

DOI: 10.5846/stxb201911142429

贾路, 于坤霞, 徐国策, 任宗萍, 高海东, 李占斌, 李鹏. 基于耦合协调度的黄土高原地区 NDVI 与降水关系的变异诊断. 生态学报, 2021, 41(18): 7357-7366.

Jia L, Yu K X, Xu G C, Ren Z P, Gao H D, Li Z B, Li P. Diagnosis of the relationship between NDVI and precipitation based on the coupling coordination degree. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7357-7366.

基于耦合协调度的黄土高原地区 NDVI 与降水关系的变异诊断

贾 路¹, 于坤霞^{1,*}, 徐国策^{1,2}, 任宗萍¹, 高海东¹, 李占斌¹, 李鹏^{1,2}

1 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048

2 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048

摘要: 植被是地表生态系统的重要“指示器”, 在能量交换、水循环、碳循环、生物地球化学循环和维持中发挥着重要作用, 降水是影响植被变化的主要气候因子, 研究两者之间的作用关系具有重要的意义和价值。利用 Mann-Kendall 趋势检验法和 Hust 指数分析了黄土高原地区归一化植被指数 (NDVI) 的变化趋势, 使用相对发展率 (RDR) 指数和重心转移模型分析了 NDVI 变化的时空差异, 并构建了基于耦合协调度理论和 Pettitt 检验方法的 NDVI 与降水关系的变异诊断方法, 识别了黄土高原地区 NDVI 与降水关系的突变点, 探讨了降水对 NDVI 变化的影响以及造成 NDVI 与降水关系变化的原因。结果表明: (1) 黄土高原地区 73.49% 面积的 NDVI 在 1998—2017 年有呈现显著增加趋势 ($P < 0.05$), 大部分地区 NDVI 在未来依旧呈现增加趋势; (2) 黄土高原地区丘陵沟壑区与高原沟壑区的 NDVI 增加幅度大于黄土高原地区整体的增加幅度, 而北部风沙区和农灌区以及黄土高原地区边界区域的 NDVI 增加滞后于区域整体变化; (3) NDVI 与降水耦合协调程度逐年增强, 两者关系在 2006 年发生显著突变 ($P < 0.05$); (4) NDVI 呈现显著增加区域降水明显高于不显著变化区域 ($P < 0.05$), 降水对 NDVI 变化存在一定影响, 在丘陵沟壑区、高原沟壑区北部和东部河谷及土石山区北部 NDVI 和降水存在显著正相关关系 ($P < 0.05$), 然而黄土高原地区大部分区域的降水并不存在显著变化趋势 ($P > 0.05$), 因此造成黄土高原地区 NDVI 与降水关系在 2006 年发生显著突变的主要原因应该是人类活动 ($P < 0.05$)。研究成果有助于进一步理解黄土高原植被变化与降水的相互作用, 为黄土高原生态建设和水土流失治理提供一定的科学支撑。

关键词: NDVI; 降水; 突变点; 耦合协调度

Diagnosis of the relationship between NDVI and precipitation based on the coupling coordination degree

JIA Lu¹, YU Kunxia^{1,*}, XU Guoce^{1,2}, REN Zongping¹, GAO Haidong¹, LI Zhanbin¹, LI Peng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: Vegetation is an important indicator of surface ecosystems, and plays an important role in energy exchange, water cycle, carbon cycle, biogeochemical cycle and maintenance. Among many environmental factors, precipitation is the main climatic factor that affects vegetation changes. Studying the relationship between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which can reflect vegetation coverage, and precipitation has important meaning and value. In this study, the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079104); 黄河上中游流域生态修复与环境保护项目 (QNZX-2019-03); 国家林业和草原局自主研发项目计划 (LC-6-06)

收稿日期: 2019-11-14; 修订日期: 2021-08-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yukunxia@126.com

Mann-Kendall trend test and Hurst exponent were used to analyze the change trend of the NDVI in the Loess Plateau region. The relative development rate (RDR) exponent and the center of gravity shift model were used to analyze the spatial and temporal differences in NDVI changes in the Loess Plateau region. A change-point diagnosis method of the relationship between NDVI and precipitation based on the coupling coordination degree and Pettitt test method were constructed, and the change-point of the relationship between NDVI and precipitation in the Loess Plateau area was identified. The impact of precipitation on the change of NDVI and the reason for the change in the relationship between NDVI and precipitation were discussed. The results showed that: (1) NDVI in 73.49% area of the Loess Plateau showed a significant increase from 1998 to 2017 ($P < 0.05$), and NDVI will continue to increase in most areas in the future. (2) The increase in NDVI in the hilly and gully areas of the Loess Plateau was greater than that of the overall increase in the Loess Plateau. However, the increase of NDVI in the northern sandstorm area, agricultural irrigation area, and the border area of the Loess Plateau lagged behind the overall regional change. (3) The coupling coordination degree between NDVI and precipitation was increasing year by year, and the coupling coordination degree between NDVI and precipitation had a change-point significantly in 2006 ($P < 0.05$). (4) Precipitation in significant increase areas of NDVI was higher than precipitation in non-significant increase areas of NDVI ($P < 0.05$). Precipitation had a certain effect on NDVI changes. There was a significant positive correlation between NDVI and precipitation in hilly and gully areas, northern and eastern valleys of plateau gully areas, and northern soil and rocky mountainous areas ($P < 0.05$). However, precipitation in most areas of the Loess Plateau did not had a significant change trend ($P > 0.05$). The main reason for the significant change-point between NDVI and precipitation in 2006 should be human activities ($P < 0.05$). Significant change-point in the overall NDVI of the Loess Plateau were 7 years behind the implementation of the policy of returning farmland to forests in the Loess Plateau ($P < 0.05$), and vegetation restoration required a longer period of time. The results help to further understand the interaction of vegetation changes and precipitation on the Loess Plateau, and provide a certain scientific support for ecological construction and soil erosion control in the Loess Plateau.

