

# 黄河水源涵养区植被NDVI时空变化特征及其驱动因子

梁 植<sup>1,2,3</sup>, 孙若辰<sup>1,2,3\*</sup>, 段青云<sup>1,2,3</sup>

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098;  
3. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 南京 210098)

**摘 要:**黄河水源涵养区是中国重要的生态功能区,深入研究区域植被变化过程对维系生态系统健康和高质量发展具有重要意义。论文利用趋势分析、局部加权回归方法(locally weighted scatterplot smoothing, LOWESS)、Pearson 相关分析、偏相关分析、残差分析等方法对1982—2015年黄河水源涵养区植被时空变化特征及其驱动要素做了分析,并根据地形不同将涵养区划分为平原区和高原区,探究区域内的差异性。结果表明:① 涵养区多年生长期NDVI(normalized difference vegetation index)呈显著增长趋势,主要源于春秋NDVI的快速增长,不同区域尺度的NDVI增长速度存在差异,涵养区及其分区高原区、平原区NDVI增长速率分别为0.0009/a、0.0007/a、0.0016/a。② 区域NDVI与降水气温相关性存在时空差异,涵养区生长期NDVI与降水、气温分别呈负、正相关,春夏季受温度控制,秋季受降水、温度同时控制;其中平原区除春季受温度控制外,其他时期同时受降水、气温控制;涵养区生长期NDVI与降水、温度呈正相关区域占比分别为50.4%、91.4%。③ NDVI变化趋势存在一定阶段性,在1995—2015年间NDVI呈停滞增长,期间NDVI与降水的相关性由负相关转为正相关;1995年之前、2015年之后则呈显著增长,与降水、温度分别呈负、正相关性。④ 区域内NDVI增长主要由人类活动与气候变化同时驱动引起,面积占比74.30%,其次为气候变化引起的植被增长与人类活动引起的植被衰退,面积占比分别为11.48%、6.23%,说明生态工程建设有效促进了植被的恢复,但城市化等人类活动同样也会破坏植被的生长。

**关键词:**植被变化;气候变化;人类活动;残差分析;黄河水源涵养区

陆地生态系统的水源涵养能力关系到生态文明建设、水安全、水灾害防治等国计民生重大问题。在生态学与水文学上,水源涵养能力分别指蓄水能力与产流量<sup>[1]</sup>。基于水源涵养基本概念,一般将黄河干流兰州以上、渭河(不包括泾河和北洛河)和伊洛河流域划定为黄河水源涵养区,区域面积与天然径流量分别占黄河流域的38.4%和84.1%,是黄河流域主要水量来源区。

黄河水源涵养区是受气候变化影响最剧烈的区域之一,气候变化对水文过程存在多种直接和间接的影响特征<sup>[2]</sup>。已有研究表明,陆地生态系统的植被根区蓄水能力是水源涵养功能评估的关键变量<sup>[1]</sup>,植被在陆气间碳氮循环、能量循环过程中扮演重要角色<sup>[3]</sup>,同时其作为陆地生态系统重要组成部分,对蓄水产流过程发挥关键作用<sup>[4]</sup>。植被光合作用、呼吸作用及蒸散发等生物物理过程受CO<sub>2</sub>浓度、氮沉

收稿日期:2023-03-15;修订日期:2023-06-29。

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFC3201102);国家自然科学基金项目(42101046, 51979004);水利部重大科技项目(SKS-2022001);河海大学引进高层次人才科研启动基金(522020012)。[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2021YFC3201102; National Natural Science Foundation of China, No. 42101046 and 51979004; Key Scientific and Technological Project of the Ministry of Water Resources, No. SKS-2022001; Scientific Research Startup Foundation for High-level Talents of Hohai University, No. 522020012.]

第一作者简介:梁植(1998—),男,山东济南人,硕士生,主要研究方向为应用水文气象学。E-mail: liangz1a@163.com

\*通信作者简介:孙若辰(1991—),男,陕西西安人,副研究员,研究方向为陆面水文模拟及不确定性分析。

E-mail: sunrc@hhu.edu.cn

引用格式:梁植,孙若辰,段青云. 黄河水源涵养区植被NDVI时空变化特征及其驱动因子[J]. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1717-1732. [Liang Zhi, Sun Ruochen, Duan Qingyun. Spatiotemporal variation of NDVI in the Yellow River water conservation zone and its driving factors. Progress in Geography, 2023, 42(9): 1717-1732.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.09.005

降、气候变化与人类活动的影响<sup>[5]</sup>,而CO<sub>2</sub>等气体浓度动态变化与气候变化存在内部联系<sup>[6]</sup>,同时,在CO<sub>2</sub>正效应逐渐降低的背景下,气候变化对生态系统的影响逐渐增强<sup>[7]</sup>,因此,本文重点关注黄河水源涵养区植被对气候变化的响应。

伴随遥感技术的发展,遥感数据在植被动态研究中得到广泛应用<sup>[8]</sup>,GIMMS NDVI 3g.v1、MODIS等包含植被相关指数与相关环境因子的长时序遥感数据已被广泛应用于植被动态研究<sup>[9-11]</sup>。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)连续时间序列长、不同遥感产品的数据可用性好,是公认的反映植被生产力的良好指标<sup>[12]</sup>,常被应用于研究区域植被变化及其与环境因子的相关性<sup>[3,12-13]</sup>。降水和气温被认为是影响植被动态的最重要的两个气候因子<sup>[14]</sup>,全球范围内植被动态受气候变化控制的区域中主要的控制因子为降水、气温,如气温的升高促进了高纬度区域植被的生长<sup>[5]</sup>,以二者为代表的气候条件影响植被变化的过程得到了广泛的关注<sup>[3,15]</sup>。此外,人类活动也是造成植被生长变化的驱动要素之一,人口的快速增长和社会经济的发展使得人类对生态环境的影响日益增加,已直接或间接导致植被覆盖的增长与减弱<sup>[16]</sup>。在中国不同区域,由于人类的影响也造成了植被覆盖不同程度的增长与减弱<sup>[17]</sup>。

对于植被变化趋势的分析,最典型的方法是线性分析,但该方法会受异常值与起始时间选取的影响<sup>[3]</sup>;而非线性方法可以提供植被和气候因子趋势变化的可靠信息;植被覆盖的面积变化<sup>[18]</sup>也属于植被趋势研究的一部分。相关分析是确定植被动态变化驱动因素的常用方法<sup>[19]</sup>,对植被与各种环境因子进行相关分析已得到广泛应用<sup>[13]</sup>,相关分析同时也被应用于研究气候变化对植被动态的时滞效应<sup>[15]</sup>。由于区域特征差异,不同区域NDVI与气候因子的相关性存在差异<sup>[20-21]</sup>。此外,分离自然与人类活动对植被变化贡献的方法有回归模型法、基于生物物理过程的模型方法、残差趋势法等,其中残差趋势法是定量分离气候变化和人类活动对植被变化影响常用且简便有效的方法<sup>[22]</sup>。

黄河水源涵养区覆盖范围广,气候条件、下垫面类型及人类活动程度差异较大且变化过程复杂<sup>[23]</sup>,导致植被变化存在明显的区域分异性,响应机理模式多样。全球变化环境下黄河水源涵养区气温呈上升趋势、降水呈波动变化,同时极端气候事件频发,上游冰川面积持续减小<sup>[24]</sup>,气候因子具有显著

的季节性变化。研究植被与气候变化的关系时应考虑不同植被物候和生理差异所导致的植被变化对气候因子响应模式的不同。目前关于黄河水源涵养区植被变化及其响应机制的研究往往只针对某个流域或其中某一区域,结果无法反映黄河水源涵养区内的差异性,同时也少有针对性对不同季节植被变化响应差异的分析研究。此外,之前的研究未针对性地在整个黄河涵养区上分析植被受气候因素与人类活动影响的区域差异性。因此,本文的主要目的为:①在黄河水源涵养区范围内针对性地进行植被动态变化的研究,确定涵养区不同时间尺度气候、植被与人类活动的变化特征;②鉴于涵养区存在明显的区域分异性,定量解析气候变化和人类活动对于植被变化影响的贡献,辨识黄河水源涵养区植被变化的驱动力及区域差异性。

