

基于 MODIS 数据的堵河流域生态指数变化 及与气候因子的相关性分析

马永明^{1, 2} 张利华¹ 翟宏宇² 符雅盛¹ 崔越¹¹

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;

2. 昭通学院, 云南 昭通 657000)

【摘要】: 堵河流域是南水北调中线工程的重要水源区, 流域的生态环境决定着南水北调的经济效益和水质状况。基于 MODIS 影像(2001~2017 年)、数字表面模型(DSM)与气象数据, 采用均值统计法、一元线性回归趋势法和相关分析法对堵河流域总初级生产力(GPP)、归一化差异植被指数(NDVI)、和蒸散发(ET)等生态指数的时空变化特征及其与气象因子的相关性进行研究, 探讨堵河流域生态环境演变规律及其气候响应特征。结果表明: (1) 堵河流域多年月均 GPP、NDVI 和 ET 分别为 $1868.67\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month}^{-1})$ 、0.605 和 $959.975\text{mm}/\text{month}$, 植被覆盖率较高; 多年年均 GPP、NDVI 和 ET 呈现相似的空间分布规律, 堵河南岸值均高于北岸, 竹溪河流域值均最低, 最高值均位于神农架林区在内的高海拔区域。(2) 年均 GPP、NDVI 和 ET 值总体呈波动上升的趋势, 表明堵河流域的生态环境在向好的趋势发展; 年内呈周期性单峰变化趋势, 7 月达到最大值; 具有较强的季节性, 夏季 GPP、NDVI 和 ET 值最大, 冬季最小。(3) 流域月均 NDVI、ET 和 GPP 之间均具有较强的正相关性, 其中月均 NDVI 与月均 GPP、ET 的相关系数 R^2 均为 0.65, 月均 ET 与月均 GPP 的 R^2 为 0.70。(4) 流域月均 GPP 与月均降水的相关性强于月均气温, 而 NDVI、ET 与气温的相关性均大于降水; GPP、NDVI 和 ET 的变化与气温、降水呈现同期变化规律, NDVI、ET 和 GPP 的变化对气候因子的响应不到一个月的滞后性。

【关键词】: 堵河流域 变化特征 相关性

【中图分类号】: TP79 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-1890-11

随着全球人口的快速增长和科学技术的迅猛发展, 人类活动改变了生态系统循环的自然过程, 造成了一系列严重的生物圈固有的碳收支平衡, 水文循环失衡的生态问题, 严重破坏生态系统平衡并威胁人类的生存^[1]。在研究和理解植被、碳循环和水循环以及气候间复杂相互的作用时, 植被作为生态系统固碳的主要载体, 是连接土壤、大气和水分的纽带, 同时在全球环境变化背景下, 植被盖度的时空变化特征更是全球变化的重要指示器^[2~5]。随着遥感卫星资源和新型资源环境卫星数据的发展, 基于生态指数数据对流域植被盖度的时空变化定量分析变得更加容易, 遥感观测已成为揭示植被动态变化对全球气候变化响应与反馈的重要手段^[6]。总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)是指单位时间内绿色植物通过光合作用途径所固定的有机碳量, 是固碳的主要途径之一, 决定了进入陆地生态系统的初始物质和能量^[7~9], 是陆地与大气间碳交换的关键环节, 在全球碳循环中起着至关重要的作用, 精确掌握 GPP 的时空变化特征可全面理解全球碳循环、是预测气候变化和气候对陆地生态系统影响的关键。

作者简介: 马永明(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域生态环境遥感. E-mail: 15758005685@163.com

张利华 E-mail: zhanglihua7483@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201429); 生物地质与环境地质国家重点实验室自主课题(GKZ17Y651); 中央高校基本科研业务费“地学长江计划”核心项目(CUGCJ1808)

键指标^[10~12]。地表蒸散发(Evapotranspiration, ET)包括土壤蒸发和植被蒸腾^[13],是土壤-植物-大气连续体系(SPAC)中水分运动的重要过程,是陆面生态系统与水文过程的重要纽带,直接反映水资源的空间分布与重分配^[14]。准确估算和监测流域 ET,探索其时空变化特征及其与气候变化的响应规律,利于区域气候调节和生态系统水源涵养与保护。刘昌明等^[15]根据中国近五十年 653 个气象站的常规气象观测资料,采用潜在蒸散发计算方法(Penman-Monteith),分析了中国 10 大流域片区的潜在蒸散发对气象的敏感性及其区域分异,得出不同地表盖度与蒸散量及时空变化特征的规律,加深流域陆面过程、流域水量平衡的认识。归一化差值植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)是反映植被所吸收的光合有效辐射比例的一个重要指数,能反映植被覆盖和生物量的变化^[16~21],常用于研究植被与气候间的关系^[22,23],在全球及区域环境变化研究中得到了广泛应用。如 K. Ichii 等^[24]利用 NOAA-AVHRRNDVI 数据的研究得出全球 NDVI 值和气候具有相关性。Tucker 等^[25]利用卫星生态数据进行非洲植被覆盖变化及 NDVI 对气候变化的响应研究。Myneni^[26]指出气候变暖使北半球中高纬度的植被覆盖有增加的趋势。陈超男等^[27]对秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析,发现 NDVI 值均呈显著上升趋势,与气温为正相关关系。胡砚霞等^[28]研究丹江口库区植被覆盖时空变化趋势及其成因分析,发现受人类活动影响下,植被覆盖总体呈增加趋势。众多国内外学者都证明了植被指数能够较真实反映地表植被覆盖状况及对气候的响应。