Key Words: NDVI; precipitation; change-point; coupling coordination degree

当前,黄土高原地区水土流失依然严重^[1],生物多样性遭到破坏,由于气候变化加剧^[2-3],该地区面临极端水文事件频发带来的一系列环境问题^[4-7],生态环境治理遭受严重挑战。随着我国社会经济的发展,人民对美好生活更加向往,生态环境保护刻不容缓^[8]。黄河流域是中华文明的重要诞生地,在气候变化和人类活动的共同作用下,流域生态环境与自然条件显著变化,对当地人民的生产和生活带来巨大的影响,黄河流域的健康和高质量成为一项重大国家战略^[9-10]。黄河中游地区主要位于中国黄土高原地区,该区域水土流失极为严重,生态脆弱,环境恶劣,是入黄泥沙的主要来源地^[11-14],因此黄土高原地区的水土流失治理工作关系到黄河流域的健康发展。

黄河流域治理的关键问题是水沙变化^[15]。从 20 世纪 50 年代开始,大规模的水土保持工程在黄土高原地区进行了实施,包括林草措施等^[16]。特别是在 1999 年,退耕还林政策在黄土高原地区进行了大规模实施^[17-20],区域植被显著增加,有效的减轻流域土壤侵蚀,黄河流域泥沙显著减少^[16,21]。植被在陆-气系统之间发挥着能量传输、维持和优化生态系统服务的重要作用,是全球生态环境变化的重要“指示器”^[22-23]。随着全球气候变化与人类活动影响对区域发展影响的课题受到学术界的高度关注,陆地生态系统与气候变化的关系研究成为当前国际研究的热点科学问题之一^[24-25]。由于归一化植被指数(NDVI)能够指示大尺度的区域植被覆盖状况,表征植被活动的强弱,因此常被广泛应用于研究生态变化的研究中^[26-27]。许多研究成果表明植被变化对气候因子变化具有明显的响应,在区域尺度上气候条件和背景环境的空间异质性对植被变化具有决定作用^[28-29],干旱区的植被净初级生产力(NPP)更容易在降水的影响下增加^[30]。虽然过去的研究已经取得了丰富的成果,但是以往气候因子与植被变化的研究主要关注的是气候变化的趋势或者线性变化对植被的影

响,缺乏关于气候因子和植被之间二元关系变化的理论和模型等研究。有一个至关重要事实是,由于过去对于植被变化的研究大多数是基于单变量统计学手段对其进行分析,例如变异系数和 Mann-Kendall 趋势检验等,对于植被与气候因子的响应关系多基于线性方法进行简单的研究,例如线性相关检验、线性回归模型等等,所以这容易造成变量之间的变化存在巨大的差异。自然界中的地表水和地下水,植被,大气,土壤等环境要素之间互相作用,非线性关系极为复杂^[31],使用单变量的分析方法有利于简化模型,减轻工作量。然而,单变量的分析方法只关注了单个变量的变化(例如降水或植被),这不符合现实的具体情况,很难完全揭示对气候变化和植被变化之间的响应关系。因此,有必要构建植被与降水之间的双变量耦合关系理论,诊断植被与降水之间变异特征。

本研究的主要目的是,通过 Mann-Kendall 趋势检验和 Hurst 指数分析黄土高原地区 1998—2017 年 NDVI 的变化趋势与持续性,利用 RDR 指数与重心转移模型分析黄土高原地区 NDVI 的时空变化差异,基于耦合协调度理论和 Pettitt 检验方法构建区域 NDVI 和降水关系的突变点的识别方法并进行诊断,探讨了造成黄土高原地区 NDVI 和降水关系变化的可能驱动因素。研究成果有助于进一步深化对黄土高原地区植被变化和降水关系变化的认识,有利于为黄土高原水土保持工作开展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地区作为世界上黄土覆盖面积最大的高原(34°—42°N, 101°—114°E),黄土平均厚度在 50—80 m,部分地区在 100 m 以上,总面积大约为 64 万 km²。黄土高原地区位于属于我国地势上的第二阶梯,海拔大约 81—4918 m,平均海拔为 1404 m。区域内主要包括甘肃省、宁夏回族自治区、青海省、内蒙古自治区、山西省及河南省等省区的 46 个地区(盟、州、市),282 个县。黄土高原地区河水的主要来补给源是降水,该区域干旱缺水。黄土高原地区特有的气候特征和湿陷性黄土以及历史上的植被破坏,使得该地区水土流失异常严重,沟壑交错,流域支离破碎,生态环境脆弱。黄土高原地区的地貌分区大致可分为 4 种,依次为北部风沙区和农灌区、丘陵沟壑区、高原沟壑区和东部河谷及土石山区,如图 1 所示。

