黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应

陆 荫，张 强，李晓红，杨淑霞，杨 青
（甘肃省环境监测中心站，甘肃 兰州 730020）

摘　要：[目的] 分析黄河流域甘肃段 2000—2018 年植被覆盖度变化的时空演变规律，探讨该区域植被覆盖度的变化对气候的响应机制，为该区域生态环境与社会经济的协调可持续发展和进一步落实生态环境保护、建设及恢复提供科学依据。[方法] 基于 2000—2018 年的 MODIS NDVI 数据、气象数据，采用线性趋势分析和相关性分析等方法，对黄河流域甘肃段植被覆盖度的时空变化特征及与气候因子之间的关系进行分析。[结果] ①空间上，近 19 a 研究区植被覆盖度自西南向东北在不断降低，以甘南州的植被覆盖状况最好；植被覆盖度改善面积占 36.64%，主要分布于兰州市北部、临夏州、定西市、庆阳市、平凉市大范围区域、天水市南部等，而退化面积占 4.2%，主要集中于甘南州等地区。②时间上，研究区植被覆盖度以 2013 年为界呈现“先持续增加后波动减少”的变化趋势，但整体在不断增加；以平凉市的增加速度最快，平均每年增长 0.96%。③研究区植被覆盖度对降水量变化的响应敏感，与降水量呈现显著的正相关关系。[结论] 研究区植被覆盖度空间差异明显，2000—2018 年植被以改善为主，降水是影响这些区域植被改善的有利因素，降水状况的改善对研究区生态环境建设与修复至关重要。

关键词：植被覆盖度；时空变化；气候因子；相关分析；黄河流域
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)02-0232-07　　**中图分类号**：S812.1

文献参数：陆荫，张强，李晓红，等. 黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J]. 水土保持通报，2020，40(2)：232-238. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.034；Lu Yin, Zhang Qiang, Li Xiaohong, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its response to climate factors in Gansu section of Yellow River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 232-238.

Temporal and Spatial Variation of Vegetation Coverage and Its Response to Climate Factors in Gansu Section of Yellow River Basin

Lu Yin, Zhang Qiang, Li Xiaohong, Yang Shuxia, Yang Qing
(*Gansu Province Environment Monitoring Center*, *Lanzhou*, *Gansu* 730020, *China*)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial evolution of vegetation coverage change from 2000 to 2018 was analyzed, and the response mechanism of vegetation coverage to climate change was clarified in Gansu section of the Yellow River basin, in order to provide scientific basis for the coordinated and sustainable development of ecological environment and social economy in this region and for the further implementation of ecological environment protection, construction and restoration. [Methods] Based on the MODIS NDVI data and meteorological data from 2000 to 2018, linear regression and correlation analysis method was used to analyze the temporal and spatial variation of vegetation coverage and its relationship with climate factors in Gansu section of the Yellow River basin. [Results] The vegetation coverage was decreasing from southwest to northeast in the past 19 years, and Gannan Prefecture had the best vegetation cover. The improved area of vegetation coverage accounted for 36.64%, which was mainly distributed in the north of Lanzhou, Linxia Prefecture, Dingxi City, Qingyang City, Pingliang City and the south of Tianshui City, while the degraded area accounted for 4.2%, which was mainly concentrated in Gannan Prefecture. The vegetation coverage in

收稿日期：2019-12-17　　**修回日期**：2020-03-02
资助项目：甘肃省青年科技基金计划项目“基于无人机技术的甘南草地植被状况监测”(18JR3RA024)
第一作者：陆荫(1973—)，女(汉族)，河南省焦作市人，本科，高级工程师，主要从事生态环境质量监测与评价。Email：luyin_8682935@163.com。
通讯作者：张强(1987—)，男(汉族)，甘肃省武威市人，本科，工程师，主要从事生态环境监测方面的研究。Email：zq11292808@gmail.com。

the study area showed a trend of continuous increase before 2013 and then decreased in fluctuation afterward, but it was increasing as a whole. Pingliang City was the fastest growing city, with an average annual growth rate of 0.96 per year. The vegetation coverage was sensitive to precipitation change in the study area, which showed a significant positive correlation with precipitation. [Conclusion] The spatial difference of vegetation cover in the study area was obvious. The vegetation was mainly improved from 2000 to 2018. Precipitation is a favorable factor affecting the improvement of vegetation, and the improvement of precipitation is very important for the construction and restoration of ecological environment in the study area.

