

DOI: 10.5846/stxb202104271108

解晗, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣, 于裴洋. 2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2022, 42(11): 4536–4549.

Xie H, Tong X J, Li J, Zhang J R, Liu P R, Yu P Y. Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000—2018. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4536–4549.

2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应

解 晗¹, 同小娟^{1,*}, 李 俊², 张静茹¹, 刘沛荣¹, 于裴洋¹

¹ 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

² 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

摘要: 黄河流域位于我国干旱、半干旱地区, 生态环境脆弱, 探究其植被指数变化和对气候因子的响应对该地区生态建设具有重要意义。基于黄河流域 2000—2018 年 MODIS 归一化植被指数、增强型植被指数和气象数据, 利用最大值合成法、趋势分析和相关分析等方法, 分析了两种植被指数的时空变化特征及受气候因子的影响机制, 探讨了 NDVI 与 EVI 在反映植被变化和对气候因子响应的差异。结果表明: 2000—2018 年, 黄河流域地区植被 NDVI、EVI 分别以 0.059/10a、0.038/10a 的变化率增加, 空间上以显著改善为主, 面积占比分别为 77.13% 和 75.27%, 大多分布在 1000—1500 m 海拔处, 中游地区改善较为良好, 林地改善率最高。显著退化区域较小, 主要分布在巴颜喀拉山西北部、西宁市、银川市、包头市、呼和浩特市、太原市、西安市及关中盆地和洛阳市周边, 建设用地退化率最高。在生长季期间, 植被指数变化与气温和降水以正相关为主, 气温滞后时间为 1 个月, 降水滞后时间为 3 个月, 都为草地最为相关; 与辐射之间为负相关, 滞后时间为 3 个月, 其中林地最为相关。在 0.05 显著性检验水平下, 驱动黄河流域生长季植被变化的主要气候因子为降水和辐射。整体上看降水对该地区植被变化影响较大。在时间和空间上, 黄河流域地区 NDVI 比 EVI 反应植被变化更敏感, 且与降水和辐射的相关性更高。

关键词: 黄河流域; 植被指数; 气候因子; NDVI; EVI

Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000—2018

XIE Han¹, TONG Xiaojuan^{1,*}, LI Jun², ZHANG Jingru¹, LIU Peirong¹, YU Peiyang¹

¹ School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The Yellow River Basin is located in the arid and semi-arid area of China, which ecological environment is fragile. The researches about vegetation index changes and its response to climate factors were significant to the ecological construction of the region. Based on the MODIS normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI) and meteorological data, we mainly used Maximum Value Composite (MVC), trend analysis, and partial correlation analysis to explore the characteristics of the spatio-temporal changes of vegetation cover and driving mechanism of climatic factors in the Yellow River Basin from 2000 to 2018. At the same time, the differences between the NDVI and EVI reflected variations of vegetation and their responses to climatic factors were discussed. Results showed that the temporal change rate of NDVI and EVI in the Yellow River Basin increased at 0.059/10 a and 0.038/10 a, respectively. In terms of space, the

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0608101); 国家自然科学基金(31872703, 31570617)

收稿日期: 2021-04-27; **网络出版日期:** 2022-02-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongxj@bjfu.edu.cn

main areas significantly improved, accounting for 77.13% and 75.27% of the area, respectively. Most of them were distributed at 1000—1500 m elevations, and the middle reaches have improved well. The improvement rate of forest land was higher than that in other areas. The degraded areas were relatively rare and mainly distributed in the northwestern Bayan Qula Mountain, Xining City, Yinchuan City, Baotou City, Hohhot City, Taiyuan City, Xi'an City, the Guanzhong Basin and the surrounding areas of Luoyang City. The degradation rate of construction land was higher compared with other areas. During the growing season, the change of vegetation index (VI) was positively correlated with air temperature and precipitation, the lag time of air temperature in the VI was one month, while in precipitation the lag time were three months. Among them, grassland showed the most significantly positive correlation. There was a negative correlation between radiation and vegetation index, and the time lag was about 3 months, among which the most relevant area was in forest land. At the significant level of 0.05, the precipitation and radiation driven the vegetation change during the growing season in the Yellow River Basin. On the whole, precipitation had a great influence on the change of vegetation in this area. In terms of temporal and spatial changes, the NDVI was more sensitive to vegetation change than EVI, and had a higher correlation with precipitation and radiation in the Yellow River Basin.

Key Words: the Yellow River Basin; vegetation index; climate factor; normalized difference vegetation index; enhanced vegetation index

气候变化对区域植被覆盖的影响是目前全球变化研究的热点问题之一。IPCC 第六次评估报告表明,过去十年中全球气温比 1850—1900 年平均高出约 1.1℃。气候变化会影响植被的生长变化特征,进而影响到生态系统的结构与功能等^[1],生态系统的变化反过来又会影响气候系统,从而加剧生态系统的气候变化。由于植物对环境的变化更加敏感,以至于气候变化最明显的表现就是地球上植被生长的变化。在长时间序列、大的空间尺度上,植被变化主要受气候条件控制,它可以客观地反映生态环境情况^[2]。

植被生长通过增加陆地生态系统碳汇、改变生物地球物理过程来缓解全球气候变暖。植被覆盖时空变化具有异质性,目前缺乏能在空间和时间上检测这些变化的观测,再加上从点向面观测的困难,因此,在大范围内地面观测难以检测植被变化^[3]。在大尺度上,通常采用遥感手段来研究植被变化。搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS),具有 36 个波段,计划中的数据产品共 44 种之多^[4]。其中,NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)与 EVI(Enhanced Vegetation Index)两种植被指数通常能够较为准确地反映植被覆盖变化情况^[5]。NDVI 存在高植被覆盖易饱和、大气干扰校正有限、易受树冠背景影响和最大合成法处理不能得到最佳像元等缺陷,而 EVI 是在 NDVI 基础上进行改进,在土壤背景和大气噪声方面进行了校正,改善了与不同覆盖程度植被的线性关系^[4],但在气候地理环境不同地区进行研究,二者存在各自优势^[6]。陈燕丽等^[7]研究发现在喀斯特地区,与 NDVI 相比,EVI 与除日照外的其它气候因子之间的相关性较高^[7]。张静茹等^[8]发现华北山地人工林的 NDVI 与夏季总初级生产力月均值的相关性高于 EVI^[8]。黄河流域由于其地理特殊性,大范围被黄土覆盖,植被稀疏,干旱少雨,EVI 是否比 NDVI 在反映地表植被状况更具优势尚需进一步研究。

黄河流域西接青藏高原,东邻华北平原,横跨黄土高原,主要分布于我国干旱与半干旱地区,地处中纬度地带,自然环境复杂,其发展对我国生态、经济有重大意义^[9],该地区还被认为是监测植被绿化的关键区域^[3]。同时,黄河流域又是我国生态环境敏感区,易受气候变化和人类活动的影响^[10],曾经一度植被退化严重。研究显示:20 年来黄河流域水资源总量减少,干旱和洪涝灾害等极端自然气候事件增加^[11—12]。植被生长受气候变化的影响,探究黄河流域植被覆盖变化及其对气候因子的响应机制对该地区的生态建设具有重要的意义。袁丽华等^[13]研究发现,2000—2010 年黄河流域植被指数西部和南部高、北部低的特点,且植被覆盖改善情况良好,呈现出持续改善的趋势。刘绿柳等^[14]分析了黄河流域 NDVI 与降水、气温两种气候因子的年际变化趋势和与植被的相关性,得出 NDVI 年较差与年均气温相关性不显著,草地、灌木区与年降水呈显著正相关。刘海等^[15]指出,黄河流域植被生长对降水的依赖性更强。田智慧等^[16]研究发现,近 20 年黄河流域生