堵河是汉江水系最大的支流,是南水北调中线工程的核心水源区之一。堵河流域是长江经济带的重要组成部分,是神农架大九湖自然保护区,也是大巴山最高级别的生态安全保障区,以独特的自然环境孕育了丰富的天然动植物资源,对其生态环境变化的研究具有重要意义。对堵河流域植被指数时空动态变化分析及与气候之间的相互关系成为当前研究的重点^[29~31]。堵河流域植被覆盖等生态环境变化过程、趋势及响应机制探究较少,且大多仅用单一生态指标进行分析,通过多种生态指标之间的能量传输与物质循环对堵河流域整体生态环境进行研究尤为紧迫。鉴于此,本文以堵河流域为空间单元,选取 NDVI、GPP 和 ET 生态分析指标,定量分析其空间变化特征及变化率与流域气温与降水的相关性,探讨堵河流域植被盖度与有机碳量和水文指数的相关性,揭示堵河流域环境状况的空间特征和演化规律,对堵河流域生态恢复和水资源管理具有重要的现实意义。

1 研究区概况

堵河(图 1)位于汉江上游南岸,西源泗河发源于陕西省大巴山,南源官渡河发源于神农架大九湖地区,两者在竹山县两河口汇合形成堵河干流,整体流向西南向东北,沿途分布从多支流,依次流经泗河、竹溪河、汇流河、官渡河、深河、苦桃河、北星河、霍河、对峙河、大木河、颍河及黄龙河等主要一级支流,最终汇入丹江口水库。堵河流域轮廓在 109° 10' E~110° 45' E, 31° 25' N~32° 48' N 之间,流域面积为 12430.38km²。流域地势西南高、东北低,平均海拔高度为 1034m,两岸山峰高出河床 150~200m。流域属于大陆亚热带季风气候区,气候垂直分带明显,年均降雨量 800~1000mm,年平均气温 15℃^[32]。受人类活动、气候和地形等影响,植被覆盖度高、类型多样,主要分布有亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶栎类和大巴山北坡青冈栎等^[33]。

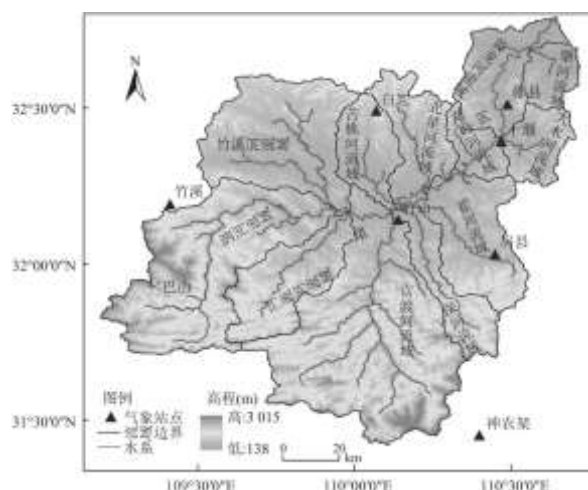


图 1 堵河流域研究区概况

2 数据来源与方法

2.1 数据来源与预处理

采用 2001~2017 年的 MODIS (NDVI、ET、GPP) 遥感数据产品均来源于美国国家航空航天局 (NASA) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。其中, 归一化植被指数 (NDVI) 对应行列号为 (H27, V5) 的 16 天合成的 MOD13Q1 数据产品, 空间分辨率 250m, 经波段运算使合成的图像值在 (0~1) 之间; 地表蒸散发 (ET) 为 8 天合成的 MOD16A2 数据产品, 空间分辨率 500m; 总初级生产力 (GPP) 为 8 天合成的 MOD17A2H 数据产品, 空间分辨率 500m。利用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 工具对 MODIS 数据集进行批量转投影、转格式、剪裁、波段运算和剔除异常值等预处理, 数据均采用最大合成法 MVC (Maximum Value Composites), 减少云、气溶胶等影响, 获取 NDVI、ET 和 GPP 的值并计算出月均值。

数字表面模型 AW3D30DSM 来源于日本宇宙航空研究开发机构网站 (JAXA) (<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>), 水平分辨率为 30m (1 弧秒), 高程精度 5m。数据进行投影 (WGS84_UTM_49N) 后基于 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型提取堵河流域轮廓并划分出 12 个一级支流的流域边界 (图 1)。

气象数据来自湖北气象局, 选取流域内的竹山、竹溪、白河、郧县、十堰、房县、神农架站点, 统计各气象站点 2001~2017 年每年逐月气象数据, 主要包括月平均气温 (°C) 和降水量 (mm)。

