第37卷,第1期	自	然	资	源	遥	感
2025年02月	REMOTE SE	NSING	FOR	NATU	JRAL	RESOURCES

doi: 10.6046/zrzyyg.2023216

引用格式:钟旭珍,吴瑞娟.基于 BFAST 改进模型的沱江流域 NDVI 变化趋势及驱动力分析[J].自然资源遥感,2025,37(1): 131-141. (Zhong X Z, Wu R J.Analysis of changing trends in NDVI and their driving forces in the Tuojiang River basin based on an improved BFAST model[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1): 131-141.)

基于 BFAST 改进模型的沱江流域 NDVI 变化趋势及驱动力分析

钟旭珍1,2,3. 吴瑞娟1,4

(1.内江师范学院地理与资源科学学院,内江 641100;2.云南师范大学地理学部,昆明 650500;3.云南 师范大学西南联合研究生院,昆明 650500;4.资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101)

摘要: 植被是陆地生态系统的主体,对区域生态系统环境变化有着重要指示。沱江流域是四川经济、工业较为发达 的地区,对该流域植被进行动态监测并分析影响其变化的因素,对生态环境变化评估与保护具有重要意义。以沱 江流域为研究区,基于 2000—2021 年 MODIS NDVI 数据,利用 Slope 线性回归趋势和 BFAST 改进模型 BFAST01 对 其线性特征、突变类型和突变年份等非线性特征进行检测、分析和比对,并利用基于最优参数的地理探测器模型 (optimal parameters-based geographical detector, OPGD)对植被 NDVI 的影响因素进行探讨。结果表明: 沱江流域 95%以上的区域 NDVI 值都大于 0.6,线性回归趋势表明,植被覆盖呈显著改善趋势的像元面积占比为 18.07%,呈 显著退化的区域像元面积占比为 10.60%; BFAST01 非线性突变检验可知, 沱江流域 22 a 间植被 NDVI 趋势可分为 8种突变类型,总体为改善的区域占比(58.62%)大于总体为退化的区域(41.38%),检测结果与线性回归趋势相 似,说明近年来研究区植被得到较好保护;发生突变的年份集中分布在 2002—2018 年,"中断-+"、"反转+-"是发 生突变最多的类型,主要集中在2008—2013年,分别占14.83%和13.19%,其他突变类型在各阶段发生突变的比例 分布较为均匀; OPGD 结果表明,不同年份 NDVI 的影响因素略有差异,总体上影响较大的因子为土地利用、海拔、 地形地貌,其次是气温、降水等气象因子,其他因子影响力相差不大,总的来说,人口、国内生产总值(gross domestic product,GDP)等人为因子对沱江流域植被的影响程度比自然因子低,但也有一定影响,因此,植被保护与恢复应综 合考虑不同自然和人类活动条件的影响。

关键词: NDVI; 非线性趋势; BFAST 改进模型; OPGD; 沱江流域 文章编号: 2097-034X(2025)01-0131-11 中图法分类号: TP 79; X 87 文献标志码: A

引言 0

植被作为地表生境状况的重要表征,不仅是联 结大气圈、土壤圈、水圈和生物圈的重要纽带,更是 全球气候变化和生态系统变化的重要指示器,对全 球碳循环也非常重要^[1-4]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)可直接利 用遥感影像计算得到,该指标数值越高表明植被生 长状况越好^[5]。沱江流域是四川经济、工业较为发 达的地区,然而,有研究表明,经济发展、人类活动以

及气候变化等会导致植被覆盖的变化和退化,甚至 诱发如极端天气、草地退化、水土流失等问题,打破 生态平衡^[6-8]。习近平总书记曾指出,生态环境是 关系到人民生存的重大问题,人类想要可持续发展, 必将对生态环境进行保护。因此,对沱江流域植被 覆盖进行动态监测并分析影响其变化的因素,对该 地区生态环境变化评估与保护具有重要意义。

目前,针对 NDVI 变化趋势的研究已经取得了 丰硕的成果,如长时间序列 NDVI 时空演变及未来 可持续性分析^[9-10]、NDVI 与地形气候等要素的相 关性分析^[11-12],以及植被 NDVI 的突变分析等^[13];