Keywords: vegetation coverage; temporal and spatial variation; climate factors; correlation analysis; Yellow River Basin

植被信息是研究全球变化和生态环境的重要参考数据，对植被生长展开时间序列上的动态监测能够反映出其所处的生态环境状况及变化[1-3]。植被覆盖度指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影占区域总面积的百分比，是监测区域生态环境变化的重要指标，能够间接反映区域的气候变化[2-4]。目前利用遥感技术动态监测植被覆盖的技术已越发成熟，估算方法也趋于完善，直接利用遥感数据产品并借助模型可以实现对区域植被覆盖的有效估算[5-7]。

植被覆盖的演变是自然与社会经济因素综合作用的产物，在有关地表植被覆盖与气候因子的相关性研究方面，主要集中在 NDVI 或植被覆盖度变化对降水和气温的响应[8-19]。Xu 等[10]研究中国干旱区新疆植被变化对气候的响应发现降水和气温对植被的影响存在地区差异及植被类型差异，且具有延迟效应。Park 和 Sohn[11]对东亚地区植被变化的研究表明在 50°N 以南的干旱、半干旱地区植被变化的原因在于局部降水的突变。Liu 等[12]对全球植被覆盖变化的研究认为 1982—2004 年植被改善与气候变暖密切相关，随后二者关系逐渐减弱，降水与植被变化呈正相关，2005 年后相关性更明显，特别在干旱地区。李登科等[13]分析了退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应，发现退耕还林等生态建设工程的实施一定程度上降低了植被生长对气候因子的敏感性。韩飞飞等人[14]研究发现阿勒泰地区全区 66.71% 的区域植被覆盖度变化与气温呈负相关。赵玉[15]发现在月尺度上渭南市植被覆盖变化与降雨量和气温相关系数较高且对降水量的响应更敏感。张斯琦等人[16]分析柴达木盆地 2000—2015 年植被覆盖度变化与环境因子的关系发现降水贡献最大且气温主要通过影响蒸散发等间接影响植被覆盖度。陈金牛、宋鹏飞等[17-18]研究发现气温增加对植被覆盖变化影响较降水更加明显。金凯等[19]研究中国 1982—2015 年植被覆盖变化与气候的关系，发现在不同地区植被覆盖对气温和降水变化的响应有很大差异且干旱和半干旱地区的植被覆盖对降水变化较敏感。以上研究表明，受地形、区位等影响，不同区域的植被覆盖度对气候变化的响应差异明显。

黄河流域上游甘肃陇中、陇东黄土高原植被覆盖较低[20-21]，陇中黄土高原丘陵沟壑区自然环境恶劣，水土流失严重，是典型的黄土高原生态脆弱区，也是我国生态恢复的难点和重点区域[22-23]。本文通过研究黄河流域甘肃段不同时间尺度植被覆盖变化及对气候因子的响应，旨在宏观把握该区域 2000—2018 年植被覆盖的时空演变，更加明确气候变化背景下该区域植被覆盖对气温和降水的时空响应规律，为区域生态环境建设和规划提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄河流域甘肃段位于黄河流域上游，是我国重要的水源涵养区。在行政区划上，黄河流域甘肃段跨越甘肃省 9 个市州，分别为兰州市、天水市、白银市、定西市、庆阳市、平凉市、临夏州、甘南州、武威市，总面积为 1.46×10^5 km^2，约占全省总面积的 32%[24]。黄河流域甘肃段平均海拔约 2 200 m，地势西高东低，自西南向东北依次为甘南高原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区、陇东黄土高原区，其中甘南高原区是黄河上游重要的水源补给区，陇中与陇东黄土高原区为黄河重要的泥沙来源地。受地形特征影响，该段气候较为敏感，自西向东为甘南高寒湿润区、陇中北部冷温带半干旱区、陇中南部冷温带半湿润区[25]。

1.2　数据来源

研究区遥感数据 MODIS/NDVI 来源于美国国家航空航天局(https://earthdata.nasa.gov/)，本研究选用的是 2000—2018 年 MOD13Q1 产品，其时间分辨率为 16 d，空间分辨率为 250 m。具体选取原则：选择每年 5—9 月为研究时相，因该时间段为植被的主要生长季，植被生长茂盛、云量较少且持续性强，能较好的反映区域植被覆盖度的变化情况。预处理方面基于 MRT 工具对该区域原始数据进行拼接、重投影等操作，之后对每年生长季的时相数据进行最大

值合成，得到每年最大 NDVI 数据以此来计算植被覆盖度。

气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)，选择研究区及周边 50 个气象站点 2000—2018 年的逐日气温与逐日降水量数据集。基于 ANUSPLIN 软件对气象数据进行月尺度插值，得到研究区月平均温度与月降水量的栅格数据。