长季植被改善良好,且受降水的影响大于受气温的影响。刘勤等^[17]研究得出,1961—2013 年黄河流域太阳辐射呈减弱趋势,且对该地区干旱度正向影响。太阳辐射作为植物光合作用的驱动力,也是驱动植被变化的因子之一^[18]。有关 NDVI 和 EVI 对气候因子响应的差异对理解黄河流域植被生长具有重要的意义。

当前研究植被指数与气候因子关系的方法有两种,分别为分析生长季内和生长季间期气候因子与植被之间的关系^[19—21]。本文基于黄河流域 2000—2018 年 MODIS NDVI 和 EVI 两种植被指数及气象数据,利用趋势分析法和偏相关分析方法对植被时间变化趋势与空间分布进行研究,分析了 NDVI 与 EVI 在黄河流域植被变化研究上的差异,探究生长季内植被指数变化对气温、降水、太阳辐射的滞后效应,揭示两种植被指数变化的时空异质性及受气候因子的影响机制,以期为黄河流域植被恢复提供理论依据,并为该区域生态环境发展提供理论支持。

1 研究区概况

黄河流域发源于青海省巴颜喀拉山,东临渤海,南达秦岭,北至阴山,流经青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省、山东省九个省份,在山东垦利县流入渤海,流域面积 79.45 万 km²,约占全国国土面积的 8.3%(图 1)。地处中纬度地带,受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂,流域内不同地区气候的差异显著,气候要素的年、季变化大。流域的大部分区域处于干旱与半干旱,易受到人类活动和气候的影响,生态环境脆弱。从整体来看,上游海拔高,地处高大山脉区域,多为林地;中游为地势比较平缓的内蒙古高原和黄土高原,为林地和草地居多;下游多是平原地貌,耕地比例较大。本研究中,黄河中上游流域边界按分水岭划分;黄河下游成地上悬河,按传统习惯加上灌区划分流域边界。

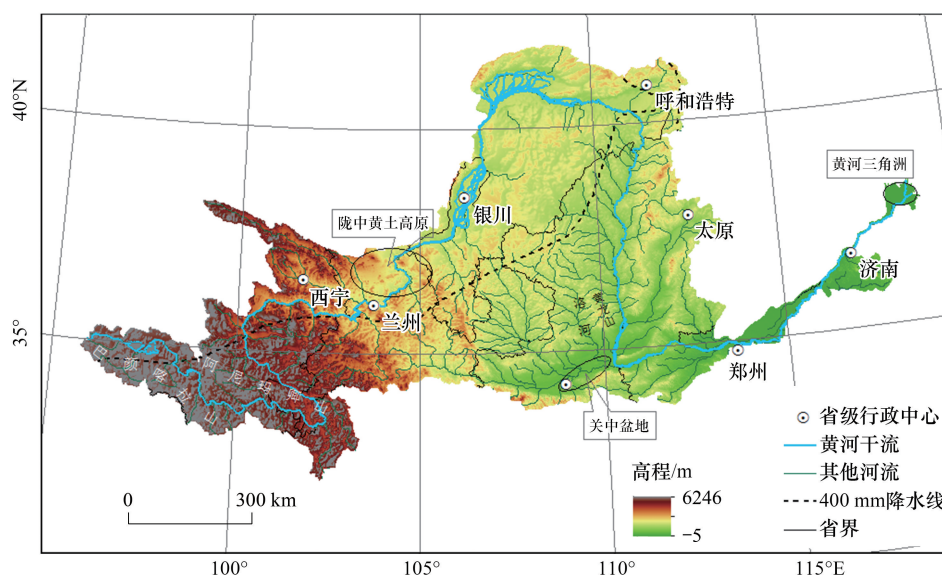


图 1 研究区高程图

Fig.1 Elevation map of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文主要对黄河流域生长季(4—10 月)植被指数的时空变化开展研究^[22—23]。黄河流域区域矢量图来自中国科学院地理科学与资源研究所水文室,NDVI 与 EVI 遥感数据来源于 NASA 官网(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)MOD13A2 数据集。时间序列为 2000—2018 年,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 16 d。在 MRT(MODIS ReProjection Tools)软件中经过格式转换和重投影后,采用最大值合成法(Maximum Value

Composites, MVC) 得到每月植被指数数据^[13,24], 选取指数值大于 0 的区域进行研究, 再经过计算得到每年生长季的月平均 NDVI 和 EVI 数据。

气温与降水数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 2000—2018 月值数据, 空间分辨率为 1 km^[25]。太阳辐射数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>) 全球高分辨率地表太阳辐射数据集 2000—2018 月值数据, 空间分辨率为 10 km, 重采样为 1 km^[26]。高程数据来自国际科学数据服务平台提供的 90 m 分辨率 SRTM 产品, 重采样为 1 km。土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 发布的中国土地利用遥感监测数据, 空间分辨率为 1 km。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen media 趋势分析

Theil-Sen media 趋势分析为非参数统计趋势分析方法^[27-28]。该方法在分析中不受到异常值影响, 且不要求数据服从正态分布, 避免了由异常值产生的误差^[29-30]。对研究区逐像元进行分析, 其计算公式为:

$$\beta = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中, β 表示 NDVI 或 EVI 的年际变化趋势; x_i, x_j 分别为第 i 和第 j 年 NDVI 或 EVI 的生长季月平均值; n 为时间序列长度; 当 $\beta > 0$ 时表明植被指数呈升高趋势, $\beta < 0$ 表明植被指数呈下降趋势。

2.2.2 Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall (M-K) 检验是一种非参数检验方法, 通常用于研究气候学和水文学的时间序列趋势^[30-31]。该方法同样不需要样本服从一定的分布, 不受少数异常值干扰^[28,32]。检验过程中, 将 2000—2018 年的 NDVI 与 EVI 遥感数据逐像元值构造为一组时间序列, 判断显著性差异^[33]:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中, Z_{mk} 为单个序列的统计检验量; S 统计量由 NDVI 或 EVI 的前后影像数据计算得到; $\text{var}(S)$ 为 S 统计量的方差, 以上为化简后的求解公式; sgn 为逻辑判别函数符号。给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时, 表明所研究序列在 α 水平上存在显著变化。本文判断在 0.05 置信水平上植被指数时间序列变化趋势的显著性。

2.2.3 相关与偏相关分析

植被生长过程缓慢, 植被指数变化与气候因子的变化并不完全同步, 其对气候因子的响应具有一定的滞后性^[34-35], 陈强等^[36]和程昌武等^[37]研究表明该地区植被生长对气象因子的时滞效应一般在 3 个月之内。本文采用相关分析法研究黄河流域两种植被指数分别对同期及前 1、2、3 个月的滑动窗口的气温、降水和辐射的响应, 比较平均相关系数得出 NDVI 和 EVI 对何时间段气候因子相关性最高, 得到滞后结果, 利用偏相关分析探究黄河流域 NDVI 和 EVI 对气温、降水和太阳辐射的响应^[36,38]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, R_{xy} 表示变量 x 、 y 的相关系数; x_i 表示第 i 年的生长季植被指数值; y_i 表示不同时序各气象要素的值; $\bar{x}$ 表示生长季植被指数平均值; $\bar{y}$ 表示各要素平均值; i 表示样本数。

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中, R_{xy} 为将 z 影响剔除后 x 与 y 之间的偏相关系数; R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 为两因子间相关系数。

$$R_{xy,zw} = \frac{R_{xy,z} - R_{xw,z} R_{yw,z}}{\sqrt{(1 - R_{xw,z}^2)(1 - R_{yw,z}^2)}} \quad (8)$$

式中, $R_{xy,zw}$ 为将 z 、 w 影响剔除后 x 与 y 之间的二阶偏相关系数; $R_{xy,z}$ 、 $R_{xw,z}$ 、 $R_{yw,z}$ 分别为变量 x 与 y 、变量 x 与 w 、变量 y 与 w 各两因子间的一阶偏相关系数。