2.2 研究方法

2.2.1 均值统计法

在统计堵河流域的 NDVI 值时, 采用均值统计法进行计算, 即统计研究区内所有像元的 NDVI 的平均值。公式如下:

$$I_{NDVI_{mean}} = \sum I_{NDVI_{x,y}} / n \quad (1)$$

式中: $I_{NDVI_{mean}}$ 表示整个堵河流域的 NDVI 平均值; x 表示统计研究区域像元的行数; y 表示统计研究区域像元的列数; n 表示统计研究区域像元的总数。对于研究区的总初级生产力和地表蒸散发统计计算时均使用均值统计法。

2.2.2 一元线性回归分析法

一元线性回归分析法是对一组随时间变化的变量进行回归分析, 预测其变化趋势的方法。统计计算堵河流域内任一像元 2001~2017 年 NDVI 数值及其变化, 通过线性回归趋势线来分析生态指数在 17 年间的变化趋势。公式如下:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times I_{NDVI_i} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n I_{NDVI_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中：n 为年份；i 为 2001~2017 年的序号； I_{NDVI} 是第 i 年的 NDVI 的平均值；Slope 是趋势线的斜率，当 Slope>0 时，表示 NDVI 值在所研究的时间段内是增加的变化趋势，反之减少，Slope 数值的大小表示增加(或减小)的幅度大小。

2.2.3 相关分析法

相关分析是研究变量之间密切相关程度的一种统计方法，其相关系数是用来描述两个变量间线性关系程度及方向的统计量，通过皮尔逊相关分析来研究堵河流域植被盖度与有机碳量和水文指数及其与气候水热因子之间的关系，相关系数在-1~1 之间，计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中：n 为年数； $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为变量 x 和变量 y 的均值； r_{xy} 为变量 x 和变量 y 的相关系数，表示两个不同因子之间的相关性大小的统计指标。当 $r_{xy}>0$ 为正相关， $r_{xy}<0$ 为负相关， r_{xy} 的绝对值越大，表明 x 和 y 的相关性越密切。

3 结果与分析

3.1 堵河流域年均 NDVI、GPP 和 ET 空间特征分析

本文以堵河流域 NDVI、GPP 和 ET 空间数据为基础，采用 IDL 计算堵河流域 17 年来的 NDVI、GPP 和 ET 多年年均值，着重分析植被覆盖等级与变化程度(图 2)，研究全球气候变暖背景下堵河流域生态环境的变化规律，探讨流域植被盖度与水文指数和植物光合作用途径所固定的有机碳量之间的关系。

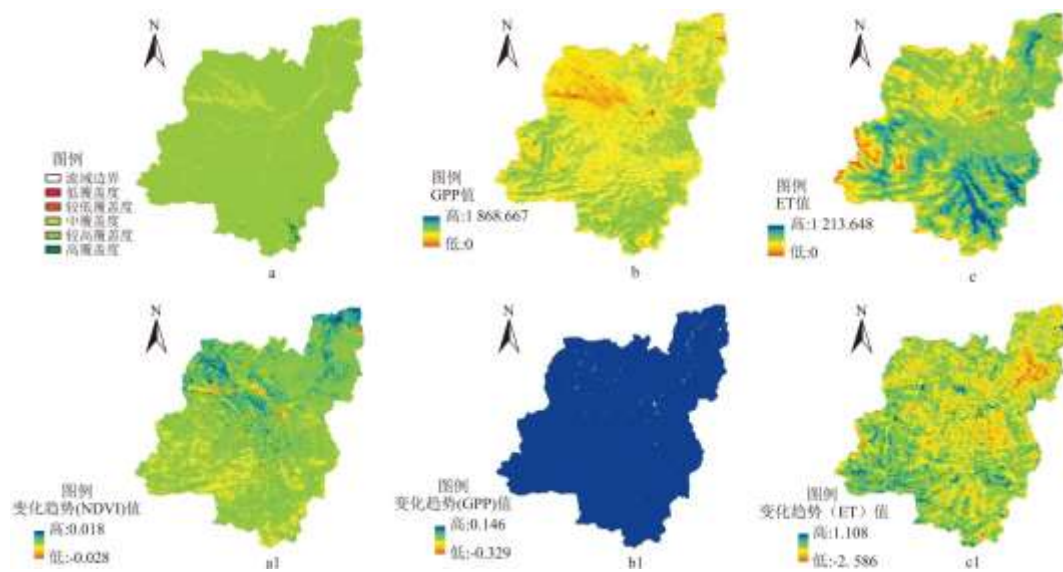


图2 2001~2017年堵河流域NDVI、GPP和ET空间分布(a、b、c)及空间变化趋势特征(a1、b1、c1)