收稿日期: 2023-07-20;修订日期: 2023-11-20

基金项目:四川省科技计划项目"基于时序遥感数据时-空-谱预测模型构建的森林扰动监测研究"(编号: 2023NSFSC0754)、资源与 环境信息系统国家重点实验室开放基金项目(编号:2022-30)、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项"利 用地理空间技术监测和评估土地利用/土地覆被变化对区域生态安全的影响"(编号:2018YFE0184300)、沱江流域高质量 发展研究中心项目"基于 RS 和 GIS 的沱江流域生态环境质量评价预测及修复对策研究"(编号: TJGZL2022-15)、内江师范 学院校级科研项目"沱江流域生态环境脆弱性评价及生态修复研究"(编号:2022YB17)和内江师范学院科研创新团队项目 (编号: 2021TD01)共同资助。

第一作者:钟旭珍(1993-)、女、博士研究生、讲师、主要从事 GIS 与环境遥感研究。Email: zxzxuzhen@ njtc.edu.cn。

通信作者:吴瑞娟(1985-),女,博士,副教授,主要从事 3S 技术集成及应用研究。Email: rjwu@ njtc.edu.cn。

常用的方法主要有线性回归分析方法[14-15]、相关性 分析法^[10-11,16]、Hurst 指数法^[10,17]、Theil-Sen 斜率 与 Mann-Kendall 检验结合的趋势分析法^[18]等。诚 然,以上这些方法都是比较经典和成熟的方法,研究 结果对植被 NDVI 趋势的改善或退化等线性特征具 有很好的参考性,但缺乏对 NDVI 时间序列的突变 性检测,更多的是表达一种单调趋势情况^[13]。然 而,在进行大尺度长时间序列 NDVI 时空演变分析 时,应该考虑其趋势的渐变或突变特征。BFAST (breaks for additive seasonal and trend) 突变检测法 是研究植被 NDVI 的非线性特征的有效方法, 它可 以将总趋势分为若干片段,其变体 BFAST01(即定 义至多1个突变点)可以对长时间序列植被 NDVI 进行趋势分类,即根据断点将趋势分为不同类型,这 对全面认识和掌握植被覆盖动态变化特征是很有用 的,已有学者将其用于植被^[19-21]、气温变化^[22]、气 溶胶变化[23]等领域中,并显示了其较好的适用 性^[24-25]。目前 BFAST 方法在国内生态环境领域的 运用相对还较少。从植被变化的非线性特征可知, 其影响因素也具有复杂性,通常包括自然因素和人 为因素,以往学者大多采用偏相关分析、回归分析、 多元回归残差分析等方法研究植被覆盖度变化的影 响因素[26-27],这些方法假设了植被与各环境因子存 在线性关系。而由王劲峰等[28]提出的地理探测器 模型(geographical detector, Geodetector), 不仅可用 于探测空间分异性并识别其主要的影响因子,还能 实现不同因子间的交互作用探测。此方法无线性假 设,可以避免多重共线性问题,在计算驱动因子的贡 献率时结果较为准确^[4]。其改进的基于最优参数 的地理探测器(optimal parameters-based geographical detector, OPGD)模型加入了参数优化模块, 可选 取出最优的离散化方式和最优的断点数目,提高各 类别间的显著差异性[29]。因此,研究采用该方法进 行植被非线性特征的驱动因子探测。

综上可知,尽管已经开展了不少植被覆盖的研究,但尚存在以下问题:第一,沱江流域位于成渝经济圈内部,作为长江上游重要生态屏障,具有重要的国家战略地位,但目前少见学者系统地研究其植被变化趋势及驱动力;第二,从研究内容和方法上,运用BFAST方法对其非线性趋势特征进行探讨并和线性趋势进行比对的研究不多。因此,研究以沱江流域为研究对象,基于2000—2021年 MODIS-NDVI数据,利用线性趋势分析法得到其线性趋势特征,并运用 BFAST01方法对其突变类型和突变年份等非线性特征进行检测和探索分析,最后引入 OPGD 模型对研究区植被覆盖的驱动因子进行定量探究,从

而多角度全面深入认识区内 NDVI 的演化规律,以 期为研究区的生态环境保护和可持续经济发展提供 科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

