

# 渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究

王丽霞<sup>1,2</sup>, 余东洋<sup>3</sup>, 刘招<sup>4</sup>, 张双成<sup>1</sup>, 杨耘<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 国土资源部 退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075; 3. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054; 4. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054)

**摘要:** NDVI 的时空变化可以反映区域生态环境的演变, 基于像元尺度的趋势分析法能模拟研究区栅格单元的变化趋势, 从而反映 NDVI 时空分布的变化细节。基于 2000—2015 年 MODIS NDVI 月时序数据, 结合同期气象资料, 利用趋势分析和相关分析的方法研究了渭河流域 NDVI、气温和降水的时空变化特征及其相关性。结果表明: (1) 近 16 年来, 渭河流域平均 NDVI 呈增大的趋势, 变化率约为 0.088/10 a, 植被覆盖度有所增加; NDVI 增大的区域占流域总面积的 97.77%, 主要分布在流域西部和北部。(2) 时间尺度上, NDVI 与气温的相关系数为 0.865, 偏相关系数为 0.664; NDVI 与降水的相关系数为 0.776, 偏相关系数为 0.346, 表明气温和降水的季节变化对植被生长都具有重要影响, 且气温的影响更为显著。(3) 空间尺度上, NDVI 与气温呈正相关的像元数占像元总数的 51.21%, NDVI 与降水呈正相关的像元数占像元总数的 96.67%, 表明就渭河流域而言, 气温的变化对植被生长的影响具有空间差异性和不确定性, 而降水的增加会促进植被的生长。

**关键词:** 渭河流域; NDVI; 气候因子; 时空变化; 相关性

**中图分类号:** TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)02-0249-06

## Study on Tempo-spatial Variations of NDVI and Climatic Factors and Their Correlation in the Weihe Watershed

WANG Lixia<sup>1,2</sup>, YU Dongyang<sup>3</sup>, LIU Zhao<sup>4</sup>, ZHANG Shuangcheng<sup>1</sup>, YANG Yun<sup>1</sup>

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and

Resources, Xi'an 710075, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an

710054, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The tempo-spatial changes of NDVI can reflect the evolution of regional ecological environment. On the basis of pixel scale, trend analysis method can simulate the trend of each grid cell in the study area, reflecting the detailed information of NDVI changes. Based on monthly data of MODIS NDVI from 2000 to 2015 and meteorological data of the same period, trend analysis method and correlation analysis method were used to study the tempo-spatial variation characteristics and correlation of NDVI, temperature and precipitation in the Weihe Watershed. The results showed that: (1) in the past 16 years, the average NDVI of the Weihe Watershed had increased, the rate of change was about 0.088/decade, and the vegetation coverage had increased; during the 16 years, the area of increasing NDVI accounted for 97.77% of the total watershed, these areas mainly distributed in the west and north of the watershed; (2) in the time series, the correlation coefficient between NDVI and temperature was 0.865, the partial correlation coefficient was 0.664; the correlation coefficient between NDVI and precipitation was 0.776, and the partial correlation coefficient was 0.346; it indicated that the seasonal variation of temperature and precipitation had a remarkable impact on vegetation growth, and the effect of temperature was more significant; (3) on the pixel scale, the area where NDVI was positively correlated with temperature accounted for 51.21%; the area in which NDVI was positively correlated with precipitation accounts for 96.67%. It indicated that there were spatial differences and uncertainty in the effects of temperature on vegetation growth, and the increase of precipitation mainly promoted the growth of vegetation.