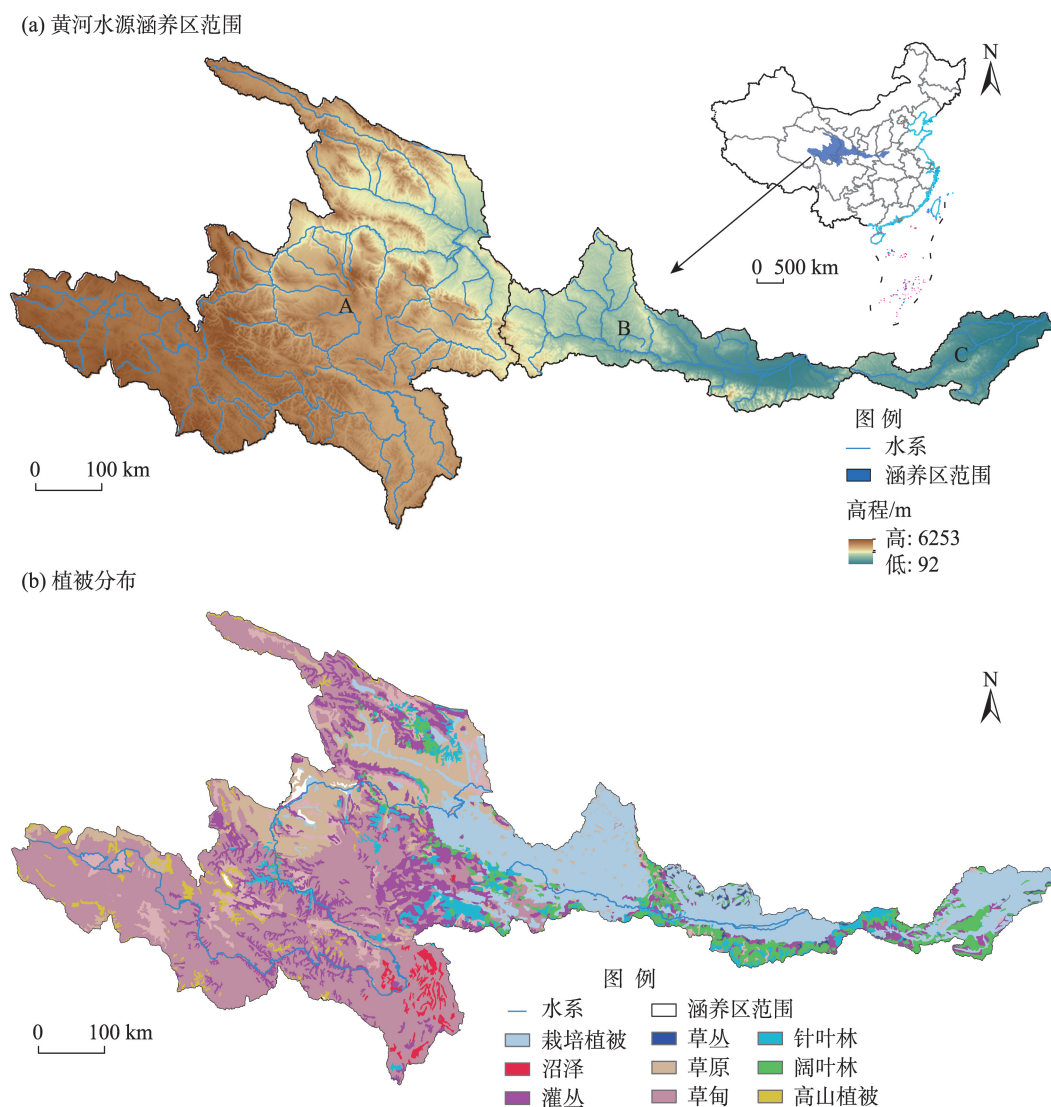
综上,本文在不同时空尺度采用线性回归方法、局部加权回归方法(locally weighted scatterplot smoothing, LOWESS)、*t*检验等方法分别对涵养区植被生长期(4—10月)及春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)不同时间段内植被与气候因子趋势变化进行分析;采用Pearson相关、偏相关分析确定植被对气候的响应关系,利用残差趋势分析确定人类活动对植被变化的相对贡献。通过研究区域植被动态变化及其驱动因子,探究气候变化下生态系统内在演化机制<sup>[25]</sup>,分析结果可揭示水源区植被动态变化的时空差异性,为水源涵养区生态建设与可持续发展提供重要参考。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

通过水源涵养能力的定义划定的黄河水源涵养区如图1a所示。划定范围为黄河干流兰州以上、渭河(不包括泾河和北洛河)和伊洛河流域,该区域面积与天然径流量占黄河流域的38.4%和84.1%,是黄河流域主要水量来源区。

区域范围为95°55′~113°10′E、32°10′~38°20′N,东西狭长,地形分布大体为西部高原区与东部平原区。黄河水源涵养区主要分为3个部分:A区为黄河干流兰州以上,地貌类型为高原,覆盖青海省、甘肃省与四川省少部分范围,主要经过山脉为巴颜喀拉山东麓、祁连山脉东部末端、横断山脉北端,包括黄河源区域,A区北部为半干旱区,南部为半湿润区;B区属于渭河流域,地貌类型为平原,覆盖甘肃



注:图a中中国地图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改;A、B、C分别表示黄河干流兰州段以上流域、渭河流域(不包括泾河、北洛河流域)、伊洛河流域范围。

图1 黄河水源涵养区范围及植被分布

Fig.1 Scope and vegetation distribution of the Yellow River water conservation zone

省与陕西省部分地区,区域西高东低,甘肃省境内有六盘山穿过,东部为关中盆地,B区为半湿润区,同时A、B区域大致为中国一二级阶梯分界线;C区为伊洛河流域,所处位置为平原,主要位于河南境内,为半湿润区。可见,A区为高原区,B、C为平原区,由西向东地势变平坦,气候逐渐变湿,降水量升高,并且由西部高原气候转变东部季风气候。平原区南缘为秦岭山区。后续研究将分别在整个区域及高原区(A)、平原区(B和C)展开。

区域植被类型多样(图1b),根据1:1000000中国植被图集数据(中国西部环境与生态科学数据中心, <http://westdc.westgis.ac.cn>)<sup>[26]</sup>,区域包含11类植

被型组,主要植被类型为灌丛、栽培植被、草原和草甸。其中栽培植被(作物等)集中分布在平原区,而其他主要植被类型基中分布在高原区。

## 1.2 数据来源与预处理

时间序列范围选取1982—2015年。NDVI数据来源于GIMMS NDVI 3g.v1数据集(the third generation Global Inventory Monitoring and Modeling System, <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/9775f2b4-7370-4e5e-a537-3482c9a83d88>)<sup>[27-28]</sup>。该数据集是搭载在NOAA系列卫星上AVHRR辐射仪制作的NDVI产品。空间分辨率为(1/12)°(约8 km),时间分辨率为半个月,已经过校正处理。对NDVI数据利用



最大值合成法(MVC)重采样得到月数据,缺省掉栅格数据区域异常值与生长期NDVI<0.1的栅格点,利用线性插值方法得到空间分辨率为(1/10)°的空间数据集。

气候因子(降水和气温)数据来源于ERA5-Land数据(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset&text=era5-land>)<sup>[29]</sup>。ERA5是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)对1950年1月至2023年2月全球气候的第五代大气再分析数据集,将模型数据与来自世界各地的观测数据结合起来,形成一个全球完整的、一致的数据集。ERA5-Land通过气候再分析的陆地部分的复现以更高的分辨率提供了数十年来土地变量的演变,其空间分辨率为(1/10)°,时间分辨率为1 h。对气温求均值并对降水求和获得月均温与月累积降水。

涵养区植被类型分布数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心的1:1000000中国植被图集数据(<http://westdc.westgis.ac.cn>)<sup>[26]</sup>。利用ArcGIS中要素转栅格工具中最大面积占比方法将原图转为分辨率为(1/10)°数据。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 NDVI与气候因子趋势分析

基于区域平均NDVI月际变化特征,划定区域植被生长期为4—10月。利用两种方法对NDVI与气候因子进行趋势分析。

(1) 利用普通最小二乘方法(OLS)<sup>[30]</sup>进行数据与时间序列的拟合,以残差平方和的最小化最优化回归曲线。分别对整体尺度、点尺度进行拟合,获得NDVI与气候因子的趋势变化。之后利用 $F$ 检验来反映NDVI变化趋势的显著性。趋势以年为单位进行分析,因子变化趋势计算公式为:

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

式中:  $n$  为年份总数(34年);  $N_i$  为对应于不同年份  $i$  的数据值;  $S$  为年均回归趋势,  $S > 0$  代表其呈上升趋势。

$F$  检验统计量<sup>[31]</sup>计算公式为:

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

式中:  $NDVI_i$  为 NDVI 实测值;  $\overline{NDVI}$  为多年 NDVI 均值;  $\bar{i}$  为研究年份总数  $n$  的序列平均值。可通过查  $F$  分布表,根据不同显著水平的临界值  $F_\alpha$  确定趋势变化显著性。

(2) LOWESS 局部加权方法作为非参数方法,用来平滑 NDVI 与气候因子的年时间序列<sup>[32]</sup>。通过设置局部加权范围、多项式回归,得到趋势变化的平滑结果<sup>[33]</sup>。计算过程为以一个点  $x$  为中心,向前后截取一段总长度为  $frac$  的数据,对于该段数据用权值函数  $w$  做一个加权的线性回归,记  $(x, \hat{y})$  为该回归线的中心值,其中  $\hat{y}$  为拟合后曲线对应值。对于所有的  $n$  个数据点则可作出  $n$  条加权回归线,每条回归线的中心值的连线则为这段数据的 LOWESS 曲线。

LOWESS 需设置参数。对长度  $frac$ , 气候变化对 NDVI 的影响为 15 年以上<sup>[3,34]</sup>, 研究数据长度为 34 年,  $frac$  选用 0.5 ( $frac$  的值为加权数据数目与所有数据比值)。拟合散点数据采用最基本权值函数  $B$  函数:

$$B(x) = \begin{cases} (1 - x^2)^2 & (|x| < 1) \\ 0 & (|x| \geq 1) \end{cases} \quad (3)$$

LOWESS 方法中局部加权计算的迭代次数设置为 1, 不设置回归间隔。LOWESS 方法利用 Python 中 statsmodels.lowess 包完成计算。

#### 1.3.2 NDVI与气候因子相关分析

用 Pearson 相关与偏相关来计算 NDVI 分别对气温与降水的相关性<sup>[35]</sup>。偏相关是排除其他环境因子影响后两个因子的相关性,计算尺度为整个区域尺度与点尺度,之后利用  $t$  检验<sup>[36]</sup>对 Pearson 相关系数和偏相关系数进行显著性检验。Pearson 相关计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中:  $R$  为相关系数;  $n$  为计算年份(34年);  $X$ 、 $Y$  分别代表不同年份的 NDVI 与气候因子。

偏相关计算公式为:

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{1 - r_{13}^2} \sqrt{1 - r_{23}^2}} \quad (5)$$

