

# 2000—2019 年渭河流域植被覆盖度 时空演变特征及气候响应

庞家泰<sup>1</sup>, 段金亮<sup>1</sup>, 张瑞<sup>1,2</sup>, 吕继超<sup>1</sup>

(1.西南交通大学 地球科学与环境工程学院测绘遥感信息系, 成都 611756;

2.西南交通大学 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 成都 611756)

**摘 要:**渭河是黄河第一大支流和主要输沙源之一,渭河流域涵盖黄土高原及秦岭地区,跨越不同的气候带且生态环境相对脆弱。因此,对其流域植被覆盖情况及气候响应分析具有重要研究意义。基于 MODIS-NDVI 数据,结合像元二分法模型计算植被覆盖度,利用趋势分析、Hurst 指数进行渭河流域 2000—2019 年植被覆盖度的空间演变特征及变化趋势分析。结合渭河流域气象数据,利用偏相关分析、Mann-Kendall 检验进行气候因子对植被覆盖度的影响分析。结果表明:(1)渭河流域植被覆盖度在空间域上表现为陕北地区及西北宁夏甘肃地区植被覆盖度较低,渭河流域南部秦岭一带及泾河、洛河一带植被覆盖度相对较高,流域整体在空间域上呈现为由东南向西北逐渐递减的趋势;(2)2000—2019 年渭河流域植被覆盖度整体呈上升趋势,上升速率为 0.095/10 a,其中在渭河干流中下游城市较密集区植被覆盖度有显著性下降;(3)渭河流域植被覆盖度未来变化趋势表现为流域整体呈现进一步改善趋势(面积占 93.36%),其中沿渭河中下游城市密集地区植被覆盖度未来变化趋势呈现持续退化趋势(面积占 6.64%);(4)近 40 年来,渭河流域气温呈显著性上升趋势,上升速率为 0.42℃/10 a,降水呈现缓慢增加趋势,渭河流域降水、气温对植被覆盖度的相关性影响存在明显的地域特征,且对植被覆盖度影响的关联性并不显著,研究结果可为渭河流域生态建设及水土保持工作提供参考意义。

**关键词:**MODIS-NDVI; 渭河流域; 植被覆盖度; 趋势分析; Hurst 指数; M-K 检验

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0230-08

## Characteristics of Spatiotemporal Evolution and Climate Response of Vegetation Cover in the Wei River Basin from 2000 to 2019

PANG Jiatai<sup>1</sup>, DUAN Jinliang<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LYU Jichao<sup>1</sup>

(1.Department of Surveying, Mapping and Remote Sensing Information, School of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2.Southwest Jiaotong University, National and Local Joint Engineering Laboratory for High-speed Railway Operation Safety Space Information Technology, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** The Weihe River is one of the largest tributaries and main sources of sediment transport in the Yellow River, which covers the Loess Plateau and Qinling region, spans different climatic zones and has a relatively fragile ecological environment. Therefore, it is of great significance to analyze vegetation cover and climate response in this basin. Based on MODIS-NDVI data, we calculated vegetation cover by combining the binary model, and used trend analysis and Hurst index to analyze the spatial evolution characteristics and trends of vegetation cover in the Weihe River Basin from 2000 to 2019. The influence of climate factors on vegetation cover was analyzed by using partial correlation analysis and Mann-Kendall test and combining with the meteorological data of the Weihe River Basin. The results show that: (1) the vegetation cover of the Weihe River Basin showed the low level in the northern Shaanxi region and the northwest Ningxia and Gansu area, the relatively high level in the Qinling area and the Jinghe River and Luohe River areas in the southern

收稿日期:2020-08-21

修回日期:2020-10-20

资助项目:国家重点研发计划(2017YFB05027000);中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2016T002-E);四川省科技计划面上项目(2018JY0564)

第一作者:庞家泰(1997—),男,重庆黔江人,硕士研究生,主要从事定量遥感方向科研工作。E-mail:Pjt\_Shawn@my.swjtu.edu.cn

通信作者:张瑞(1982—),男,河南省新乡市人,博士,副教授,主要从事微波遥感与雷达干涉测量相关科研工作。E-mail:zhangrui@swjtu.edu.cn

part of the Weihe River basin, and presented the decreasing trend from southeast towards the northwest in the whole basin; (2) the vegetation cover of the Weihe River basin had risen overall from 2000 to 2019 with the increase rate of 0.095/decade, the vegetation cover significantly decreased in the regions with the more dense urban areas in the middle and lower reaches of the main stream of the Weihe River; (3) the trend of future changes in vegetation cover in the Weihe River basin showed the further improvement trend in the basin as a whole (area ratio 93.36%), the future trend of vegetation cover in regions with the dense urban areas along the middle and lower reaches of the Weihe River showed a trend of continuous degradation (area ratio 6.64%); (4) in the past 40 years, the temperature of the Weihe River Basin had shown a significant upward trend with the increase rate of 0.42 °C/decade, and the precipitation showed a slow increase trend; the correlation between temperature and vegetation cover had obvious regional characteristics, and the correlation of vegetation cover was not significant. The results of the study can provide reference significance for ecological construction and soil and water conservation in the Weihe River Basin.