2.2.4 复相关分析

应用标准化的多元线性回归方程研究气温、降水和太阳辐射对黄河流域两种植被指数的影响程度^[38], 进而求得复相关系数, 计算公式为:

$$y = b_t T + b_p P + b_r R + b_0 \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum (y - \bar{y})(\hat{y} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2 \sum (\hat{y} - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中, y 为 NDVI 或 EVI 的生长季均值; T 、 P 、 R 分别为生长季的月平均气温、月总降水、月平均太阳辐射强度, b_t 、 b_p 、 b_r 、 b_0 分别为相应的标准化回归系数和常数项。 R 为复相关系数, $\bar{y}$ 为 y 的平均值, $\hat{y}$ 为 y 的预测值。通过 F 检验对复相关系数进行显著性检验。

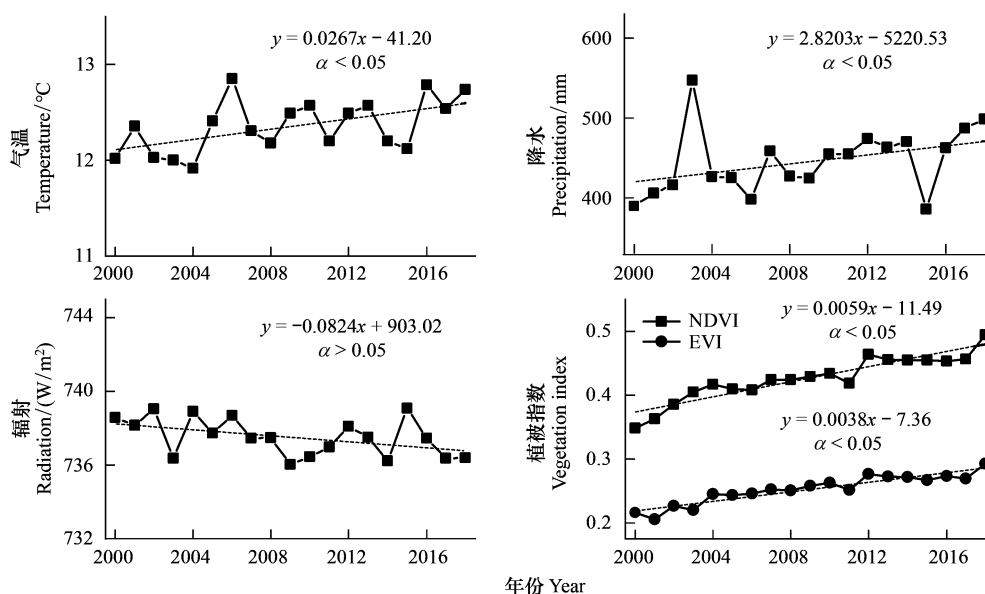


图2 生长季气候因子与植被指数年际变化

Fig.2 Interannual variation of climatic factors and vegetation index during the growing season

3 结果分析

3.1 黄河流域生长季植被变化特征

3.1.1 气候因子、NDVI 和 EVI 的年际变化

2000—2018 年黄河流域 4—10 月气温、降水、辐射和植被指数的年变化见图 2。其中生长季平均气温和累计降水总体呈上升趋势,线性增长率分别为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $28.20\text{ mm}/10\text{a}$, M-K 检验结果显著;生长季平均辐射总体呈下降趋势,线性减少率为 $0.82\text{ Wm}^{-2}(10\text{a})^{-1}$,变化不显著。总体来看,黄河流域气候主要表现为暖湿化。NDVI 与 EVI 均呈增加趋势,且 M-K 检验结果极其显著。其中,NDVI 的线性增长率为 $0.059/(10\text{a})$, EVI 线性增长率为 $0.038/(10\text{a})$ 。NDVI 与 EVI 均在 2011 年出现突降,都在 2012—2017 年出现下降趋势,在 2018 年上升至最高值。与 EVI 相比,2000—2004 年 NDVI 值变化平稳,在 2004—2010 年波动则较大。NDVI、EVI 在 2004 年达到较高峰值,这可能与 2003 年降水高、辐射低有关。2012 年和 2018 年,NDVI、EVI 明显增加,这可能与气温、降水同时增加有关。

3.1.2 NDVI 和 EVI 的空间变化

采用 Theil-Sen media 趋势分析法与 M-K 统计检验方法对 NDVI 和 EVI 逐像元进行分析,得到植被变化空间分布图(图 3)。本文中将研究区内植被覆盖区植被指数划分为显著退化($\beta < 0, \alpha < 0.05$)、轻微退化($\beta < 0, \alpha > 0.05$)、稳定不变($-0.0005 < \beta < 0.0005$)、轻微改善($\beta > 0, \alpha > 0.05$)、显著改善($\beta > 0, \alpha < 0.05$) 5 种变化类型。

图 3 显示 2000—2018 年间黄河流域大部分地区植被呈显著改善趋势,在流域中游显著改善区域相对分布更广。NDVI 显著改善区面积约为 $59.68 \times 10^4\text{ km}^2$,约占研究区总面积的 77.13%,各土地类型中林地的显著改善率最高(表 1);EVI 显著改善区面积约为 $58.24 \times 10^4\text{ km}^2$,约占研究区总面积的 75.27%,各土地类型中林地的显著改善率最高(表 1)。NDVI 和 EVI 显著退化区面积区域面积最小,分布较为分散,巴颜喀拉山西北部、西宁市、银川市、包头市、呼和浩特市、太原市、西安市及关中盆地和洛阳市附近植被显著退化相对较为严重,建设用地显著退化率最高(表 1)。NDVI 显著退化区面积约为 $0.36 \times 10^4\text{ km}^2$,约占研究区总面积的 0.47%;EVI 显著退化区面积约为 $0.43 \times 10^4\text{ km}^2$,约占研究区总面积的 0.55%。

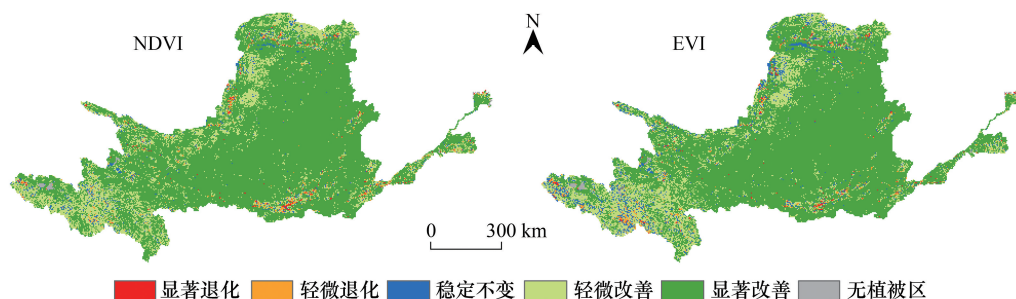


图 3 2000—2018 黄河流域 NDVI 和 EVI 趋势变化

Fig.3 Trends of NDVI and EVI series in the Yellow River Basin from 2000 to 2018

NDVI: 归一化植被指数; VEI: 增加型植被指数

NDVI 和 EVI 显著改善区像元数随海拔分布相似(图 4):图中每个海拔高度对应着处在这一高度的显著改善像元数量,在低海拔地区有一定的显著改善,随着海拔升高改善区面积出现突降,后逐渐升高,在 1000—1500 m 改善最为明显,随着海拔升高,显著改善像元数分布逐渐减少。整体来看高海拔地区易受气候因素影响,同时地处内陆,植被覆盖改善水平较低,低海拔及中低海拔地区植被显著改善较明显。