1.2 数据来源

本文所使用的降水数据是来源于国家地球系统科学数据中心的栅格降水量数据(<http://loess.geodata.cn>),时间序列为 1901—2017 年,空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率为月,该数据使用全国 496 个独立气象观测点数据进行了验证,验证结果可信。本研究通过 ArcGIS 软件裁剪了黄土高原地区 1998—2017 年逐月的降水量数据,并通过逐月数据进行合成,获得了黄土高原地区 1998—2017 年逐年年降水量栅格数据。植被归一化指数(NDVI)是一个长期的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据集,数据集由中国科学院地理科学与资源研究所网站提供(<http://www.resdc.cn>),数据时间为 1998—2017 年,空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率为年。通过使用 ArcGIS 软件将 NDVI 数据与栅格降水量数据进行投影转换,获得逐年相互匹配的 NDVI 数据和栅格降水量数据。

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验与 Hurst 指数

Mann-Kendall(M-K)趋势检验^[32]作为一种非参数的时间序列趋势检验方法,由于简单实用常被广泛使用在气象和水文序列的趋势检验中,本文中使用的 Mann-Kendall 趋势检验识别降水量、NDVI 以及其他变量的变

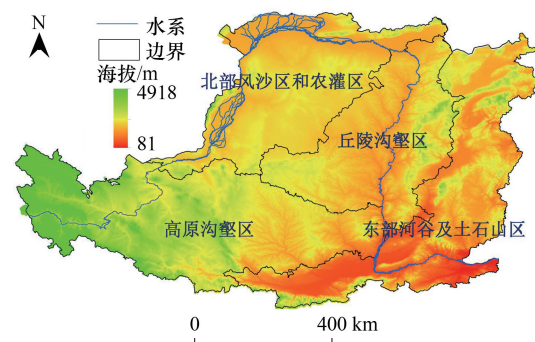


图 1 黄土高原地区地理位置与地貌分区

Fig. 1 Geographical location and geomorphic zoning of the Loess Plateau

化趋势。

Hurst 指数(H)常被用在定量表征时间序列的持续性或长期相关性^[33],本研究中使用 Hurst 指数来描述 NDVI 的未来变化趋势。其中 H 代表 Hurst 指数。 H 的值在 $[0,1]$ 的范围内。当 $H=0.5$ 时,表明 NDVI 的时间序列是随机序列,是不可持续的。当 $H>0.5$ 时,NDVI 的变化与目前的趋势基本一致,表明植被的可持续性正向的。 $H<0.5$ 表示负可持续性,未来植被变化将与当前趋势相反。

1.3.2 RDR 指数

相对发展率(RDR)被用来分析研究区内^[34],不同栅格 NDVI 在研究时段初期与末期的变化量与研究区整体 NDVI 在研究时段初期与末期变化量的变化差异,计算公式如下:

$$RDR_i = \frac{Y_{2i} - Y_{1i}}{Y_2 - Y_1} \quad (1)$$

式中: Y_{2i} 为 2017 年黄土高原地区第 i 个栅格 NDVI; Y_{1i} 为 1998 年黄土高原地区第 i 个栅格 NDVI; Y_2 为 2017 年黄土高原地区 NDVI 平均值; Y_1 为 1998 年黄土高原地区 NDVI 平均值。

1.3.3 重心转移模型

重心转移模型^[34]常被用来描述地理变量分布重心在空间上的变化特征,可以被用来研究 NDVI 空间重心随时间的变化,重心转移模型在本研究中被用来研究黄土高原地区 1998—2017 年 NDVI 的重心变化,计算公式如下:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{mi} \times x_i)}{\sum_{i=1}^n c_{mi}} \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{mi} \times y_i)}{\sum_{i=1}^n c_{mi}} \quad (3)$$

式中: X_m 和 Y_m 为 NDVI 空间分布重心的经度和纬度; c_{mi} 为第 i 个栅格的 NDVI; x_i 为第 i 个栅格的经度; y_i 为第 i 个栅格的纬度。

1.3.4 耦合协调度理论

两个或两个以上的系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象被称为耦合^[35-37],随着科学理论的深入研究与运用,这一理论逐渐被广泛使用在生态学领域。NDVI 和降水两个子系统之间的耦合度模型,表示成以下公式^[38]:

$$C = 2 \left\{ \frac{(u_1 \times u_2)}{(u_1 + u_2)^2} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

式中: C 为 NDVI 和降水二元系统的耦合度, u_1, u_2 分别为 NDVI 子系统和降水系统对总系统有序度的贡献。在本研究中 NDVI 和降水子系统的指标为黄土高原地区所有栅格 1998—2017 的 NDVI 和降水量,假定 NDVI 和降水量越大对系统越好。

$$u_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} \times u_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m w_{ij} = 1 \quad (6)$$

式中 u_i 为第 i 个子系统对总系统有序度的贡献; u_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个指标的归一化值; w_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个指标的权重,每个子系统中指标的权重计算使用熵权法进行计算。

