

2000~2019 嘉陵江流域植被覆盖时空 变化特征及气候响应分析

张婷¹ 薛东剑¹ 段金亮² 杨利¹¹

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610059)

【摘要】: 嘉陵江是长江水系流域面积最大的一条支流, 近年来嘉陵江流域出现严重水土流失, 在生态保护工程的实施和气候变化的共同作用下植被覆盖发生了明显变化, 研究植被覆盖时空变化特征、未来趋势和影响因素, 可为嘉陵江流域生态环境治理提供参考依据。基于 MODIS-NDVI 时序数据和地面气象数据, 借助 3S 技术和线性趋势分析、Hurst 指数、变异系数等方法多角度分析了嘉陵江流域植被覆盖的时空演变特征及未来趋势, 并结合 Mann-Kendall (M-K) 检验与偏相关系数研究气候因子对植被覆盖的影响。结果表明: (1) 近 20 年来嘉陵江流域植被覆盖总体呈上升趋势, 增加速率为 2.9%/10a, 且空间分布上具有显著差异, 表现为上中游偏高, 下游偏低; (2) 嘉陵江流域植被覆盖呈增加趋势和减少趋势的面积分别占 88.68%和 11.32%, 具体表现为陇南陕南地区及中下游东部地区显著增加, 流域西北部与南部各市县城区减少; (3) 流域北部地区植被覆盖变化的波动性强于南部地区, 中东部地区波动最小。 (4) 嘉陵江流域植被覆盖变化反向持续性较强, 植被变化呈持续退化趋势的主要在碌曲县南部与流域南部各市县城区, 呈持续改善趋势的主要在广元市剑阁县与苍溪县, 其余区域呈由退化到改善的趋势; (5) 气温对嘉陵江流域植被覆盖变化的影响最大, 且植被 NDVI 对气温和降水的响应均存在一定的滞后现象, 人类活动对植被覆盖变化的影响具有两面性。

【关键词】: 植被覆盖 NDVI 时空变化 嘉陵江流域 Hurst 指数

【中图分类号】: Q948 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2021)05-1110-11

植被在陆地生态系统中扮演着重要角色, 它是辐射平衡、水循环等过程的参与者, 连接着土壤、大气、水分, 可以有效改造调节生态环境^[1~4]。植被覆盖是生态系统服务功能评估和生态敏感性评估中的重要指标。在全球化背景下, 植被覆盖时空变化特征及其影响因素的分析一直是国内外全球变化研究中的核心内容之一^[5~7]。植被指数能够较好地反映地表植被覆盖状况和生长情况, 比值植被指数 (RVI)、归一化植被指数 (NDVI)、差值植被指数 (DVI) 是较为常见的 3 种植被指数形式。其中归一化植被指数 (NDVI) 是应用最广泛的一种植被指数形式, 它是指遥感数据中近红外波段 (NIR) 和红光波段 (RED) 反射率的比值参数^[8~11]。它可以消除大部分由仪器定标、太阳角、地形、云阴影等因素引起的辐射误差, 具有较强的植被响应能力, 因此被广泛应用于植被覆盖时空演变趋势的研究中。目前, 国内外诸多学者利用 NDVI 数据在不同空间尺度下进行植被覆盖时空变化方面研究, 如王建邦等^[8]探讨了中国植被覆盖人为影响的时空变化特征, 结果表明中国植被覆盖人为影响由南向北空间分异愈发明显, 人类活动对

作者简介: 张婷 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境遥感与生态修复。E-mail: zt223029163.com

薛东剑, E-mail: xdj101@sina.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0706003-1); 青海省科技计划项目 (2019-SF-130)

植被覆盖的减少作用较弱。金凯等^[9]研究了中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响,得出气候变化和人类活动的共同作用是中国植被 NDVI 呈现整体快速增加和巨大空间差异的主要原因的结论。刘宪锋等^[10]探究了秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因。方建梅等^[11]对青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系进行了研究。

嘉陵江是长江上游主要产沙区之一,前人对嘉陵江的研究大多是关于水沙变化趋势方面的,对嘉陵江植被覆盖时空演变方面的研究鲜少,而植被变化是生态环境变化的直接结果,研究植被覆盖变化对保护区域生态环境具有重要意义^[12~14]。刘洪鸽等^[15]利用 GIMMS-NDVI 数据探讨了嘉陵江流域植被覆盖变化,所用数据分辨率较低,并且没有分析植被变化的未来趋势,对植被变化影响因素也缺乏定量分析。因此,本文基于 MODIS-NDVI 时序数据和地面气象数据,借助 3S 技术和线性趋势分析、Hurst 指数、变异系数、偏相关分析以及 Mann-Kendall (M-K) 非参数检验等方法,多角度探究了嘉陵江流域植被覆盖时空演变特征、未来趋势及其影响因素。