**Keywords:** Weihe Watershed; NDVI; climatic factors; tempo-spatial change; correlation

植被是地表物质循环与能量流动的主要载体<sup>[1]</sup>,也是气候和生态环境变化的指示器<sup>[2]</sup>。气候对植被的空间分布<sup>[3]</sup>、生产力<sup>[4]</sup>、物候<sup>[5]</sup>等具有重要影响。因此,深入研究植被的动态变化及其与气候因子之间的相关性,对揭示区域生态环境演变以及应对气候变化具有重要的现实意义。

归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)对植被的分布、密度及变化非常敏感,被认为是表征地表植被覆盖动态的有效指标<sup>[6-8]</sup>。近年来,国内外学者利用 NDVI 数据从不同尺度对植被变化及其与气候因子之间的动态关系进行了深入研究。例如, Liu 等<sup>[9]</sup>研究发现,1982—2012 年全球大多数地区 NDVI 与气温的相关性逐渐减弱,而与降水的相关性增强;朴世龙等<sup>[10]</sup>提出生长季的提前是中国植被对全球变化响应的最主要方式的观点; Xu 等<sup>[11]</sup>发现我国植被生长动态主要受气温影响,其次受到降水的影响;杜加强等<sup>[12]</sup>研究发现,新疆地区的 NDVI 变化在春秋季节主要受气温影响,夏季主要受降水的影响。

总之,当前的研究结果已经表明 NDVI 与气候因子之间存在着显著的相关性<sup>[13-15]</sup>,但研究结果的地区差异明显<sup>[16-17]</sup>,对渭河流域指导意义不大。渭河流域位于黄土高原地区,是我国典型的生态环境脆弱区,其植被覆盖状况对流域生态环境保护具有重要意义,但目前针对该流域的相关研究较少。鉴于此,本文利用渭河流域 2000—2015 年 MODIS NDVI 月时序数据及同期气象资料,研究流域 NDVI、气温和降水的时空变化特征及相关性,以为渭河流域生态环境保护与建设提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

渭河流域位于黄河流域中部,地理位置介于 33°—38°N, 104°—110°E。其干流全长 818 km,流域面积 13.5 万 km<sup>2</sup>,泾河和北洛河是其主要支流。流域西部、渭河北山以北属黄土高原,中部为渭河谷地,南部为秦岭,地势西高东低,平均海拔 1 300 m。渭河流域地处温带半干旱半湿润区,属温带大陆性季风气候,年降水量 500~800 mm,年平均气温 7.8~13.5℃<sup>[18]</sup>,其主要植被类型有阔叶林、针叶林、灌丛、草丛、草甸、草原以及栽培植被。

### 1.2 数据来源

研究所用的植被指数数据采用 2000—2015 年 MODIS NDVI 月合成数据集,空间分辨率为 500 m,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

利用 ArcGIS 软件,以渭河流域矢量边界为基础进行裁剪,获得研究区逐月的 NDVI 影像。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)所提供的中国地面气候资料月值数据集。包括渭河流域及其周边的 27 个气象站点,选取的气象因子为月平均气温和月降水量。利用反距离权重插值法(Inverse Distance Weighing)将上述气象要素插值为空间分辨率与 NDVI 一致的栅格数据。

### 1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 基于像元尺度的趋势分析法能模拟研究区中每个栅格单元的变化趋势,从而反映植被 NDVI 变化的方向和速率<sup>[19]</sup>。趋势分析的计算公式为:

$$\text{Slop} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:Slop 为像元 NDVI 线性回归方程的斜率; $i$ 代表年份(本文中 $i$ 的取值范围为 1~16); $n$ 为研究的时间跨度(本文的时间跨度为 16 a)。当 Slop>0 时,NDVI 呈增加趋势;当 Slop<0 时,NDVI 呈减小趋势;当 Slop=0 时,NDVI 基本稳定,无明显变化。

1.3.2 相关分析 相关分析是测度变量之间相关程度的有效方法。本文首先对 2000—2015 年月时序 NDVI 与气温和降水进行相关分析,然后利用 ArcGIS 空间分析,基于像元尺度分析 NDVI 与气温和降水之间的相关性,以探讨长时间序列下 NDVI 与气温和降水之间的相关程度,并分析其空间分布状况。相关系数的计算公式如下:

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

式中: $R_{xy}$ 为相关系数; $x_i$ 与 $y_i$ 分别代表变量 $x$ 与 $y$ 在第 $i$ 时期时的值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 代表变量 $x$ 与 $y$ 的平均值; $n$ 为样本容量。相关系数的取值范围为-1~1,正值代表变量之间呈正相关关系,负值代表变量之间呈负相关关系,相关系数的绝对值越大,变量之间的相关性越强。