在计算每个子系统的熵权时,必须通过进行归一化先对数据处理,常用的方法是极值法:

当 u_{ij} 越大对系统越有利(正向归一化):

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7)$$

当 u_{ij} 越小对系统越有害(负向归一化):

$$u_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

式中 u_{ij} 为子系统第 i 个指标的第 j 个时序的归一化值; x_{ij} 为子系统第 i 个指标的第 j 个时序的值。

为了更好的反映出子系统整体“功效”与“协同”效应,耦合协调度模型用来评判 NDVI 和降水两系统的交互耦合的协调程度,计算公式如下:

$$D = (C \times T)^{1/2} \quad (9)$$

$$T = a \times u_1 + b \times u_2 \quad (10)$$

式中, D 为耦合协调度; C 为耦合度; T 为 NDVI 子系统与降水子系统的综合调和指数,它反映 NDVI 子系统与降水子系统的整体协同效应或贡献; a 、 b 为待定系数,实际中常常认为两个子系统的重要性相同,所以 $a = b = 0.5$ 。

1.3.5 Pettitt 检验

Pettitt 检验法^[39]采用 Mann-Whitney 中 $U_{t,n}$ 值检验同一总体中两个样本 $X_1, \dots, X_t$ 和 $X_{t+1}, \dots, X_N$, Pettitt 检验的零假设为没有变化点,当 $|U_{t,n}|$ 取最大值时对应的 X_t 被认为是可能的突变点。其显著性水平可由下式计算:

$$P = 2e^{\left(\frac{-6U_{t,N}^2}{N^2+N^3}\right)} \quad (11)$$

当 $P \leq 0.05$ 时认为数据中存在均值变异点。

2 结果与分析

2.1 NDVI 变化特征

黄土高原地区 NDVI 在 1998—2017 年 73.49% 面积呈现显著增加趋势 ($P < 0.05$), 变化趋势时空分布如图 2 所示。北部风沙区和农灌区、高原沟壑区、丘陵沟壑区和东部河谷及土石山区的 NDVI 均有大面积呈现显著增加趋势 ($P < 0.05$), 4 个分区 NDVI 显著增加面积占各分区面积的比例为 54.32%、72.91%、93.97% 和 74.98% ($P < 0.05$)。北部风沙区和农灌区、高原沟壑区、丘陵沟壑区和东部河谷及土石山区的多年平均 NDVI 分别为 0.34、0.53、0.55 和 0.58, 东部河谷及土石山区的植被覆盖状况最好, 北部风沙区和农灌区的植被覆盖状况最差(图 2)。1998—2017 年黄土高原 NDVI 的 Hurst 指数空间分布最大值为 0.75, 最小值为 0.25, 黄土高原只有 5.84% 面积 NDVI 的 Hurst 指数低于 0.5, 主要集中在北部风沙区和农灌区。黄土高原大部分区域 NDVI 在未来依旧呈现增加趋势。

2.2 NDVI 时空变化差异

黄土高原地区 NDVI 在 1998—2017 年间变化存在时空差异, 如图 3 所示。RDR 指数最大值为 8.14, 最小值为 -6.42, RDR 指数大于 1 的区域主要集中在丘陵沟壑区, RDR 指数小于 1 的区域主要集中在北部风沙区和农灌区以及黄土高原边界区域。在高原沟壑区也有较大面积 NDVI 的 RDR 指数大于 1, 这表明在 1998—2017 年间黄土高原地区 NDVI 在丘陵沟壑区与高原沟壑区的增加幅度远远大于黄土高原整体的增加幅度, 北部风沙区和农灌区以及黄土高原边界区域的 NDVI 增加相对总体来说更为滞后。

图 3 的结果显示, 1998—2017 年间黄土高原 NDVI 重心在不断发生转移。从 1998—1999 年、1999—2000 年、2000—2001 年、2001—2002 以及 2015—2016 年转移距离比较长, 这表明这期间植被在黄土高原地区大范围增加。从总体看, NDVI 重心由 1998 年的 109.36°E 35.79°N 变化为 2017 年的 109.36°E 35.81°N , 呈现从波动变化的趋势, 表明黄土高原地区植被在年际间存在明显的变化差异。