式中:  $r_{12.3}$  为保持变量 3 不变时变量 1 与变量 2 的相关系数,其他类似。气候变化对 NDVI 的影响为 15 年以上<sup>[3]</sup>, 以 15 年为窗口长度,滑动计算 34 年间



NDVI对气候因子的变化过程<sup>[3]</sup>。

*t*检验统计量计算公式为:

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1-r_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-2} \tag{6}$$

式中:  $r_{xy,z}$  为偏相关系数;  $n$  为样本数;  $m$  为控制变量个数。可通过  $t$  分布表得到不同显著性水平上的临界值  $t_{\alpha}$ , 若  $t > t_{\alpha}$ , 则显著相关, 反之则不显著相关。

1.3.3 残差趋势分析

残差趋势方法将气候影响与人类影响独立开来, 是用来分离二者影响的常用方法<sup>[22]</sup>。基本过程为: 利用气候因子与NDVI进行多元回归, 之后将实测值与回归结果做差, 回归结果作为气候影响, 差值作为人类影响结果<sup>[37]</sup>。计算公式为:

$$NDVI_{CC} = a \times T + b \times p + c \tag{7}$$

$$NDVI_{HA} = NDVI_{obs} - NDVI_{CC} \tag{8}$$

式中:  $NDVI_{CC}$  为回归值,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为回归系数,  $NDVI_{obs}$  与  $NDVI_{HA}$  分别代表实测值与人类影响,  $T$  为温度,  $p$  为降水。将计算的  $NDVI_{obs}$  与  $NDVI_{HA}$  利用式(1)进行趋势计算,  $NDVI_{HA}$  趋势显著则表示人类活动有显著影响, 否则为基本无影响<sup>[35]</sup>, 同时根据二者计算的趋势, 可将区域分为受不同驱动影响的6种类型<sup>[31]</sup>(表1)。

2 结果与分析

2.1 NDVI与气候因子的时空变化特征

对于黄河水源涵养区整个区域尺度上的NDVI与气候因子做趋势分析, 结果如图2。不同时段

NDVI与气候因子年变化趋势存在差异, 根据线性趋势, 植被生长期NDVI呈显著增长趋势, 年增长速率为0.0009/a; 温度也呈显著增长, 增长趋势为0.041 °C/a; 降水呈减少趋势, 速率为-1.004 mm/a。春夏秋三季NDVI均呈显著增长趋势, 年增长速率分别为0.001/a、0.0006/a、0.001/a, 增长速率最快季节为春季与秋季, 夏季增长速率最低, 由此可知, 生长期NDVI的增长主要来源于春秋二季的NDVI增长。春夏秋三季温度也呈显著增长趋势, 年增长速率分别为0.055 °C/a、0.036 °C/a、0.040 °C/a, 与NDVI在不同季节增长差异类似, 生长期温度增长主要来自春秋两季增长; 降水量在时间分配上存在差异, 生长期春夏秋三季降水均呈减少趋势。

根据LOWESS局部趋势变化可知, 涵养区NDVI趋势变化可较明显地划分为3个阶段: 第一阶段为20世纪90年代中期前, NDVI呈增长趋势; 第二阶段为90年代中期到2000年代中期, NDVI增长速率降低, 增长极为缓慢; 最后一个阶段为2000年代中期之后, NDVI增长加速, 增长速率较第一阶段更快。生长期温度变化最明显时间发生在2005年前后, 温度由增长变为停滞增长。生长期降水年际波动较大, 无明显跳跃点, 2005年之后降水减少速率变快。综合4个不同时段变化过程, NDVI与温度的变化阶段性较明显, 而降水由于本身减少趋势不显著且其变化幅度较大, 总体无显著阶段变化。

由于高原区与平原区存在显著地形差异, 因此, 本文针对不同宏观地形尺度(高原区与平原区)分别进行了NDVI与气候因子的趋势分析, 结果如图3与图4。与整个区域趋势变化相比, 高原区与平原区趋势变化存在显著差异: 平原区NDVI增长速率(0.0016/a)高于高原区(0.0007/a), 即涵养区NDVI主要由平原区贡献; 由于气温空间变异性不大<sup>[21]</sup>, 总体上平原区气温增长速率(0.039 °C/a)稍低于高原区气温变化(0.042 °C/a); 累积降水存在较大差异, 平原区降水呈降低趋势(-4.848 mm/a), 而高原区降水呈增加趋势(0.217 mm/a)。进一步分析得高原与平原NDVI的增长均主要源于春季与秋季NDVI的增长, 对比不同季节NDVI的增长, 高原区秋季NDVI增长更快, 而平原区春季NDVI增长更快; 平原区秋季温度增长速率在各个时段中速率是最低的(0.027 °C/a); 降水的主要差异体现在高原区降水季节差异更大, 高原区降水春秋两季呈多年降低趋势, 而夏季呈增长趋势(0.264 mm/a), 而平原区各时段

表1 植被NDVI变化驱动因素判定标准  
Tab.1 Criteria for determining driving factors of NDVI change

S (NDVI <sub>obs</sub> )	驱动要素	划分标准	
		S (NDVI <sub>CC</sub> )	S (NDVI <sub>HA</sub> )
>0	CC & HA	>0	>0
	CC	>0	<0
	HA	<0	>0
<0	CC & HA	<0	<0
	CC	<0	>0
	HA	>0	<0

注: S代表趋势, CC代表气候影响, HA代表人类活动影响。  
下同。

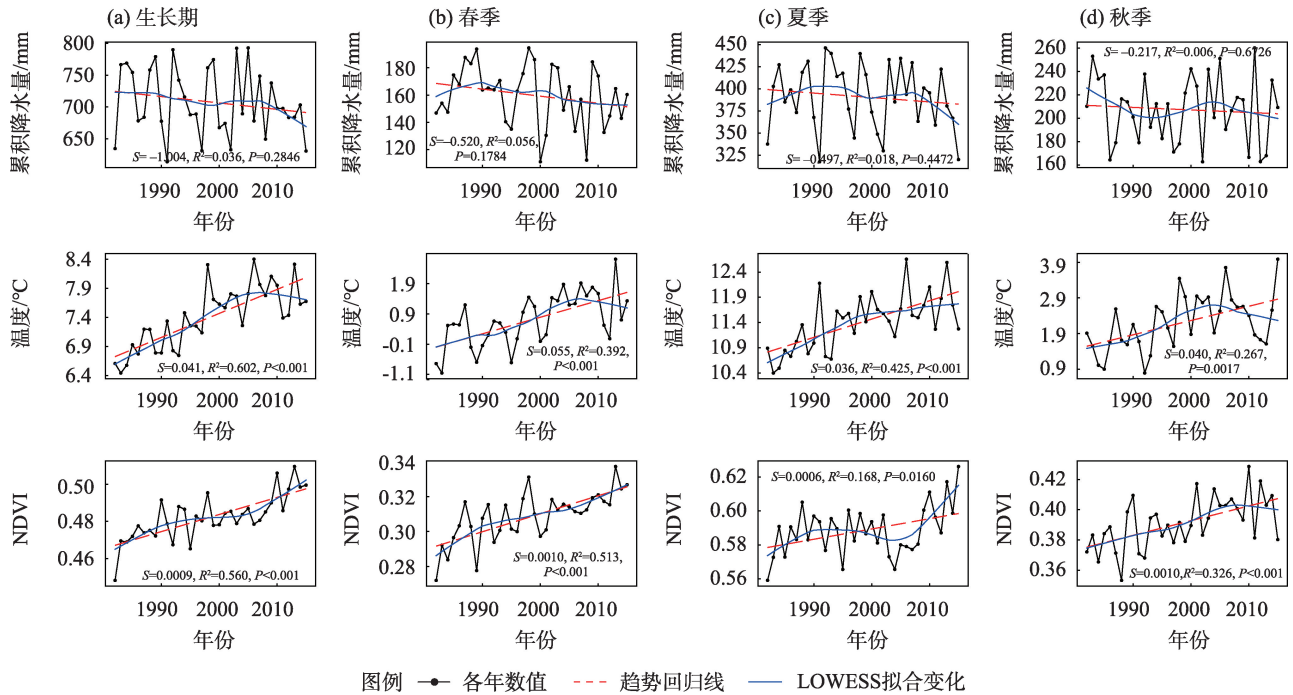


图2 黄河水源涵养区区域NDVI与气候因子变化趋势

Fig.2 Trend of variation of regional NDVI and climatic factors in the Yellow River water conservation zone