为保证试验结果的精确度，所有数据经处理统一时间序列为 2000—2018 年，空间分辨率为 250 m，投影类型为 WGS-1 984-Albers 坐标系统。

1.3 研究方法

1.3.1 *植被覆盖度估测* 像元二分模型操作简便，且精度高，是一种被广泛应用的植被覆盖度估算方法。其原理[26]是以一个像元内的全部遥感影像信息为数据源，将像元表达为由绿色植被成分贡献的信息 S_v 以及由土壤成分所贡献的信息 S_s 两部分组成，设像元的植被覆盖度为 f_v，则该混合像元的植被成分贡献的信息 S_v 可以表达为：

$$S_v = f_v \cdot S_{\mathrm{veg}}$$

而该混合像元的土壤成分贡献的信息 S_s 可以表示为：

$$S_s = (1 - f_v) \cdot S_{\mathrm{soil}}$$

将 NDVI 与该模型结合，基于 ENVI 软件截取研究区范围内植被 NDVI 对应 5%与 95%的阈值，分别作为 $\mathrm{NDVI_{soil}}$，$\mathrm{NDVI_{veg}}$，最终得到基于 NDVI 的植被覆盖度模型：

$$f_v = (\mathrm{NDVI} - \mathrm{NDVI_{soil}})/(\mathrm{NDVI_{veg}} - \mathrm{NDVI_{soil}})$$

式中：$\mathrm{NDVI_{soil}}$ 为纯土壤像元的植被指数值，理论上接近于 0，但由于大气效应、光照、土壤水分等因素的影响，其值一般在 −0.1～0.2 之间变化；$\mathrm{NDVI_{veg}}$ 为纯植被像元的植被指数值，理论上接近于 1，但也会随着时空及植被类型等的变化而变化。

1.3.2 *趋势分析法* 一元线性回归分析法通过模拟每个像元的变化趋势来反映其在区域内的空间变化特征[27]。基于 2000—2018 年黄河流域甘肃段每年生长季的平均植被覆盖度，在像元尺度上计算植被覆盖度的变化斜率 S：

$$S = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(i \cdot f_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} f_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n})}$$

式中：S 为回归斜率；n 为监测年数；i 为年份；f_i 为第 i 年对应的植被覆盖度。其中，回归斜率为正，即植被覆盖度呈现增加的趋势，反之植被覆盖度呈现减少的趋势。结合 F 检验法，取显著性水平 0.05 与 0.01对该回归方法进行显著性检验。

1.3.3 *相关分析法* 借鉴穆少杰等[28]对植被 NPP 与气候因子之间的相关分析，本文基于像元尺度，分析植被覆盖度与平均气温和降水量的相关性，采用 Pearson 相关系数表示两因子之间的相关性。相关系数 R 的计算公式为：

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

式中：R 为变量 x 与 y 的相关系数；x_i 为第 i 年的气候因子(平均气温或降水量)；y_i 为第 i 年的植被覆盖度；$\bar{x}$，$\bar{y}$ 为变量 x，y 的多年平均值。

2 结果与分析

2.1 黄河流域甘肃段植被覆盖度的空间分布

基于 MODIS NDVI 基础数据，利用像元二分模型计算了研究区生长季的植被覆盖度，并对其进行分级[29]：极低覆盖度(f_c<10%)、低覆盖度(10%<f_c<35%)、中覆盖度(35%<f_c<55%)、中高覆盖度(55%<f_c<75%)、高覆盖度(f_c>75%)。图 1 为 2000—2018 年黄河流域甘肃段植被覆盖度的空间变化图。由图 1 可知，黄河流域甘肃段近 19 a 的平均植被覆盖度空间分布差异明显。其中甘南高原区、定西南部区域、天水市南部边缘、平凉市西南部及庆阳市东部等区域的植被覆盖度最高，占总面积的 31.74%；植被中高覆盖度主要分布于临夏州与天水市中部、平凉市东西部、庆阳市南部部分区域，占总面积的 16.43%；黄河流域甘肃段中部区域及庆阳市西部与北部少数区域的植被覆盖类型为中覆盖度，占总面积的 21.50%；植被低覆盖主要集中于黄河流域甘肃段的北部(即兰州市、白银市东南部及庆阳市西北部)，占总面积的 21.14%；而白银市北部区域植被覆盖度最低，占总面积的 9.2%。