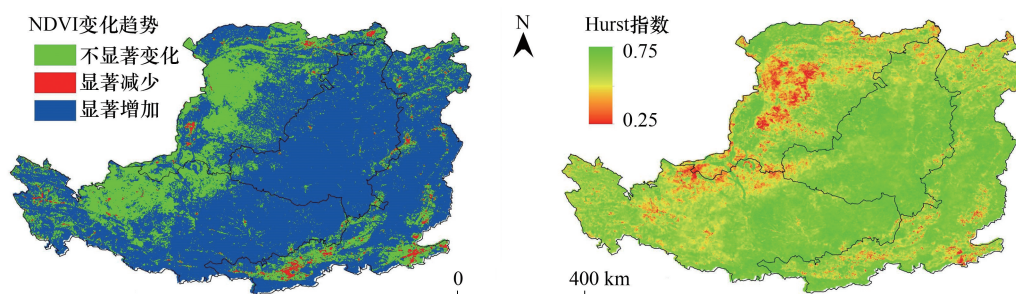


图2 黄土高原地区 1998—2017 年 NDVI 变化趋势

Fig.2 Trend of annual NDVI in the Loess Plateau from 1998 to 2017

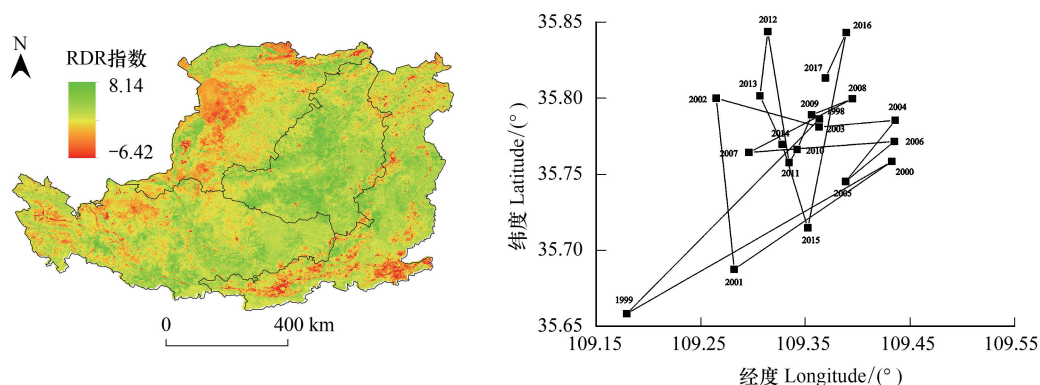


图3 1998—2017 年黄土高原地区 NDVI 的 RDR 指数和 NDVI 重心转移

Fig.3 RDR index of annual NDVI in the Loess Plateau and shifting of the center of gravity of annual NDVI

2.3 NDVI 子系统与的降水子系统权重分布变化

根据耦合协调度理论,构建了黄土高原地区 1998—2017 年间 NDVI 子系统与降水子系统之间的二元耦合系统,NDVI 子系统与降水子系统的构建指标分别为黄土高原地区 1998—2017 年每个栅格的 NDVI 时间序列和降水量时间序列,使用熵权法计算了每个指标的权重如图 4 所示。NDVI 的权重分布最大值为 90.6×10^{-7} ,最小值为 4.7×10^{-7} ,北部风沙区和农灌区、高原沟壑区、丘陵沟壑区和东部河谷及土石山区的 NDVI 子系统权重均值分别为 17.9×10^{-7} 、 16.66×10^{-7} 、 14.29×10^{-7} 和 15.05×10^{-7} ,高原沟壑区和北部风沙区和农灌区的 NDVI 变化对黄土高原地区整体的重要性较大(图 4)。图 4 表明北部风沙区和农灌区、高原沟壑区、丘陵沟壑区和东部河谷及土石山区的降水子系统权重均值分别为 13.88×10^{-7} 、 19.50×10^{-7} 、 13.95×10^{-7} 和 15.21×10^{-7} ,高

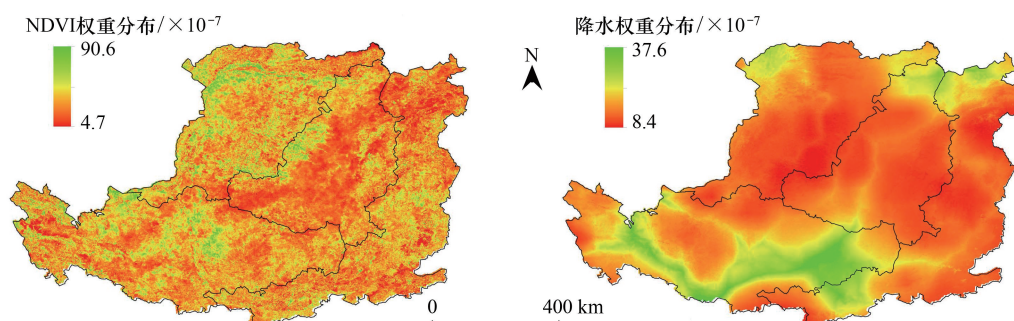


图4 NDVI 子系统权重分布和降水子系统权重分布

Fig.4 Distribution of NDVI subsystem weights and distribution of precipitation subsystem weights

原沟壑区和东部河谷及土石山区的降水变化对黄土高原地区整体的重要性较大。

2.4 NDVI 与降水的耦合协调度变化及其突变点

根据耦合协调理论计算,1998—2017 年间黄土高原地区 NDVI 与降水的耦合协调度变化如图 5 所示。由 M-K 趋势检验分析可知,NDVI 与降水之间的耦合协调度呈现显著增加趋势,1998 年耦合协调度为 0.61,2017 年耦合协调度为 0.81,增加幅度为 32.79%。由 Hurst 指数分析可知,1998—2017 年间黄土高原地区 NDVI 与降水的耦合协调度 Hurst 指数为 0.65,未来依然呈现增加趋势,这表明黄土高原地区 NDVI 与降水之间的耦合协调程度在持续增强。由于耦合协调度可以反映黄土高原地区 NDVI 与降水之间的相互作用关系,因此通过 Pettitt 方法识别了 NDVI 与降水的耦合协调度变化的突变点。1998—2017 年间黄土高原地区 NDVI 与降水的耦合协调度在 2006 年发生了显著突变($P<0.05$),这表明黄土高原地区 NDVI 与降水之间的关系可能在 2006 年存在变异。