**Keywords:** MODIS-NDVI; Weihe River Basin; vegetation coverage; trend analysis; Hurst index; M-K test

植被是陆地生态系统中必不可少的一部分,在气温调节、水土保持、物质循环中扮演着重要的角色<sup>[1-2]</sup>,对气候变化及人类的生产活动具有高度的敏感性。植被覆盖的时空演变是气候变化、土地利用类型变化等影响因素综合作用的结果<sup>[3-4]</sup>。自然因素和人类活动对地表植被覆盖的影响都会直接反映到地表植被类型及其覆盖度的变化上<sup>[5]</sup>。植被覆盖度是反映区域生态系统及环境优劣的重要监测指标之一<sup>[6]</sup>,作为生态系统表述的重要数据基础,以及区域生态环境在时间和空间上演变的重要指标,对水文、生态以及区域变化等研究领域都具有重要意义,植被覆盖度在很大程度上反映了区域生态系统的安全性及稳定性<sup>[7]</sup>。

遥感作为当前针对多尺度、大范围、时空连续性较强的对地观测手段,能够很好地表示地表覆盖情况,是获取地表植被指数的重要手段<sup>[8]</sup>。目前,利用遥感数据产品进行地表植被指数的反演已经成为研究的热点领域。通过对遥感影像的解译与判读能够很好地表达不同尺度上的区域植被指数,其中归一化植被指数(NDVI)在当前的研究中使用的最为广泛<sup>[9]</sup>,是监测地区和全球植被及生态环境的有效指标,同时也是反演地表植被覆盖变化的最佳指示因子<sup>[9]</sup>。基于NDVI数据利用像元二分模型反演植被覆盖度是常用的反演方法,通过构建时序植被覆盖度影像能直观准确的反映植被指数的时空变化特征。为区域的政策方针,发展规划提供有效的参考与及时的反馈。植被覆盖的时空演变特征及气候因子的影响分析,是当前全球环境变化和气候演变的研究热点之一。分析其变化特征及未来发展趋势能够为生态环境、经济发展及区域管理提供科学的数据支持<sup>[10]</sup>。

渭河流域自古以来就是人类生产、生活的主要集中区域。由于历史上长期的滥垦乱伐,区域内植被遭到严

重破坏,另外,流域大部分地区处于黄土高原范围内,土质疏松,导致水土流失严重,造成流域生态相对脆弱<sup>[11]</sup>。据数据统计,每年黄河向下游地区输沙量达16亿t,其中,平均每年有3亿t来自渭河流域<sup>[12]</sup>。因此,对渭河流域进行植被的时空动态演变的监测具有重要的研究意义。乔晨等<sup>[13]</sup>通过研究1980—2007年渭河流域关中段的植被动态变化分析,得出该区域NDVI和植被覆盖度近30a总体上呈增长趋势,仅1990—2000年期间有所下降;傅志军等<sup>[14]</sup>通过研究基于NDVI的渭河流域时空演变分析,得出2010—2015年渭河流域NDVI均值呈缓慢增加趋势,植被覆盖度总体呈现由西北向东南逐渐增加的趋势;余东洋等<sup>[15]</sup>通过研究2000—2017年渭河流域植被动态变化遥感时序分析,得出渭河流域NDVI总体呈上升趋势,但在空间上存在一定的差异性,同期气温和降水具有显著的时空差异性;渭河流域的植被指数变换在一定程度上反映了整个流域生态系统的稳定性与发展趋势。

为进一步研究渭河流域生态植被的时空演变特征及相关影响因子,并对未来发展趋势进行预测。本文基于2000—2019年渭河流域MODIS-NDVI遥感产品数据进行逐像元植被覆盖度反演,研究其时空演变特征,结合气温、降水等气象数据进行相关性分析及偏相关性分析并进行M-K突变检验,基于Hurst指数及年际变化率进行未来发展趋势分析,并就人类活动对渭河流域植被覆盖的影响因子进行简要分析。渭河作为黄河最大的支流,且作为黄河输沙量的主要来源之一,渭河流域特殊的地理位置决定了其在生态环境保护中的特殊地位,因此定期对流域内植被变化情况进行监测是对区域内的生态环境重要保护举措,对渭河流域及黄河中下游地区的生态安全及社会经济可持续发展都具有重要的意义。

# 1 研究区概况

渭河是黄河第一大支流,渭河流域位于东经 103°30′—110°30′和北纬 33°30′—37°30′。由北洛河、泾河两大支流和渭河主流构成,流域北部地处黄土高原,南部位于秦岭山区北侧,流域范围涉及甘肃、宁夏、陕西三省(自治区),总面积达 134 766 km<sup>2</sup>。渭河流域在空间上可分为东西 2 个部分:西部地区为黄土丘陵沟壑区,东部地区为关中平原区,流域地势西北高东南低,南北两侧山地呈阶梯状向渭河干流倾斜<sup>[13]</sup>。区域内水土流失严重,生态系统脆弱,气候以半湿润和半干旱气候为主<sup>[16]</sup>。渭河流域位于干旱地区、大陆性季风气候区和湿润地区的中间过渡带,春季温暖少雨,夏季炎热多雨且伴有伏旱天气,秋季清凉湿润,冬季气候寒冷干旱且降雨稀少<sup>[17]</sup>。流域内植被覆盖类型北部以草地为主,南部地区以荆条灌丛为主<sup>[18]</sup>,区域内主要土地利用类型以耕地、林地、草地等。