考虑到地理系统中各要素之间相互影响。采用偏相关系数法研究单个气候因子与 NDVI 之间的相关性。偏相关系数的计算公式为:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \quad (3)$$

式中: $R_{xy,z}$ 表示将变量 $z$ 视为常数时变量 $x$ 与 $y$ 之间的偏相关系数; $R_{xy}$ , $R_{xz}$ , $R_{yz}$ 分别表示变量 $x$ , $y$ , $z$ 两两之间的相关系数。偏相关系数的取值范围为-1~1。

2 结果与分析

2.1 NDVI、气温及降水的时间变化

2.1.1 年内变化特征 图 1 显示了渭河流域 2000—2015 年月平均 NDVI 和气温、降水的时间变化序列。从图 1 中可以看出,渭河流域平均 NDVI 具有明显的季节变化。NDVI 变化曲线在年内呈单峰型,最小值一般出现在 1 月和 2 月,此时 NDVI 小于 0.3;最大值一般出现在 8 月,此时 NDVI 大于 0.6。表 1 列出了 16 a 间各月的 NDVI、气温和降水的平均值。由表 1 可以看出,NDVI 从 3 月开始逐渐增大,并在 8 月达到最大值,为 0.68;8 月—次年 2 月 NDVI 逐渐降低,并在 2 月达到最小值,为 0.27,春季和夏季是 NDVI 变化幅度最大的时间段。NDVI 的年内变化直接反映了植被的物候,3 月份开始,各类植被逐渐开始发芽生长,至 8 月份,植被均处于生长旺盛阶段,此时 NDVI 达到最大值;9 月份开始,植被逐渐停止生长,植被覆盖度逐渐减小,因此 NDVI 逐渐降低,并在次年 2 月达到最低值。