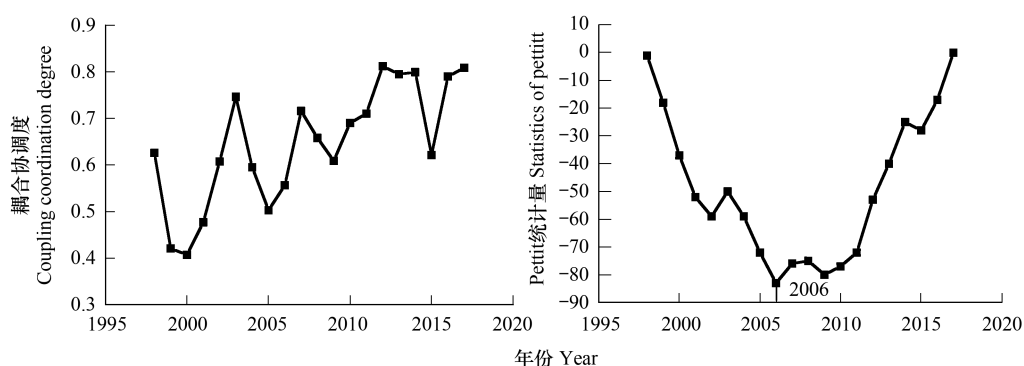


图 5 NDVI 与降水的耦合协调度变化及其突变点

Fig.5 Change of coupling coordination degree of NDVI and precipitation and its change-point

3 讨论

3.1 降雨对 NDVI 的影响

降水作为重要的气候因子,对植被的生长和变化具有不可忽视的作用^[34,40-41]。许多研究成果表明,降水可以促进植被更好的生长和存活^[28]。图 6 所示为 1998—2017 年黄土高原地区 NDVI 显著增加区域($P<0.05$)和不显著变化区域($P>0.05$)逐年平均年降水量的时间变化过程。NDVI 显著增加区域的降水在 1998—2017 年间均高于 NDVI 变化不显著的区域,这说明降水确实一定程度上影响着黄土高原 NDVI 的变化。但根据 1998—2017 年黄土高原地区 NDVI 和降水量的相关性分布图可知,黄土高原大部分地区 NDVI 和降水之间不存在显著的相关关系,部分面积 NDVI 和降水存在显著正相关关系($P<0.05$),主要集中在丘陵沟壑区、高原沟壑区北部和东部河谷及土石山区北部。这说明,降水确实在黄土高原地区的局部地区发挥了促进植被增加的作用。

3.2 造成 NDVI 与降水之间突变点的原因

植被的生长确实需要充足的水分供应,但是许多研究表明黄土高原地区大部分区域年降水并未发生明显的增加趋势^[42],造成黄土高原地区植被在 1998—2017 年间增加的主要驱动力应该是退耕还林、植树造林等水土保持工程^[21]。黄土高原地区 1998—2017 年多年平均年降水量为 445 mm,空间变化范围为 109—878 mm,北部风沙区和农灌区、高原沟壑区、丘陵沟壑区和东部河谷及土石山区四大区域的多年平均年降水量分别为 271、483、459、546mm,北部风沙区和农灌区的多年平均年降水量最小,东部河谷及土石山区的多年平均年降水量最大(图 7)。根据 M-K 趋势检验分析,1998—2017 年黄土高原地区年降水的变化趋势如图 7 所示。黄土高原地区年降水显著增加的区域主要集中在丘陵沟壑区和东部河谷及土石山区中部($P<0.05$),这

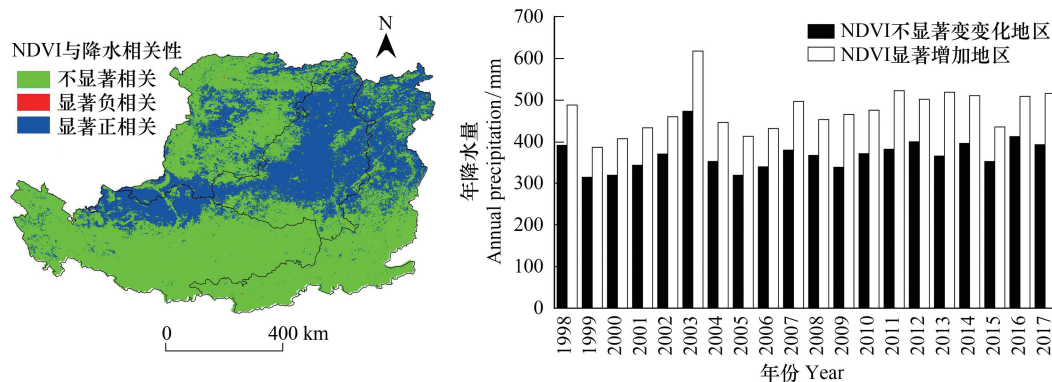


图6 黄土高原地区 NDVI 与降水相关性以及 NDVI 不同变化趋势区域的逐年降水量

Fig.6 Distribution of correlation between NDVI and precipitation in the Loess Plateau and annual precipitation in different NDVI trends zones