1 研究区概况

嘉陵江发源于秦岭南麓,是长江水系中流域面积最大的支流。干流全长约 1120km,全流域总面积约 16 万 km²,地跨 102° 35' 36" E~109° 01' 08" E,29° 17' 30" N~34° 28' 11" N,穿越川、陕、甘 3 省。嘉陵江上游为四川省广元市昭化区以上,中游为昭化至重庆市合川区,下游为合川至重庆河口。整个流域包括 3 大水系:嘉陵江干流、渠江、涪江。嘉陵江干流自北向南流与涪江、渠江在合川汇合,形成巨大的扇形向心河网,最后于重庆市朝天门码头注入长江^[16]。嘉陵江流域大部分属亚热带湿润季风气候。在上游段高海拔山区,冬季严寒且多霜雪风暴,而中下游段为盆地,冬季温暖多雾。年平均气温约 10℃,年降水量在 1000mm 以上,降水在时间上分配不均,大多集中于 5~10 月。流域内土地利用类型主要有耕地、林地、草地 3 种,主要作物为冬小麦、玉米、水稻、土豆和油菜等,一般种两季。

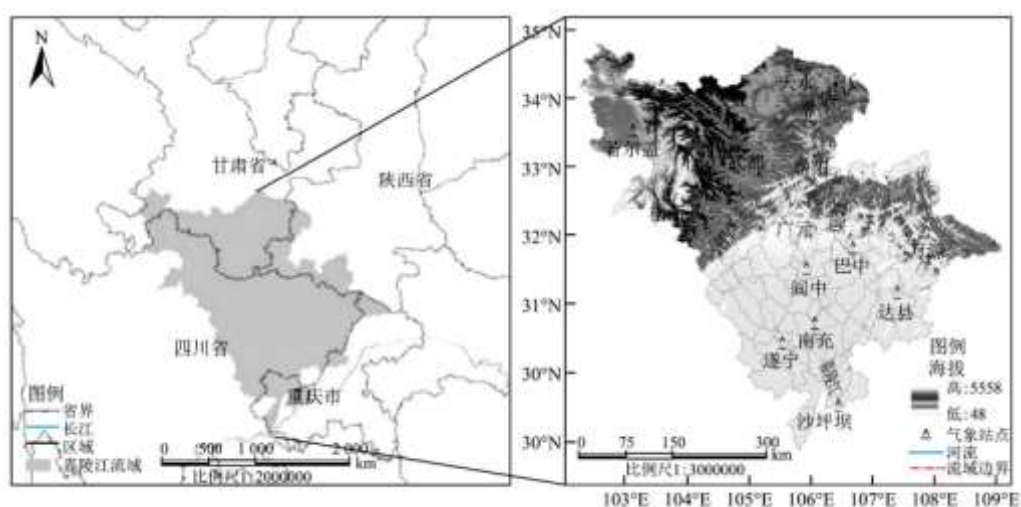


图 1 研究区概况图及气象站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

本次使用的数据包括遥感数据和气象数据。遥感数据为 MOD13Q1 数据,来源于美国国家航空航天局 (NASA) 的 EOS/MODIS 数据产品 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),数据的时间跨度为 2000~2019 年,时空分辨率分别为 16d 和 250m。由于

MODIS/NDVI 产品经过水、云、重气溶胶等处理,数据质量较好,被广泛应用于区域植被覆盖变化研究。对遥感数据的预处理主要包括格式转换、拼接、投影转换、年/月 NDVI 影像合成、数据裁剪等。首先,使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)将下载的 MODIS13Q1 数据进行拼接、投影及格式转换,获得覆盖研究区的 MODIS-NDVI 数据;然后,使用 ENVI 软件批量裁剪出嘉陵江流域的 NDVI 数据;其次,使用 Matlab 软件编写最大合成法(MVC)合成月 ND-VI 数据,再由月 NDVI 数据合成年最大 NDVI 影像;最后,获得 2000~2019 年嘉陵江流域的逐月及逐年 NDVI 影像。研究使用的地面气象数据是来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)的日值数据,主要使用平均气温和降水量数据,本文将 1990~2019 年有缺测的站点剔除,选取嘉陵江流域内 13 个气象台站进行分析。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

一元线性回归分析方法计算简便,可以模拟每个栅格单元的年均 NDVI、年均气温和年降水量随时间 t 的变化趋势,该方法是指采用最小二乘法逐像元拟合年均 NDVI、年均气温、年降水量在研究时段内变化的斜率,分析每个像元值在研究时段的变化趋势^[17,18]。计算公式如下:

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

式中: n 为研究期总年数; i 为年份; x_i 为第 i 年变量 x 即年均 NDVI、年均气温、年降水量的值; $Slope$ 表示 NDVI、年均气温、年降水量的变化趋势;当 $Slope > 0$ 时,说明变量 x 呈增加趋势;当 $Slope = 0$ 时,说明变量 x 不变;当 $Slope < 0$ 时,说明变量 x 呈下降趋势。

2.2.2 Hurst 指数

Hurst 指数 H 是定量描述长程依赖性的主要方法之一。目前,已有多种方法用于估计 Hurst 指数,而应用最广泛的是 R/S 分析法即重标极差分析法^[19]。本研究利用基于 R/S 分析法的 Hurst 指数表明嘉陵江流域 NDVI 时间序列的持续性特征,其基本原理是^[20]:

对于时间序列 $\{\xi(i)\}$, $i=1, 2, \dots, n$:

$$\xi_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$S_\tau = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(i) - \xi_\tau) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$X(i, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(i) - \xi_\tau), \quad 1 \leq i \leq \tau \quad (4)$$

$$R_\tau = \max_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) - \min_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau), \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