# 2 数据和方法

## 2.1 数据及预处理

遥感数据使用美国国家航空航天局(NASA)的 2000—2019 年 MODIS13Q1 数据产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),空间分辨率为 250 m×250 m,时间分辨率为 16 d。由于渭河流域跨越 h:26 v:5 和 h:27 v:5 两个瓦片范围,因此选择 h:26 v:5 和 h:27 v:5 为原始数据。MODIS-NDVI 产品是已经经过水、云、重气溶胶等数据处理,因此其数据产品具有一定的质量保障,由于 MODIS-NDVI 产品具有较高的空间分辨率,因此在区域植被覆盖变化等研究领域中应用广泛。在进行数据预处理时,首先利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)和 bat 批处理命令将原始 MODIS-NDVI 数据进行批量的格式转换、重投影和影像拼接;其次,利用 IDL 程序进行批量研究区边界裁剪得到研究区的原始 MODIS-NDVI 影像数据并进行异常值消除处理;然后,利用最大合成法得到年 NDVI 影像数据,并进一步利用像元二分法模型逐像元计算得到年植被覆盖度影像数据;最后,对 2000—2019 年的植被覆盖度影像数据进行时序数据合成,得到 2000—2019 年植被覆盖度时序影像数据。

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)中国地面气候资料日值数据集的 1981—2019 年渭河流域及其周边区域 37 个气象站点的逐日数据(包括日降水量、日平均气温等)

## 2.2 趋势分析

在时序栅格影像数据的变化趋势研究领域中,通

过一元线性回归分析能够对每个栅格像元的演变趋势进行模拟。该方法是在确定的时序影像数据范围内,通过最小二乘的方法对年植被覆盖度的时间变化曲线斜率进行拟合,用以综合反演植被的时空变换特征<sup>[19-21]</sup>。本文采用一元线性回归分析来进行 2000—2019 年时序植被覆盖度数据的逐像元趋势分析,用以反演植被的时空演变特征,计算公式如下<sup>[22]</sup>:

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

式中: $\theta_{\text{slope}}$ 为变化趋势; $\text{NDVI}_i$ 为第  $i$  年的 NDVI 值; $n$  为时序数据的总年数;当  $\theta_{\text{slope}} > 0$  时该像元呈现增加趋势;当  $\theta_{\text{slope}} \leq 0$  时该像元呈现下降趋势。

## 2.3 Hurst 指数

Hurst 指数是用以描述时间序列是否具有长期依赖性的有效检测方法,其基本原理基于重标极差(R/S)分析方法,最早由英国水文学家提出,用以描述水库及水流量的相关分析,后被广泛应用于各研究领域,基本概念为<sup>[24]</sup>:

一时间序列  $\{\varphi(t)\}, t=1, 2, \dots, n$ , 对于任意正整数  $\tau=1$ , 定义均值序列:

$$\varphi_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \varphi(i) \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^t (\varphi(\mu) - \varphi_{\tau}) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) - \min_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\varphi(i) - \varphi_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

若存在  $R/S \propto \tau^H$ , 则说明时间序列  $\{\varphi(t)\}, t=1, 2, \dots, n$  存在 Hurst 现象,其中  $H$  值称为 Hurst 指数, Hurst 指数数值大小的代表意义如下:

(1)  $0 < H < 0.5$  时,表明当前时间序列具有长期的依赖性,但是未来的发展趋势与过去相背,即反持续性,其中  $H$  值越小,反持续性越强。

(2)  $H = 0.5$ ,表明当前时间序列呈随机变换,即过去对未来发展趋势没有影响。

(3)  $0.5 < H < 1$ ,表明当前时间序列具有长期的持续性,未来发展趋势与过去基本一致; $H$  值越接近 1,过去与未来的持续性越强。

(4)  $H = 1$ ,说明未来完全可以用现在来预测。时间序列是一条直线。



2.4 Manner-Kendal(M-K)一突变检验

Mann-Kendall 检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出,在降水、径流、气温和水质等时间序列的趋势变化研究中应用广泛<sup>[25]</sup>。在 Mann-Kendall 检验中,假定  $X_n$  为一时间序列数据( $X_1, \dots, X_n$ ),其不同时间点的数据是相互独立、随机的样本数据;假设  $H_i$  是双边检验,对于任意的  $k, j \leq n$ ,且  $k \neq j$ ,  $X_i$  和  $X_j$  的分布是不相同的,检验的统计量  $S$  计算如下<sup>[26]</sup>:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \tag{6}$$

其中

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \tag{7}$$

$S$  服从标准正态分布,方差  $V_{ar}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当  $n > 10$  时,通过下式计算统计量  $Z$  值:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{ar}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{ar}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{8}$$

对于统计量  $Z$ ,当  $Z$  值大于 0 表示当前时间序列呈增加趋势;小于 0 时表示当前时间序列呈减少趋势。统计量  $Z$  值的绝对值在大于等于 1.28,1.64,2.32 时,表示当前时间序列分别通过了置信度为 90%,95%,99% 的显著性检验。

Mann-Kendall 检验还可以进一步用于时间序列的突变节点检测,其检测统计量  $Z$  与前面所述有所差异,通过构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad (k=2,3,4,\dots,n) \tag{9}$$

其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & X_i > X_j \\ 0 & X_i \leq X_j \end{cases} \quad 1 \leq j \leq i \tag{10}$$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \tag{11}$$

式中:  $E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4}$ ;  $\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$ ;

$UF_k$  为标准正态分布,对于给定显著性水平  $\alpha$ ,若  $|UF_k| > U_{\alpha/2}$ ,则表明序列存在明显的趋势变化,将时间序列  $x$  按逆序排列,再按照上式计算,同时使:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ K = n+1-k \end{cases} \quad (k=1,2,\dots,n) \tag{12}$$