沱江发源于龙门山脉中段的九顶山南麓,流经 绵阳、德阳、成都、遂宁、简阳、内江、自贡、泸州等城 市。流域跨四川、重庆两省市(图1),总面积约2.7 万 km²,形状瘦长。其地形以盆地、丘陵为主,地势 走向自西北向东南倾斜,主要山脉有岷山、龙门山、 龙泉山等,森林植被以阔叶林为主,东部以及北部柏 木较多,南部有各种竹林,中部为多种亚热带作物及 果木。流域气候为亚热带季风气候,多年平均气温 稳定在17℃左右。流域内人口分布密集,耕地集 中,经济发达,有全省经济发展"金腰带"之称。近 年来,长期人类活动及工业发展使得流域内水质及 环境都受到了较为严重的污染,再加上近年气候的 变化,使流域的生态环境受到了重创,沱江流域已经 成为四川省各大河流流域中森林植被差、水土流失 严重的地区之一。对该区域植被进行动态监测并探 究其驱动因素,有利于保护生态环境的平衡。



图1 沱江流域地理位置



1.2 数据来源

研究数据主要有: 2000—2021 年 MODIS NDVI 数据,空间分辨率为 250 m,下载于 Google Earth Engine (https: //earthengine.google.com/); ASTER GDEMV3 DEM 数据产品,空间分辨率为 30 m,来源 于地理空间数据云(http: //www.gscloud.cn); 2000—2020年土地利用/土地覆被(land use/land cover, LULC)数据,空间分辨率为30m,来源于中国 科学院资源环境科学数据中心(http: //www.resdc. cn);土壤类型数据,来源于Harmonized World Soil Database(HWSD),数据下载于(https: //www.fao. org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/ en/);1:100万中华人民共和国地貌图集、中国人 口、国内生产总值(gross domestic product,GDP)空 间分布 km 格网数据集等,来源于中国科学院资源 环境科学数据中心(http: //www.resdc.cn);2000— 2021年气温、降水等气象数据,来源于国家地球系 统科学数据中心(http: www.geodata.cn/)。

2 研究方法

2.1 线性回归趋势分析法

采用基于最小二乘法的线性回归法来检测 ND-VI 的趋势^[2],它更多的是反映测评时段内植被的总 体增加或减少的线性趋势,不能够用来检测植被的 阶段性变化过程、季节性变化或者突变情况,更不能 够确定植被变化发生的时刻^[30]。计算公式为^[20]:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^{n} i \cdot NDVI_{i} - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} NDVI_{i}}{n \sum_{i=1}^{n} i^{2} - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^{2}}, \quad (1)$$

式中: *Slope* 为 NDVI 变化趋势斜率; *n* 为研究年份数,本文为22; *NDVI_i* 为第*i*年的 NDVI 值。*Slope* 为正值或负值预示着 NDVI 的增加或减少。如果回归系数通过显著性检验(F 检验,*p*< 0.05),则呈现显

著的上升或下降趋势。

2.2 BFAST 改进模型

BFAST 是一种迭代算法,它利用分段线性趋势 和季节性模型将时间序列分解为趋势、季节性和残 差组分,并能检测趋势和季节性成分的突变^[31-32], 已经在各种生态系统的研究中成功地采用和验证, 包括在植被 NDVI 检测中的应用^[33]。在数学上, BFAST 的趋势分量和季节分量通过以下分解模型 得到:

$$Y_t = T_t + S_t + e_t, \quad t = 1, \cdots, m$$
, (2)

式中: Y_i 为 t 时观测到的值; T_i 为趋势组分; S_i 为季 节性组分; e_i 为残差组分; t 为观测的时间范围。

根据 BFAST 原理^[23,32],本研究采用了 BFAST 的改进模型 BFAST01,BFAST01模型相比 BFAST 模 型的优势在于,它同时考虑了季节模型和趋势模型, 只检测时间序列的主要变化,而忽略小的结构变化, 从而检测趋势中最有影响力的一个突变以将趋势分 为前后 2 段而不是多个较小趋势,也就是说 BFAST01 只检测 0 个或者 1 个断点^[34]。本研究利 用 R 环境,从 GitHub 加载最新的 BFAST 包(https: //github.com/),完成所有 BFAST01 的统计分 析^[35]。提取出植被 NDVI 的趋势显著性、变化强 度、趋势断点发生的时间和突变类型等。

为了更加直观详细地呈现 BFAST01 检测到的 趋势突变点前后 NDVI 的变化特征,参考相关研 究^[23,19,36],将 BFAST01 检测到的植被覆盖变化趋势 类别分为8类(如表1和图2所示)以及4种显著性 类型:两段均显著(或无中断且显著)、只有第一段 显著、只有第二段显著、两段都不显著(或没有中断 且不显著)。

表 1 BFAST01 检测的 NDVI 变化趋势类型 Tab.1 Types of NDVI change trends detected by BFAST01