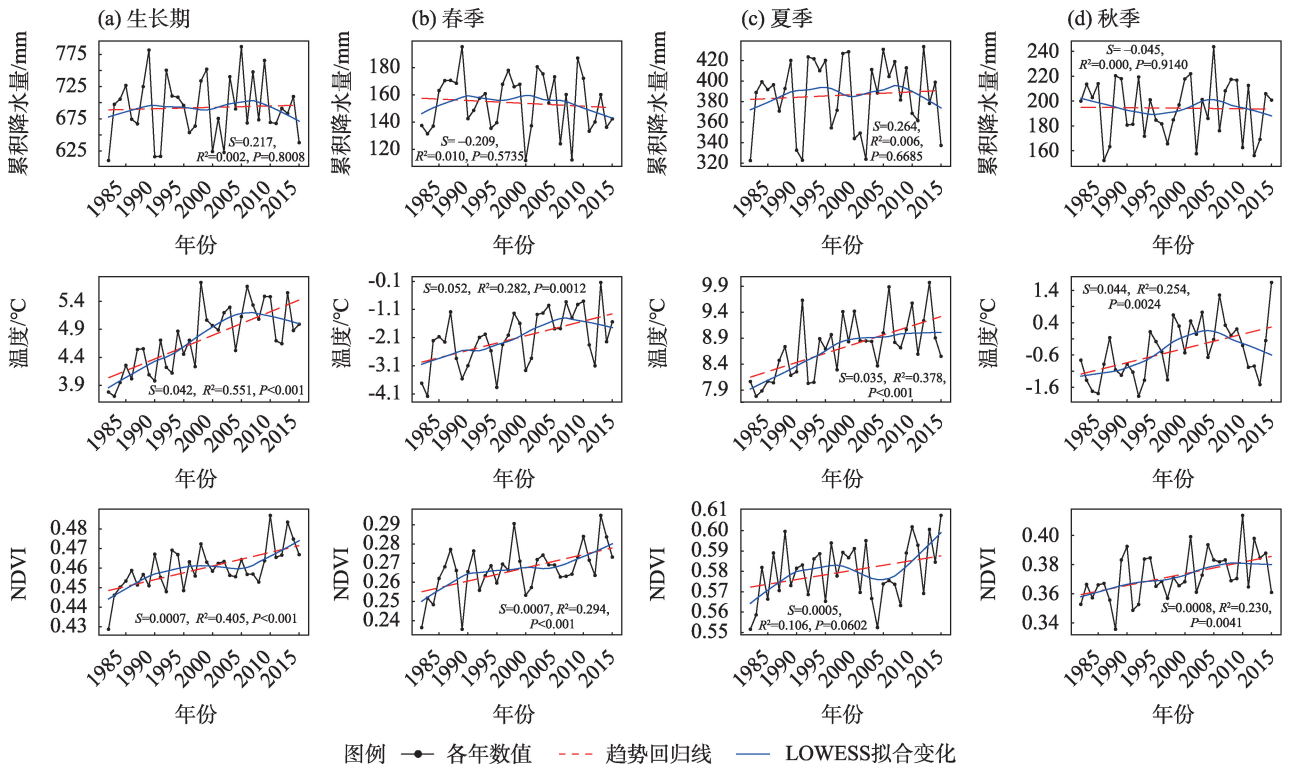


图3 高原区NDVI与气候因子变化趋势

Fig.3 Trend of variation of NDVI and climatic factors in the plateau region

均呈下降趋势。由于高原区占较高的面积比重,高原区趋势变化与整个涵养区对应的结果具有一定

相似性。

由图5可见,对于黄河水源涵养区空间NDVI

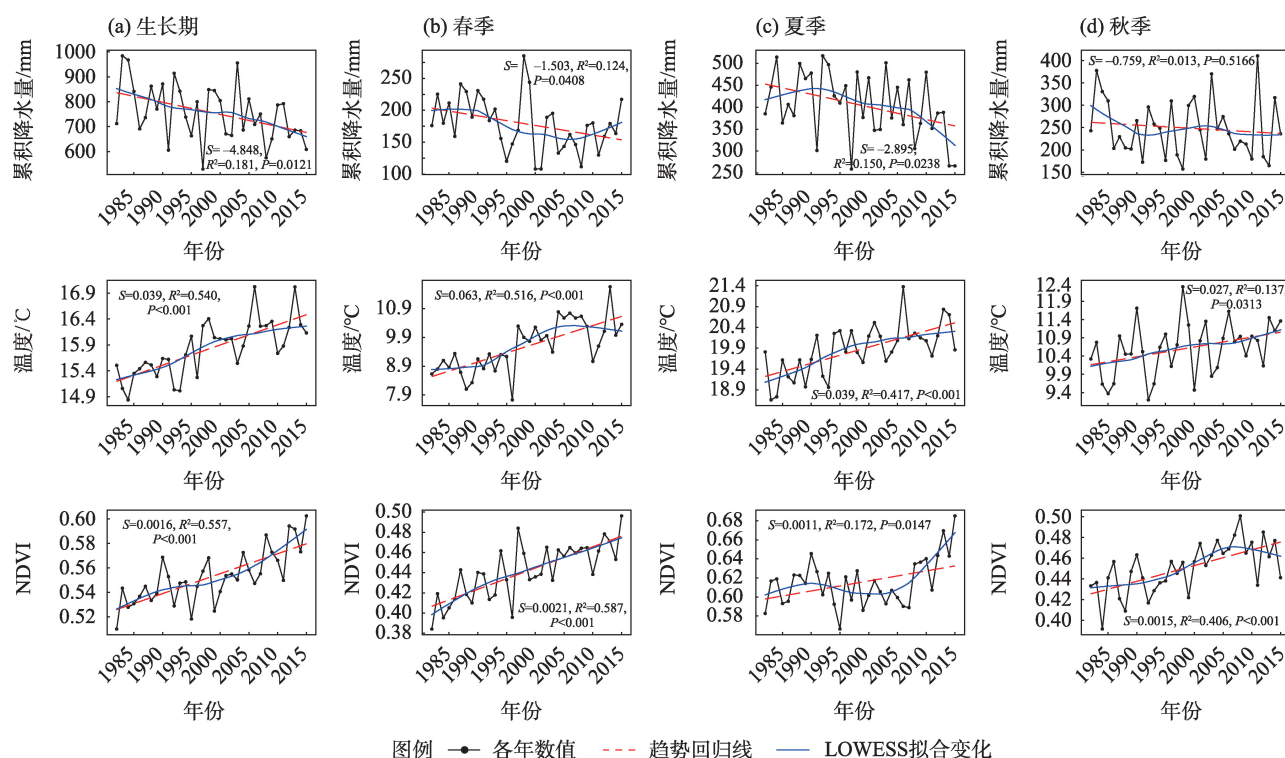


图4 平原区NDVI与气候因子变化趋势

Fig.4 Trend of variation of NDVI and climatic factors in the plain area

趋势变化,生长期与春秋季空间分布具有相似性,春秋季NDVI呈增长趋势的面积分别占90.2%、89.4%,而夏季NDVI增长面积占70%,生长期NDVI的增长主要来自于春秋季,与之前所得结论一致。区域NDVI增长显著性的空间统计如表2,区域生长期NDVI显著增长区域占58.6%,增长区域占89.2%,区域总体呈增长趋势。生长期NDVI显著增长区域集中在渭河流域、伊洛河流域西部、高原区东北部,有少量NDVI趋势衰退区域散布在黄河源区域与渭河流域东部,NDVI衰退面积占10.8%,衰退原因除气候变化外,可能来自于过度放牧、城市化等人类活动<sup>[38-39]</sup>。NDVI衰退趋势主要发生在夏季高原区南部、关中盆地和伊洛河流域东部区域,其中在夏季以草甸为主的覆被区域呈明显大范围衰退趋势。

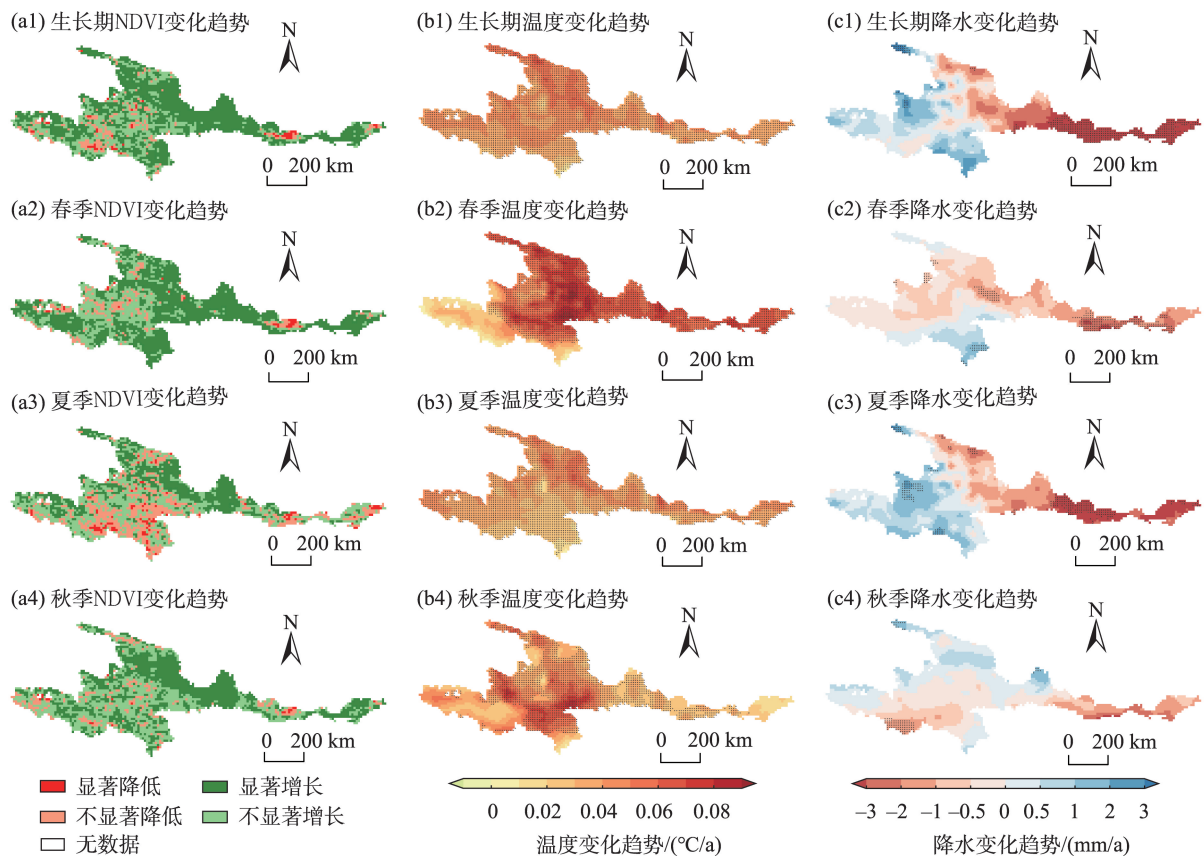
降水空间趋势分布生长期与夏季类似,区域总体上东部为降低趋势,西部为增长趋势。生长期平原区,特别是关中盆地与伊洛河流域,降水呈显著降低趋势,平原区除生长期与夏季大部分地区呈显著降低趋势外,春季和秋季也呈降低趋势;而高原区除东北部为降低趋势外,大部分地区均呈湿润趋势,夏季少部分区域呈显著湿润趋势,而高原区春