对于统计序列  $UF_k$  和  $UB_k$  进行进一步分析时时间序列的变化趋势以及其突变的时间节点。若  $UF_k$

值大于 0,则表明序列呈现为增加趋势;小于 0 则表示呈现减少趋势;当它们达到设定阈值时,表示当前时间序列的具有显著性的变化趋势。如果  $UF_k$  和  $UB_k$  的序列统计曲线存在交点,并且交点位于设定阈值的范围之内时,那么此时交点出现的时间节点就对应了时间序列的突变发生的时间点<sup>[27]</sup>。

3 结果与分析

3.1 渭河流域植被覆盖度时空演变特征

3.1.1 时间尺度 基于 MODIS-NDVI 产品数据利用最大合成法得到的 2000—2019 年 NDVI 数据并反演年植被覆盖度,进一步计算渭河流域整体年均植被覆盖度。利用线性拟合方法对 2000—2019 年渭河流域年均植被覆盖度进行线性拟合分析。结果表明:渭河流域整体植被覆盖度呈现显著性上升趋势,年均增长速率为 0.087/10 a,其中,在 2000—2013 年基本为单调递增趋势,在 2013—2019 年有一定的正负波动,但仍呈现增加趋势(图 1)。

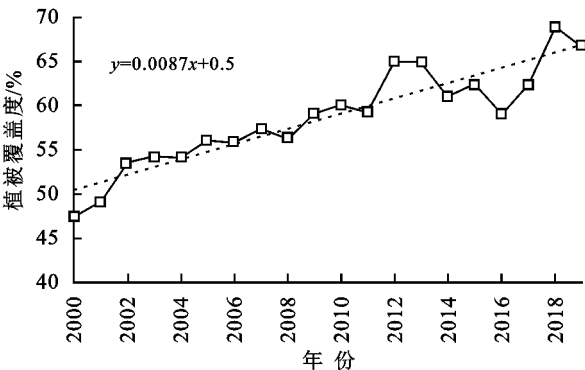


图 1 渭河流域年均植被覆盖度变化

3.1.2 空间尺度 基于渭河流域 2000—2019 年植被覆盖度时序影像数据,逐像元计算其植被覆盖度均值、年际变化率、变异系数及置信度(图 2),图 2A 表明渭河流域陕北地区及西北宁夏甘肃地区植被覆盖度整体较低,渭河流域南部秦岭一带及泾河、洛河一带植被覆盖度相对较高,流域整体在空间域上呈现为由东南向西北逐渐递减的趋势;图 2B 表明渭河流域甘肃、宁夏及陕北地区植被覆盖度年际变化率呈正向趋势,在渭河干流中下游地区呈现负向变化趋势;变异系数又称“离散系数”,其定义为标准差与平均值之比;变异系数可以用来衡量各观测值的变异程度。图 2C 表明渭河流域植被覆盖度变异系数整体呈西北高东南低的空间格局,在西安及流域西北会宁县、环县、固原县、定边县等地区较为明显;图 2D 置信水平结果表明除渭河中下游地区等少数地区外置信水平整体较高,植被覆盖度变换较为平稳;在置信度较低的地区植被覆盖度波动较大,有明显的差异性。