若 $R/S \propto \tau^H$ ，则说明该时间序列存在 Hurst 现象，Hurst 指数即 H 值可根据 $\log(R/S) = a + H \times \log(n)$ 利用最小二乘法拟合得到。Hurst 指数取值范围介于 0~1 之间，有以下三种形式：若 $0.5 \leq H \leq 1$ ，表明该时间序列未来变化趋势具有正向持续性，即植被覆盖未来变化趋势与过去 20 年的趋势一致，且 H 值与 1 越接近，这种正向持续性越强；若 $H=0.5$ 时，表明该时间序列处于独立状态，即植被覆盖未来变化趋势与过去 20 年的趋势无关；若 $0 \leq H \leq 0.5$ 时，表明该时间序列具有反向持续性，即植被覆盖未来变化趋势与过去 20 年的趋势相反，且 H 值与 0 越接近，反向持续性越强。

2.2.3 偏相关分析

在多要素构成的系统中，要素之间的关系很复杂，简单相关系数已不能真实反映某要素与另一要素的相关性。而偏相关系数可以暂时不考虑其他要素的影响，单独分析两要素之间的相关程度^[21]。本研究利用偏相关分析方法来分析气候因子(气温、降水)对嘉陵江流域植被 NDVI 变化的影响，计算公式如下^[22]：

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中： $r_{xy \cdot z}$ 表示变量 z 固定后与变量 x 与 y 的偏相关系数； r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为 x 与 y、x 与 z、y 与 z 之间的相关系数。

其中，相关系数计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中： r_{xy} 为变量 x 与 y 的相关系数；值域范围是 $[-1, 1]$ 。 x_{ij} 、 y_{ij} 表示第 i 年和第 j 月的研究变量的值， $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别表各变量在各时间尺度上的均值。

3 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征

3.1 时间变化特征

为研究嘉陵江流域植被 NDVI 随时间变化的特征，利用一元线性回归方法对 2000~2019 年嘉陵江流域植被 NDVI 值进行分析(图 2)，在研究时段内，嘉陵江植被 NDVI 值介于 0.777~0.831 之间，最小值出现在 2001 年，最大值出现在 2019 年。由所拟合的线性函数可知，嘉陵江流域植被的 NDVI 值整体呈上升趋势，增加速率为 2.9%/10a ($p < 0.01$)。其中 2000~2016 年 NDVI 值是呈波动上升，在 2005~2006、2013~2014 和 2015~2016 年间出现较明显下降阶段。自 2016 年起，植被的 NDVI 值呈持续上升趋势，表明嘉陵江流域植被的生长状况越来越好。

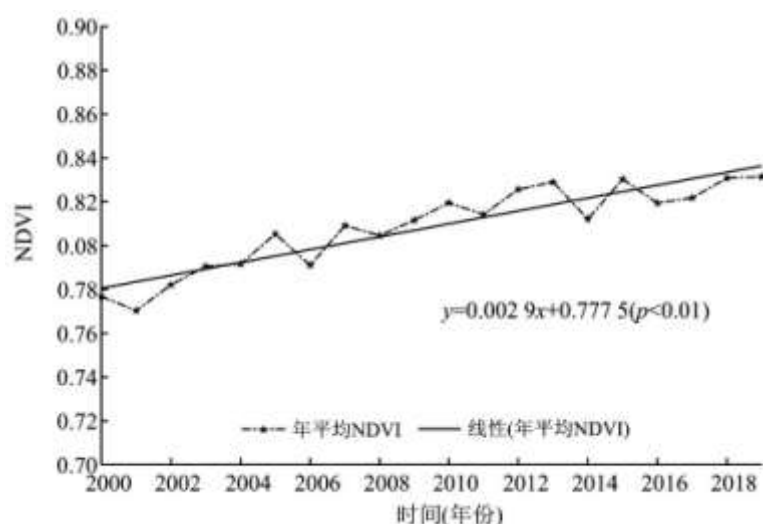


图 2 嘉陵江流域植被 NDVI 年际变化

3.2 空间差异特征

3.2.1 植被 NDVI 空间变化基本特征

依据 2000~2019 年嘉陵江流域年均 NDVI 数据, 计算 20a 平均值得到平均 NDVI 的空间分布图(图 3)。从图中可以看出, 嘉陵江流域大部分地区植被 NDVI 值集中于 0.4~0.8, 总体偏高, 植被覆盖在空间分布上具有显著差异, 表现为上中游偏高, 下游偏低。NDVI 值较低的区域主要分布在九寨沟县南部、松潘县东部、平武县西北部、迭部县北部, 原因是这些地方是高海拔山地, NDVI 值小于 0.1, 根据影像判断为积雪、裸地; 而 NDVI 值较高的区域主要分布在北川县、平武县、麦积区、凤县、文县南部、康县南部、两当县东南部与南江县北部, 归因于这些地区林草类型和数量丰富, 多为 NDVI 较高的天然草场、落叶阔叶林和常绿、落叶针阔混交林等。