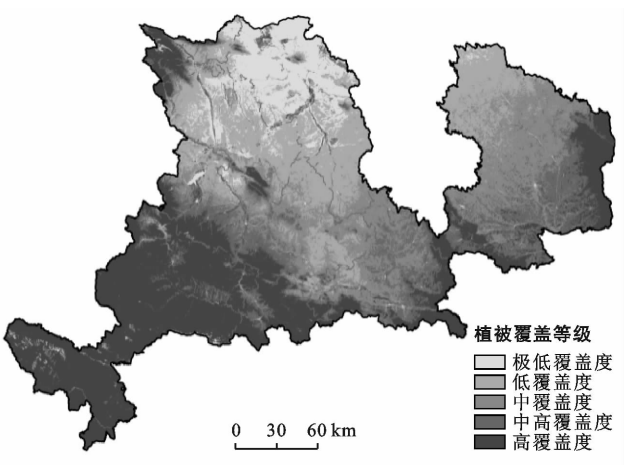

图 1 研究区 2000—2018 年植被覆盖度空间分布

图 2 为 2000—2018 年黄河流域甘肃段植被覆盖度变化及显著性检验结果空间分布。2000—2018 年黄河流域甘肃段的植被覆盖度呈现改善的趋势，平均改善面积为 36.64%。其中兰州市北部、临夏州中部、定西市北部与中部、庆阳市多数区域、天水市南部、平凉市东西部区域等的植被覆盖度改善显著（$p<0.05$，$p<0.01$），所占面积比分别为 12.54%，24.1%。植被覆盖度显著减少与极显著减少的区域所占面积比分别为 1.96%和 2.24%，主要位于甘南州地区。

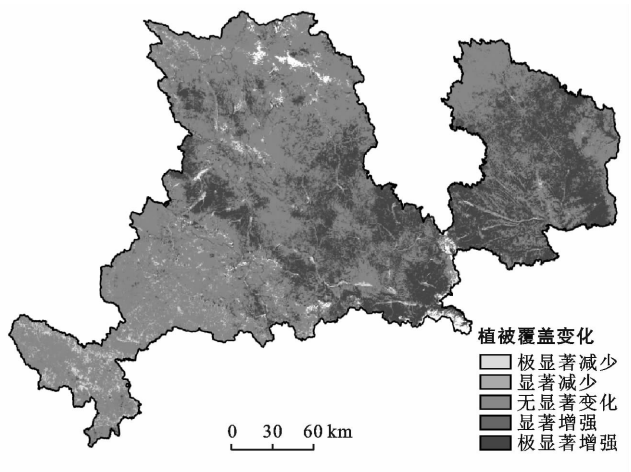

图 2　研究区 2000—2018 年植被覆盖度空间变化趋势检验

2.2　黄河流域甘肃段植被覆盖度年际变化

图 3 为 2000—2018 年黄河流域甘肃段及各市州平均植被覆盖度的年际变化特征。从图 3 可以得到，研究区近 19 a 的植被覆盖度维持在 47.47%～61.05%之间，整体呈增加趋势，年增速为 0.53%。年均植被覆盖度在 2000 年最低（47.47%），2013 年最高（61.05%），多年平均值为 54.26%，可见该区域植被覆盖的总体水平较高，且增长速度较快。植被覆盖度高于研究区多年均值的市州为甘南州、天水市、平凉市、临夏州及定西市，其多年均值分别为 88.08%，64.46%，64.21%，56.27%和 55.21%，以甘南州的覆盖状况最好；而武威市、庆阳市、兰州市、白银市的平均植被覆盖度低于研究区多年均值，其多年均值分别为 52.97%，50.61%，26.85%和 15.12%，以白银市的植被覆盖状况最差。

从具体变化趋势来看，研究区植被覆盖度的变化趋势可分为以下两个阶段：2000—2013 年为植被覆盖度持续增加阶段，即由 2000 年 47.47%增加至 2013 年 61.05%，这与该段时间甘肃省大力实施退耕还林、“三北”防护林、“三化”草原治理等生态保护与建设工程密切相关[30]；2013—2018 年为植被覆盖度波动减少阶段，其中由于持续性高温及异常大气环流等因素的影响[31]，植被覆盖度在 2016 年达到低值 52.56%，而 2018 年回升至 60.18%。从各市州的变化来看，除甘南州与武威市的植被覆盖度波动减少以外，其余市州的植被覆盖度均呈现增加的趋势，其中以平凉市的增加速度最快，为 0.96/a，其次为庆阳市与天水市，分别为 0.76/a，0.75/a，而兰州市的增加速度最慢，仅为 0.32/a。