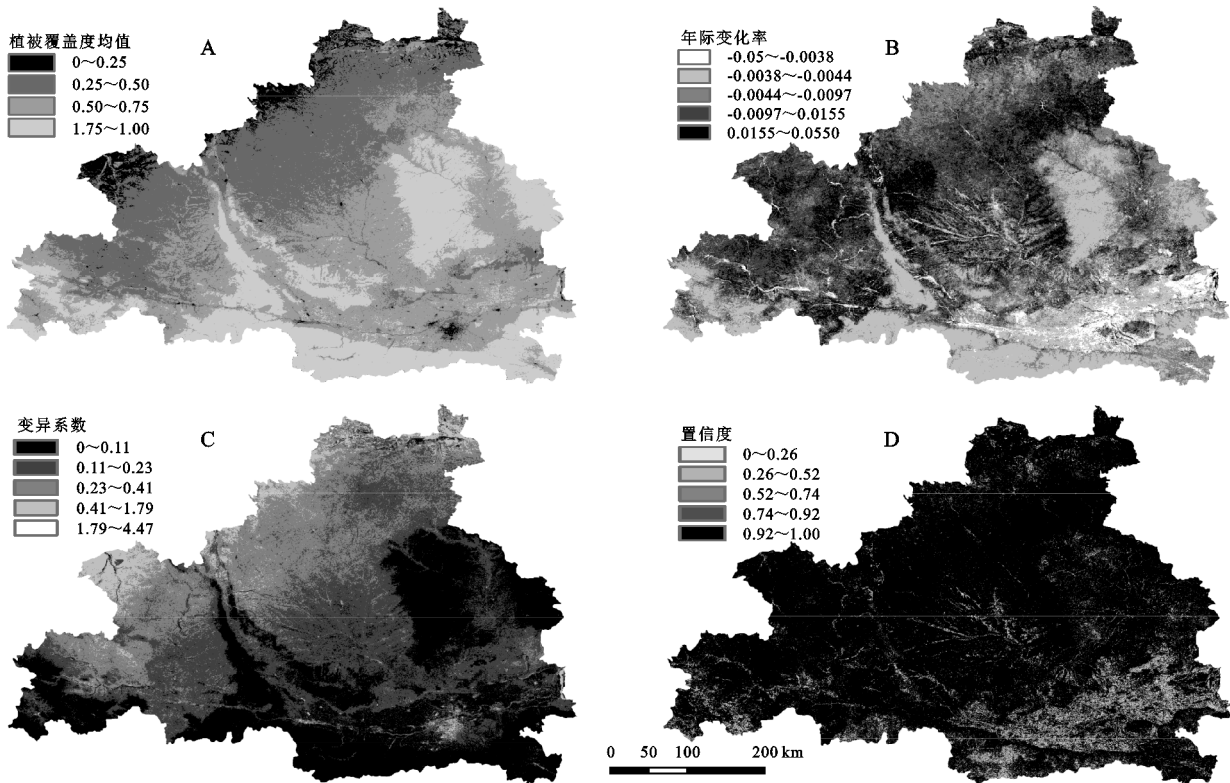


图 2 渭河流域 2000—2019 年植被覆盖度均值、年际变化率、变异系数及置信度

对渭河流域植被覆盖度按照自然间断分级法进行分类显示,按植被覆盖度分为低、中低、中、中高、高植被覆盖区,分类结果(图 3A)显示渭河流域植被覆盖度呈现由东南向西北渐进式的降低。

结合置信度与年际变化率进行变化显著性分析(图 3B),得到结论:2000—2019 年渭河流域植被覆盖度整体表现为显著性增加,其中在渭河中下游城市密度较为集中地区植被覆盖度有显著性减少。

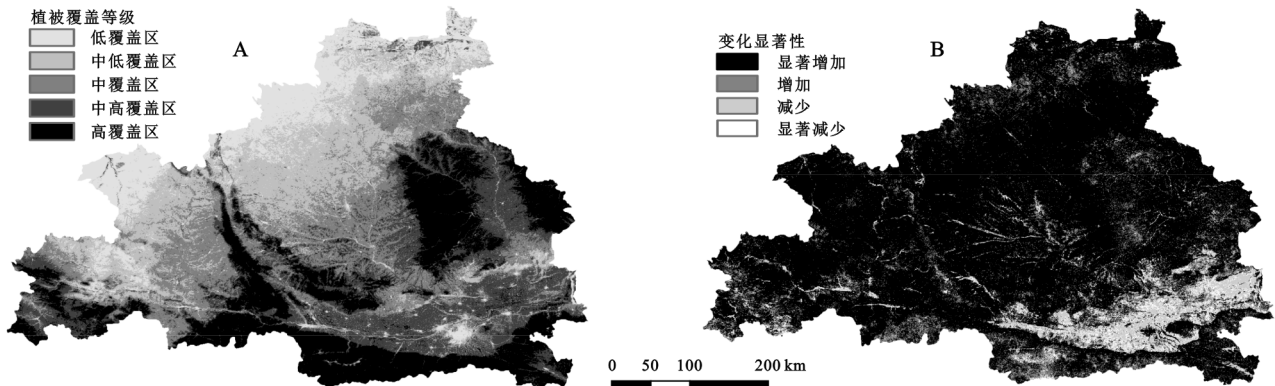


图 3 渭河流域植被覆盖等级及变化显著性

3.1.3 未来趋势分析 针对 2000—2019 年渭河流域植被覆盖度时序数据逐像元计算 Hurst 指数(图 4A),得到渭河流域 Hurst 指数最大值为 0.991 5,最小值为 0.102 4,平均值为 0.478 8,小于 0.5 的像元数所占比例为 55%,大于 0.5 的像元数所占比例为 45%。结果表明渭河流域未来植被覆盖度趋势既存在反向特征也存在同向特征。进一步结合 2000—2019 年植被覆盖度的年际变化率按照以下标准进行未来发展趋势分析:

Hurst 指数大于 0.5,年际变化率大于 0 时,未来

趋势为改善到持续改善;Hurst 指数大于 0.5,年纪变化率小于 0 时,未来趋势为退化到持续退化;Hurst 指数小于 0.5,年际变化率大于 0,未来趋势为改善到退化;Hurst 指数小于 0.5,年际变化率小于 0,未来趋势为退化到改善;分析结果(图 4B)表明:渭河流域整体植被覆盖度未来变化趋势为改善,沿渭河中下游城市较为密集及其他城市地区植被覆盖度未来变化趋势为持续退化趋势。

3.2 渭河流域植被覆盖度影响因子分析

结合渭河流域及其周边区域 1981—2019 年共



37 个气象站点的气象数据,使用 M-K 突变检测法及偏相关分析法对气温降水数据进行突变检测以及流域降水、气温与植被覆盖度之间的相关性进行分析。首先根据逐日气象数据计算年降水量与年平均温度,

利用 ArcGIS 10.3 软件对每年气象数据的年降水量及年均温度进行克里金插值得到渭河流域及其周边区域的年降水量及年均温度栅格数据,经过掩膜处理后得到渭河流域逐像元的年降水量和年均温度。