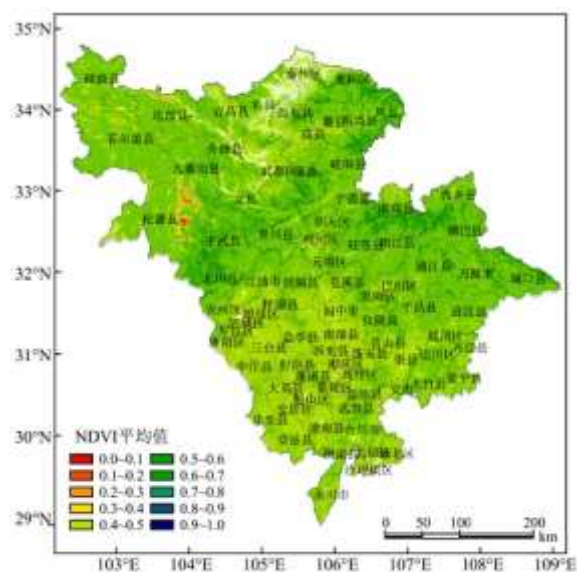


图 3 嘉陵江流域 NDVI 空间分布

3.2.2 植被 NDVI 空间变化波动特征

根据变异系数计算方法得出嘉陵江流域植被 NDVI 时间序列的变异系数取值范围为 0.005~0.392(图 4), 植被 NDVI 变化的稳定性在空间分布上存在明显差异, 变化稳定的地区主要分布在大巴山一带;而不稳定的地区主要分布在秦州区、礼县、西和县、武都区北部、九寨沟南部、松藩县东部、平武县西北部以及流域南部的各市县城区。因此, 总而言之, 嘉陵江流域植被 ND-VI 的空间波动特征表现为北部地区的波动性强于南部地区, 中东部地区波动最小。

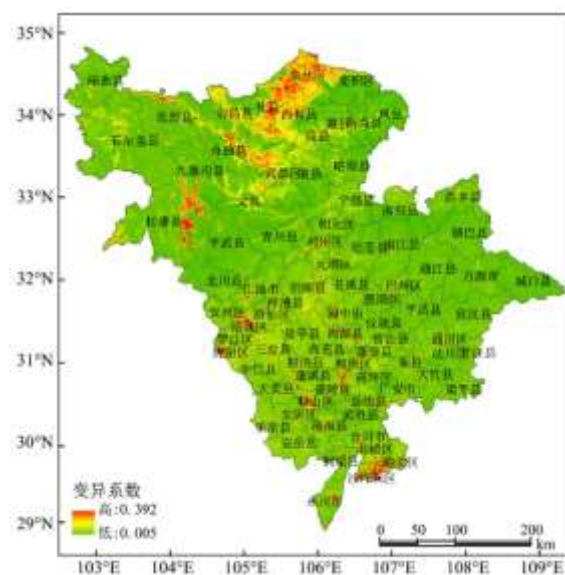


图 4 近 20 年嘉陵江流域植被 NDVI 空间变化波动性

3.3 嘉陵江流域 NDVI 趋势分析

3.3.1 嘉陵江流域植被 NDVI 变化趋势

采用一元线性回归趋势分析逐像元模拟影像每个栅格近 20 年的变化趋势(图 5), 并对分析结果进行显著性检验, 把结果划分为 4 个变化等级(图 6), 分别为极显著(显著水平 0.01)、显著(显著水平 0.05)、弱显著(显著水平 0.1)和不显著。结果表明, 嘉陵江流域植被 NDVI 整体呈上升趋势, 变化趋势的平均值为 2.9%/10a, 呈增加趋势的面积占 88.68%, 呈减少趋势的面积占 11.32%。其中就增加趋势而言, 极显著和显著增加的面积占 55.25%, 而下降趋势中极显著和显著减少占 1.93%(表 1)。从空间分布来看, 极显著增加的区域主要分布在上游的陇南地区和陕南地区以及中下游地区的东部, 主要归因于长江上游水土保持重点防治工程(“长治工程”)中相关措施的实施。呈减少趋势的主要分布在流域的西北部和南部各市县城区, 如碌曲县、迭部县、若尔盖县、九寨沟县、松潘县等出现较明显植被退化现象。