依据植被覆盖等级及变化率分级标准^[34, 35], 利用 ArcGIS 软件对植被覆盖度图进行重分类, 将流域 NDVI 分为 I、II、III、IV、V 级, 得到 2001~2017 年堵河流域植被覆盖等级及各等级所占面积比例, 发现堵河流域植被盖度为中高覆盖度, 结果见表 1。根据堵河流域年平均 NDVI 值统计结果, 植被覆盖率较高, 植被指数在 0.605 左右, 最高达 0.755; 空间上 NDVI 值南岸高于北岸, 上、下游高于中游地区; NDVI 值整体特征与地势南高北低, 西高东低相关。其中 NDVI 值最低值位于竹溪河、堵河沿岸地区, 最高值在北星河流域、霍河流域及海拔较高的南岸山区和神农架保护林区 (图 a)。利用一元线性回归趋势分析法对 2001~2017 年各年均 NDVI 值与其相对应的时间序列进行逐项元回归分析, 依据变化率分级标准将其回归斜率划分为四类, 用以表征该时间段内植被覆盖变化趋势, 结果见表 (表 2)。结果表明堵河流域植被呈中度、明显改善的变化趋势, 占植被像元数的 96.76%, 而退化大幅减少, 只占植被像元的 3.24%。从图 2(a1)中明显观察到 NDVI 值较低的南岸地区增长率普遍比 NDVI 值高的北岸高, 其中堵河中下游沿岸、竹溪河流域植被指数增幅最大, 而南岸高海拔山区略微增长, 竹溪河、南源官渡河和壘河沿岸等小区域的植被指数有下降趋势。实地考察发现南岸地区略微增长与植被盖度较高、结构完整有关; 而堵河中下游沿岸、竹溪河流域的高长幅与退耕还林、植树造林等植被恢复有关。由上述研究得出堵河流域 17 年来植被覆盖度呈现上升趋势, 生态环境在转好发展。

表 1 2001~2017 年堵河流域植被覆盖度等级划分

阈值区间	等级	面积 (km ²)	面积比例 (%)
NDVI<0.1	低覆盖度	0.25	0.14
0.1≤NDVI≤0.3	较低覆盖度	9.96	5.60
0.3<NDVI≤0.5	中覆盖度	29.01	16.32
0.5<NDVI≤0.7	较高覆盖度	76.66	43.13
NDVI>0.7	高覆盖度	61.86	34.80

表 2 2001~2017 年堵河流域植被变化趋势

分类标准	类型	像元数 (个)	占植被像元 (%)
Slope<-0.02	严重退化	85	0.04
-0.02≤Slope≤0	中度退化	6312	3.20
0<Slope≤0.01	中度改善	187679	95.03
Slope>0.01	明显改善	3419	1.73

由图 2(b)和图 2(c)发现堵河流域年均 ET、GPP 空间分布及其变化特征整体分布与植被指数 NDVI 整体上相似。以堵河干流为界 ET、GPP 南岸地区高于北岸地区, 整体上中游地区低于上、下游地区, 最低处位于竹溪河流域, 最高位于海拔较高的山区和神农架大九湖森林保护区, 其中 ET 在泗河流域、官渡河流域及深河流域黄龙河流域最强, GPP 在泗河、官渡河中、上游值最高。发现在堵河流域南岸地区地表蒸散发增加趋势较大, 泗河流域、深河流域、汇流河流域上升趋势较为明显, 大木河流域、对峙河流域呈明显的下降趋势, 图 2(c1);GPP 除河流外均呈普遍增加的趋势。

3.2 堵河流域 NDVI、ET 及 GPP 与气温、降水时间变化特征

3.2.1 年内变化特征

总体而言,堵河流域年内 NDVI、ET 及 GPP 与气温、降水多年月均值分别为 0.597 、 741.835mm/month 、 $209.224\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month}^{-1})$ 、 $15.530^\circ\text{C/month}$ 和 71.426mm/month , 根据年内变化特征图 3(a) 表明堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 值的变化与该区域水热变化同期, 得出气温和降水变化是引起 NDVI、ET、GPP 值变化的重要因素, 年内变化特征均呈周期性单峰变化趋势, 从 3 月开始波动上升, 在 7 月达到最大值, 8 到 11 月波动下降, 12 月到次年 2 月为低值区且其变化特征不显著。根据植被生长习性 & 区域环境状况, 将 3 到 5 月划分成春季, 6 到 8 月划分成夏季, 9 到 11 月划分成秋季, 12 月到次年 2 月划分成冬季, 堵河流域 NDVI、GPP、ET 具有较强的季节性, 夏季太阳辐射强、气温高、降水量丰富, 使得植被快速生长、蒸腾和土壤水分蒸发作用均达到最强, 因而夏季 NDVI、GPP 和 ET 值最大, 冬季则与夏季相反; 秋季, 气温逐步下降、降水量和太阳辐射逐渐减少以及植被进入枯萎期, 植被固碳与蒸腾作用和土壤水分蒸发作用相对减弱, 是导致秋季 NDVI、GPP、ET 值降低的重要因素, 春季则与秋季相反, 植被进入发芽、生长期 NDVI、GPP 和 ET 值较高且增长较快^[36], 堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 与气温和降水的四季差异表明植被-植物固碳-土壤-大气间水汽与热量的循环与流通, 既是影响区域地表水热平衡重要因素, 也是引起 NDVI、GPP 和 ET 和生态环境变化的根本原因。