3.2 NDVI、EVI 与气候因子的关系

3.2.1 NDVI、EVI 与气候因子的滞后效应

2000—2018 年黄河流域生长季 NDVI 和 EVI 与不同时序的各气象要素相关系数均值(通过 0.05 显著性

检验)如表 2 所示,高度相关面积占比如图 5 所示。生长季 NDVI 和 EVI 与气温、降水呈正相关关系,与辐射呈负相关关系。其中,NDVI 和 EVI 与前期 1 月气温相关系数数值最大,与前期 3 月降水相关系数最大,与前期 3 月辐射相关系数绝对值最大,同时相关系数最高时期的高度相关面积占比最高。该地区植被生长对气温、降水和辐射的响应存在一定的滞后性,滞后于气温 1 个月,滞后于降水、辐射 3 个月。

表 1 2000—2018 黄河流域各土地利用类型 NDVI 和 EVI 趋势变化面积占比

土地利用 Land utilization	NDVI					EVI				
	显著退化 Significantly degraded	轻微退化 Slight degradation	稳定不变 Stable	轻微改善 Slight improvement	显著改善 Significantly improved	显著退化 Significantly degraded	轻微退化 Slight degradation	稳定不变 Stable	轻微改善 Slight improvement	显著改善 Significantly improved
耕地 Arable land	0.58	2.44	1.86	13.15	81.95	0.45	1.33	1.88	10.11	86.22
林地 Woodland	0.08	0.47	0.83	10.35	88.27	0.10	0.45	1.45	11.53	86.47
草地 Grassland	0.10	0.88	1.88	22.61	74.51	0.26	1.45	4.75	23.76	69.75
水域 Waters	3.12	6.55	3.43	19.33	50.19	3.97	7.05	6.93	18.76	45.55
建设用地 Construction land	5.18	9.65	4.75	22.00	58.19	5.52	7.32	7.13	17.71	62.09
未利用地 Unused land	0.15	1.23	4.43	20.69	73.36	0.26	1.72	10.02	20.59	67.09

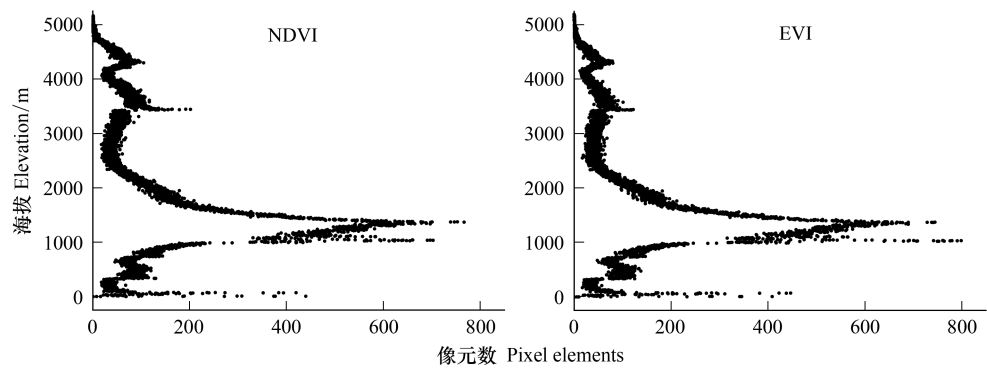


图 4 NDVI、EVI 显著改善区像元在不同海拔的分布

Fig.4 The significantly improved pixel number of NDVI and EVI series with altitude

表 2 NDVI、EVI 与不同时序气温、降水、辐射的相关系数

气候因子 Climate factor	NDVI				EVI			
	生长季 Growing season	3—9 月 Mar—Sep	2—8 月 Feb—Aug	1—7 月 Jan—Jul	生长季 Growing season	3—9 月 Mar—Sept	2—8 月 Feb—Aug	1—7 月 Jan—Jul
月平均气温 Monthly mean temperature	0.020	0.025	0.022	0.013	0.027	0.032	0.027	0.013
月累积降水 Monthly cumulative precipitation	0.090	0.095	0.118	0.132	0.063	0.068	0.095	0.115
月平均辐射 Monthly mean radiation	-0.036	-0.050	-0.054	-0.060	-0.030	-0.040	-0.040	-0.051

其中生长季为 4—10 月

3.2.2 NDVI、EVI 与气候因子的偏相关分析

根据 NDVI 和 EVI 对气候因子响应的滞后结果,将生长季 NDVI、EVI 与生长季前期 1 月气温、生长季前期 3 月降水和辐射进行偏相关分析。NDVI 与气温显著相关区域占研究区总面积的 14.50%,平均偏相关系数为 0.39,显著正相关和负相关区域分别占研究区总面积的 13.07%和 1.43%,以正相关为主(图 6)。NDVI 与气温偏相关系数在-0.88—0.92 之间,偏相关系数大于 0.5 的区域主要分布在青海省西部和与甘肃省和四川省接壤地区以及北部的西宁市附近、甘肃省中部、内蒙古自治区西北部、陕西省南部和中部的黄龙山地区、河

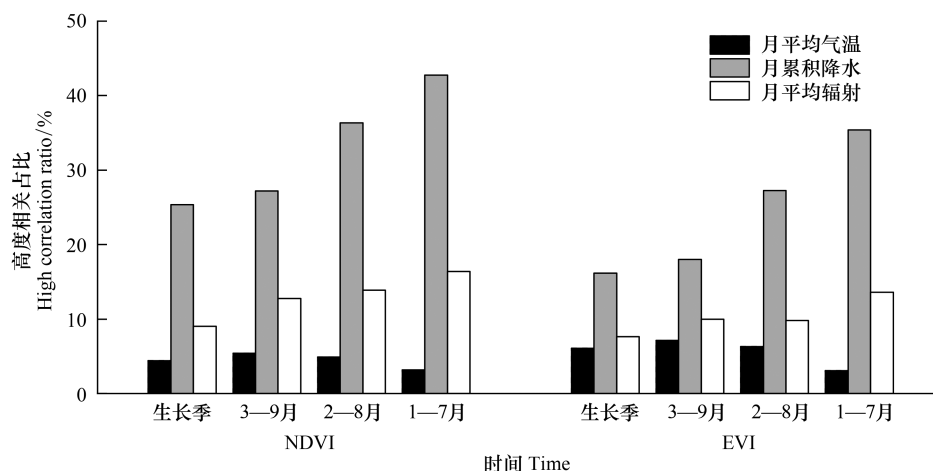


图 5 NDVI、EVI 与不同时序气温、降水、辐射的高度相关面积占比

Fig.5 The proportion of highly correlated area between NDVI, EVI and temperature, precipitation and radiation in different time series

高度相关区域为植被指数与气温、降水相关系数高于 0.5 区域,与辐射相关系数低于-0.5 区域

南省南部地区以及黄河三角洲西部。不同土地利用中,林地 NDVI 与气温的相关系数最高但显著相关面积比例较小,草地 NDVI 与气温相关性最高(图 7)。EVI 与气温显著相关区域占研究区总面积的 17.93%,平均偏相关系数为 0.43,显著正相关和负相关区域分别占研究区总面积的 16.81%和 1.13%,以正相关为主。EVI 与气温的偏相关系数在-0.86—0.90 之间,大于 0.50 的区域范围与 NDVI 相似,但分布更为广泛,生长季,该地区 EVI 与气温的相关性更高。在不同土地利用类型中,草地 EVI 与气温显著相关的面积占比和相关系数都为最高,说明草地受气温影响较大(图 7)。