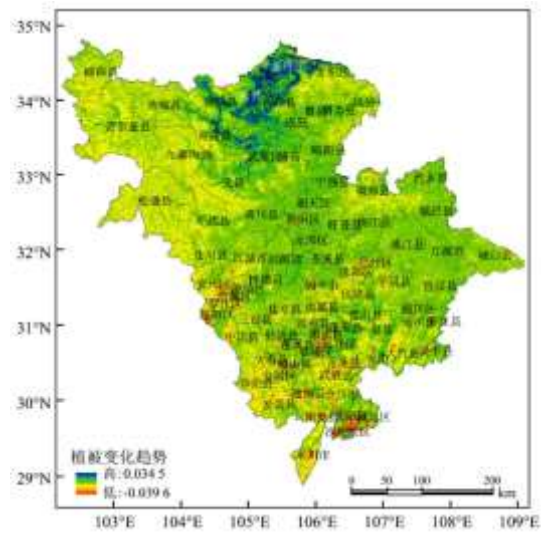


图 5 近 20 年嘉陵江流域植被变化趋势

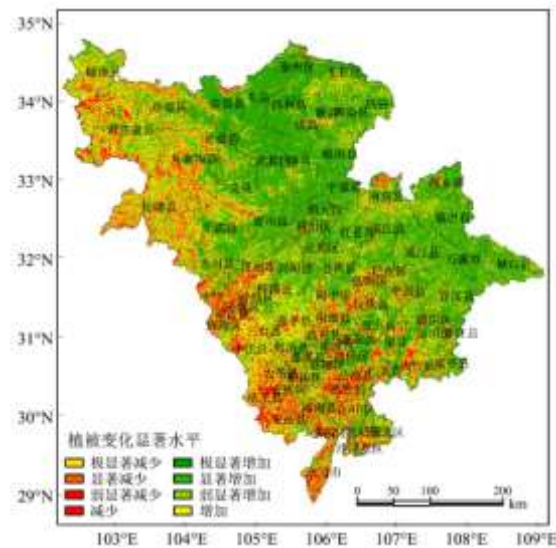


图 6 嘉陵江流域植被变化趋势显著性检验结果

3.3.2 植被 NDVI 未来趋势分析

嘉陵江流域植被 NDVI 的 Hurst 指数介于 0.07~0.79 之间, 平均值为 0.4817, Hurst 指数大于 0.5 的像元数占 31.22%, 小于 0.5 的占 68.78%, 表明嘉陵江流域植被变化的反向持续性强于正向持续性。

Hurst 指数分析可以反映植被覆盖变化未来趋势相对于过去趋势的依赖性, 因此, 结合将植被覆盖变化趋势的结果 Slope 与 Hurst 指数分析结果, 未来趋势有以下 4 种情况: 当植被覆盖呈上升趋势且 H 值大于 0.5, 则未来趋势为持续改善; 当植被覆盖呈上升趋势而 H 值小于 0.5, 则未来趋势为改善到退化; 当植被覆盖呈下降趋势且 H 值大于 0.5, 则未来趋势为持续退化; 当植被覆盖呈下降趋势且 H 值小于 0.5, 则未来趋势为退化到改善。如图 8 显示, 植被持续退化的区域主要分布在碌曲县南部和流域南部

的各市县城区;呈持续改善趋势的区域主要分布在广元市剑阁县和苍溪县;呈退化到改善趋势的区域主要是流域上游以及中下游的东部地区。而流域几乎没有出现由改善到退化的趋势,表明嘉陵江流域植被生长状况未来更加好转。

4 嘉陵江流域 NDVI 影响因素分析

4.1 嘉陵江流域 NDVI 对气候因子的响应

植被能对气候变化产生反馈作用,为了定量分析嘉陵江流域 NDVI 对气温、降水的响应情况,利用偏相关分析法以年和月两种时间尺度逐站点进行分析。首先,每个站点的年/月 NDVI 值为各站点周边 5km×5km 的 NDVI 平均值,依据气象站点的位置在 ArcGIS 里完成提取。最后,把年/月 NDVI 值用于同年和月平均气温、降水量进行偏相关分析。