秋季降水趋势大部分地区为降低趋势,即高原区降水的增长主要来自于夏季降水,与之前趋势分析结果一致。对于温度空间趋势分布,生长期与夏季分布类似,显著特点为所有时段区域大部分地区呈显著增长趋势,整体上春秋季温度增长更快,与之前趋势分析结果一致;春秋季高原区西部与南部少数地区、秋季伊洛河流域大部分地区温度增长不显著。

## 2.2 NDVI对气候因子的响应

利用Pearson相关分析,得到区域NDVI对气候因子的相关关系(表3)与区域相关关系空间分布图(图6)。由表3可知,涵养区生长期、春夏季NDVI与温度呈显著相关,相应时段受温度控制,温度升高促进植被的生长<sup>[40]</sup>;秋季受降水和温度同时控制,NDVI与降水呈负相关,这是由于降水减少进而导致云量等减少<sup>[3]</sup>,增长了秋季植被的太阳日照长度,促进NDVI的升高。高原区与全区的相关关系类似,但其生长期、春季植被与降水呈正相关,春季的降水可以促进NDVI的升高。平原区NDVI在生长期与气温和降水均呈显著相关,温度和降水同时控制生长期植被的生长,春季NDVI与降水呈负相关,夏秋两季植被生长均与温度呈正相关,与降水呈负相关。





注:降雨与温度趋势变化空间分布图中,格点处“+”表示显著增长或降低。

图5 黄河水源涵养区NDVI、气温、降水空间变化趋势分布

Fig.5 Spatial trend distribution NDVI, temperature and precipitation of the Yellow River water conservation zone

表2 黄河水源涵养区区域NDVI空间趋势变化统计

Tab.2 Statistical table of regional NDVI spatial trend change in the Yellow River water conservation zone

时段	区域增长占比/%			区域衰退占比/%		
	显著增长	弱增长	合计	显著衰退	弱衰退	合计
生长期	58.6	30.5	89.2	2.0	8.8	10.8
春季	59.8	30.4	90.2	1.2	8.6	9.8
夏季	30.9	39.1	70.0	3.9	26.0	30.0
秋季	45.7	43.7	89.4	0.8	9.8	10.6

植被生长与气候因子的空间相关关系存在季节性差异。对于NDVI与降水的相关关系,由图6可知,生长期呈正相关范围占比50.4%(表4),主要分布在高原区东部与伊洛河流域东部;春季除关中平原、伊洛河流域呈负相关外,其他区域均呈正相关,正相关范围占比66.6%,其中高原区横断山脉北部呈显著正相关;夏秋季具有一定的相似性,大范围地区呈负相关,而高原区东北部与伊洛河东部区域呈正相关。对于NDVI与温度的相关关系,各季节基本以正相关为主,生长期正相关区域占比91.4%,显著正相关区域占比45.6%,显著正相关分

布在高原区与渭河上游,只有平原少部分区域呈负相关;春季相关关系广泛呈正相关,正相关占比97.6%,其中显著正相关占比68.8%,显著正相关范围集中分布在高原区西南与东北部、渭河流域、伊洛河流域西部;夏季负相关关系是各时段中占比最多的季节,负相关占比26.2%,零散分布于高原区东北部与平原区;秋季相关关系同样以正相关为主,正相关区域占比83.1%。

除在不同地形尺度、空间范围研究植被趋势变化与对气候的响应外,由于不同下垫面植被存在的物候与生理差异,不同的植被类型对气候变化的响

表3 黄河水源涵养区区域NDVI与气候因子Pearson相关关系

Tab.3 Pearson correlation between regional NDVI and climatic factors in the Yellow River water conservation zone					
区域	相关系数	生长期	春季	夏季	秋季
涵养区	$R_{NDVI-p}$	-0.140	0.131	-0.209	-0.175
	$R_{NDVI-T}$	0.608***	0.723***	0.350*	0.288
高原区	$R_{NDVI-p}$	0.046	0.215	-0.187	-0.147
	$R_{NDVI-T}$	0.584***	0.695***	0.413*	0.194
平原区	$R_{NDVI-p}$	-0.440**	-0.119	-0.193	-0.260
	$R_{NDVI-T}$	0.552***	0.767***	0.058	0.262

注:  $R$  代表变量之间的皮尔逊相关系数,\*\*\*、\*\*、\*分别表示 $P<0.001$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 。下同。

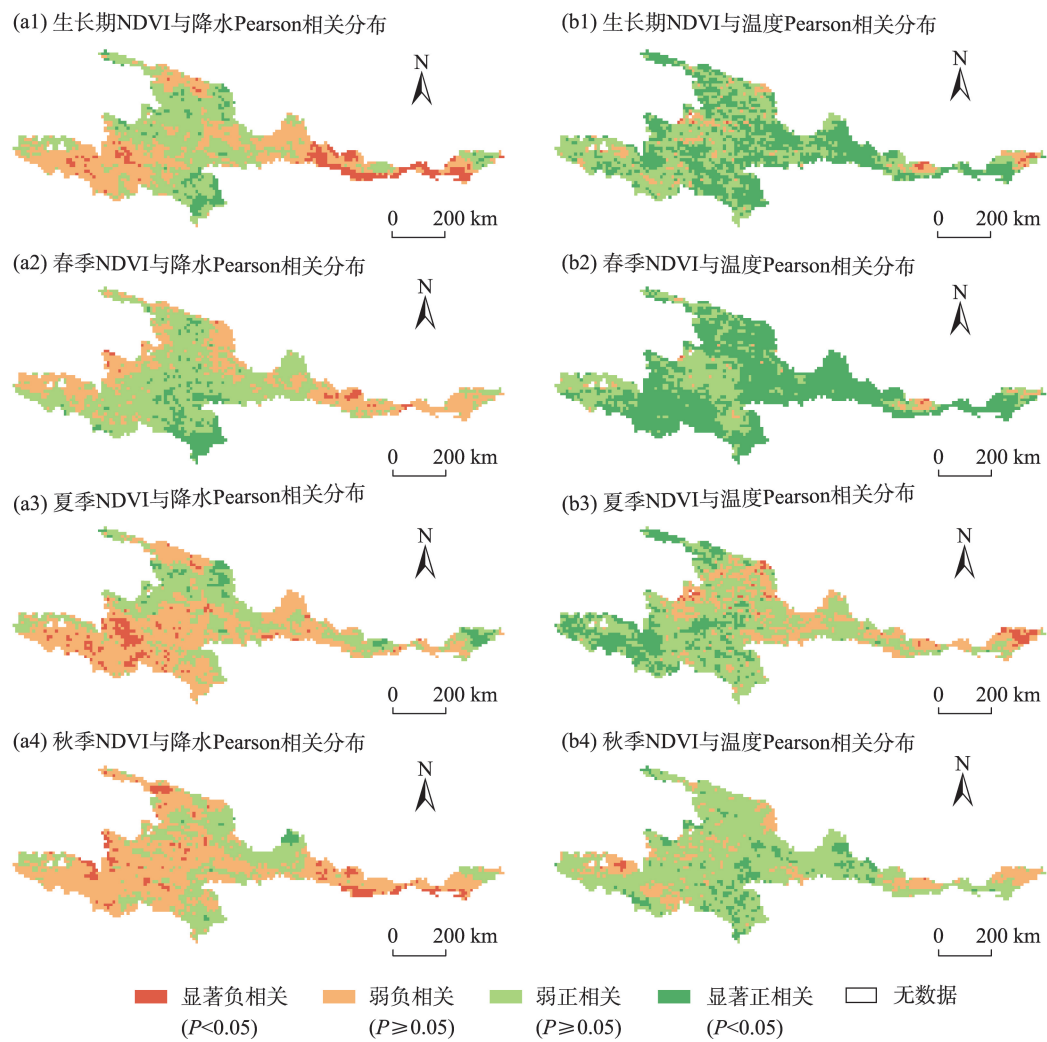


图6 黄河水源涵养区NDVI与气候因子Pearson相关空间分布

Fig.6 Pearson correlation spatial distribution of NDVI and climatic factors in the Yellow River water conservation zone

应也存在差异<sup>[3,10,41]</sup>。本文也针对不同植被类型做了同样研究,结果如表5所示。研究区域以灌丛、草甸、草原、栽培植被分布最广。栽培植被NDVI计算特征与上述平原区计算结果具有一致性;由于相关计算方式的差异,春季NDVI与降水Pearson相关呈

负相关,但由偏相关结果可得,实际春季降水对植被生长有促进作用,而夏季的持续升温不利于栽培植被的生长;栽培植被在4种植被类型中NDVI增长速率是最快的,生长期增长速率为0.00168/a。根据图1,除栽培植被外,其他3类植被主要分布在高

表4 黄河水源涵养区空间Pearson相关统计

Tab.4 Pearson correlation statistical table of the Yellow River water conservation zone