从气温和降水的时间变化序列曲线中可以清晰看出 NDVI 在不同的变化阶段里水热条件的变化特

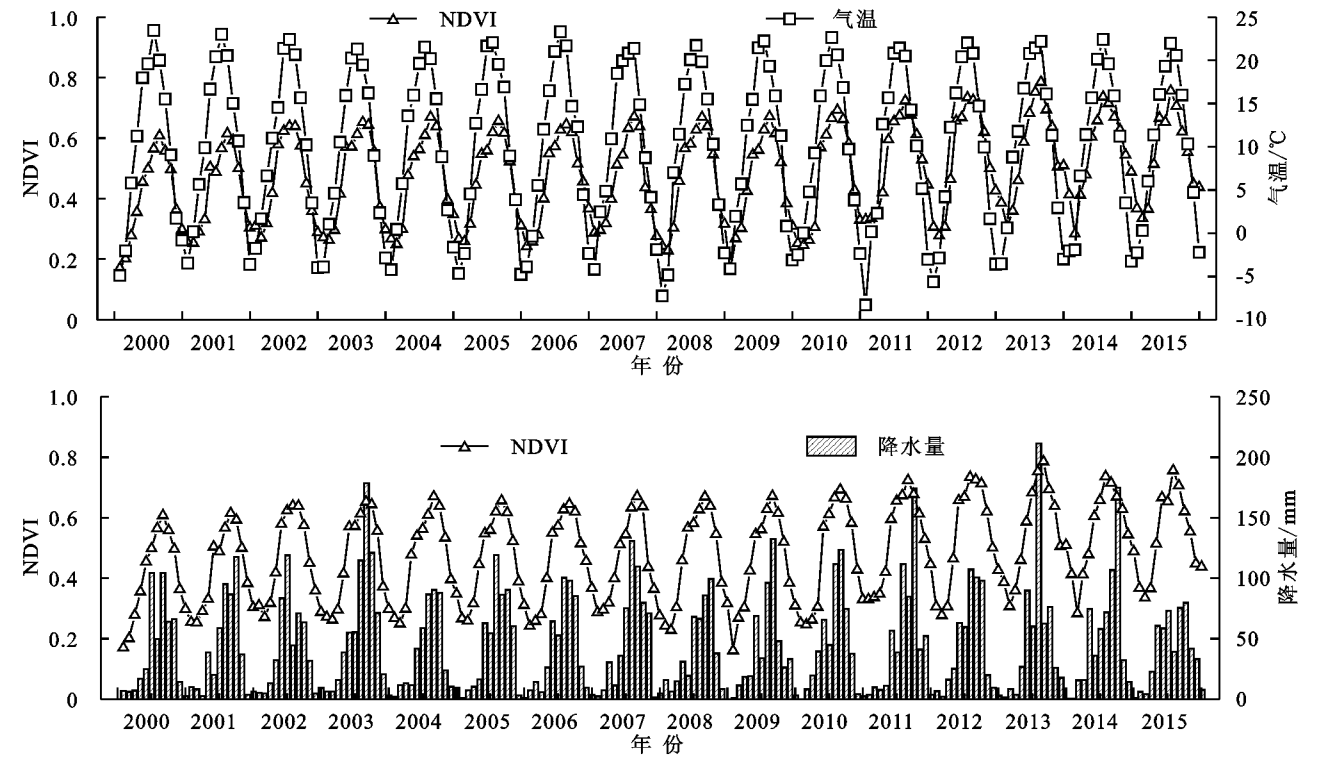


图 1 2000—2015 年渭河流域平均 NDVI 及各气象要素的时间序列

表 1 渭河流域 NDVI 及各气象要素月平均值

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
NDVI	0.28	0.27	0.32	0.42	0.57	0.59	0.65	0.68	0.64	0.54	0.43	0.36
气温/℃	-4.17	-0.35	5.55	11.53	16.35	20.43	22.11	20.43	15.60	10.12	3.26	-2.80
降水量/mm	4.79	8.28	13.64	30.02	52.88	63.41	97.28	99.76	95.97	40.68	15.06	3.88

征。渭河流域月平均气温和降水的年内变化趋势与 NDVI 相一致,冬季气温低,降水量少,夏季气温高,降水量多。由表 1 可以看出,平均气温最高出现在 7 月份,为 22.11℃,最低出现在 1 月份,为-4.17℃;降水量最大值出现在 8 月份,为 99.7 mm,最小值出现在 12 月份,为 3.88 mm。

2.1.2 年际变化特征 图 2 显示了渭河流域 2000—2015 年 NDVI、气温和降水的整体变化趋势。由图 2 可知,渭河流域 NDVI 呈缓慢增大的趋势,增大的速率约为 0.088/10 a,表明植被覆盖度有所增加。多年平均 NDVI 为 0.48,NDVI 最小值出现在 2000 年,为 0.40,NDVI 最大值出现在 2013 年,为 0.56。NDVI 的年际变化大致经历了 3 个阶段:(1) 2000—2002 年,这一阶段 NDVI 呈增大的趋势,增大的幅度为 0.06;(2) 2004—2010 年,这一阶段 NDVI 的变化较为平稳,在 0.45~0.47 之间波动;(3) 2011—2015 年,这一阶段 NDVI 明显增大,并且在 2013 年达到最大值。

2000—2015 年,渭河流域的气候总体上朝着暖湿的方向变化,气温和降水的年际波动较大,无明显的波动周期。其中,气温升高的速率为 0.066℃/10 a,降水增加的速率为 37.92 mm/10 a。