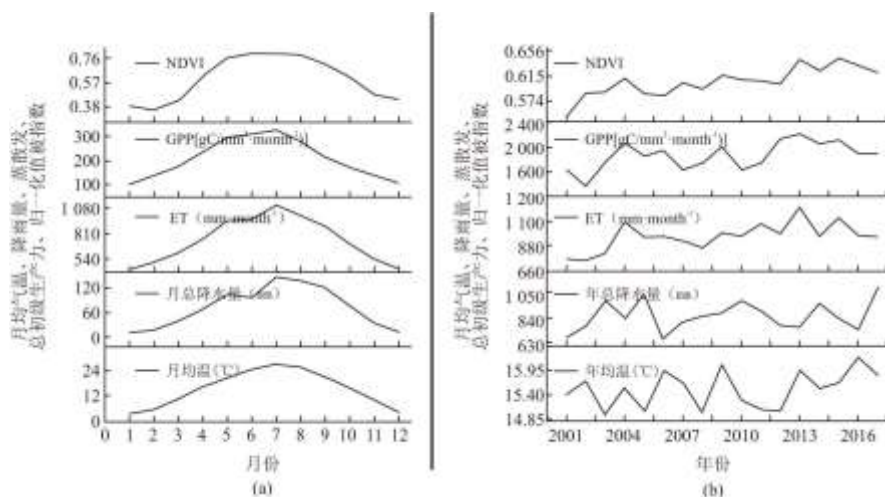


图 3 堵河流域月均(a)与年均(b)气温、降雨量、蒸散发、总初级生产力、归一化植被指数变化特征

3.2.2 年际变化特征

根据 2001~2017 年年均值统计结果图 3(b), 堵河流域年际 NDVI、GPP 和 ET 波动较大, 呈现两端年份高而中间年份低的变化特点, 在 2004 和 2013 年有两个峰值, 有快速增长现象, NDVI、GPP 和 ET 多年月均值分别为 0.605 、 $1868.667\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month}^{-1})$ 、 959.975mm/month 。整体上, 发现堵河流域的 NDVI 值与 ET、GPP 值在 2001~2017 年时间段内总体上都呈现出波动上升趋势, 在 2001~2017 年堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 值趋势变化率分布在 $-0.026 \sim 0.018$ 之间、 $-1.108 \sim 2.586\text{mm/a}$ 之间和 $-47.929 \sim 0.146\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month}^{-1})$, 其中在竹溪河流域、黄龙河流域、大木河流域 NDVI、ET 和 GPP 值增长趋势程度较强, 在鄂河两岸、竹溪河和汇流河沿岸出现负增长趋势, 其余流域增长趋势程度却不大, 表明研究时段内黄河源区 ET 的空间差异化显著但其相对变化幅度小图(c1), 整体而言, 区域植被、光合作用植物固碳与水热气三者之间处于相对平衡的状态。

3.3 堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 相关性分析

植被是直接影响陆地生态系统碳循环和水分循环的主要载体^[37], 起到物质循环和能量流动的纽带, 采用相关性分析法, 探讨堵河流域 2001~2017 年植被盖度与植物光合作用途径所固定的有机碳量和水文循环之间的关系。

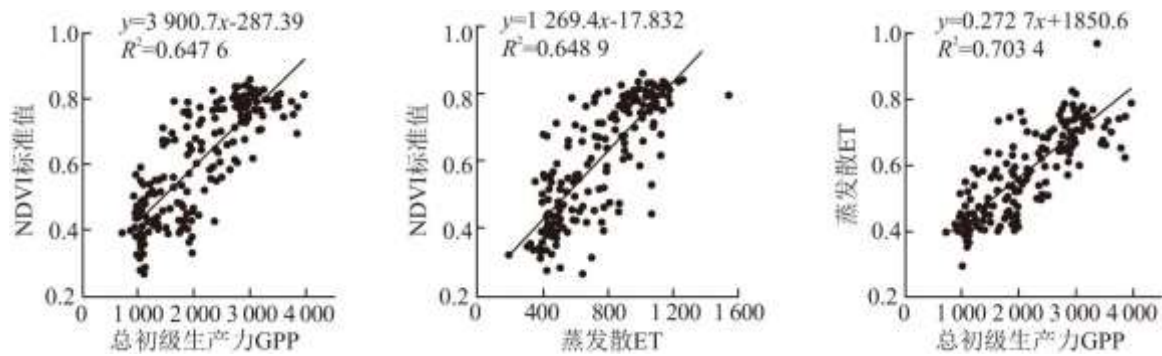


图4 堵河流域 NDVI、GPP 和 ET 相关性分析

根据图4所示，堵河流域在研究时间段内植被盖度与植物固碳量和水文循环均具有很强的相关性，其中月均NDVI值与月均GPP值的相关系数 R^2 为0.6476，堵河流域内植被类型、群落及生长规律对植物所固定的有机碳量起决定性作用，植被处在生长季时固碳量增长，常绿阔叶林常年固碳；月均NDVI值与月均ET值的相关系数 R^2 为0.6489，ET值强度大小受到流域下垫面条件和植物蒸腾等的影响，堵河流域处在大陆亚热带季风气候区，降水量多，土壤蒸发变化较稳定，ET值受植被蒸腾作用影响较大，植被盖度的大小控制水文循环的程度。月均ET值与月均GPP值的相关系数 R^2 为0.7034，说明植物固碳量和水文循环具有很强的联系性。堵河流域植被盖度与植物固碳量和水文循环之间相互影响，生态保持相对平衡，生态环境在向好的趋势发展。