时段	NDVI与降雨 Pearson 相关统计				NDVI与温度 Pearson 相关统计			
	正相关占比/%		负相关占比/%		正相关占比/%		负相关占比/%	
	$P<0.05$	$P\geq 0.05$	$P<0.05$	$P\geq 0.05$	$P<0.05$	$P\geq 0.05$	$P<0.05$	$P\geq 0.05$
生长期	5.7	44.7	8.5	41.1	45.6	45.8	0.8	7.8
春季	9.7	56.9	1.3	32.1	68.8	28.4	0.1	2.7
夏季	4.4	36.0	5.8	53.8	19.9	53.9	2.4	23.8
秋季	1.0	32.1	7.0	59.9	10.3	72.8	0.4	16.5

表5 黄河水源涵养区不同植被类型植被变化差异

Tab.5 Vegetation dynamics of different vegetation types in the Yellow River water conservation zone

植被类型	时段	NDVI趋势 /(/a)	Pearson 相关		偏相关	
			$R_{NDVI-p}$	$R_{NDVI-T}$	$r_{NDVI-p}$	$r_{NDVI-T}$
灌丛	生长期	0.00074***	-0.15	0.55***	-0.12	0.55***
	春季	0.00108***	0.26	0.66***	0.14	0.64***
	夏季	0.00021	-0.28	0.21	-0.24	0.15
	秋季	0.00083*	-0.26	0.31	-0.22	0.28
草甸	生长期	0.00051**	0.03	0.55***	-0.13	0.56***
	春季	0.00066**	0.27	0.68***	-0.07	0.65***
	夏季	0.00027	-0.28	0.48**	-0.40*	0.54**
	秋季	0.00058*	-0.14	0.16	-0.15	0.17
栽培植被	生长期	0.00168***	-0.34*	0.52**	-0.08	0.43*
	春季	0.00166***	-0.09	0.73***	0.18	0.74***
	夏季	0.00138**	-0.20	0.09	-0.18	-0.01
	秋季	0.00172***	-0.13	0.29	-0.04	0.27
草原	生长期	0.00107***	0.16	0.43*	0.20	0.45**
	春季	0.00057***	0.05	0.60***	0.04	0.60***
	夏季	0.00105***	0.13	0.13	0.19	0.19
	秋季	0.00116***	-0.04	0.21	-0.02	0.21

原区,灌丛、草甸、草原主要分别分布在高原区东部、南部、北部,三者之间植被的动态也存在明显差异<sup>[20]</sup>。草原植被的NDVI增长趋势最大,生长期增长速率为0.00107/a;灌丛、草原、草甸植被生长期与春季植被生长受温度控制;对于草原植被,夏季降水促进植被生长,灌丛、草甸植被则与其相反。

利用LOWESS以15年滑动窗口拟合植被生长与气候因子的相关多年变化,得到结果如图7,可见植被生长与气候因子的相关性随时间存在阶段性变化。对于生长期偏相关变化过程,NDVI与温度多年呈正相关,在2000年左右NDVI与降水相关性由负相关变为正相关,之后几年又转变为负相关,与图2中NDVI趋势变化在该阶段变缓相对应;春季偏相关图(图7b)显示NDVI与气温一直呈显著相关,而NDVI与降水偏相关关系在1996年左右由负

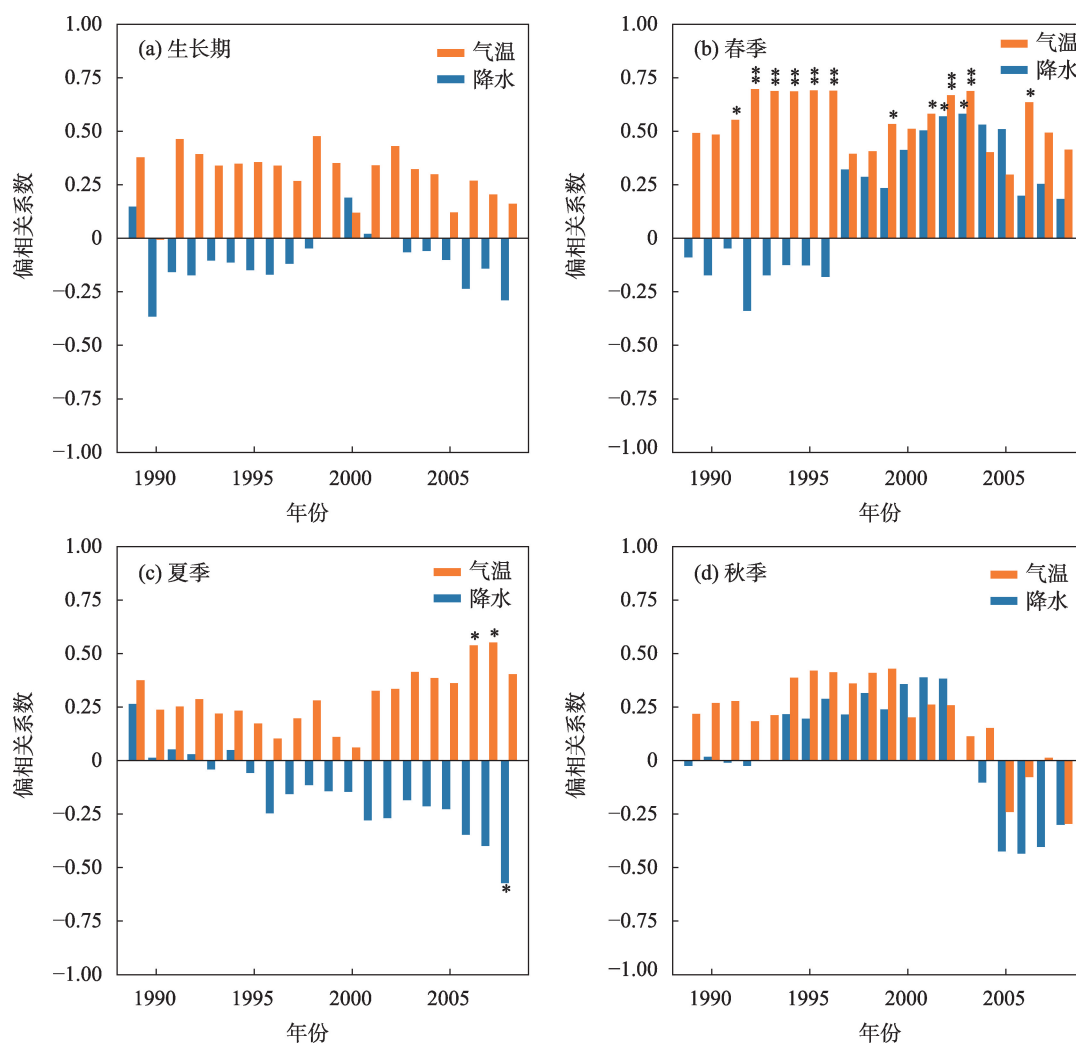
相关变为正相关,而在该阶段与图2中NDVI增长变缓对应;夏季NDVI与温度、降水分别呈正相关与负相关,且随时间相关性逐渐增强;秋季NDVI在2004年左右与温度、降水的相关性均由正相关转变为负相关,对应的NDVI、温度、降水变化趋势也在该时段发生转变。综上,黄河水源涵养区在各不同时间段内NDVI与降水、气温的相关性存在阶段性差异,同时NDVI、降水和气温在对应的时间也表现出相应的趋势变化。平原区与高原区NDVI对气候因子的偏相关变化经过验证也存在明显差异。

**2.3 NDVI变化的驱动因素**

利用残差分析得到回归趋势分布与残差趋势分布(图8a、8b),根据表1分类得到图8c,并将涵养区NDVI变化的驱动力分类结果进行统计得到表6。

将多元回归结果作为气候变化的影响,由图8a





注:图中\*\*、\*分别表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 。

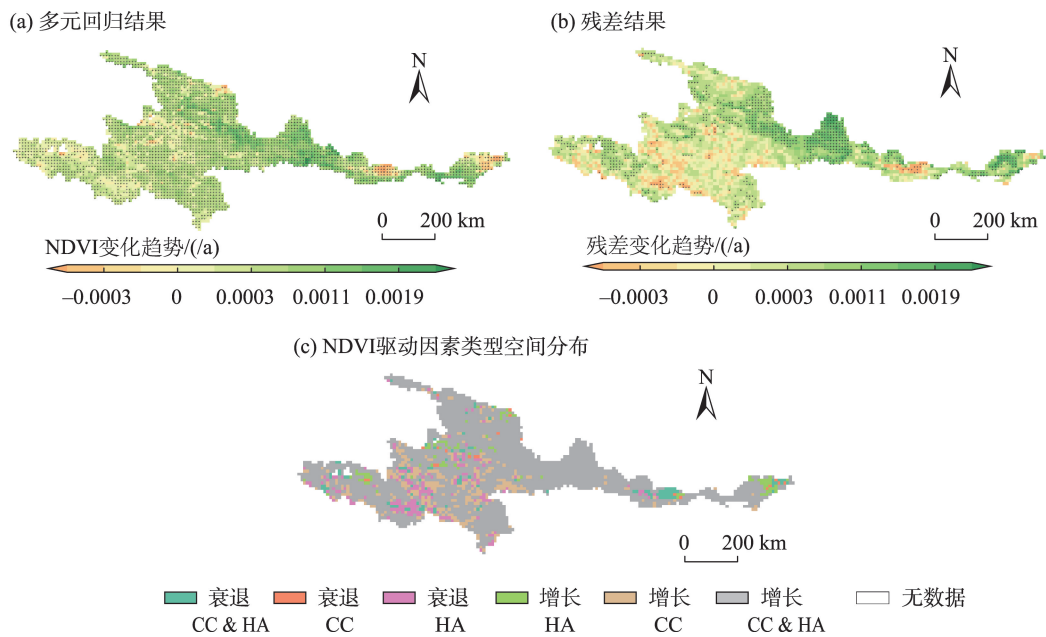
图7 黄河水源涵养区区域偏相关变化过程

Fig.7 Partial correlation trend of the whole Yellow River water conservation zone