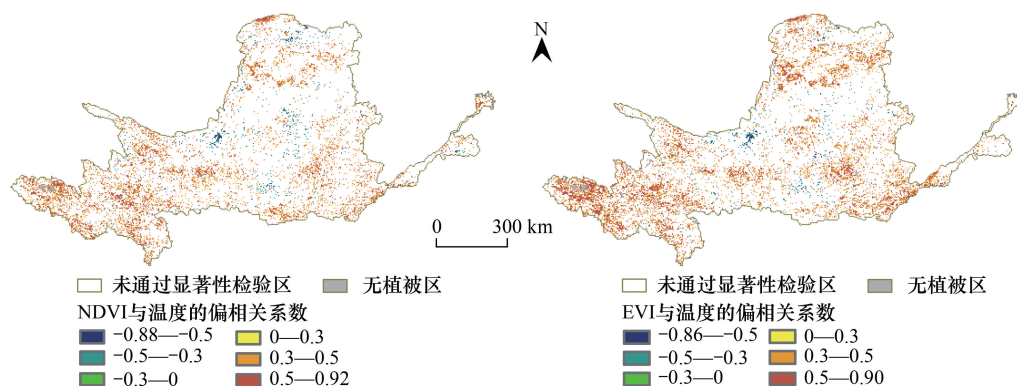


图 6 NDVI、EVI 与气温偏相关系数的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NDVI and EVI series and air temperature

图 8 为 2000—2018 年生长季 NDVI 和 EVI 与降水的偏相关分布。NDVI 与降水显著相关区域占研究区总面积的 47.62%,平均偏相关系数为 0.52,显著正相关和负相关区域分别占研究区总面积的 46.95%和 0.67%,以正相关为主;偏相关系数在-0.80—0.93 之间,偏相关系数大于 0.5 的区域大部分处于 400 mm 降水线以北,在阿尼玛卿山西北部、宁夏回族自治区中部及与内蒙古自治区和陕西省以及甘肃省接壤一带、内蒙古自治区北部、陕西省与山西省接壤地带、四川省北部和山西省中部较为集中。在不同土地利用类型中,草地 NDVI 与降水显著相关的面积占比及相关系数值最高(图 9)。EVI 与降水显著相关区域占研究区总面积的 43.39%,平均偏相关系数为 0.50,显著正相关和负相关区域分别占研究区总面积的 42.46%和 0.93%,以正相关为主;偏相关系数在-0.91—0.96 之间,偏相关系数大于 0.5 的空间分布与 NDVI 相似,但分布面积小于

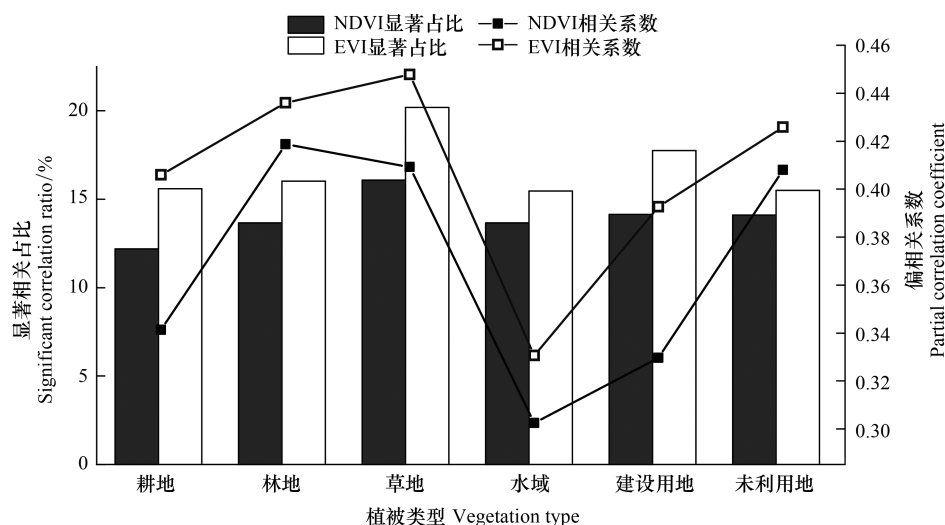


图7 不同土地利用类型 NDVI、EVI 与气温显著相关面积占比和偏相关系数

Fig.7 The area percentages and partial correlation coefficients of NDVI, EVI and air temperature that are significantly related to different land utilization

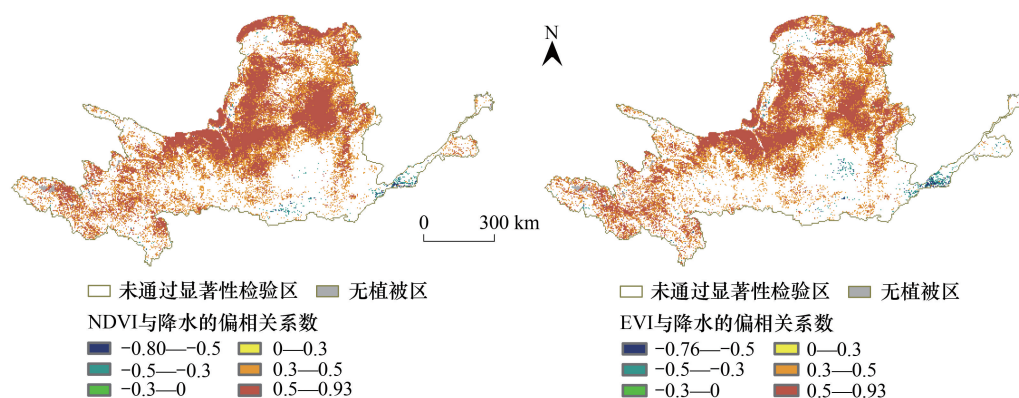


图8 NDVI、EVI 与降水的偏相关系数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NDVI, EVI series and precipitation

NDVI,该地区 NDVI 与降水相关性更高。在不同土地利用中,草地植被生长与降水的相关性最高(图9)。

NDVI 与辐射显著相关区域占研究区总面积的 21.77%,平均偏相关系数为-0.35,显著正相关和负相关区域分别占研究区总面积的 3.63%和 18.14%,以负相关为主(图10)。NDVI 与辐射的偏相关系数在-0.92—0.88之间,偏相关系数小于-0.5 的区域主要分布在青海省中部地区以及与甘肃省和四川省接壤地带、甘肃省东部和中部及与宁夏回族自治区接壤地区、陕西省中部的洛河-黄龙山-黄河干流一带及与山西省交界地区、陕西省南部与山西省和河南省接壤地带、山西省东南部地区。其中,林地 NDVI 与辐射显著相关面积占比和相关系数绝对值最高(图11)。EVI 与辐射显著相关区域占研究区总面积的 21.14%,平均偏相关系数为-0.34,显著正相关和负相关区域分别占研究区总面积的 3.89%和 17.25%,以负相关为主,相关系数在-0.92—0.87 之间,偏相关系数小于-0.5 的区域空间分布与 NDVI 相似,分布面积较为相近。上游地区 NDVI 与辐射相关性高,中游地区则是 EVI 与辐射相关性更高。整体上看,NDVI 与辐射相关性较高。林地 EVI 与辐射显著相关面积占比和相关系数绝对值最高,该地区林地植被生长受辐射的影响较大;耕地 NDVI 和 EVI 与辐射的相关性接近,耕地土地利用类型上,两种植被指数与辐射相关差异较小(图11)。