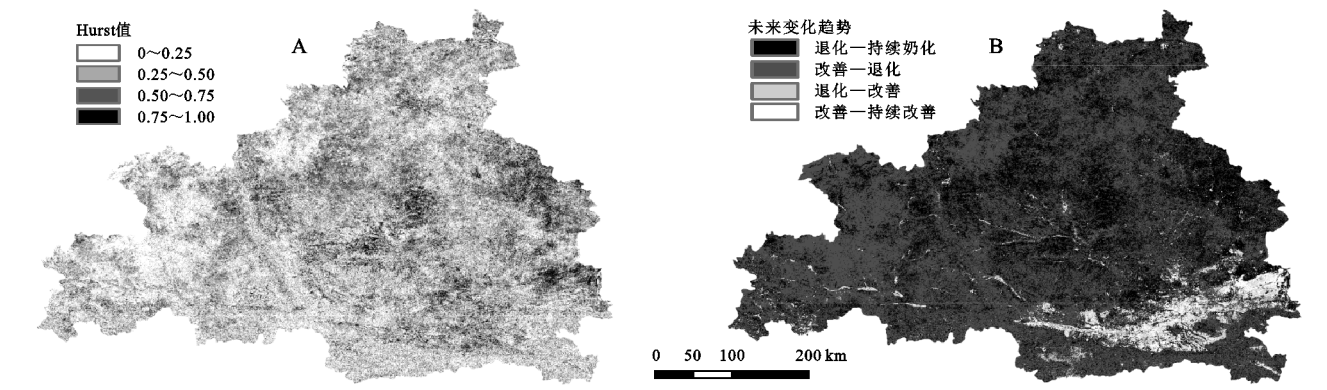


图 4 渭河流域 Hurst 指数以及未来变化趋势

3.2.1 降水、气温趋势分析 基于 1981—2019 年渭河流域内 17 个气象站点的气象数据,就降水、气温两个方面进行渭河流域气候因子发展趋势分析。以年为单位,分别统计各站点年降雨量及年均气温,然后求其均值得到渭河流域整体的年均降水量(图 5A)及年均温度(图 5B),结果表明,渭河流域近 40 a 来降雨量呈不显著增加趋势,而气温呈现显著增加趋势,上升速率为  $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

在 2012—2018 年,其中在空间上渭河流域东南地区耀县、华山、商州站点降水量变化水平呈不显著性减少,渭河流域北部地区定边、环县站点降水量变化水平呈显著性增加,其余地区均表现为不显著性增加;在气温方面,渭河流域气温变化水平整体表现为显著性增加,其突变时间均发生在 1996 年左右。

利用渭河流域内 17 个气象站点近 40 a 逐日气象数据,通过 Python 3.7 进行编程统计各气象站点年降水量与年均温度,在 MATLAB 中编写脚本分别对渭河流域各气象站点的年降水量和年均温度进行 Mann-Kendall(M-K)突变检验,根据计算结果的  $UF_k$ ,  $UB_k$  时间变化曲线图及统计量  $Z$  值确定各气象站点年降水量和年均温度的突变时间节点及变化显著性水平。首先,对渭河流域内各站点年降水量和年均气温进行均值求解得到渭河流域整体的年均降水量和年均温度,对渭河流域整体降水和气温进行 M-K 突变检验,得到:在降水(图 5C)方面,渭河流域整体降水存在一定的波动,其  $Z$  值计算结果为 0.99 表明流域整体降水呈不显著增加,其中在 2016 年流域整体降水的趋势发生突变;在气温(图 5D)方面,其  $Z$  值计算结果为 4.69 表明流域整体气温呈显著性增加,其中渭河流域整体气温趋势于 1996 年发生突变。

3.2.2 气象数据偏相关分析 基于渭河流域及其周边区域共 37 个气象站点数据,在各站点年降水量和年均温度的基础上,利用 ArcGIS 在空间上对 2000—2019 年各气象站点的年降水量和年均气温进行整个区域的克里金插值,在进行克里金插值时输出结果像元大小设定与植被覆盖度栅格图像像元大小一致,得到渭河流域及周边区域的降水、气温栅格数据,最后利用矢量文件掩膜得到渭河流域年降水、年均气温逐像元的年栅格数据。

进一步分别对渭河流域内各气象站点降水和气温进行 M-K 突变检测,确定各气象站点降水、气温的突变时间及变化显著性水平。结果表明:各站点降水和气温的 M-K 检验结果与流域整体 M-K 检验结果基本一致,在降水方面,近 40 a 渭河流域降水总体呈现增加趋势,各气象站点的降水量突变时间节点集中

进一步结合渭河流域植被覆盖度时序影像数据对植被覆盖度与降水、气温进行相关分析及偏相关分析<sup>[28-29]</sup>。结果显示,渭河流域植被覆盖度与温度、降水的相关系数与偏相关系数均存在区域正负波动,植被覆盖度与温度的相关系数最大值为 0.85,最小值为 -0.82,区域整体相关系数平均值为 0.08,由图分析可知,气温植被被覆盖度的相关性在空间存在很大的差异,在渭河流域干流中下游、关中及陕北地区表现为大范围的负相关性,而在流域其他地区则呈现出大范围的正相关性;控制温度分析植被覆盖度与温度的偏相关性,偏相关系数最大值为 0.86,最小值为 -0.83,区域整体偏相关系数平均值为 0.07,且在空间域上与单独的相关性分析差异较小,结果表明温度与植被覆盖度的相关性受降水的影响很小;植被覆盖度与降水的相关系数最大值为 0.92,最小值为

-0.81,区域整体平均值为 0.30,在空间上呈现出东南负相关西北正相关的地域分布;控制气温,分析植被覆盖度与降水的偏相关性,偏相关系数最大值为 0.93,最小值为-0.79,区域整体均值为 0.31,其结果与单独分析降水与植被覆盖度的相关性差异较小,结果表明渭河流域降水与植被覆盖度的相关性受温度影响较小;由结果得出:2000—2019 年渭河流域植被覆盖度与气温整体呈现正相关性,在陕西地区存在正