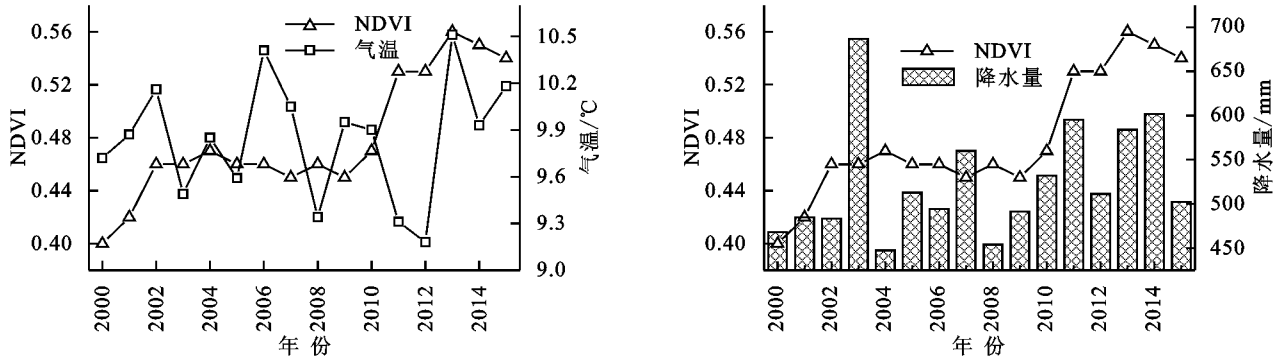


图 2 渭河流域 NDVI 及各气象要素年际变化趋势

## 2.2 NDVI、气温及降水的空间变化

2.2.1 NDVI、气温及降水的空间分布特征 渭河流域 2000—2015 年平均 NDVI、气温及降水的空间分布状况如图 3 所示。从图 3 可以看出,NDVI 分布的空间差异比较明显,流域内 NDVI 介于 0.18~0.78 之间,均值为 0.48。流域西部、北部的黄土丘陵沟壑区的植被覆盖状况较差,NDVI 小于 0.3;泾河谷地、北洛河谷地和关中平原的植被覆盖状况较好,NDVI 介于 0.3~0.6 之间;流域南部的秦岭、中部的子午岭地区植被覆盖状况最好,NDVI 大于 0.6。

NDVI 的空间分布格局与气候因子的空间变化

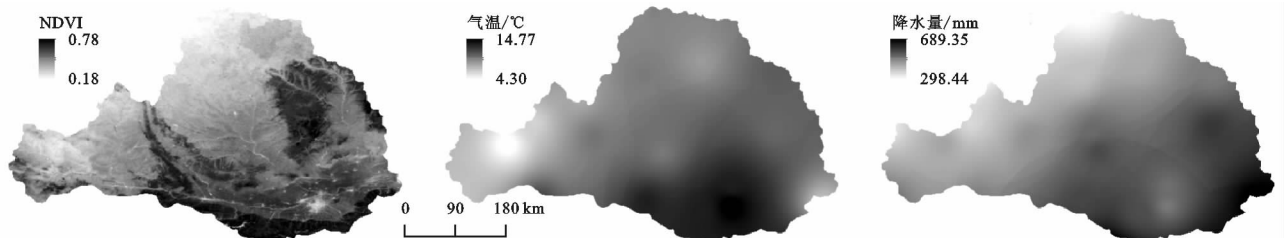


图 3 渭河流域多年平均 NDVI 及各气象要素的空间分布

2.2.2 NDVI、气温及降水的空间变化趋势 基于流域尺度的时间序列分析可以探明渭河流域 NDVI 及气候变化的整体趋势,但无法说明这些变化在空间上的差异。因此利用趋势分析法,在像元尺度上分析了渭河流域 2000—2015 年 NDVI、气温及降水的变化趋势,结果如图 4 所示。图 4 表明,近 16 a 以来,渭河流域绝大部分地区的 NDVI 值均呈增大的趋势,统计各像元值对应的像元数发现,趋势斜率大于 0 的像元个数有 375 579 个,占全区的 97.77%,其中,流域西部和北部的 NDVI 增大的趋势最为明显;趋势斜率小于 0 的像元个数有 8 586 个,占全区的 2.23%,主要沿渭河干流一线的城镇和人口密集地区分布。总体而言,渭河流域近 16 a 以来 NDVI 变化的趋势为整体增大,西部强于东部,北部强于南部。