			-	-
序号	趋势类型名称	第一段	第二段	趋势类型含义
1	单调递增	+	+	未检测出明显突变,趋势整体表现为单调性增加
2	单调递减	-	-	未检测出明显突变,趋势整体表现为单调性减小
3	单调递增(带正中断)	+	+	检测出1个明显突变,且断点处值突然增大,趋势整体表现为单调性 增加,用符号"单调递增+"表示
4	单调递减(带负中断)	_	-	检测出1个明显突变,且断点处值突然减小,趋势整体表现为单调性 减小,用符号"单调递减-"表示
5	中断(随着负中断增加)	+	+	检测出1个明显突变,且断点处值突然减小,趋势表现为显著增加, 显著负中断,然后显著增加,用符号"中断-+"表示
6	中断(随着正中断减少)	-	-	检测出1个明显突变,且断点处值突然增大,趋势表现为显著减小, 显著正中断,然后显著减小,用符号"中断+-"表示
7	反转(由增到减)	+	-	检测出1个明显突变,趋势表现为从显著增加转换为显著减小,用符 号"反转+-"表示
8	反转(由减到增)	-	+	检测出1个明显突变,趋势表现为从显著减小转换为显著增加,用符 号"反转-+"表示

· 134 ·





2.3 地理探测器

地理探测器 Geodetector 是一种统计工具^[28]。 其包括4个探测器:因子探测器、交互探测器、生态 探测器和风险探测器,其中因子探测器用于探究地 理因变量 Y 的分异性及各驱动因素 X 对 Y 的解释 力^[28]。

OPGD 模型是一种改进后的地理探测器模型^[29],除了地理探测器包含的4个部分,OPGD 模型另外加入了参数优化模块。该模块可根据自变量的特征,对其进行多种方式(如自然断点法、分位数法、等距离间隔法和几何间隔法)和多种断点数目的离散化处理,并计算方式与断点数的每种组合所对应的q值,以q值最大为标准,选取出最优的离散化方式和最优的断点数目。该模块能够弥补依靠经

验或统一离散化方式处理多个自变量所致的分析效 果不佳的缺漏,精准地对自变量进行定量评估,降低 因变量在最优分割组内的方差,同时增加各组别间 的显著差异,实现对驱动因子影响因变量空间分布 程度的最佳探测效果。

研究选取了海拔、坡度、坡向、气温、降水、土壤 类型、地形地貌等自然因素和 LULC、人口、GDP 等 人为因素作为植被覆盖的影响因子,分别为 X₁~ X₁₀,NDVI 为 Y,利用 ArcGIS 创建渔网,通过多次调 试设置采样间隔为 1 km,运用 Spatial Analyst-提取 分析-采样工具,选择研究区渔网点为采样点,将自 变量和因变量的值提取到点,作为地理探测器的数 据输入。并利用 OPGD 在 R 语言环境中进行参数 优化,具体离散化方法和类别见表 2。

表 2	地理探测器因子离散化方法与类别	
-----	-----------------	--

Tab.2	Discretization	methods	and	categories	of	geographical	detector	factors
-------	----------------	---------	-----	------------	----	--------------	----------	---------

亦具反称	亦具	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020年	
文里石协	文里	离散方法	类别数	离散方法	类别数	离散方法	类别数	离散方法	类别数	离散方法	类别数
海拔	X_1	自然间断点	12	自然间断点	12	自然间断点	12	自然间断点	12	自然间断点	10
坡度	X_2	几何间隔	12	自然间断点	12	自然间断点	12	自然间断点	12	自然间断点	11
坡向	X_3	手动	10	手动	10	手动	10	手动	10	手动	10
气温	X_4	自然间断点	10	相等间隔	12	相等间隔	11	相等间隔	12	自然间断点	11
降水	X_5	自然间断点	12	分位数	10	自然间断点	8	自然间断点	12	自然间断点	12
土壤类型	X_6	手动	16	手动	16	手动	16	手动	16	手动	16
地形地貌	X_7	手动	24	手动	24	手动	24	手动	24	手动	24
LULC	X_8	手动	6	手动	6	手动	6	手动	6	手动	6
人口	X_9	自然间断点	11	自然间断点	12	自然间断点	10	自然间断点	11	自然间断点	12
GDP	X_{10}	分位数	12	自然间断点	11	自然间断点	12	自然间断点	12	自然间断点	12