可得,受气候变化影响下的NDVI在整个区域基本呈显著增长趋势,增长最快区域分布在高原区东北部与渭河流域上游,但也存在气候对NDVI为减弱趋势影响的区域,主要分布在关中平原及伊洛河流域东部。残差趋势结果代表人类活动影响,其中人类活动对NDVI有显著影响的区域面积占比28.28%,人类活动呈显著积极作用区域分布在高原区东北部与西部、横断山脉北端、渭河上游区、伊洛河西部,以上区域也是NDVI增长速度最快地区;人类活动对植被生长呈消极作用区域分布在高原区中部、渭河流域东部、伊洛河流域东部,其中渭河流域东部NDVI呈显著降低趋势。

图8c显示了NDVI变化驱动力的空间分布。由图可知大部分地区为人类活动、气候共同作用下

NDVI增长型,区域面积占比74.29%,与回归结果、残差结果对应一致,高原区东北部、渭河上游、伊洛河流域西部全范围内为气候和人类活动共同作用下增长型;由单一气候或人类活动作用下NDVI增长区域分别分布在高原区中部(区域植被以灌丛、草甸为主)、伊洛河流域东部(区域植被以栽培植被为主);区域内NDVI总体呈增长趋势的面积占比89.16%,呈降低趋势的面积占比10.84%;人类气候共同作用、单一气候作用、单一人类活动作用造成NDVI减小的区域面积占比分别为3.84%、0.77%、6.23%,可知NDVI降低区域中由单一人类活动影响的面积占比最大;单一人类活动导致NDVI降低的区域主要散布在高原区中部与西南部;由单一气候作用导致的NDVI降低只存在于极个别区域,而



注:格点处“+”表示显著增长或降低。

图8 残差分析结果

Fig.8 Residual analysis results

表6 NDVI变化驱动力分类  
Tab.6 NDVI change driving force classification

变化趋势	驱动类型	占比/%
增长	CC & HA	74.30
	CC	11.48
	HA	3.38
降低	CC & HA	3.84
	CC	0.77
	HA	6.23

由人类活动和气候同时作用导致的NDVI降低区域分布在关中盆地东部、伊洛河流域东部少量区域与高原少数区域。

3 讨论

植被生长趋势及其对气候因子的响应关系在不同的时空尺度存在差异。黄河水源涵养区位于半干旱、半湿润地区,东西气候、地形条件存在差异性,进而导致以高原区、平原区划分的NDVI趋势变化与响应关系存在差异<sup>[42]</sup>。由于地形、气候、植被覆盖的差异,根据相关分析结果,高原区生长期显著受温度的控制,说明高原区温暖的环境可以促进植被的生长<sup>[40]</sup>;而平原区生长期同时受温度、降水的显著影响,温暖的环境易促进耕作植被的生长,

而降水的减少也利于耕作植被的生长,可能是由于夏秋季降水的减少可促进光照时间的增加<sup>[3]</sup>,进而促进了植被的生长,同样的结论可在高原区夏秋季植被与降水的负相关中体现,但高原区大部分区域春季NDVI与降水呈正相关,可能是因为高原区域春季本身雨水较少,光照较为充足,降水的增加有利于植被的生长。夏秋两季植被与降水均呈负相关,除降水的减少带来的云量减少、日照增多外,He等<sup>[20]</sup>指出,在部分地区降水减少条件下植被会通过调节气孔大小和数量限制水分蒸散,由此导致CO<sub>2</sub>浓度升高、光合作用增加,促进植被生长。同时进一步可由图6得到,NDVI与降水呈显著负相关区域主要集中在平原区,其原因还可能是耕作植被受人类影响,即使在降水减少条件下也可通过农业技术措施来进行作物生长环境的改善<sup>[43]</sup>。

植被动态与气候的相关性存在明显的不同时间尺度下的年际差异性,主要体现在由LOWESS、偏相关计算结果的阶段变化。由图7得到NDVI与降水的关系呈现阶段性,其也表现在趋势分析中NDVI滑动年限窗口内趋势变化与降水变化的差异性,说明区域NDVI趋势与气候因子的关系存在动态变化,这是由于不同年份的冷暖干湿状态不同,导致NDVI与气候因子相关关系存在阶段性变化<sup>[44]</sup>。

残差分析方法分离自然因素与人类因素过程

中使用多元线性回归方法时,以降水、气温作为输入变量进行回归是分离气候变化影响的常用方法<sup>[3,45]</sup>,由于未考虑到植被的非线性响应、气候变化的累积效应等问题<sup>[21]</sup>,存在一定误差,但能有效得到人类与气候影响下植被变化的大致结果。之后的研究将针对植被与气候因子的非线性关系进行研究,例如利用随机森林等机器学习方法进一步探讨植被的动态变化与多种因素的关系。

涵养区的植被变化受人类活动和气候的共同作用整体呈增长趋势,与Liu等<sup>[46]</sup>对黄河流域植被动态研究结果一致,该类驱动面积占比74.29%,分布在高原区草地、渭河流域西部、伊洛河流域西部,其原因主要是由于人类退耕还林还草生态工程、植树造林等措施<sup>[47-48]</sup>与气候因素共同促进了植被的生长<sup>[49]</sup>。而高原区中部同时出现由于人类活动引起的NDVI增长与降低趋势,说明人类在该范围同时存在保护与过度放牧等行为<sup>[50]</sup>,但图8b显示人类活动并不显著,因此不会产生特别严重的影响。由气候单独造成的NDVI降低趋势基本不存在,说明研究区域气候变化整体为促进植被生长<sup>[51]</sup>。城市化会使NDVI呈降低趋势<sup>[39]</sup>,主要体现在关中平原东部受人类活动影响NDVI呈显著降低趋势。

## 4 结论

(1) 黄河水源涵养区1982—2015年NDVI呈显著增长趋势,生长期增长速率为0.0009/a,主要来自于春秋季节NDVI的增长。以不同地形划分的高原区与平原区NDVI与气候因子多年变化趋势存在差异:二者气温增长变化差异不大,但平原区NDVI增速明显大于高原区NDVI增速,是由于地形差异<sup>[42]</sup>伴随气候、植被类型等原因造成的。

(2) 黄河水源涵养区植被生长期NDVI与降水呈负相关、与温度呈正相关,是地区降水阶段变化、气温条件引起的植被生理胁迫等因素导致的结果,同时区域气温呈显著增长趋势,NDVI变化主要受温度控制。由于不同植被生理状态的差异,不同植被类型的NDVI变化趋势与对气候因子的响应存在差异,各主要植被NDVI增长趋势由高到低分别为栽培植被>草原>灌丛>草甸。

(3) 由于不同年份的冷暖干湿差异,不同植被对降水、气温的相关性也存在差异<sup>[44]</sup>,涵养区NDVI呈3个变化阶段:第一阶段在20世纪90年代中期之

前,NDVI与温度、降水分别呈正、负相关,该阶段NDVI显著增长;第二阶段为90年代中期到2000年代中期,NDVI与温度呈正相关,与降水负相关性减弱,且之后往正相关发展,该阶段NDVI增长减缓,并呈缓速停滞增长;第三阶段为2000年代中期之后,NDVI与温度、降水回到之前的正、负相关性,NDVI呈显著增长趋势。该结果证明NDVI动态呈阶段性变化。

(4) 黄河水源涵养区植被变化同时受气候、人类活动影响,不同驱动类型面积占比由高到低分别为共同促进>气候促进>人为抑制>共同抑制>人为促进>气候抑制。黄河水源涵养区NDVI的增长主要受气候、人类活动的共同影响和单一人类活动的影响,两种影响的范围集中分布在高原区东北部、渭河流域西部、伊洛河流域西部,该部分区域也是人类活动造成NDVI显著上升的区域,说明人类退耕还林、植树造林等生态工程对植被增长起到了积极作用。人类活动造成NDVI显著降低的区域分布在高原区西南部、关中平原东部,说明人类一些放牧、开垦、城市化等活动在这些区域对植被造成了破坏。

## 参考文献(References)

- [1] 高红凯, 刘俊国, 高光耀, 等. 水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析 [J]. 地理学报, 2023, 78(1): 139-148. [Gao Hongkai, Liu Junguo, Gao Guangyao, et al. Ecological and hydrological perspectives of the water retention concept. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(1): 139-148.]
- [2] Omer A, Elagib N A, Ma Z G, et al. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141446. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141446.
- [3] Chu H S, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2051-2062.
- [4] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务 [J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196. [Lv Yihe, Hu Jian, Sun Feixiang, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5191-5196.]
- [5] Chen Z F, Wang W G, Cescatti A, et al. Climate-driven vegetation greening further reduces water availability in drylands [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(6): 1628-1647.