渭河流域大部分地区 16 a 间气温均呈升高的趋势,其中流域西部、北部气温升高的趋势最明显,东部趋势相对稳定,北洛河以东气温有降低的趋势;降水

比较一致。根据插值结果,渭河流域平均气温 4.3~14.77℃,多年平均降水量 298~689 mm,气温和降水的空间分布表现出由东南向西北逐渐降低和减少的趋势。流域西部、北部气温低、降水量少,气候干旱,主要的植被类型为温带草原,NDVI 较低;自西北向东南,水热条件逐渐改善,泾河谷地、北洛河谷地以及关中平原适宜农耕,主要的植被类型为栽培植被,NDVI 较高;流域南部的秦岭和子午岭地区水热条件组合好,主要的植被类型为阔叶林和针叶林,并分布有少量的温带落叶灌丛,NDVI 最高。

的变化趋势为:流域大部分地区降水量增大,南部和西北部最明显,北洛河谷地降水量有减少的趋势。

## 2.3 NDVI 与气温、降水的相关性分析

2.3.1 时间序列相关性分析 图 5 显示了渭河流域 2000—2015 年月平均 NDVI 随气温和降水的变化而变化的大致趋势。由图 5A 可以看出,月平均 NDVI 与月平均气温之间的相关性显著,NDVI 随气温的升高而增大,当月平均气温在 20℃以上时,NDVI 趋于最大。由图 5B 可知,月平均 NDVI 与月降水之间接近于对数关系,月降水量在 0~100 mm 之间时,NDVI 随着降水的增加而迅速增大,当月降水量超过 100 mm 时,NDVI 趋于稳定,说明此时供给植被生长发育的水分已趋于饱和。

分别计算 NDVI 与气温和降水的相关系数和偏相关系数。结果表明,月平均 NDVI 与气温和降水之间均呈显著正相关关系,其中 NDVI 与气温的相关系数为 0.865,NDVI 与降水之间的相关系数为 0.776,二者均通过显著性水平为 0.01 的检验;NDVI 与

气温的偏相关系数为 0.664,NDVI 与降水偏相关系数为 0.346。这表明气温和降水的季节变化对植被

生长影响显著,并且说明就渭河流域而言,植被的动态变化更易受到气温变化的影响。

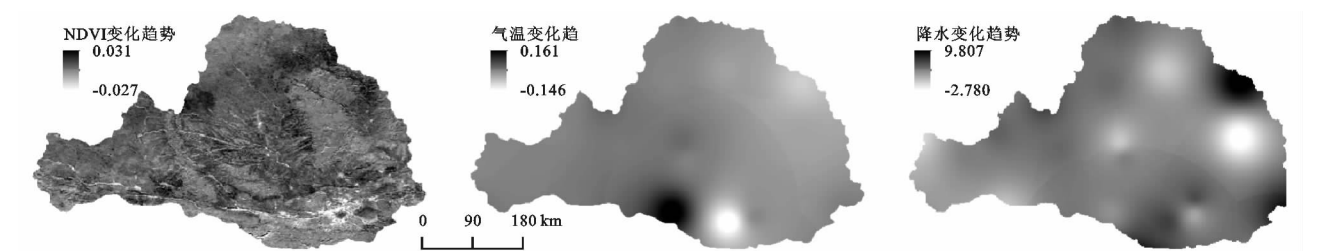


图 4 渭河流域 NDVI 及各气象要素的变化趋势

2.3.2 空间相关性分析 对渭河流域 2000—2015 年年平均 NDVI 与年平均气温和年降水量逐像元进行相关分析和偏相关分析,结果如图 6 所示。图 6A、图 6B 显示了 NDVI 与气温相关系数、偏相关系数的空间分布格局。由图可知,渭河流域 NDVI 与气温的相关系数介于  $-0.943\sim0.864$  之间,偏相关系数介于  $-0.926\sim0.870$  之间,二者的极化现象严重且空间差异性明显。NDVI 与气温呈正相关关系的区域占流域面积的 51.21%,主要分布在渭河宝鸡峡以上的地区,包括宝鸡、天水、平凉、固原以及榆林定边县。这些地区年均温较低,植被以草原和栽培植被为主,同期气温升高,降水量也呈增大趋势,这有利于农业耕作和自然植被生长。NDVI 与气温呈负相关关系的地区占流域面积的 48.79%,主要分布在北洛河流域以及渭河流域咸阳至潼关段,包括