3 结果与分析

3.1 2000—2021 年沱江流域 NDVI 线性趋势分析

利用 ArcGIS 空间分析功能得到研究区 2000—2021 年平均 NDVI 空间分布(图 3(a)),采用一元线 性回归法得到沱江流域 22 a 间植被线性趋势分布 特征(图 3(b))。根据结果可知,沱江流域 95%以 上的区域 NDVI 值都大于 0.6,植被覆盖情况较好, 其中 NDVI 值大于 0.8 的区域主要分布在龙泉山、龙 门山和岷山几座山脉。线性回归趋势表明,植被覆 盖呈显著改善趋势的主要分布在几座山脉及高植被 覆盖区域,占比为 18.07%;图 3(b)中紫色区域为 植被覆盖显著退化的区域,占比为 10.60%,主要分 布在成都市市辖区、金堂县、仁寿县、泸县、江安县 等;剩余空白区域 Slope 趋势值为 0,改善或退化趋 势不明显。

NDVI 进行突变检测,得到 NDVI 的非线性突变类型

和突变显著性空间分布图(图4)。



Fig.3 Spatial distribution and linear change trend of NDVI in the Tuojiang River basin from 2000 to 2021

3.2 2000—2021 年沱江流域 NDVI 非线性趋势分析

3.2.1 突变类型分析

运用 BFAST01 算法对沱江流域 2000—2021 年



 (a) 突变类型空间分布
 (b) 突变显著性空间分布

 图 4-1
 BFAST01 突变类型与显著性

 Fig.4-1
 BFAST01 mutation types and significance





从图中可知,单调递增和单调递减的比重是最 多的,分别占 37.83%和 22.71%,接着依次是中断 -+(15.65%)、反转+-(12.81%)、中断+-(5.37%)、 反转-+(4.95%)、单调递减-(0.49%)、单调增加 +(0.19%)。可见,除了单调递增和单调递减类型, 全区有 39.46% 面积的 NDVI 发生了突变,因此,在 进行植被 NDVI 趋势分析时,考虑其非线性突变性, 能更加准确地进行趋势评估。从整体变化趋势类型 来看,植被覆盖总体为改善的区域(单调递增、单调 增加+、中断-+、反转-+)和总体为退化的区域(单 调递减、单调递减-、中断+-、反转+-),分别占 58.62%和41.38%。从空间分布来看,单调递增趋势 类型主要分布在龙泉山、龙门山和岷山一带及流域 中部和东南部,该类型没有发生中断,因此 NDVI 表 现出长期绿化的趋势;单调递减主要分布于岷山与 龙门山之间、龙门山南部及流域南部区域,这些地区 的植被覆盖未曾表现出改善趋势:"中断型增加" (单调增加+和中断-+),即植被覆盖在长期逐渐改 善的情况下经受了某些负面干扰而出现短期的退 化,主要零星分布于植被改善区域的周边;"中断型 减少"(单调递减-和中断+-)趋势类型较少,主要

镶嵌分布于植被退化区域;反转+-和反转-+均镶嵌分布于退化区域周边或内部,这些区域即植被因为中途受到某种干扰而出现绿化或退化。需要注意的是,不管是整体退化还是改善区域,在断点前后发 生"绿化"(改善)逆转的地区,应该是生态保护和治 理需要重点关注的地区。

从 BFAST01 显著性检验结果来看, NDVI 两段 均显著(或无中断且显著)的像元面积占比为 20.44%, 主要分布在高植被覆盖区域;只有第一段 或第二段显著的像元面积占比分别为 13.80% 和 9.93%, 主要分布在什邡市、彭州市北部及安岳县、 内江市市辖区、荣昌县; 而两段都不显著(或没有中 断且不显著)的像元面积占比较多为 55.83%。

3.2.2 突变时间分析

为了进一步分析各趋势突变类型发生断点的位置,研究同时提取出了 NDVI 趋势突变时间(图 5)。 由图可知,发生突变的年份主要集中在 2002—2018 年,在这些年份中发生断点最多的年份是 2007 年, 断点的像元面积占比为 12.22%,其次是 2013 年和 2018 年。各突变类型在突变年份发生突变的面积 占比见表3,将断点发生年份从纵向上分为2002—



• 137 •

2007年、2008—2013年、2014-2018年3个阶段进 行统计发现各阶段发生突变的比例具有一定差异, 横向分析发现"中断-+"、"反转+-"是发生突变最 多的类型,突变主要集中在 2008—2013 年,分别占 14.83%和13.19%,其他突变类型在各阶段发生突变 的比例分布较为均匀。