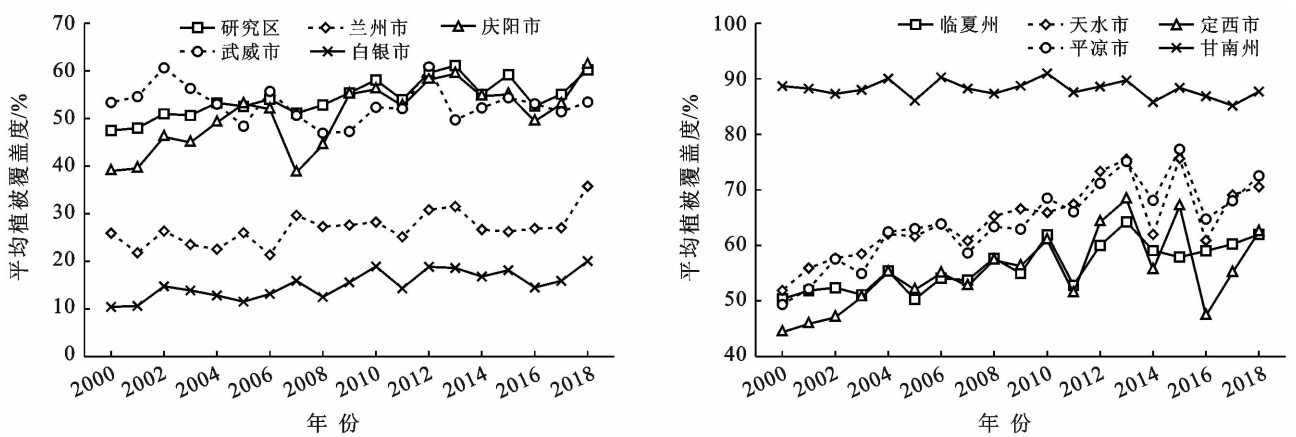

图 3　研究区及不同市州 2000—2018 年植被覆盖度年际变化

2.3　黄河流域甘肃段植被覆盖度与气候因子的关系

通过区域统计得到黄河流域甘肃段植被覆盖度与降水、气温在生长季及春、夏、秋 3 个季节尺度上的相关性。表 1 为近 19 a 黄河流域甘肃段平均植被覆盖度与降水量的相关性分析结果。由表 1 可知，研究区平均植被覆盖度与降水量在不同时间尺度上整体呈现显著正相关性，其中植被覆盖度与生长季降水量的相关性最高，相关系数为 0.702，达极显著水平（$p<0.01$）；其次与夏季降水量的相关性较好，相关系数为 0.684，达极显著水平（$p<0.01$）。植被覆盖度与春季降水量的相关系数为 0.570，达显著水平（$p<0.05$）；而与秋季降水量的相关性差，差异不显著，相

关系数仅为 0.049。

表 2 为近 19 a 黄河流域甘肃段平均植被覆盖度与气温的相关性分析结果。不同阶段植被覆盖度与气温整体呈正相关,但相关性不显著。其中植被覆盖度与春季及秋季气温的相关性最好,相关系数均达到 0.452,植被覆盖度与生长季均温、夏季均温的相关系数分别为 0.381,0.374。

表 1 植被覆盖度与降水量的相关系数

阶段降水量	植被覆盖度与降水量的相关性
生长季降水量	0.702**
春季降水量	0.570*
夏季降水量	0.684**
秋季降水量	0.049

注:* 和 ** 分别表示相关性显著($p<0.05$)和极显著($p<0.01$)。下同。

进一步从像元尺度上分析黄河流域甘肃段植被覆盖度与生长季降水量、生长季均温的空间相关性。从图 4 可以看出,2000—2018 年黄河流域甘肃段植被覆盖度与生长季降水量的相关系数介于−0.805～0.888 之间,整体上呈现正相关。显著性检验发现,植被覆盖度与降水相关性极显著($p<0.01$)和显著($p<0.05$)的像元比例分别达到 3.4%和 11.6%。呈显著正相关的区域主要分布在兰州市西南部、临夏州东部、甘南州西北角、白银市南部以及定西市中部、庆阳市西部较大范围,这些区域植被覆盖度与降水的相关系数普遍在 0.5～0.8 之间,部分达到 0.8 以上。而结合该区域 2000—2018 年植被覆盖度空间变化趋势来看,呈显著正相关的区域其植被覆盖度也主要呈现显著增加的趋势,说明该阶段降水是影响这些区域植被改善的有利因素。

