlin P, Martiny N, Philippon N, et al. Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(2): 199-216.
- [24] 邓煜霖, 塔西甫拉提·特依拜, 姜红涛, 等. 艾比湖流域 NDVI 垂直梯度变化特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 508-513.
- [25] 姜红涛, 塔西甫拉提·特依拜, 阿尔达克·克里木, 等. 艾比湖流域 NDVI 变化及其与降水、温度的关系[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1678-1684.
- [26] 王辉, 刘海隆, 包安明, 等. 2001—2013 年开孔河流域净初级生产力遥感估算及其时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 220-224.
- [27] 李艳丽, 杨太保, 曾彪. 基于 MODIS 数据的柴达木盆地南缘绿洲土地覆盖动态变化研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 34-42.
- [28] 张凯, 司建华, 王润元, 等. 气候变化对阿拉善荒漠植被的影响研究[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 879-885.
- [29] 王正兴, 刘闯, HUETE, 等. 植被指数研究进展: 从 AVHRR—NDVI 到 MODIS—EVI [J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.
- [30] 王二丽, 周军其. 1998—2012 年艾比湖流域 NDVI 变化及其气候因子驱动分析[J]. *应用科学学报*, 2015, 33(1): 59-69.
- [31] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [32] 陈欢, 任志远. 中国大陆植被覆盖对降水与温度变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 78-82.
- [33] 戈登·B·伯南. 生态气候学: 概念与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [34] 卢升高. 环境生态学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.