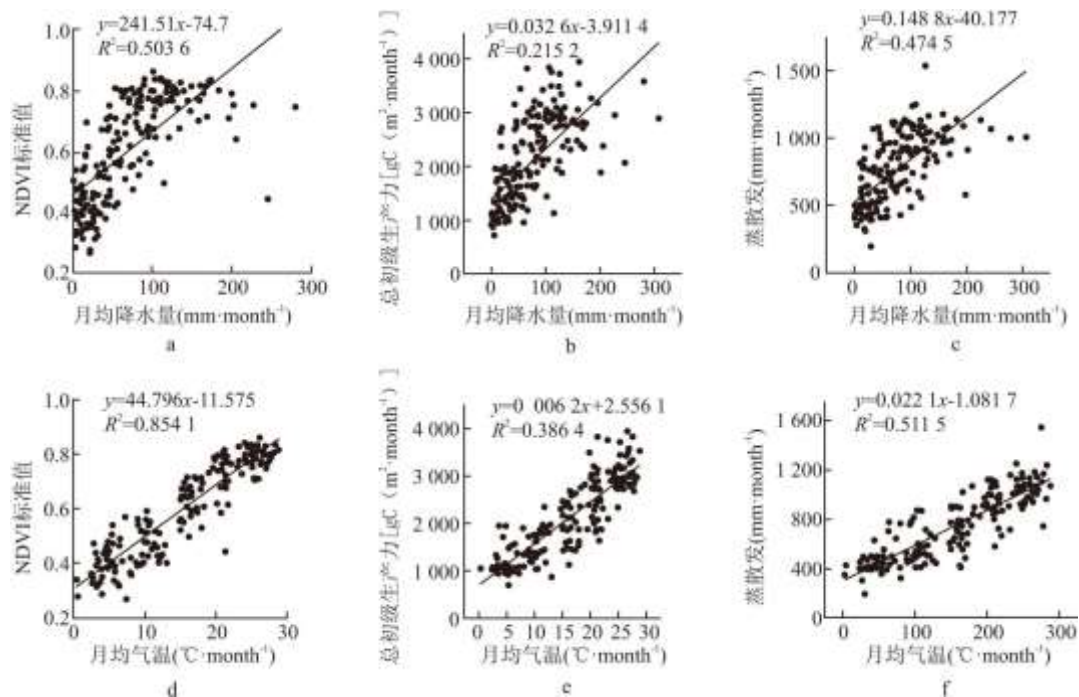


图5 堵河流域 NDVI 和气温数据关系

3.4 堵河流域 NDVI、ET、GPP 与气温、降水的相关性分析

气候变化是影响区域水热分布的重要环境因素，气温决定天气的变化状况，降水决定区域水分循环的快慢^[38]。因此利用相关性系数 R^2 判断NDVI、ET和GPP值与气温、降水的拟合优劣如图5，结果得出从2001~2017年整体上堵河流域NDVI、ET和GPP

与气温、降水均呈正相关性, NDVI、ET 和 GPP 与气温的相关系数 R^2 分别为 0.8541、0.5115、0.3564; NDVI、ET 和 GPP 与降水的相关系数 R^2 分别为 0.5036、0.4745、0.2152, 其中堵河流域 NDVI 与气温、降水的相关性最强, ET 与气温、降水相关性较强, GPP 与气温、降水最弱, NDVI、ET 和 GPP 与气温的相关性均大于降水的相关性。研究得出堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 的变化特征总体上对气温变化的响应程度大于降水, 研究结果与雒新萍、白淑英等^[39, 40]对长江流域植被覆盖对气候响应一致。

3.5 月变化尺度上与主要水热因子的相关分析

为了探讨大陆亚热带季风气候区气温与降水对 NDVI、ET 和 GPP 的影响大小, 分析 NDVI、ET 和 GPP 对影响其生长的因子动态变化能否做出及时的反应。本研究通过选取 NDVI、ET 和 GPP 的月均值相对于气候因子值与当月往前 1 个月、往前 2 个月、往前 3 个月、当前月、往后 1 月、往后 2 月、往后 3 月的 7 个特征时间与堵河流域正常月份的月均气温、降水量进行计算相关系数。

堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 的月均值相对于气候因子值与当月往前 3 个月、往前 2 个月、往前 1 个月的相关性逐渐增大, 到当前月的相关性为最大值, 往后 1 月、往后 2 月、往后 3 个月的相关性呈下降趋势, 其中 NDVI、ET 和 GPP 的 7 个特征时间与气温的相关性均大于降水的相关性, 表明受到大陆亚热带季风气候区影响的堵河流域分水充足, 加之堵河流域河网密集, 能够满足植被生长所需的水分, 得出 NDVI、ET 和 GPP 的变化与气候因子的相关性有着明显的季节性, 且与该区域气温、降水量同期的现象, NDVI、ET 和 GPP 的变化对气候因子的响应存在时间尺度小于一个月滞后性。

4 结果与讨论

本研究基于 2001~2017 年 MODIS 和气象数据对堵河流域的植被覆盖度与生态和水文指数时空分布规律以及对气候水热因子的相关性分析, 得到以下结论:

(1) 空间上堵河流域 NDVI 年均值为 0.605, 最高达 0.755, 植被覆盖率为高覆盖度和较高覆盖度; ET、GPP 多年月均值分别为 959.975mm/month、1868.667gC/(m²·month⁻¹)。流域 NDVI、ET、GPP 值空间分布特征相似, 以堵河干流为界均呈现南岸高于北岸, 上游、下游高于中游地区。流域植被呈中度改善、明显改善的变化趋势, 改善像元占植被像元数的 96.76%。南岸地区增长率普遍比北岸高, 竹溪河流域 NDVI 值增幅最大。ET 值增加趋势较大, 泗河流域、深河流域上升趋势较为明显; GPP 值除河流外均呈普遍增加, 北岸河流沿岸呈降低趋势。

(2) 时间上堵河流域年内 NDVIET 及 GPP 与气温、降水多年月均值都呈现周期性单峰变化趋势, 7 月份达到最大值, 都具有较强的季节性。年际上 NDVI、GPP 和 ET 波动较大, 从 2001~2017 年时间段内总体上都呈现出波动上升趋势, 生态环境在向好的趋势发展。

(3) 堵河流域 NDVI 值与 ET、GPP 值相关系数 R^2 分别为 0.6489 和 0.6476, ET 值与 GPP 值的相关系数 R^2 为 0.7034, 均具有很强的相关性。NDVI、ET、GPP 与气温的相关系数 R^2 由高至低依次分别为 0.8541、0.5115、0.3564, 与降水 R^2 分别为 0.5036、0.4745、0.2152, 且与气温的相关性均大于降水的相关性。NDVI、ET、GPP 值具有明显的季节性和同期的现象, 其变化对气候因子的响应不到一个月的滞后性。

研究结果表明, 堵河流域 NDVI、GPP 和 ET 值整体特征与地势西南高东北低相关, 根据年际变化特征整体上反映出植被得到恢复, 生态环境呈明显好转的趋势发展, 变化趋势与前人研究结果一致^[41~43], 在 2001~2017 年堵河流域 NDVI、GPP 和 ET 都呈现波动上升趋势, 且呈现两端年份高而中间年份低的变化特点, 在 2004 和 2013 年有两个峰值, 其中 NDVI 值在 2001 最低, 2001~2002 年增长速率最大, 受到研究区全面实施退耕还林政策等因素影响^[44]。NDVI、GPP 和 ET 最低值位于竹溪河、堵河沿岸等人类活动的剧烈地区, 最高值分布海拔较高的南岸山区和神农架保护林区, 表明堵河流域植被覆盖变化受人为因素干扰较大, 因此

对流域 NDVI、ET 和 GPP 变化的人为因素定量分析和驱动机制有待进一步探讨。

另外一方面, 堵河流域是生态安全保障区, 又是以石灰岩为主, 属于生态环境脆弱区, 对气候变化相当敏感, 研究发现 NDVI、ET 和 GPP 具有很强的相关性, 与温度、降水都以正相关为主, 且温度响应强于降水, 具有明显的季节性和同期现象, 其中 NDVI 值的变化对气候因子的响应不到一个月的滞后性, 表明受到大陆亚热带季风气候区影响的堵河流域分水充足, 气温是控制堵河流域生态环境变化的关键性因子。NDVI、ET 和 GPP 与气温和降水的季节差异表明植被-植物固碳-土壤-大气间水汽与热量的循环与流通是维持区域地表水热平衡重要因素。因此, 加强研究未来气候变化对该地区植被生态系统的影响不容忽视。

总之, 全面揭示堵河流域 NDVI、ET 和 GPP 之间物质循环与能量流动及其对气候因素与人为因素的响应机制, 能够为山地生态保护和恢复提供科学依据, 对堵河流域水资源管理具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 夏钰. 基于涡度相关通量观测的 MODIS 总初级生产力估算研究[D]. 武汉大学, 2017.
- [2] 李明杰, 侯西勇, 应兰兰, 等. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 322-327.
- [3] AGUILAR C, ZINNERT J C, POLO M J. NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation[J]. Ecological Indicators, 2012, 23(2): 290-300.
- [4] TAO J, ZHANG Y, DONG J, et al. Elevation-dependent relationships between climate change and grassland vegetation variation across the Qinghai-Xizang Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(7), 1638-1647.
- [5] SHEN M, ZHANG G, CONG N, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 71-80.
- [6] 马新萍, 白红英, 贺映娜. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1616-1621.
- [7] 刘宝升. 基于 MODIS 和通量数据的玉米总初级生产力反演研究[D]. 电子科技大学, 2013.
- [8] DING M, LI L, ZHANG Y, et al. Start of vegetation growing season on the Tibetan Plateau inferred from multiple methods based on GIMMS and SPOT NDVI data[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(2): 131-148.
- [9] ZHANG Y, GAO J, LIU L, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas[J]. Global & Planetary Change, 2013, 108(SEP.): 139-148.
- [10] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 等. 基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2015(1): 8-13.
- [11] WANG X, CHEN J M, JU W. Photochemical reflectance index (PRI) can be used to improve the relationship between