- [6] Hansen J, Sato M, Kharecha P, et al. Earth's energy imbalance and implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(24): 13421-13449.
- [7] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, et al. Recent global decline of CO<sub>2</sub> fertilization effects on vegetation photosynthesis [J]. *Science*, 2020, 370: 1295-1300.
- [8] Yang L Q, Guan Q Y, Lin J K, et al. Evolution of NDVI secular trends and responses to climate change: A perspective from nonlinearity and nonstationarity characteristics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 254: 112247. doi: 10.1016/j.rse.2020.112247.
- [9] 刘玲玲, 刘良云, 胡勇. 1982—2006年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1433-1442. [Liu Lingling, Liu Liangyun, Hu Yong. Assessment and intercomparison of satellite-derived start-of-season (SOS) measures in Eurasia for 1982–2006. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1433-1442. ]
- [10] 周玉科. 青藏高原植被NDVI对气候因子响应的格兰杰效应分析 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5): 718-730. [Zhou Yuke. Detecting Granger effect of vegetation response to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2019, 38(5): 718-730. ]
- [11] 李双双, 张玉凤, 汪成博, 等. 气候变化和生态建设对秦岭—淮河北植被动态的影响 [J]. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1026-1036. [Li Shuangshuang, Zhang Yufeng, Wang Chengbo, et al. Coupling effects of climate change and ecological restoration on vegetation dynamics in the Qinling-Huaihe region. *Progress in Geography*, 2021, 40(6): 1026-1036. ]
- [12] 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.
- [13] Jin H Y, Chen X H, Wang Y M, et al. Spatio-temporal distribution of NDVI and its influencing factors in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127129. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127129.
- [14] He B, Chen A F, Wang H L, et al. Dynamic response of satellite-derived vegetation growth to climate change in the three north shelter forest region in China [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9998-10016.
- [15] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Interannual variations of monthly and seasonal Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in China from 1982 to 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14). doi: 10.1029/2002JD002848.
- [16] Liu Y, Li Y, Li S C, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13233-13250.
- [17] Niu Q F, Xiao X M, Zhang Y, et al. Ecological engineering projects increased vegetation cover, production, and biomass in semiarid and subhumid Northern China [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(13): 1620-1631.
- [18] Kelly A E, Goulden M L. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change [J]. *PNAS*, 2008, 105(33): 11823-11826.
- [19] 石淞, 李文, 丁一书, 等. 东北地区植被时空演变及影响因素分析 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(1): 276-289. [Shi Song, Li Wen, Ding Yishu, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation in Northeast China. *China Environmental Science*, 2023, 43(1): 276-289. ]
- [20] He L M, Chen J M, Pan Y D, et al. Relationships between net primary productivity and forest stand age in US forests [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3). doi: 10.1029/2010GB003942.
- [21] 马启民, 贾晓鹏, 王海兵, 等. 气候和人为因素对植被变化影响的评价方法综述 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 48-55. [Ma Qimin, Jia Xiaopeng, Wang Haibing, et al. Recent advances in driving mechanisms of climate and anthropogenic factors on vegetation change. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 48-55. ]
- [22] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近50 a中国西南地区地表干湿状况研究 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 104-116. [Su Xiucheng, Wang Lei, Li Qilin, et al. Study of surface dry and wet conditions in southwest China in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 104-116. ]
- [23] Miao C Y, Yang L, Chen X H, et al. The vegetation cover dynamics (1982–2006) in different erosion regions of the Yellow River Basin, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(1): 62-71.
- [24] Cuo L, Zhang Y X, Gao Y H, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 502: 37-52.
- [25] Zhe M, Zhang X Q. Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107431. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107431.
- [26] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:1000000) [M]. 北京: 地质出版社, 2007. [Zhang Xinshi. *Vegetation map of the People's Republic of China (1:1000000)*. Beijing, China: Geology Press, 2007. ]
- [27] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. *International Jour-*

- nal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [28] Pinzon J E, Tucker C J. A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI<sub>3g</sub> time series [J]. Remote Sensing, 2014, 6(8): 6929-6960.
- [29] Muñoz S. ERA5-Land hourly data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [DB/OL]. 2019-07-12 [2023-06-19]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- [30] Hou W J, Gao J B, Wu S H, et al. Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern karst region of China [J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 11105-11124.
- [31] 卫宇婷. 山西省 1986—2015 年植被覆盖变化分析及其对气候因子的响应 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2018. [Wei Yuting. Analysis of vegetation cover change and its response to climatic factors in Shanxi Province from 1986 to 2015. Taigu, China: Shanxi Agricultural University, 2018. ]
- [32] Basarin B, Lukić T, Pavić D, et al. Trends and multi-annual variability of water temperatures in the River Danube, Serbia [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(18): 3315-3329.
- [33] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots [J]. Journal of the American Statistical Association, 1979, 74(368): 829-836.
- [34] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5018. doi: 10.1038/ncomms6018.
- [35] Jiang L L, Jiapaer G L, Bao A M, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 967-980.
- [36] Wang L, Chen W, Zhou W. Assessment of future drought in Southwest China based on CMIP5 multimodel projections [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(5): 1035-1050.
- [37] 杨钰杰, 白晓永, 谭秋, 等. 1982—2015 年“一带一路”地区 NDVI 时空演变规律及其影响因素 [J]. 山地学报, 2020, 38(2): 252-264. [Yang Yujie, Bai Xiaoyong, Tan Qiu, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution of NDVI and its influencing factors in the "Belt and Road" region from 1982 to 2015. Mountain Research, 2020, 38(2): 252-264. ]
- [38] Hou Q Q, Ji Z X, Yang H, et al. Impacts of climate change and human activities on different degraded grassland based on NDVI [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 15918. doi: 10.1038/s41598-022-19943-6.
- [39] Miao L J, He Y, Kattel G R, et al. Double effect of urbanization on vegetation growth in China's 35 cities during 2000–2020 [J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): 3312. doi: 10.3390/rs14143312.
- [40] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.
- [41] 赵卓文, 张连蓬, 李行, 等. 基于 MOD13Q1 数据的宁夏生长季植被动态监测 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(6): 741-752. [Zhao Zhuowen, Zhang Lianpeng, Li Xing, et al. Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data. Progress in Geography, 2017, 36(6): 741-752. ]
- [42] Zhu M, Zhang J J, Zhu L Q. Article title variations in growing season NDVI and its sensitivity to climate change responses to green development in mountainous areas [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 678450. doi: 10.3389/fenvs.2021.678450.
- [43] Geng G P, Yang R, Liu L Z. Downscaled solar-induced chlorophyll fluorescence has great potential for monitoring the response of vegetation to drought in the Yellow River Basin, China: Insights from an extreme event [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108801. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108801.
- [44] Shen M G, Piao S L, Cong N, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3647-3656.
- [45] He C Y, Tian J, Gao B, et al. Differentiating climate- and human-induced drivers of grassland degradation in the Liao River Basin, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(1): 4199. doi: 10.1007/s10661-014-4199-2.
- [46] Liu Y F, Guo B, Lu M, et al. Quantitative distinction of the relative actions of climate change and human activities on vegetation evolution in the Yellow River Basin of China during 1981–2019 [J]. Journal of Arid Land, 2023, 15(1): 91-108.
- [47] Li M Q, Liu S L, Liu Y X, et al. The cost-benefit evaluation based on ecosystem services under different ecological restoration scenarios [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(7): 398. doi: 10.1007/s10661-021-09188-7.
- [48] 金明, 于静洁. 生态保护和植树造林对黑河流域河川径流的影响 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 47-54. [Jin Ming, Yu Jingjie. The impact of ecological protection and afforestation on streamflow in Heihe River Basin. Progress in Geography, 2008, 27(3): 47-54. ]
- [49] 王子玉, 许端阳, 杨华, 等. 1981—2010 年气候变化和人

- 类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 1025-1032. [Wang Ziyu, Xu Duanyang, Yang Hua, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in Inner Mongolia, 1981–2010. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 1025-1032. ]
- [50] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, et al. Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 75(1): 27-36.
- [51] Ren Y Q, Liu J P, Liu S X, et al. Effects of climate change on vegetation growth in the Yellow River Basin from 2000 to 2019 [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 687. doi: 10.3390/rs14030687.

## Spatiotemporal variation of NDVI in the Yellow River water conservation zone and its driving factors

LIANG Zhi<sup>1,2,3</sup>, SUN Ruochen<sup>1,2,3\*</sup>, DUAN Qingyun<sup>1,2,3</sup>

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The water conservation zone of the Yellow River is a critical ecological function zone in China and further study is needed to maintain its ecosystem health and promote high-quality development. This study employed various analytical methods such as trend analysis, LOWESS (locally weighted scatterplot smoothing), Pearson and partial correlation analyses, and residual analysis, to investigate the spatiotemporal variation of vegetation and its driving factors in the Yellow River water conservation zone from 1982 to 2015. It also divided the conservation zone into plain and plateau regions based on topographical differences to examine the intra-regional disparities. The results reveal that: 1) The growing season normalized difference vegetation index (NDVI) in the conservation zone exhibited a significant growth trend, mainly driven by the rapid growth of NDVI in spring and autumn, with varying growth rates at different regional scales (0.0009/a for the whole area, 0.0007/a for the plateau area, and 0.0016/a for the plain area). 2) The correlation between regional NDVI and precipitation and temperature differed through time and across space. During the growing season, NDVI was negatively and positively correlated with precipitation and temperature, respectively. In spring and summer, temperature was the primary controlling factor, whereas in autumn, both precipitation and temperature were involved. Except for temperature in spring, the plain area was controlled by precipitation and temperature in other periods. The growing season NDVI of the conservation zone had a positive correlation with rainfall and temperature in 50.4% and 91.4% of cases, respectively. 3) The NDVI variation trend went through some stages—it stagnated in 1995–2015, during which the correlation between NDVI and rainfall shifted from negative to positive, but before 1995 and after 2015, NDVI increased significantly and had negative and positive correlations with rainfall and temperature, respectively. 4) Human activities and climate change jointly were the primary drivers of NDVI growth in the region, accounting for 74.30% of the total area. The second largest factor of vegetation growth was climate change, which accounted for 11.48% of the area, and vegetation decline caused by human activities accounted for 6.23% of the area. These findings suggest that ecological engineering construction effectively promoted vegetation recovery; however, human activities such as urbanization can also disrupt vegetation growth.

**Keywords:** vegetation variation; climate change; human activities; residual analysis; Yellow River water conservation zone