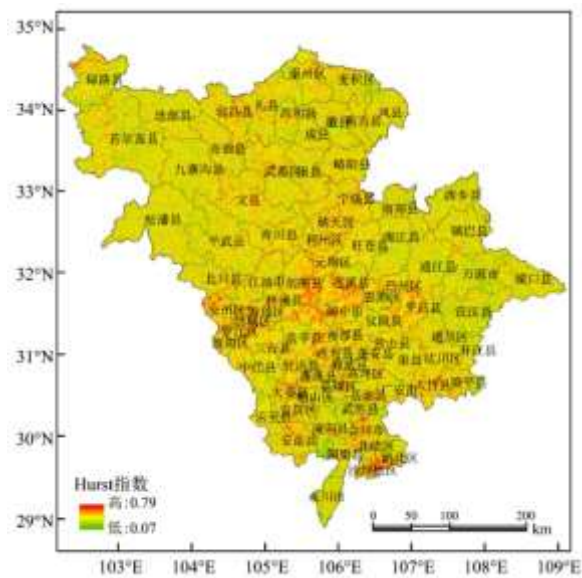


图 7 嘉陵江流域植被 Hurst 指数

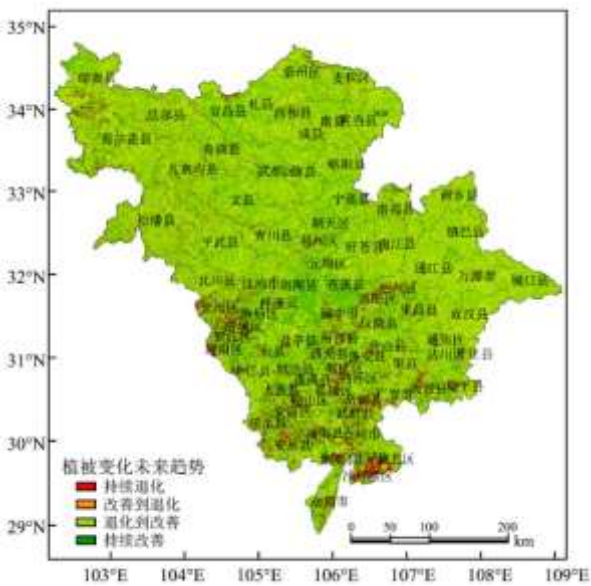


图 8 嘉陵江流域植被未来趋势

统计结果显示,从年度上看,NDVI 与气温的偏相关系数呈下降趋势,均为正值(图 9a);NDVI 与降水的偏相关系数呈上升趋势,且偏相关系数在正负之间波动(图 9b)。年均气温与年 NDVI 的偏相关系数较大的站点主要有万源站、达县站、略阳站,分别为 0.781、0.772、0.752。年降水量与年 NDVI 的偏相关系数较大的站点为天水站(0.451)、武都站(0.362)、若尔盖站(0.323)。取各站点偏相关系数求平均,得到嘉陵江流域年平均气温与年 NDVI 的偏相关系数为 0.706,年降水量与年 NDVI 的偏相关系数为 0.162,说明气温和降水对嘉陵江流域植被覆盖变化都有正面效应,而植被 NDVI 对气温更加敏感,因此气温是影响嘉陵江流域植被覆盖变化的主要因素。在月度上,气温和降水对嘉陵江流域植被 NDVI 的影响均存在一定的滞后现象。

4.2 嘉陵江流域气候变化趋势

图 10 给出了嘉陵江流域 1990~2019 年年平均气温的变化情况,根据所拟合线性函数的系数可知,1990~2019 年嘉陵江流域年平均气温表现出上升趋势,与符艳红^[23]研究结果一致。另据 Mann-Kendall 检验计算得出趋势值 $Z=2.18$,气温升高显著(通过了 95%的显著性检验),增速为 $0.236^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p<0.05$)。由图 11 所示 M-K 检验结果可以看出,在置信区间内,嘉陵江流域除 1995 年外,1990~1996 年平均气温呈降低趋势,但没达到显著水平,在 1996 年后,气温持续上升。由 UF 曲线和 UB 曲线的交点可知,突变时间发生在 1996 与 1997 年之间,1996 年后气温升高显著。其次通过逐站点分析图 12,结果表明,所有站点气温都升高,只有广元站、遂宁站、松藩站 3 个站点的气温没有发生显著变化,并且在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初这一时期所有站点均发生突变。

嘉陵江流域 1990~2019 年年降水量总体呈上升趋势,由 Mann-Kendall 检验计算得出趋势值 $Z=1.96$,降水升高明显(通过了 95%的显著性检验),增速为 $50.349\text{mm}/10\text{a}$ ($p<0.05$) (图 14)。近 30 年来,嘉陵江流域降水量最大值为 1013.708mm ,出现在 1998 年,最小值为 655.3385mm ,出现在 1997 年。根据 M-K 检验结果显示(图 15),由 UF 曲线可知,在 1990~2006 年之间除了 1992、1993、2005 年降水量一直呈显著减少的趋势,从 2007 年开始降水量持续上升。在置信区间内,观察 UF 曲线与 UB 曲线的交点可以判断出降水量变化在 2009、2015 和 2016 年发生突变,2009 年是降水量由枯到丰的转折点,说明 2009 年之前整个流域处于较干旱的状态,2015 年的突变不明显但 2016 年的突变达到了显著水平,说明 2016 年后降水量显著上升。另外根据逐站点分析发现(图 13),所有站点的年降水量均上升,除达县、南充、若尔盖、万源、阆中外,其他站点都显著上升,并且所有站点都存在突变现象,突变时间集中在 21 世纪 10 年代。综合 1990~2019 年嘉陵江流域年平均气温和年降水量的变化趋势可以看出,近年来嘉陵江流域气温显著升高,降水的增加使得水热条件组合较好,导致流域植被覆盖变化呈增加趋势^[24]。