表 3	各突变类型发生改变的年份分布

Tab.3 Distribution of years of changes in different mutation types

(%)

											_
	突变时间	单调递增	单调递减	单调增加+	单调递减-	中断-+	中断+-	反转+-	反转-+	合计	
	2002—2007 年	_	_	0.31	0.10	14.08	4.45	12.59	3.58	35.11	
	2008—2013 年	—	—	0.06	0.53	14.83	4.50	13.19	3.90	37.02	
	2014—2018 年	—	—	0.11	0.62	10.73	4.66	6.68	5.07	27.88	
Î	合计	_	_	0.48	1.26	39.64	13.61	32.46	12.56	100	Τ

3.3 线性趋势与非线性趋势的比对

研究使用 BFAST01 方法来确定 NDVI 年际趋势中是否存在突发事件以及突变发生的时间,从而弥补一元线性回归趋势没有考虑 NDVI 长时间序列 突变性的缺陷。有研究表明 BFAST 方法在 NDVI 时间序列上检测的准确率可达 56%~84%之间^[37], 并可应用于处理季节性或非季节性时间序列的其他 学科,如水文学、气候学和计量经济学^[31]。相比其 他突变检测方法,在时间序列内,BFAST 受季节差 异和噪声的影响较小,可以更快地检测到变化^[23]。 本研究采用 BFAST 方法的改进模型 BFAST01,在进 行检测时只关注 NDVI 年际成分中的最大断点,并 假设模型中没有季节变化。

表 4 统计出了一元线性回归趋势分析与 BFAST01 趋势分类结果的对比。2 种方法检测的显 著性区域空间分布相似,同时可以看到线性回归趋 势中的植被覆盖改善和退化趋势对应了 BFAST01 的多种趋势突变类型,比如线性回归趋势中的改善 类型有 64.99%的区域对应 BFAST01 的单调递增类

型,还有 0.32% 的单调增加+、17.69% 的中断-+、 2.91%的反转-+,除了这些呈改善状态的区域,线性 回归趋势的改善类型当中还有部分区域对应在 BFAST01 中为退化类型,主要为中断+-、反转+-,这 表明在改善的植被 NDVI 当中,有一部分受到了负 面干扰,这些受到干扰的地区主要零星分布在 NDVI 退化区域周边,是生态治理需要特别关注的地区。 二者的比对表明采用传统单调的趋势检测方法可能 会忽略掉植被覆盖长期变化趋势中的一些细节,而 BFAST01 方法刚好能检测出整体趋势中因各种因 素干扰而可能出现的中断或转换现象,识别不同的 阶段及其重要性,找到大趋势中可能会出现植被退 化而需要特别关注的地区,其科学性和适用性也得 到了相关研究的证实^[2,13,19]。值得注意的是,这并 不是否认线性回归趋势分析结果,研究主要通过 BFAST01 识别了沱江流域 2000—2021 年期间 NDVI 更细节的突变,这正是本研究的特色,将2种趋势分 析方法取长补短,达到优势互补的目的。

表 4 线性与非线性趋势统计 Tab.4 Linear and nonlinear trend statistics

线性				BFAS	ST01			
回归	单调递增	单调递减	单调增加+	单调递减-	中断-+	中断+-	反转+-	反转-+
退化	0	54.33	0	1.18	12.82	7.98	15.88	7.81
改善	64 99	0	0.32	0	17.69	3 49	10.61	2.91

3.4 沱江流域植被 NDVI 驱动力分析

利用地理探测器的因子探测得到沱江流域 2000年、2005年、2010年、2015年和2020年NDVI 驱动力探测结果q值(图6),除坡向因子,其余因子 p值均为0,通过显著性检验。根据图6发现,除了 2000年,各年份中LULC的q值是最高的。总体上 对NDVI影响较大的因子为LULC、海拔和地形地 貌,其他因子影响力相差不大,但各年份影响力大小 略有差异。具体分析,2000年沱江流域NDVI主要 影响因子为海拔、LULC、气温和降水,其次是人口、 GDP、土壤类型等;2005年NDVI主要影响因子为 LULC、气温、海拔和地形地貌,其次是降水、人口、 GDP等;2010年主要影响因子为LULC、地形地貌、 土壤类型、海拔、气温、人口、GDP等;2015年主要 影响因子为LULC、降水、地形地貌、人口、海拔、GDP 等;2020年主要影响因子为LULC、地形地貌、气 温、海拔、人口、坡度等。各年份坡向对植被的解释 力最小,说明沱江流域的植被覆盖几乎不受坡向的 影响。可以看出,自然因素对沱江流域植被NDVI 的影响大于人口和 GDP等社会经济因素,因此,植 被保护与恢复应该综合考虑自然和人类活动因素的 影响。 超星·期刊