负波动的情况,且在控制降水的情况下植被覆盖度与气温的相关性与偏相关性差异较小;与降水的相关性在空间域上呈现出在陕西中南部呈现负相关,而在渭河流域其他区域整体呈现正相关性,且在控制温度的情况下植被覆盖度与降水的相关性和偏相关性也差异较小,总体而言,渭河流域植被覆盖度与气温、降水的相关性与偏相关性均呈正相关性,其中与降水的相关性及偏相关性稍强于气温(图 6)。

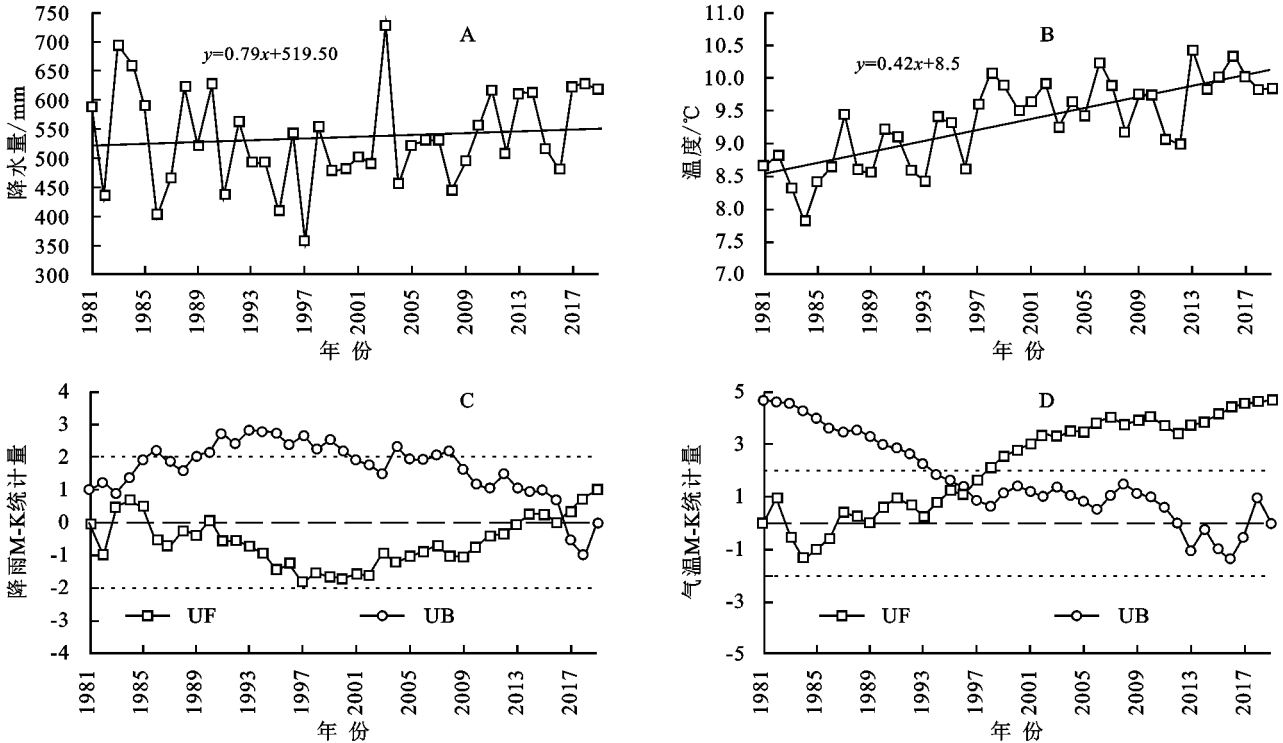


图 5 年均降水量、年均温度、降水 M-K 突变检测、气温 M-K 突变检测

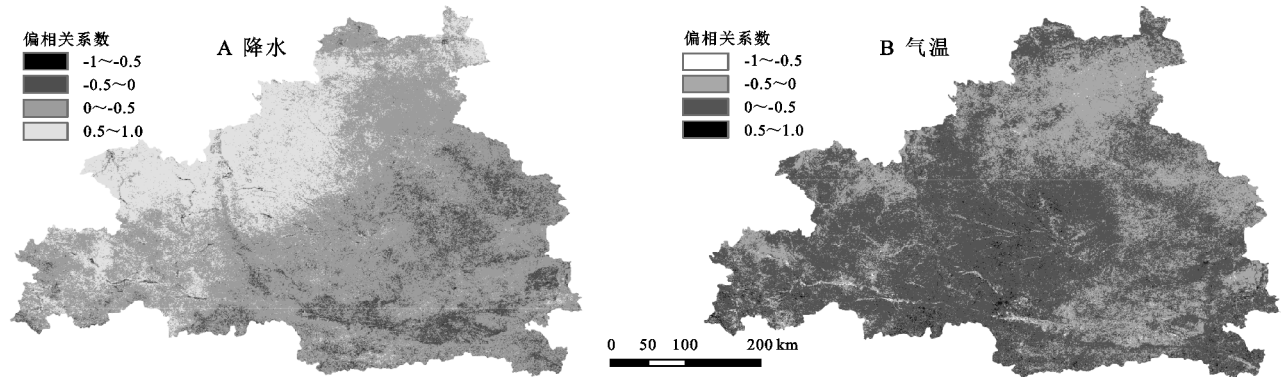


图 6 渭河流域降水和气温偏相关性

5 结论

(1) 2000—2019 年渭河流域整体植被覆盖度呈上升趋势,上升速率为 0.095/10 a,其中渭河流域陕北地区及西北宁夏甘肃地区植被覆盖度整体相对较低,渭河流域南部秦岭一带及泾河、洛河一带植被覆盖度相对较高,渭河沿线城市地区植被覆盖呈现显著性降低,有明显的差异性。