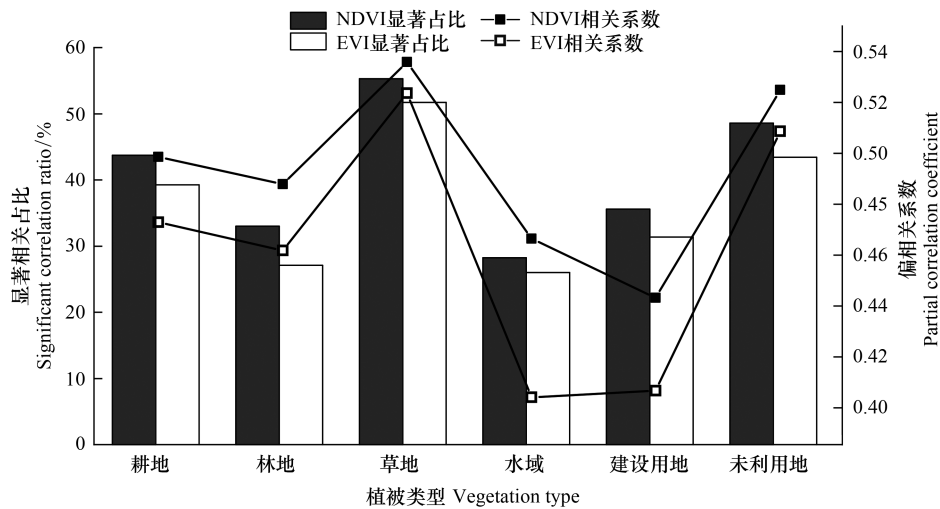


图 9 不同土地利用类型 NDVI、EVI 与降水显著相关面积占比和偏相关系数

Fig.9 The area percentages and partial correlation coefficients of NDVI, EVI and precipitation that are significantly related to different land utilization

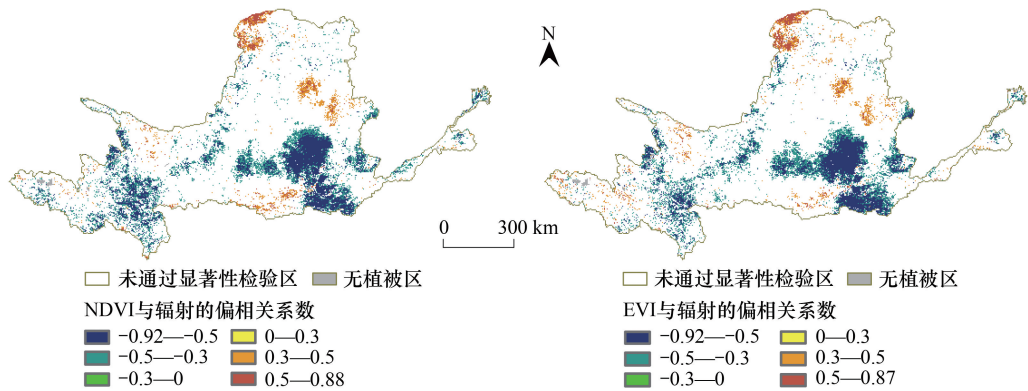


图 10 NDVI 和 EVI 与辐射偏相关系数空间分布

Fig.10 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NDVI, EVI series and radiation

表 3 植被指数变化驱动因素分区准则

Table 3 Rules for driving factors of vegetation index change

驱动因素类型 Types of driving factors	分区准则 Rules			
	r_{VI-T}	r_{VI-P}	r_{VI-R}	r_{VI-TPR}
气温、降水、辐射强驱动 Strong driven by temperature, precipitation and radiation	$t > t_{0.05}$	$t > t_{0.05}$	$t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
气温驱动 Driven by temperature	$t > t_{0.05}$			$F > F_{0.05}$
降水驱动 Driven by precipitation		$t > t_{0.05}$		$F > F_{0.05}$
辐射驱动 Driven by radiation			$t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
气温、降水驱动 Driven by temperature and precipitation	$t > t_{0.05}$	$t > t_{0.05}$		$F > F_{0.05}$
气温、辐射驱动 Driven by temperature and radiation	$t > t_{0.05}$		$t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
降水、辐射驱动 Driven by precipitation and precipitation		$t > t_{0.05}$	$t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
气温、降水、辐射弱驱动 Weakly driven by temperature, precipitation and radiation	$t \leq t_{0.05}$	$t \leq t_{0.05}$	$t \leq t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
非气候因子驱动 Driven by non-climate factors				$F \leq F_{0.05}$

r_{VI-T} : 植被指数与气温的偏相关系数; r_{VI-P} : 植被指数与降水的偏相关系数; r_{VI-R} : 植被指数与辐射的偏相关系数; r_{VI-TPR} : 植被指数与气温、降水和辐射的复相关系数; $t_{0.05}$: t 检验的 0.05 显著性水平; $F_{0.05}$: F 检验的 0.05 显著性水平

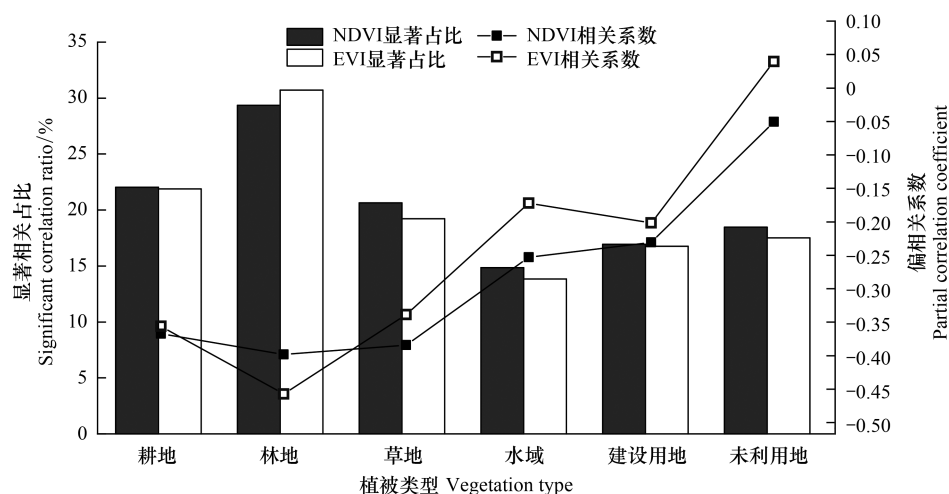


图 11 不同土地利用类型 NDVI、EVI 与辐射显著相关面积占比和偏相关系数

Fig.11 The area percentages and partial correlation coefficients of NDVI, EVI and radiation that are significantly related to different land utilization

3.3 NDVI 和 EVI 变化的驱动机制

图 12 为气温、降水、辐射对植被指数变化的综合影响情况。其中 NDVI 显示复相关系数较高的区域主要为阿尼玛卿山东部及以北的青海省区域、甘肃省东部部分地区、内蒙古自治区的西部地区以及陕西省的洛河-黄龙山-黄河干流一带,以上地区随气温升高、降水增加和辐射下降,植被指数增加。NDVI 和 EVI 与气温、降水、辐射高度复相关区域还包括宁夏回族自治区西部和陕西省西北部部分地区,这些地区随气温辐射下降降水升高植被指数增加。在内蒙古自治区的西北少部分地区 NDVI 和 EVI 与气候因子的复相关系数较高,且随气温升高、降水增加和辐射增强,植被指数增加。EVI 与三种气象要素的高度复相关区域与 NDVI 相似,但在