图 6 沱江流域各年份影响因子 q 值柱状图

Fig.6 Histogram of impact factor q values for various years in the Tuojiang River basin

研究选择了适用于具有非线性特征分析的 OPGD 模型,对研究区植被覆盖影响因素进行分年 份探讨,根据探测结果进行更有针对性的原因分析。 探测结果表明,总体上对 NDVI 影响较大的是 LULC、海拔和地形地貌等,探其原因可知,研究区土 地利用主要以耕地为主,占比达到 79%,林地和草 地仅占15%左右,且林草地主要分布在几座山脉地 区,因此,要提高植被覆盖度更多的靠人类活动,而 农耕活动的人为调节空间大,种植不同的农作物及 是否种植农作物都将影响植被覆盖情况,所以, LULC 对 NDVI 分布影响较大。从地形地貌来看, 沱 江流域大部分属于低矮的平原丘陵,岷山、龙门山、 龙泉山几座山脉将流域划分为了山地丘陵平原相间 分布的几部分,这样的地形地貌从宏观上控制着地 表过程的发生和发展^[38],研究区林草地也主要分布 在这些区域,而海拔高低也与这样的地形地貌紧密 相关,所以海拔和地形地貌对研究区植被 NDVI 分 布具有主导作用。接着影响较大的是气温、降水等 气象因子,植被受气候影响较大,一方面适宜的气 温、降水有利于植被生长,另一方面极端气候灾害等 也会造成植被的退化,这与许多研究也是相符 的^[39-40]。而人口、GDP等人为因子对全区植被的影 响程度比自然因子较低,但也有一定影响,原因主要 在于沱江流域经济发达,人口分布密集,人类活动较 为频繁,所以人为因素对植被具有一定的影响。

具体分析发现,各年份植被 NDVI 的影响因素 具有一定差异性,图 6显示了不同年份 NDVI 的 *q* 值比对情况,可以看出 LULC 对 NDVI 的影响力总 体上为随时间逐渐增大趋势,但在 2020 年有所减 小,原因可能是随着城市化的发展,研究区建设用地 面积不断扩大,挤占了耕地,人类对地表的改造影响 了植被覆盖。其他因子对 NDVI 的影响随时间没有 明显规律,总体上可以看出人口对植被的影响有所 增大,GDP 对植被的影响较为平稳,气温、降水等气 象因子的影响有一定减少,但总体上自然因素的影响大于人类活动因素。因此建议综合考虑不同自然和人类活动条件对 NDVI 空间分布的影响,因地制 宜制定生态修复措施,提高植被覆盖率和生物多样 性,以期促进研究区植被建设高质量发展。

4 结论与展望

4.1 结论

研究基于沱江流域 2000—2021 年 MODIS ND-VI 数据,探讨了研究区 22 a 间植被 NDVI 的线性趋势、非线性趋势以及驱动力。主要结论为:

1) 沱江流域 95% 以上的区域 NDVI 值都大于 0.6, 植被覆盖情况较好, 线性回归趋势表明, 植被覆 盖呈显著改善趋势的像元面积占比为 18.07%, 大于 呈显著退化的区域(10.60%), 说明近年来研究区植 被得到较好保护。

2) BFAST01 非线性突变检验得到沱江流域 22 a 间 NDVI 可分为 8 种突变类型,突变类型总体为增 加的区域占比依然大于总体为减少的区域(58.62% >41.38%),检测结果与线性回归趋势相似。发生突 变的年份集中分布在 2002—2018 年,中断-+和反 转+-是突变最多的类型,分别占 14.83%和 13.19%, 其他突变类型在各阶段发生突变的比例分布较为均 匀,应该特别关注和保护在断点前后发生"绿化" (改善)逆转的地区。

3) 地理探测器结果表明,不同年份 NDVI 的影响因素略有差异,总体上影响较大的因子为 LULC、海拔、地形地貌,其次是气温、降水等气象因子,其他因子影响力相差不大,总的来说人口、GDP 等人为因子对沱江流域植被的影响程度比自然因子低,但也有一定影响,因此,植被保护与恢复应综合考虑不同自然和人类活动条件对 NDVI 空间分布的影响。