(2) 近 40 a 来,渭河流域气温呈显著性上升趋势,上升速率为 0.42℃/10 a,降水呈现弱增加趋势,但降水变化的随机性较大。渭河流域植被覆盖度与气温和降水整体均呈现为正相关性,在陕北等局部地区呈现负相关性;与降水的相关性在空间上表现为由东南向西北递增的空间分布,在陕西中南部地区呈现负相关性,陕北、宁夏及甘肃地区呈现为较强的正相关性。渭河流域植被覆盖度与气温和降水的偏相关

系数相较于相关系数差异并不明显。

(3) 渭河流域植被覆盖度与气温、降水的相关性存在明显的空间地域特征,且气温、降水之间对被覆盖度的影响都较为独立,关联性并不明显。

(4) 渭河流域植被覆盖的未来变化趋势表现为:流域整体呈现进一步改善趋势,其中沿渭河中下游城市密集地区植被覆盖未来变化趋势呈现为持续退化趋势。

#### 参考文献:

- [1] Wookey P A, Aerts R, Bardgett R D, et al. Ecosystem feed backs and cascaded processes: understanding the interlinking of Arctic and alpine systems in a changing environment [J]. *Global Change Biology*, 2010, 15 (5):1153-1172.
- [2] Chen B, Xu G, Coops N C, et al. Satellite-observed changes in terrestrial vegetation growth trends across the Asia-Pacific region associated with land cover and climate from 1982 to 2011 [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(11):1055-1076.
- [3] 丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,刘传胜.策勒绿洲植被覆盖动态变化遥感研究[J].*中国沙漠*,2003,23(1):79-83.
- [4] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(2):313-328.
- [5] 李秀花,师庆东,常顺利,等.1981—2001年中国西北干旱区 NDVI 变化分析[J].*干旱区地理*,2008,31(6):940-945.
- [6] 梅安新,彭望禄,秦其明,等.遥感导论[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [7] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): Impacts of climate changes and human activities [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51 (1):67-78.
- [8] 程红芳,章文波,陈锋.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].*国土资源遥感*,2008(1):13-18.
- [9] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4):542-553.
- [10] Chen F, Yuan Y, Zhang R, et al. A tree-ring based drought reconstruction (AD1760-2010) for the Loess Plateau and its possible driving mechanisms [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 122:82-88.
- [11] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.退耕还林(草)背景下渭河流域植被覆盖时空变化分析[J].*农业现代化研究*,2012,33 (4):470-474.
- [12] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报(长江、黄河) [N]. *中国水利报*,2001-12-27(002).
- [13] 乔晨,占车生,徐宗学,等.渭河流域关中段近 30 年植被动态变化分析[J].*北京师范大学学报:自然科学版*, 2011, 47(4):432-436.
- [14] 傅志军,黄蓉,周毓栋,等.基于 NDVI 的渭河流域时空演变分析[J].*湖北农业科学*,2019,58(6):54-57.
- [15] 余东洋.渭河流域植被动态变化遥感时序分析及生态安全评价[D].西安:长安大学,2019.
- [16] 刘桂芳.黄河中下游过渡区近 20 年来县域土地利用变化研究[D].郑州:河南大学,2009.
- [17] 杜希溪.渭河流域气候舒适度变化特征及其对植被覆盖响应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [18] 陆一帆.近 30 年来渭河流域植被与气候变化互影响模式的探寻分析[J].*北京测绘*,2016(5):7-12.
- [19] 张成才,姜洋,李颖,等.基于像元二分模型的伏牛山地区植被覆盖度变化[J].*水土保持研究*,2020,27(3):301-307.
- [20] Jing X, Yao W Q, Wang J H, et al. A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing's mountainous areas during the last 20 years [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 54(3/4):1079-1085.
- [21] 宋怡,马明国.基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J].*遥感学报*,2008,12(3):499-505.
- [22] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J].*生态学报*,2015,35(16):5331-5342.
- [23] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].*地理学报*,2012,67(7):960-970.
- [24] 白子怡,薛亮,张翀.基于土壤湿度与植被覆盖变化的黄土高原生态恢复项目适宜性评价[J].*水土保持研究*,2019,26(4):292-298,379.
- [25] 周旗,张海宁,任源鑫.1961—2016 年渭河流域极端降水事件研究[J].*地理科学*,2020,40(5):833-841.
- [26] 张林齐,任立良,江善虎,等.1982—2015 年渭河流域植被变化特征及气候因素影响[J].*水文*,2018,38(2):66-72.
- [27] 陆阳,尹剑,邹逸江,等.淮河流域近 50 年来气候变化及突变分析[J].*世界科技研究与发展*,2016,38(4):814-820.
- [28] 李应鑫,李石华,彭双云.云南省九大高原湖泊流域 NDVI 时空演变及其与气候的响应关系[J].*水土保持研究*,2020,27(4):192-200.
- [29] 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.