表 2 植被覆盖度与气温的相关系数

阶段均温	植被覆盖度与气温的相关性
生长季均温	0.381
春季均温	0.452
夏季均温	0.374
秋季均温	0.452

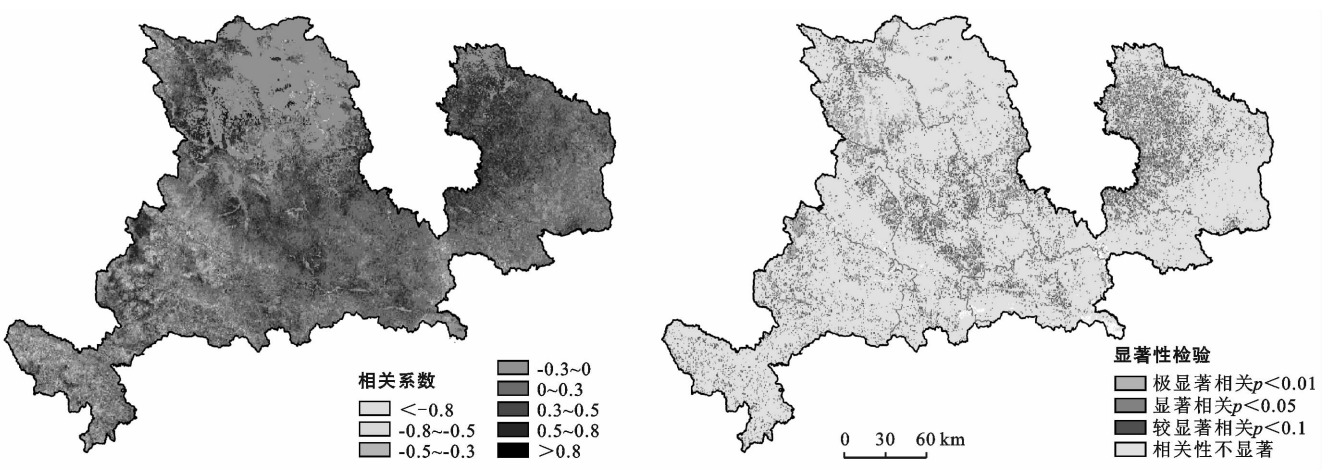

图 4 研究区 2000—2018 年植被覆盖度与降水相关系数及显著性检验空间分布

从图 5 可以看出,2000—2018 年黄河流域甘肃段植被覆盖度与生长季均温的相关系数介于−0.995～0.922 之间,整体上正负相关并存,以正相关为主。显著性检验发现,植被覆盖度与气温相关性极显著($p<0.01$)的像元比例达到 2.9%,相关性显著($p<0.05$)和较显著($p<0.1$)的像元比例分别达到 7.7%和 12.8%。呈显著正相关的区域集中分布在兰州市西南部,相关系数普遍在 0.5～0.8 之间,部分达到 0.8 以上。呈显著负相关的区域主要分布在庆阳市北部与东部,相关系数普遍在−0.5～−0.8 之间。

3 讨论

由于甘南地区的植被类型以高寒草甸草原为主,该地区植被丰厚且长势较好,因而植被覆盖度较高;定西市、天水市、平凉市和庆阳市的植被类型以农业与草原为主,植被生长较好,而白银市北部与兰州市部分区域由于水资源极度匮乏、沙漠化严重,该地区植被生长状况较差,因而植被覆盖度最低。由此形成了黄河流域甘肃段植被覆盖度自西南向东北不断递减的分布态势。

近 19 a 的黄河流域甘肃段植被覆盖度整体呈现改善的趋势。由于甘南玛曲县与碌曲县草场严重超载过牧、鼠虫害及毒杂草的影响,该区植被明显退化,这与王伟军等[32-34]的研究结果基本一致。2000 年以来政府贯彻的植被建设政策和当地人们的植树造林等活动,一定程度上有效促进了植被的恢复[35]。胡

春艳等[36]的研究表明 2000—2015 年甘肃庆阳市、平凉市中部和东南部、天水市与定西市多数区域、临夏与兰州部分区域的植被覆盖明显改善,这与本文陇中、陇东地区的植被显著改善结果相一致。