gross primary productivity (GPP) and sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF) [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 246(3):111888.

[12] LASSLOP G, HANTSON S, HARRISON S P, et al. Global ecosystems and fire: Multi-model assessment of fire-induced tree-cover and carbon storage reduction [J]. Global Change Biology, 2020.

[13] 张静, 任志远. 基于 MOD16 的汉江流域地表蒸散发时空特征 [J]. 地理科学, 2017, 37(2):274-282.

[14] 陈建耀, 刘昌明, 吴凯. 利用大型蒸渗仪模拟土壤-植物-大气连续体水分蒸散 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(1):45-48.

[15] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析 [J]. 地理学报, 2011, 66(5):579-588.

[16] NOURI H, ANDERSON S, SUTTON P. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands [J]. Science of the Total Environment, 2017, s 584-585:11-18.

[17] JASON E, ROLAND G. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4):535-554.

[18] 付新峰, 杨胜天, 刘昌明. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与主要气候因子的关系 [J]. 地理研究, 2007, 26(1):60-66.

[19] 张勃, 王东, 王桂钢, 等. 西南地区近 14a 植被覆盖变化及其与气候因子的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6):956-964.

[20] 赵亚杰, 黄进良, 王立辉, 等. 基于时空融合 NDVI 及物候特征的江汉平原水稻种植区提取研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2):424-433.

[21] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 长江流域中上游植被 NDVI 时空变化及其地形分异效应 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1):66-78.

[22] JIAN S, GENWEI C, WEIPENG L. On the variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau. [J]. Remote Sensing, 2013, 5(4):1894-1911.

[23] 何云玲, 李同艳, 熊巧利. 2000-2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38(24).

[24] ICHII K, KAWABATA A, YAMAGUCHI Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(18):3873-3878.

[25] TUCKER CJ, TOWNSHEND JRG, GOFF TE. African Land-Cover Classification Using Satellite Data [J]. Science, 1985, 227(4685):369-375.

[26] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. Nature (London), 1997, 386(6626):698-702.

-
- [27]陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].生态学报,2019,39(9):3257-3266.
- [28]胡硯霞,黄进良,杜耘,等.2000~2015年丹江口库区植被覆盖时空变化趋势及其成因分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):862-872.
- [29]杨建平,丁永建,陈仁升.长江黄河源区高寒植被变化的NDVI记录[J].地理学报,2005,60(3):467-478.
- [30]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[J].遥感学报,2016,20(3):481-490.
- [31]刘灿,高阳华,李月臣.基于NDVI的重庆市植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].长江流域资源与环境,2013,22(11):1514.
- [32]顾胜,李思悦,张全发.汉江堵河流域地表水质时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):41.
- [33]蒲云海,张应坤,江明喜,等.神农架北坡堵河源自然保护区植物多样性研究[J].植物科学学报,2006,24(4):327-332.
- [34]赵健赞,张晓华,张波,等.基于Landsat的三江源区植被覆盖时空变化分析[J].人民黄河,2018,40(7):68-72,77.
- [35]杜梅,赵健赞.基于MODIS NDVI的湟水流域植被覆盖时空变化特征分析[J].青海大学学报,2020,38(6):77-84.
- [36]张静,任志远.基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征[J].地理科学,2017,37(2):274-282.
- [37]PAN Y,BIRDSEY R,FANG J Y.A large and persistent carbon sink in the world's forests[J].Science,2011,333(6045):988-993.
- [38]雒新萍.近25a来秦巴山区植被NDVI时空变化及其对区域气候的响应[D].西北大学,2009.
- [39]崔凤梅.E601B型与小型蒸发器观测对比分析[J].气象研究与应用,2007,28(A02):174-176.
- [40]白淑英,王莉,史建桥.长江流域NDVI对气候变化响应的时滞效应[J].中国农业气象,2012,33(4):579-586.
- [41]于志磊,秦天玲,章数语,等.近年来长江流域植被指数变化规律及气候因素影响研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(5):362-366,373.
- [42]王琮,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J].生态学杂志,2013,32(5):1292-1302.
- [43]炳楠,陈报章,车明亮.鄱阳湖流域植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子分析[J].植物学报,2016,51(5).
- [44]何家理,马治虎,陈绪敖.秦巴山区退耕还林生态效益外显与经济效益内隐状况调查[J].水土保持通报,2012,32(4):251-254,260.