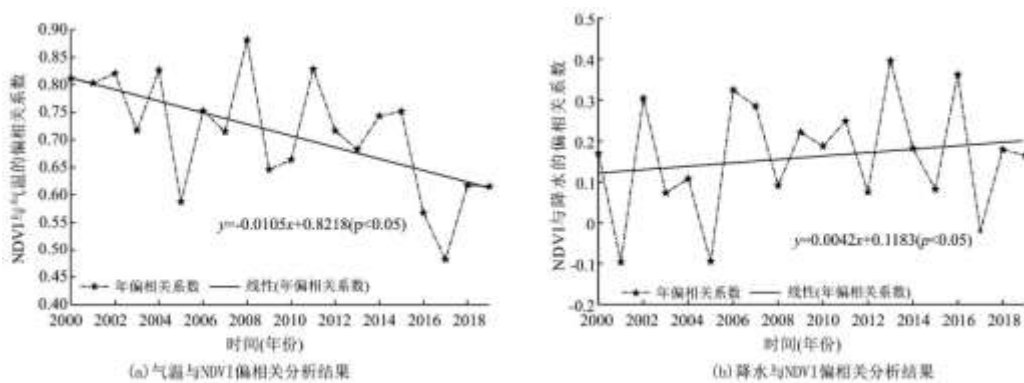


图 9 嘉陵江流域植被 NDVI 与气候因子的偏相关系数

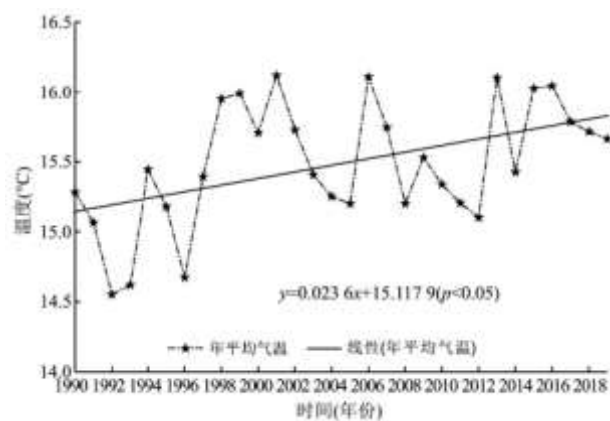


图 10 嘉陵江流域气温变化趋势

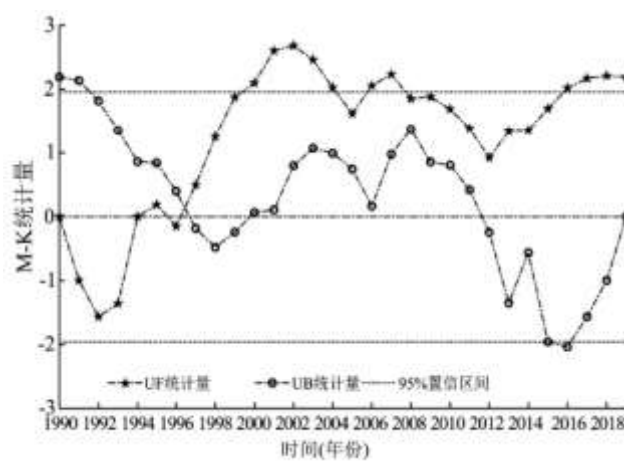


图 11 气温变化 M-K 检验结果



图 12 嘉陵江流域各气象站点气温突变特征

4.3 嘉陵江流域人类影响因素分析

近年来,随着人类活动范围的扩大和活动能力的增强,植被覆盖变化深刻记录了人类活动的烙印^[26]。短时间内,植被覆盖演变主要是由人类活动直接或间接影响而发生的人为胁迫演变^[8]。人类活动对植被覆盖变化的影响是生态环境变化研究中不可忽视的因素。

20 世纪 80 年代以来,长江上游地区出现严重的水土流失,引起政府和社会的高度重视。国务院在 1988 年 4 月把长江上游列为全国水土保持重点防治区,并将陇南陕南地区及嘉陵江中下游列为第一批治理重点^[26]。从 1989 年起,长江上游水土保持重点防治工程(“长治”工程)正式实施,技术体系主要包括工程措施、植被措施、农耕措施。工程措施以坡耕地治理为突破点,把坡地改为梯田;植物措施不仅因地制宜种植经济果木林,同时实施种草和封禁治理;农耕方面的相关措施改善了耕作条件,使农民收入大幅提高^[27]。近 20 年来,嘉陵江流域内陇南陕南和中下游东部地区植被覆盖极显著增加,可见是政府政策良好生态效应的体现。而流域南部各市县城区由于城市化进程加快,城镇建设用地增加,持续占用植被资源,导致植被覆盖有所下降。因此,人类活动对嘉陵江流域植被覆盖具有正向和负向影响,但总体趋势以良性发展为主。



图 13 嘉陵江流域各气象站点降水突变特征

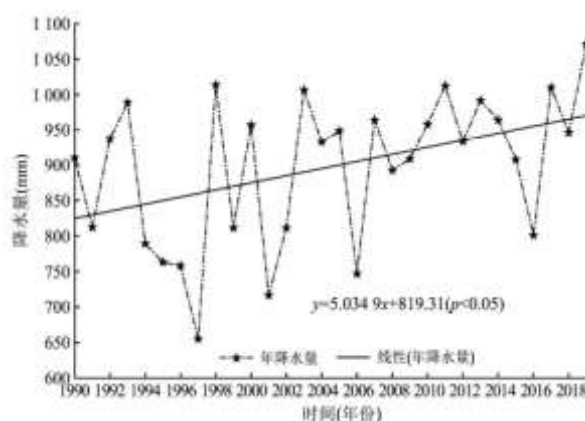


图 14 嘉陵江流域降水变化趋势

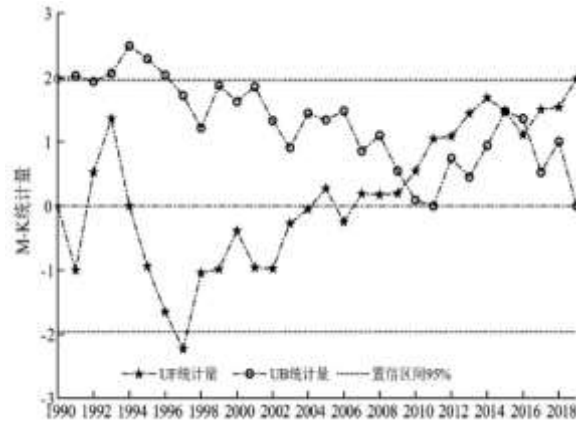


图 15 降水变化 M-K 检验结果

5 结论

本文基于 MODIS-NDVI 时序数据和地面气象数据, 利用线性趋势分析、变异系数和 Hurst 指数分析了嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征和未来趋势, 同时结合偏相关系数和 Mann-Kendall 非参数检验法讨论了气候因子对植被覆盖变化的影响, 得出以下结论:

(1) 从时空变化特征方面, 近 20 年来嘉陵江流域植被覆盖整体呈上升趋势, 增速为 2.9%/10a, 其中 2016 年前呈波动上升趋势, 2016 年后持续上升。嘉陵江流域大部分地区植被 NDVI 值集中于 0.4~0.8, 总体偏高, 植被覆盖在空间分布上具有显著差异, 表现为上中游偏高, 下游偏低。NDVI 低值区主要分布在九寨沟县南部, 高值区主要分布在流域中、东部。

(2) 从变化趋势方面, 嘉陵江流域植被覆盖呈增加趋势和减少趋势的面积分别占 88.68 和 11.32%。在增加趋势中, 极显著和显著增加的面积占 55.25%, 在减少趋势中, 极显著和显著减少的面积占 1.93%。具体表现为陇南陕南地区及中下游东部地区显著增加, 而流域西北部与南部各市县城区植被退化现象较明显。

(3) 从植被变化稳定性方面, 北部地区的波动性强于南部地区, 中东部地区波动最小, 植被覆盖变化最稳定。

(4) 从未来趋势方面, Hurst 分析结果表明嘉陵江流域植被覆盖变化反向持续性强于正向持续性, 植被变化呈持续退化趋势的主要在碌曲县南部与流域南部各市县城区, 呈持续改善趋势的主要在广元市剑阁县与苍溪县, 其余区域呈由退化到改善的趋势;

(5) 从影响因子方面, 气候变化和人类活动的共同作用是造成植被覆盖变化的主要原因。近 30 年嘉陵江流域气温和降水均显著上升, 植被 NDVI 对气温和降水的响应均存在时滞效应, 且植被覆盖变化受气温影响更大。人类活动对植被覆盖变化的影响具有两面性。长江上游水土保持重点防治工程等生态保护工程的实施对嘉陵江流域植被生长起促进作用, 城镇建设用地面积不断扩张导致植被资源减少, 但人类活动对嘉陵江流域植被覆盖主要以良性发展为主。

参考文献:

-
- [1]孙锐,陈少辉,苏红波.黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应[J].地理研究,2020,39(5):1200-1214.
- [2]张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.
- [3]GERLA P, CORNETT M M, EKSTEIN J, et al. Talking big: Lessons learned from a 9000 hectare restoration in the northern tallgrass prairie[J]. Sustainability, 2012, 4 (11):3066-3087.
- [4]张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等.2000-2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J].地球与环境,2020,48(4):461-470.
- [5]ANWAR M M. Recreational opportunities and services from ecosystem services generated by public parks in megacity Karachi Pakistan[J]. Sindh University Research Journal-Science Series, 2012, 44(1):23-28.
- [6]刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.
- [7]张亮,丁明军,张华敏,等.1982~2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].自然资源学报,2018,33(12):2084-2097.
- [8]王建邦,赵军,李传华,等.2001-2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J].地理学报,2019,74(3):504-519.
- [9]金凯,王飞,韩剑桥,等.1982-2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.
- [10]刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [11]方健梅,马国青,余新晓,等.青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系[J].水土保持学报,2020,34(3):105-112.
- [12]张戈丽,徐兴良,周才平,等.近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.
- [13]信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D 辑:地球科学),2007(11):1504-1514.
- [14]阿多,赵文吉,宫兆宁,等.1981~2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J].生态学报,2017,37(2):576-592.
- [15]刘洪鹄,张平仓,刘宪春,等.嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):111-115.
- [16]陈桂亚, Derek Clarke. 气候变化对嘉陵江流域水资源量的影响分析[J].长江科学院院报,2007,24(4):14-18.
- [17]李杰,张军,刘陈立,等.基于 MODIS-NDVI 的中老缅交界区近 16 年植被覆盖时空变化特征[J].林业科学,2019,55(8):9-18.

-
- [18]刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40 (2):678-691.
- [19]江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题-以在气候变化研究中的应用为例[J]. 地理科学, 2004(2):177-182.
- [20]袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7798-7806.
- [21]严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用[J]. 云南财贸学院学报, 2003, 19(3):78-80.
- [22]徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2 版. 北京:高等教育出版, 2002:37-41.
- [23]符艳红. 嘉陵江流域近 55 年气候变化特征[D]. 重庆:西南大学, 2019.
- [24]王刚, 张行南, 刘扬扬, 等. 嘉陵江流域 NDVI 年季变化特征及其与气象因子的关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(1):21-25.
- [25]高鹏, 穆兴民, 王伟. 长江支流嘉陵江水沙变化趋势及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4):57-61, 66.
- [26]许炯心. 农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(4):385-394.
- [27]王莺, 王劲松, 武明, 等. 土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):135-142.