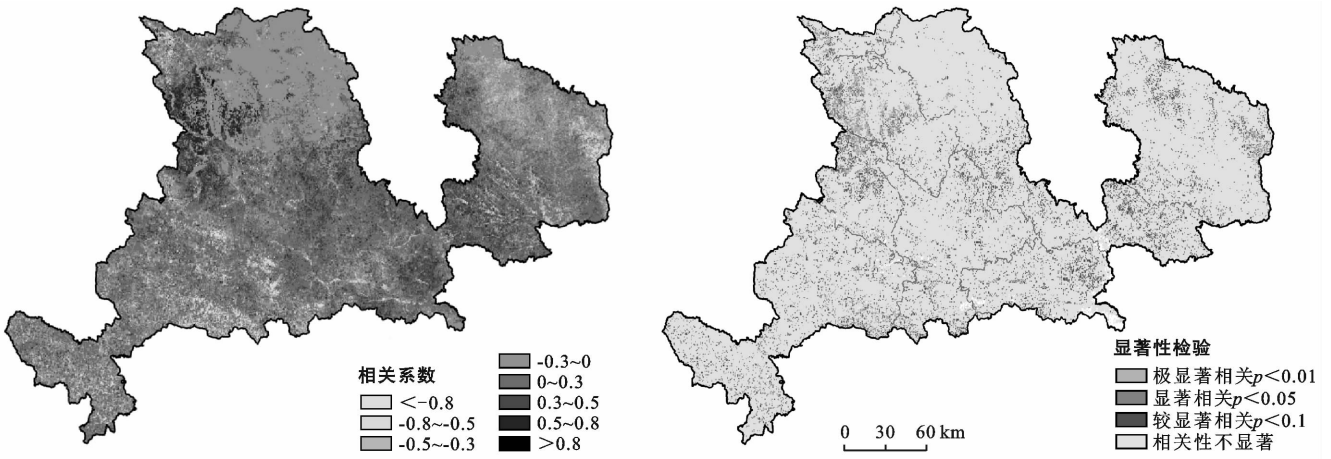

图 5　研究区 2000—2018 年植被覆盖度与气温相关系数及显著性检验空间分布

2000—2018 年植被覆盖度与气温呈正相关,但相关性不显著,这可能是因为黄河流域甘肃段的地貌主要以黄土高原区为主,该地区气候干旱少雨,植被对气温的响应较低。在空间上,兰州市西南部的植被覆盖度与气温显著正相关,而庆阳市北部与东部区域的植被覆盖度与气温呈显著负相关。19 a 植被覆盖度与降水量也呈显著正相关,且呈显著正相关的区域主要分布在兰州市西南部、临夏州东部、甘南州西北角、白银市南部以及定西市中部、庆阳市西部等区域,这可能是因为以上区域的海拔较低,温度对植被生长限制较小,因而植被覆盖度与降水量呈显著正相关,降水是影响这些区域植被改善的有利因素。杨尚武[20]的研究选用 1999—2013 年的 SPOT NDVI 数据与气候因子进行相关性分析,得到甘肃陇中、陇东黄土高原干旱区,由于降水稀少、气温高、蒸发量大,植被对降水的响应高于气温,这与本文研究结果相一致。

4　结 论

(1) 2000—2018 年期间,黄河流域甘肃段多年平均植被覆盖度的空间分布差异明显。甘南州及周边少数区域的植被覆盖度最高,其次为临夏州与天水市中部、平凉市东西部、庆阳市部分南部区域,植被为中高覆盖度,而白银市北部区域的植被覆盖度最低。

(2) 2000—2018 年期间,黄河流域甘肃段的植被覆盖度整体呈现改善的趋势,空间上以兰州市北部、临夏州中部、定西市北部与中部、庆阳市多数区域、天水市南部、平凉市东西部区域等的植被改善最为显著($p<0.05$,$p<0.01$),而甘南州地区 4.2%的植被明显退化($p<0.05$,$p<0.01$)。

(3) 2000—2018 年期间,黄河流域甘肃段的植被覆盖度整体呈现增加的趋势,时间上以 2013 年为界呈现"先持续增加后波动减少"的变化趋势。其中 2000 年的植被覆盖度最低,为 47.47%,而 2013 年植被覆盖度最高,达到 61.05%。分地区来看,甘南州的植被覆盖状况最好,白银市最差,19 a 来除甘南州与武威市的植被覆盖度波动减少以外,其余市州的植被覆盖度均呈现增加的趋势,其中以平凉市的增加速度最快,平均每年增长 0.96%。

(4) 2000—2018 年期间,降水量对黄河流域甘肃段植被覆盖度的影响要大于气温,其中植被覆盖度与生长季降水量呈显著正相关,相关系数达到 0.702($p<0.01$);与气温呈正相关,但相关性不显著。在空间上,陇中干旱区域的植被覆盖度对生长季降水量的响应高于气温生长季均温。

[参 考 文 献]

[1] 陈云浩,李晓兵,史培军,等.北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J].植物生态学报,2001,25(5):588-593.

[2] 邹洪坤.湖北省植被覆盖度动态变化及其对气候变化的响应[D].湖北 武汉:武汉大学,2018.