可能是该区域 NDVI 显著增加的一个重要原因,但是黄土高原地区大部分区域的降水并不存在显著变化趋势。图 7 显示了 1998—2017 年间黄土高原地区 NDVI 均值的变化过程。根据 M-K 趋势检验,黄土高原地区 NDVI 均值在 1998—2017 年呈现显著增加趋势。由 Pettitt 检验可知,黄土高原 NDVI 均值在 2006 年出现显著突变点,这可能是造成 NDVI 和降水关系在 2006 年发生显著突变点的主要原因(7),而 1999 年中国政府开始在黄土高原地区实施了退耕还林政策,极大的改善了黄土高原地区的生态环境,这可能是造成 NDVI 在 2006 年发生突变的可能原因,这同时表明黄土高原地区整体 NDVI 发生显著突变相对于黄土高原地区实施退耕还林政策开始实施的时间滞后了 7 年,植被恢复需要一个较长的时间周期。

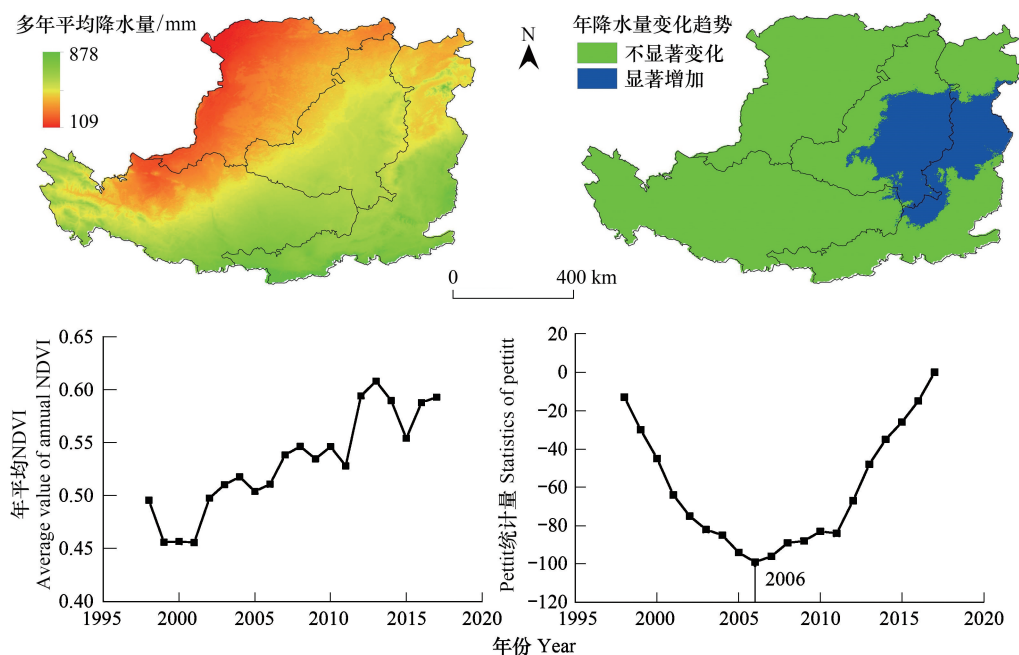


图7 黄土高原地区多年平均年降水量空间分布;年降水量变化趋势;年 NDVI 平均值变化;年 NDVI 平均值得突变点

Fig.7 Spatial distribution of multi-year average annual precipitation in the Loess Plateau; trend of annual precipitation; change of average value of annual NDVI; change-point of average value of annual NDVI

4 结论

(1)在 1998—2017 年,黄土高原地区 73.49%面积 NDVI 存在显著变化趋势,大面积区域植被在未来依旧呈现增加的趋势,东部河谷及土石山区的植被覆盖状况最好,北部风沙区和农灌区的植被覆盖状况最差;

(2)1998—2017 年间黄土高原地区丘陵沟壑区与高原沟壑区的 NDVI 增加幅度大于黄土高原地区整体的增加幅度,北部风沙区和农灌区以及黄土高原地区边界区域的 NDVI 增加滞后于整体,NDVI 逐渐从东南向西北增加;

(3)本研究构建了基于耦合协调度的 NDVI 降水关系突变点诊断方法,识别出黄土高原地区 NDVI 降水关系在 2006 年存在显著突变点,高原沟壑区和北部风沙区和农灌区的 NDVI 变化对黄土高原地区整体的重要性较大,同时高原沟壑区和东部河谷及土石山区的降水变化在黄土高原地区占有重要地位。

(4)降水对黄土高原地区 NDVI 的增加具有积极的促进作用,在丘陵沟壑区、高原沟壑区北部和东部河谷及土石山区北部 NDVI 和降水存在显著正相关关系,但是黄土高原地区大部分区域的降水并不存在显著变化趋势,因此造成黄土高原地区 NDVI 与降水关系在 2006 年发生显著突变的主要原因应该是退耕还林等水土保持人类工程措施,黄土高原地区整体 NDVI 发生显著突变相对于黄土高原地区实施退耕还林政策开始实施的时间滞后了 7 年,植被恢复需要一个较长的时间周期。

参考文献(References):