庆阳、西安、咸阳、铜川、延安和渭南,这与已有研究结果一致<sup>[20]</sup>。这也说明气温的升高会导致植被生长在一定程度上受到抑制。图 6C、图 6D 显示了 NDVI 与降水的相关系数、偏相关系数的空间分布格局。总体而言,NDVI 与降水变化的相关性要弱于气温变化,NDVI 与降水的相关系数介于  $-0.474\sim0.818$  之间,偏相关系数介于  $-0.519\sim0.825$  之间。空间分布上,NDVI 与降水呈正相关关系的区域占流域面积的 96.67%,特别是流域西北部,NDVI 与降水的正相关性较为明显,而植被覆盖程度较好的秦岭与子午岭地区,NDVI 与降水的相关性较弱。NDVI 与降水呈负相关关系的区域占流域面积的 3.33%,主要沿关中平原城市周边分布。从整体上看,渭河流域降水的增加对植被生长主要起到促进的作用。

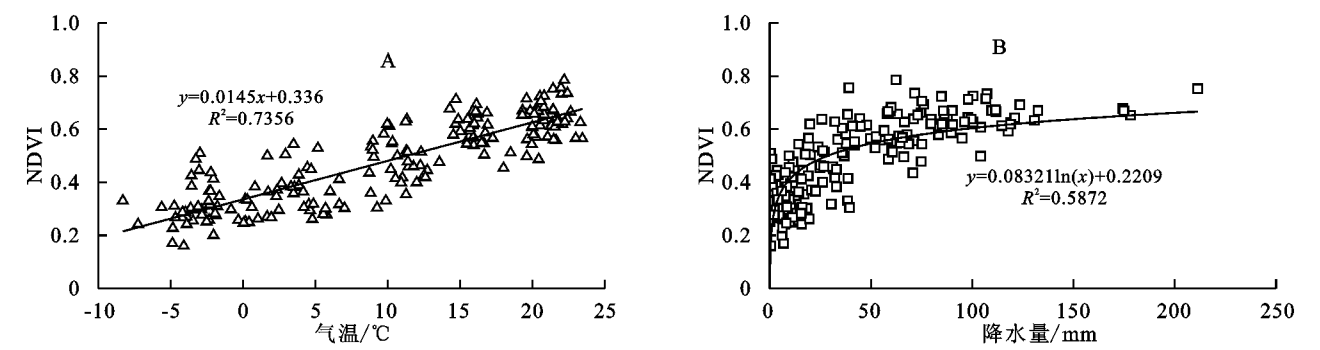


图 5 NDVI 与气温、降水在时间序列上的关系

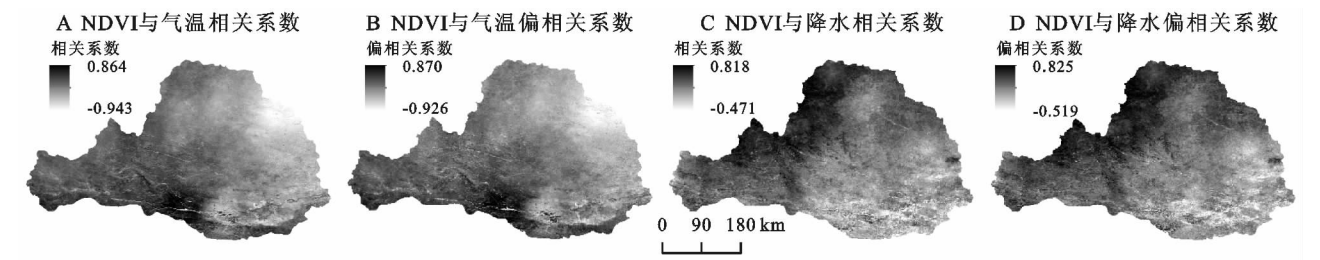


图 6 NDVI 与气温、降水量相关性空间分布

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

气候变化是影响地表植被时空分布的重要原因<sup>[21]</sup>。已有研究表明,全球变暖正导致北半球中高纬度地区植被活动增强<sup>[22-23]</sup>。本文以渭河流域为研究