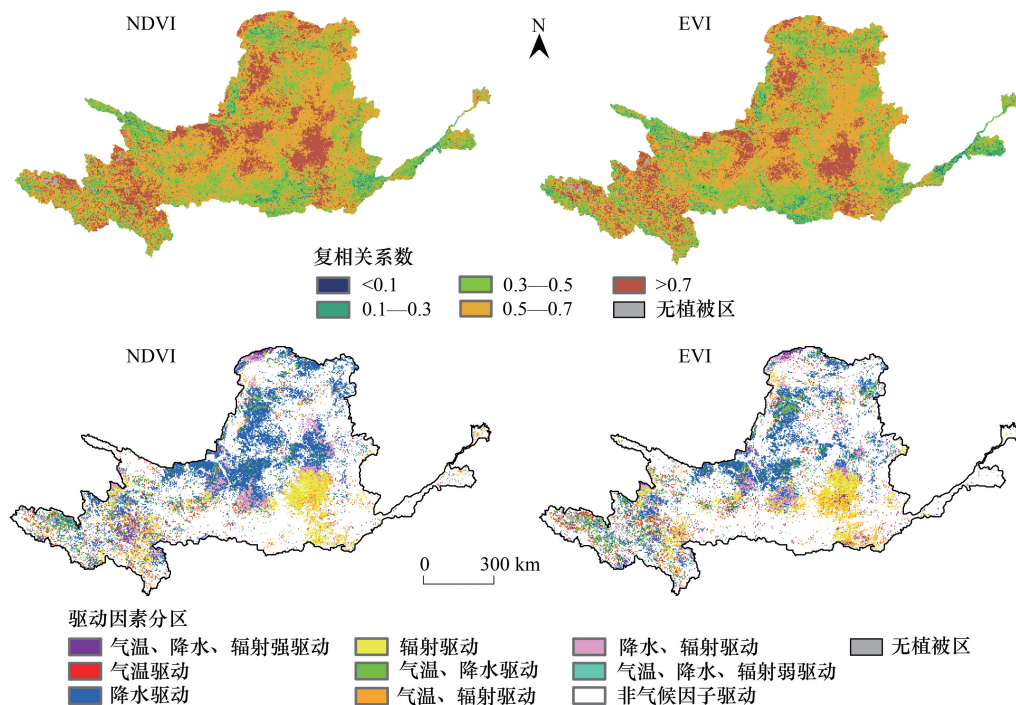


图 12 NDVI 和 EVI 与气候因子的复相关系数及驱动因素分区

Fig.12 Multiple correlation coefficients between NDVI, EVI series and meteorological variables and distribution zone of driving factors

范围上小于 NDVI。

本文参考前人的研究方法^[39—41]对研究区植被指数变化的驱动因素进行分析(表 3)。黄河流域地区生长季 NDVI 受气候因子驱动地区占研究区总面积的 37.21%(图 12),其中受降水驱动范围最大,面积占比为 16.10%,主要分布在青海省西北部、陇中黄土高原地区及宁夏回族自治区中部和与甘肃和陕西三省交界地带、内蒙古自治区西南部和北部、陕西省的北部地区,这些地区地处黄土高原地区且大部分位于 400 mm 等降水线以北,气候较为干旱,地形复杂,植被稀疏,因此对降水较为敏感。其次为受辐射驱动区域,面积占比为 5.86%,主要集中在陕西省中部的洛河-黄龙山-黄河干流一带,该地区植被覆盖主要为林地、草地和少量耕地,植被覆盖度较高。EVI 受气候因子驱动区域小于 NDVI,面积占比为 32.80%(图 12),同样为受降水驱动面积占比最高,为 11.73%。除降水驱动外,EVI 受辐射驱动面积占比较高,范围要略小于 NDVI,为 5.16%。NDVI 和 EVI 的变化受其它因子驱动的区域分布范围较小,在黄河流域内零散分布。

4 结论与讨论

2000—2018 年黄河流域植被指数整体上呈改善趋势,其中生长季 NDVI 的线性增长率为 0.059/10a,生长季 EVI 线性增长率为 0.038/10a。空间上呈改善趋势区域面积远大于退化趋势区域面积,NDVI 与 EVI 显示显著改善区域面积占比分别达 77.13%和 75.27%之高,在中游地区显著改善较为明显。研究表明黄河流域植被整体改善情况良好,绿度增加,这与中国大陆植被面积变化的总体趋势相同^[42]。该地区植被指数与气温、降水呈正相关,与辐射呈负相关,这表明 2000—2018 年气温升高、降水增多、辐射的下降有利于植被生长。国家在 1998 年推行的森林保护工程和 2000 年推行的退耕还林工程^[43—45]及防沙治沙^[46]等生态修复工程相继在黄河流域内展开,这使得流域内植被得到了改善。Tian 等^[23]指出气候变暖、人口增长和植树造林是黄河流域地区植被绿度增加的主导因素。杨灿等^[47]发现黄土高原部分地区退耕还林实施前 NDVI 呈下降趋势,实施后 NDVI 呈增加趋势。在各类土地利用类型中,林地植被显著改善率最高。显著改善区大多分布于 1000—1500 m 海拔处,地处第二阶梯部分地区,包括河套平原、鄂尔多斯草原、黄土高原和渭汾盆地等较大地形单元,曾经水土流失严重^[9],2000—2018 年植被恢复情况良好,但由于其地质类型等因素影响仍然存在生态脆弱区域,以致少部分地区植被生长出现退化。巴颜喀拉山西北部、西宁市、银川市、包头市、呼和浩特市、太原市、西安市及关中盆地和洛阳市附近植被显著退化相对较为严重。其中一些地区因海拔和地理因素,土地易退化,而省级行政中心附近可能更多的由于开发范围广,人口密集,城市扩张发展对周围植被产生不利影响^[48—49],结果显示不同土地利用类型中建设用地的显著退化率最高与之相对应。

黄河流域生长季植被指数变化与气温的关系以正相关为主,植被指数变化与气温滞后时间约为 1 个月;与降水以正相关为主,滞后时间约为 3 个月,且气候因子驱动分区中以降水驱动为主。在 2000—2018 年间,气温升高、降水增加趋势显著,气候整体向暖湿化方向发展。Piao 等^[50]和 Tao 等^[51]发现,降水是促进干旱地区植被绿化的主要驱动因素。刘绿柳等^[14]指出,1982—1999 年黄河流域降水对流域内植被影响更为显著。黄河流域地处内陆,为温带大陆性气候,多为干旱、半干旱地区^[9],植被覆盖与降水高度相关区域大多位于 400 mm 降水线以北,其中以宁夏回族自治区中部及与内蒙古自治区和陕西省以及甘肃省接壤一带、内蒙古自治区北部、陕西省与山西省接壤地带为主,以上地区地处黄土高原,土地干旱易退化,植被覆盖率低,以草地为主,对水分较为敏感。黄河流域植被指数变化与辐射的关系以负相关为主,这与孙高鹏等^[52]的研究结果相一致。植被指数变化与辐射的滞后时间约为 3 个月,受辐射驱动的区域面积占比相对较高,且集中分布在陕西省中部的洛河中游-黄龙山-黄河干流一带,该地区与气温、降水和辐射复相关系数较高,气温升高、降水增加和辐射下降使植被指数升高;以上地区主要土地利用类型为林地和草地,草深林密,植被覆盖度高,植被生长所需水热条件良好,辐射过强则可能会造成该地区植被蒸腾增加,水分消耗过多,影响植物生长,使植物快速进入枯黄期,从而导致植被指数的迅速下降^[53]。

在时间和空间上,NDVI 比 EVI 能较好地反映植被的改善状况,EVI 则比 NDVI 能较好地反映植被的退化

状况。NDVI 在使用过程中容易受到土壤背景的干扰,而且存在基于比值的植被指数饱和问题^[4],黄河流域大部分地区为草地植被且干旱,植被生长密度不高,NDVI 对植被变化的敏感程度要高于 EVI,NDVI 的年际变化幅度高于 EVI,因此,在对黄河流域植被覆盖率较低且植被整体呈改善趋势地区开展植被变化研究时,NDVI 更为适用。NDVI 与气温相关度低于 EVI,与降水、辐射的相关度要高于 EVI。陈燕丽等^[7]在广西石漠化片区进行 NDVI、EVI 与气象因子相关对比研究得出,EVI 对降水的响应好于 NDVI;Pan 等^[54]在内蒙古阿拉善地区的研究结果显示,EVI 对降水和辐射的响应要好于 NDVI。以上地区和本研究类似,植被覆盖率较低,研究结果存在一定差异。因此,EVI 和 NDVI 对气候因子响应的差异可能并非只因植被覆盖率不同,后续还应引入其它相关因素开展进一步的研究。总体来看,NDVI 更适用于研究黄河流域植被变化及其与降水、辐射响应,EVI 则更适用于研究植被变化对气温的响应。