[3] Wang Hongwei, Qi Yuan, Huang Chunlin, et al. Analysis of vegetation changes and dominant factors on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2019,11(2):150-158.

[4] Ringrose S, Matheson W, Wolski P, et al. Vegetation cover trends along the Botswana Kalahari transect [J]. Journal of Arid Environments, 2003,54(2):297-317.

[5] 邓友志.漓江流域植被覆盖度遥感估算模型及动态变化研究[D].广西 桂林:桂林理工大学,2013.

[6] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.基于 Google Earth Engine

分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].中国环境科学,2019,39(11):4804-4811.

[7] Zhang Yahai, Ye Aizhong. Spatial and temporal variations in vegetation coverage observed using AVHRR GIMMS and Terra MODIS data in the mainland of China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2020,41(11):4238-4268.

[8] Liu Qun, Yang Zhaoping, Han Fang, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: A case study in the Tianshan Mountains, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(16):1189.

[9] Revadekar J V, Tiwari Y K, Kumar K R. Impact of climate variability on NDVI over the Indian region during 1981—2010 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012,33(22):7132-7150.

[10] Xu Yufeng, Yang Jing, Chen Yaning. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2016,126(1/2):213-222.

[11] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010,115(14):101-125.

[12] Liu Ya, Li Yan, Li Shuangcheng, et al. Spatial and Temporal Patterns of Global NDVI Trends: Correlations with Climate and Human Factors [J]. Remote Sensing, 2015,7(10):13233-13250.

[13] 李登科,王钊.退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J].生态学杂志,2019,39(1):1-10.

[14] 韩飞飞,闫俊杰,郭斌.阿勒泰地区植被覆盖度及ET对气温变化的响应[J].干旱区地理,2019,42(6):1-17.

[15] 赵玉.渭南市植被覆盖变化及其与气候因子的相关性[J].生态科学,2019,38(5):92-103.

[16] 张斯琦,陈辉,宋明华,等.2000—2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J].干旱区地理,2019,42(5):1124-1132.

[17] 陈金牛,毛学刚,侯艳军.1982—2015年山西省忻州市植被覆盖变化与气候因子的相关性分析[J].台湾农业探索,2019,3(3):28-37.

[18] 宋鹏飞,季民,刘泽群,等.山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J].测绘科学,2020,45(3):1-8.

[19] 金凯.中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[20] 杨尚武.黄河流域不同时间尺度植被覆盖变化及与气候因子的关系[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2015.

[21] 温小洁.黄河中上游植被覆盖时空演变对退耕还林(草)工程的动态响应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[22] 陆佩毅.陇中黄土丘陵沟壑区植被恢复建设与对策探讨[J].甘肃水利水电技术,2011,47(3):62-63.

[23] 马学成.陇中黄土丘陵沟壑区县域社会生态系统恢复力时空变化及其影响因素[D].甘肃 兰州:兰州大学,2019.

[24] 常继青,牛最荣.甘肃黄河流域与疏勒河流域降水径流变化特性对比分析[J].水文,2014,34(5):94-96.

[25] 姚玉璧,李耀邦,张谋草,等.陇东黄土高原气候对全球变暖的响应及其对林果的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2005,29(4):73-77.

[26] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003.

[27] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(5):1111-1117.

[28] 穆少杰,李建龙,周伟,等.2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J].生态学报,2013,33(12):3752-3764.

[29] 游浩妍,骆成凤,刘正军,等.基于MODIS植被指数估算青海湖流域植被覆盖度研究[J].遥感信息,2012,27(5):55-60.

[30] 崔丹丹,张耀南,陈广庭.2001—2010年甘肃省植被覆盖的时空变化[J].中国沙漠,2014,34(4):1161-1166.

[31] 叶培龙,刘新伟,赵文婧,等.2016年8月甘肃省持续性高温过程及其异常大气环流特征[J].高原气象,2019,38(6):1283-1292.

[32] 王伟军,赵雪雁,万文玉,等.2000—2014年甘南高原植被覆盖度变化及其对气候变化的响应[J].生态学杂志,2016,35(9):2494-2504.

[33] 王胜忠.甘南州天然草地退化及生态保护对策分析[J].农业科技与信息,2009,(03):48-49.

[34] 张晶.甘肃省甘南牧区草原法实施状况及影响[D].甘肃 兰州:兰州大学,2010.

[35] 杨尚武,张勃.基于SPOT NDVI的甘肃河东植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].生态学杂志,2014,33(2):455-461.

[36] 胡春艳,卫伟,王晓峰,等.甘肃省植被覆盖变化及其对退耕还林工程的响应[J].生态与农村环境学报,2016,32(4):588-594.