区域,尝试分析 NDVI 的时空变化及其与气候因子之间的时空相关性。结果表明,2000—2015 年,渭河流域 NDVI 总体呈增大的趋势,但空间差异明显,流域西部、北部植被活动的强度明显大于东南部地区;在 NDVI 与气候因子的相关性分析中发现,NDVI 对气温变化的响应强度要大于降水变化;此外,气温的升高对植

被动态变化的影响具有空间差异性,而降水的增加主要促进了植被的生长。气候变化对渭河流域植被动态变化的影响是明显的,但其他非气候因素对植被动态变化的影响也不可忽视,特别是退耕还林(草)工程、城市化的发展等人类活动因素对植被动态的影响还有待进一步研究。

### 3.2 结论

(1) 2000—2015年,渭河流域 NDVI 总体呈增大的趋势,但空间差异明显。NDVI 增大的趋势表现为西部强于东部,北部强于南部。同期渭河流域气候总体朝暖湿的方向发展,流域西部、北部气温升高,降水量增大,东北部气温降低、降水量减小。

(2) 时间尺度上,渭河流域 NDVI 与气温和降水均呈显著正相关关系,其中 NDVI 与气温的相关性要强于降水。

(3) 像元尺度上,渭河流域 NDVI 与气温的相关性空间差异明显,西部主要呈正相关关系,东部主要呈负相关关系。大部分地区 NDVI 与降水均呈正相关关系。说明就渭河流域而言,气温的变化对植被生长的影响具有空间差异性和不确定性,而降水的增加会促进植被的生长。

### 参考文献:

- [1] 赵杰,杜自强,张红,等. 中国季节性昼夜增温的不对称性及其对植被活动的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3909-3919.
- [2] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [3] 於琰,李克让,陶波,等. 植被地理分布对气候变化的适应性研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1326-1332.
- [4] 张景华,李英年. 青海气候变化趋势及对植被生产力影响的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 97-102.
- [5] 候静,杜灵通,刘可,等. 1982—2012年北半球荒漠草原过渡带植被物候特征及其与气候因子的关系[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 473-482.
- [6] Pettorelli N, Vik J, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2005, 20(9): 503-510.
- [7] Pang G J, Wang X J, Yang M X. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibet Plateau from 1982 to 2012[J]. Quaternary International, 2017, 444: 87-96.
- [8] 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.
- [9] Liu Y, Li Y, Li S C, et al. Spatial and temporal pat-

terns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors[J]. Remote Sensing, 2015, 7(10): 13233-13250.

- [10] 朴世龙,方精云. 1982—1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 199-125.
- [11] Xu G, Zhang H F, Chen B Z, et al. Changes in Vegetation Growth Dynamics and Relations with Climate over China's Landmass from 1982 to 2011[J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 3263-3283.
- [12] 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等. 1982—2012年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3567-3578.
- [13] Al-Bakri J T, Suleman A S. NDVI response to rainfall in different ecological zones in Jordan[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(19): 3897-3912.
- [14] Keersmaecker W D, Lhermitte S, Hill M, et al. Assessment of regional vegetation response to climate anomalies: A case study for Australia using GIMMS NDVI Time Series between 1982 and 2006[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 34-51.
- [15] Zhang G, Su X, Singh V P, et al. Modeling NDVI using joint entropy method considering hydro-meteorological driving factors in the middle reaches of Hei River Basin[J]. Entropy, 2017, 19(9): 502-515.
- [16] 陈福军,沈彦俊,胡乔利,等. 海河流域 NDVI 对气候变化的响应研究[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 401-414.
- [17] 刘少华,严登华,史晓亮,等. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 480-489.
- [18] 赵安周,朱秀芳,刘宪锋,等. 1965—2013年渭河流域降水时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1896-1909.
- [19] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 897-908.
- [20] 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.
- [21] 何月,樊高峰,张小伟,等. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.
- [22] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R F, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (D17): 20069-20083.
- [23] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997, 386(6626): 698-702.