- [1] 胡良军, 张晓萍, 杨勤科, 李锐. 黄土高原区域水土流失评价数据库的建立. 水利学报, 2002, (1): 81-85, 91-91.
- [2] 高学睿, 闫程晟, 王玉宝, 赵西宁, 赵旗, 吴普特. 黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价. 农业机械学报, 2020, 51(1): 275-283.
- [3] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 符娜, 李怀有, 李垚林, 冯丹. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应. 农业工程学报, 2018, 34(20): 148-159.
- [4] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 何海, 王晓燕. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286.
- [5] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 2009 年中国水旱灾害公报. 中华人民共和国水利部公报, 2011, 000(1): P.14-30.
- [6] 张利平, 杜鸿, 夏军, 徐霞. 气候变化下极端水文事件的研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1370-1379.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 翟绍果, 湛基东. 共建美好生活的时代蕴意、内涵特质与实现路径. 西北大学学报: 哲学社会科学版, 2017, 47(6): 20-26.
- [9] 左其享. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架. 人民黄河, 2019, 41(11): 1-6, 16-16.
- [10] 任保平, 张倩. 黄河流域高质量发展的战略设计及其支撑体系构建. 改革, 2019, (10): 26-34.
- [11] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [12] Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation—a global synopsis. Geomorphology, 2013, 201: 1-34.
- [13] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. Catena, 2014, 121: 151-163.
- [14] Wang F, Mu X M, Li R, Fleskens L, Stringer L C, Ritsema C J. Co-evolution of soil and water conservation policy and human-environment linkages in the Yellow River Basin since 1949. Science of the Total Environment, 2015, 508: 166-177.
- [15] 冉大川, 张志萍, 耿勃, 罗全华, 申震洲. 大理河流域水沙变化重要问题分析. 人民黄河, 2010, 32(9): 80-82.
- [16] 冉大川. 黄河中游河龙区间水沙变化研究综述. 泥沙研究, 2000, (3): 72-81.
- [17] 延军平. 中国西北生态环境建设与制度创新. 北京: 中国社会科学出版社, 2004.
- [18] 陈健生. 退耕还林与西部可持续发展. 成都: 西南财经大学出版社, 2006.
- [19] 贾晓娟, 常庆瑞, 薛阿亮, 蔚霖, 王德彩. 黄土高原丘陵沟壑区退耕还林生态效应评价. 水土保持通报, 2008, 28(3): 182-185.
- [20] 韩新辉. 黄土高原退耕还林还草工程生态效应及作用机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [21] 高海东, 刘晗, 贾莲莲, 庞国伟, 王杰. 2000—2017 年河龙区间输沙量锐减归因分析. 地理学报, 2019, 74(9): 1745-1757.
- [22] Wang Q, Zhang Q P, Zhou W. Grassland coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu County. Physics Procedia, 2012, 33: 1292-1297.
- [23] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.

- [24] WalKer B, SteffenW. IGBP Science No.1: A Synthesis of GCTE and Related Research. Stockholm: IGBP, 1997: 1-24.
- [25] 史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局. 地理科学, 2014, 34(11): 1281-1290.
- [26] Gao J B, Jiao K W, Wu S H, Ma D Y, Zhao D S, Yin Y H, Dai E F. Past and future effects of climate change on spatially heterogeneous vegetation activity in China. *Earth's Future*, 2017, 5(7): 679-692.
- [27] Fang J Y, Tang Y H, Son Y. Why are East Asian ecosystems important for carbon cycle research?. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 753-756.
- [28] Zeppel M J B, Wilks J V, Lewis J D. Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences*, 2014, 11(11): 3083-3093.
- [29] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 229-232.
- [30] Báez S, Collins S L, Pockman W T, Johnson J E, Small E E. Effects of experimental rainfall manipulations on Chihuahuan Desert grassland and shrubland plant communities. *Oecologia*, 2013, 172(4): 1117-1127.
- [31] Sadri S, Burn D H. Nonparametric methods for drought severity estimation at ungauged sites. *Water Resources Research*, 2012, 48(12): W12505.
- [32] Kong D X, Miao C Y, Wu J W, Duan Q Y. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 566-573.
- [33] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.
- [34] 贾路, 任宗萍, 李占斌, 徐国策, 时鹏, 张译心, 王斌. 2000—2013 年西安市植被覆盖度时空演变. 水土保持研究, 2019, 26(6): 274-279.
- [35] 周宏. 现代汉语辞海. 北京: 光明日报出版社, 2003: 820-821.
- [36] 安济文. 武汉城市圈土地利用与生态环境耦合关系研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [37] 张伟. 关中—天水经济区农田生态系统服务价值与城市化耦合关系[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [38] 贾路, 任宗萍, 李占斌, 李鹏, 徐国策, 张铁钢, 杨媛媛. 基于耦合协调度的大理河流域径流和输沙关系分析. 农业工程学报, 2020, 36(11): 86-94.
- [39] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [40] 许炯心. 黄土高原植被——降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义. 生态学报, 2005, 25(6): 1233-1239.
- [41] Jia L, Ren Z P, Li Z B, Xu G C, Zhang Y X, Wang B. Diagnosis and risk assessment of vegetation restoration in Wuding River Basin. *Taiwan Water Conservancy*, 2019, 67(2): 67-74.
- [42] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.