参考文献 (References):

- [1] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展. 遥感学报, 2013, 17(1): 1-16.
- [2] 马启民,贾晓鹏,王海兵,李永山,李劭宁. 气候和人为因素对植被变化影响的评价方法综述. 中国沙漠, 2019, 39(6): 48-55.
- [3] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [4] 王正兴,刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [5] 刘世梁,董玉红,安南南,王军,赵海迪. 基于增强型植被指数序列和景观格局分析的松嫩平原盐碱地动态——以大安市为例. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3263-3269.
- [6] 王正兴,刘闯,陈文波,林昕. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 407-410, 427-427.
- [7] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,莫建飞,黄永璘,丁美花. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1802-1812.
- [8] 张静茹,同小娟,孟平,张劲松,刘沛荣. 基于植被指数、叶绿素荧光和碳通量的华北山地人工林物候对比研究. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 17-26.
- [9] 王文杰,蒋卫国,房志,王维,国巧真. 黄河流域生态环境十年变化评估. 北京: 科学出版社, 2017: 17-23.
- [10] 王有恒,谭丹,韩兰英,李丹华,王鑫,卢国阳,林婧婧. 黄河流域气候变化研究综述. 中国沙漠, 2021, 41(4): 235-246.
- [11] 马雪宁,张明军,黄小燕,马潜,潘淑坤. 黄河上游流域近 49a 气候变化特征和未来变化趋势分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 17-23.
- [12] Zhou S, Zhang Y, Williams A P, Gentile P. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau5740.
- [13] 袁丽华,蒋卫国,申文明,刘颖慧,王文杰,陶亮亮,郑华,刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [14] 刘绿柳,肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. 生态学杂志, 2006, 25(5): 477-481, 502-502.
- [15] 刘海,刘凤,郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响. 水土保持学报, 2021, 35(4): 143-151.
- [16] 田智慧,任祖光,魏海涛. 2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制. 环境科学, 2021, doi: 10.13227/j.hjxx.202105213.
- [17] 刘勤,严昌荣,何文清. 黄河流域干旱时空变化特征及其气候要素敏感性分析. 中国农业气象, 2016, 37(6): 623-632.
- [18] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [19] 沈斌,房世波,余卫国. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异. 遥感学报, 2016, 20(3): 481-490.
- [20] Xu J X, Fang S B, Li X, Jiang Z C. Indication of the two linear correlation methods between vegetation index and climatic factors: an example in the three River-Headwater region of China During 2000-2016. *Atmosphere*, 2020, 11(6): 606.
- [21] Pei Z F, Fang S B, Yang W N, Wang L, Wu M Y, Zhang Q F, Han W, Khoi D N. The relationship between NDVI and climate factors at different monthly time scales: a case study of grasslands in inner Mongolia, China (1982—2015). *Sustainability*, 2019, 11(24): 7243.
- [22] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S, Peng S S, Ahlström A, Canadell J G, Cong N, Levis S, Levy P E, Liu L L, Lomas M R, Mao J F, Myneni R B, Peylin P, Poulter B, Shi X Y, Yin G D, Viovy N, Wang T, Wang X H, Zaehle S, Zeng N, Zeng Z Z, Chen A P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 2014, 5: 5018.
- [23] Tian F, Liu L Z, Yang J H, Wu J J. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107479.
- [24] 李春晖,杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系. 地理研究, 2004, 23(6): 753-759.

- [25] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [26] Tang W J, Yang K, Qin J, Li X, Niu X L. A 16-year dataset (2000—2015) of high-resolution (3 h, 10 km) global surface solar radiation. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1905-1915.
- [27] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. *生态学报*, 2017, 37(9): 2994-3008.
- [28] 谢慧君, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 别小娟, 范馨. 川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 286-294, 328-328.
- [29] Tabari H, Marofi S, Amini A, Talaei P H, Mohammadi K. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 128-136.
- [30] Li Y L, Wang X Q, Chen Y Z, Wang M M. Land surface temperature variations and their relationship to fractional vegetation coverage in subtropical regions: a case study in Fujian Province, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(6): 2081-2097.
- [31] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [32] 王建邦, 赵军, 李传华, 朱钰, 康重阳, 高超. 2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局. *地理学报*, 2019, 74(3): 504-519.
- [33] 贺忠华, 张育慧, 何月, 张小伟, 蔡菊珍, 雷莉萍. 浙江省近 20 年植被变化趋势及驱动因子分析. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1530-1539.
- [34] Yuan J, Xu Y P, Xiang J, Wu L, Wang D Q. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its associated influence factor analysis in the Yangtze River Delta, eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(32): 32866-32879.
- [35] 魏榕, 刘冀, 张特, 张茜, 彭涛, 刘艳丽. 雅砻江流域生长季植被时空变化特征及对气象因子的响应分析. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 512-522.
- [36] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [37] 程昌武. 黄河流域 1982—2015 年植被变化及其影响因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [38] 张凯选, 范鹏鹏, 王军邦, 叶辉. 西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1080-1091.
- [39] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 716-720.
- [40] 何奕萱, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 闫利, 郑飞鸽. 红河流域“通道-阻隔”作用下 2000-2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力. *生态学报*, 2018, 38(6): 2056-2064.
- [41] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. *生态学报*, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [42] Zhang Y H, Ye A Z. Spatial and temporal variations in vegetation coverage observed using AVHRR GIMMS and Terra MODIS data in the mainland of China. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(11): 4238-4268.
- [43] Wohlfart C, Mack B, Liu G H, Kuenzer C. Multi-faceted land cover and land use change analyses in the Yellow River Basin based on dense Landsat time series: exemplary analysis in mining, agriculture, forest, and urban areas. *Applied Geography*, 2017, 85: 73-88.
- [44] 周剑芬, 管东生. 森林土地利用变化及其对碳循环的影响. *生态环境*, 2004, 13(4): 674-676.
- [45] Chen Y Z, Chen L Y, Cheng Y, Ju W M, Chen H Y H, Ruan H H. Afforestation promotes the enhancement of forest LAI and NPP in China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 462: 117990.
- [46] 赵廷宁, 丁国栋, 王秀茹, 王俊中, 屠志方. 中国防沙治沙主要模式. *水土保持研究*, 2002, 9(3): 118-123.
- [47] 杨灿, 魏天兴, 李亦然, 郑粮, 陈宇轩. 黄土高原水土侵蚀交错区退耕还林工程前后 NDVI 时空变化特征. *北京林业大学学报*, 2021, 43(6): 83-91.
- [48] 刘沁萍, 杨永春, 田洪阵, 顾磊, 张博. 快速城市化时期中国城市建成区植被状况的时空分异特征. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 223-236.
- [49] Qian C, Shao L Q, Hou X H, Zhang B B, Chen W, Xia X L. Detection and attribution of vegetation greening trend across distinct local landscapes under China's grain to green program: a case study in Shaanxi Province. *CATENA*, 2019, 183: 104182.
- [50] Piao S L, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z, Wang Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [51] Tao, J, Xu T Q, Dong J W, Yu X Q, Jiang Y B, Zhang Y J, Huang K, Zhu J T, Dong J X, Xu Y M, Wang S S. Elevation-dependent effects of climate change on vegetation greenness in the high mountains of southwest China during 1982—2013. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(4): 2029-2038.
- [52] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 李双双. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 205-212.
- [53] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.
- [54] Pan X, Gao Y, Wang J. Response differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to climate factors. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(6): 673-680.