4.2 展望

研究在进行植被 NDVI 驱动力探讨时,考虑了

不同的时间尺度影响因素的差异性,但实际上不同 区域的环境条件也具有差异性,比如不同的气候区、 土壤区、地貌区、植被区等,因此未来应该进一步考 虑不同地理环境对植被覆盖的影响。此外,研究在 进行 NDVI 趋势分析的时候,考虑了其线性与非线 性特征,但这都是对现状的分析,受篇幅限制,对于 NDVI 未来的发展趋势未做研究,因此这也是未来 需要进一步探讨的地方。

参考文献(References):

 [1] 李雪银,张志强,孙爱芝.1982—2021 年黄河流域植被覆盖时 空演变及影响因素研究[J].地球环境学报,2022,13(4):428-436.

Li X Y,Zhang Z Q,Sun A Z.Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River basin during 1982—2021 [J].Journal of Earth Environment, 2022,13(4):428-436.

[2] 晋成名,杨兴旺,景海涛.基于 RS 的陕北地区植被覆盖度变化 及驱动力研究[J].自然资源遥感,2021,33(4):258-264.doi: 10.6046 /zrzyyg.2021019.

Jin C M, Yang X W, Jing H T.A RS-based study on changes in fractional vegetation cover in North Shaanxi and their driving factors[J].Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4):258-264.doi;10.6046 /zrzyyg.2021019.

[3] 王 力,赵思妍,陈元鹏,等.基于 GEE 云平台的黄土高原生态
 修复区植被变化与归因[J].农业机械学报,2023,54(3):210-223.

Wang L,Zhao S Y, Chen Y P, et al. Vegetation change and attribution in ecological restoration area of Loess Plateau based on GEE cloud platform[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3);210-223.

- [4] Han Z, Song W. Interannual trends of vegetation and responses to climate change and human activities in the Great Mekong Subregion[J].Global Ecology and Conservation, 2022, 38:e02215.
- [5] 陈文裕,夏丽华,徐国良,等.2000—2020 年珠江流域 NDVI 动态变化及影响因素研究[J].生态环境学报,2022,31(7):1306-1316.

Chen W Y, Xia L H, Xu G L, et al.Dynamic variation of NDVI and its influencing factors in the Pearl River basin from 2000 to 2020 [J].Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31 (7): 1306 – 1316.

- [6] Zhang X, Cao Q, Chen H, et al. Effect of vegetation carryover and climate variability on the seasonal growth of vegetation in the upper and middle reaches of the Yellow River basin [J]. Remote Sensing, 2022, 14(19):5011.
- [7] 冯 李.金沙江流域植被覆盖度的遥感动态监测及其驱动机制研究[D].昆明:云南师范大学,2021.
 Feng L. The study of remote sensing dynamic monitoring and its driving mechanism of vegetation cover in the Jinsha River basin [D].Kunming; Yunnan Normal University, 2021.
- [8] 孙金龙,黄润秋.切实履行生态环境保护职责不断开创新时代

美丽中国建设新局面[N].人民日报,2022-11-21(11).

Sun J L, Huang R Q.Effectively perform the responsibility of ecological environment protection and constantly create a new situation of building a beautiful China in a new era [N].People's Daily, 2022-11-21(11).

[9] 林妍敏,李文慧,南雄雄,等.基于地理探测器的宁夏贺兰山植 被覆盖度时空分异及驱动因子[J].应用生态学报,2022,33 (12):3321-3327.

Lin Y M, Li W H, Nan X X, et al. Spatial-temporal differentiation and driving factors of vegetation coverage in Ningxia Helan Mountain based on geodetector[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(12):3321-3327.

- [10] 孙美荣,孙鹏森.西南高山亚高山区植被活动变化的气候驱动效应与可持续性[J].水土保持研究,2023,30(3):240-250.
 Sun M R, Sun P S. Climate-driving effects and sustainability of vegetation activity change in alpine and subalpine areas of southwest China[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30 (3):240-250.
- [11] Gao X, Zhao D.Impacts of climate change on vegetation phenology over the Great Lakes region of Central Asia from 1982 to 2014[J]. Science of the Total Environment, 2022, 845:157227.
- [12] 张兴航,张百平,王 晶,等.神农架林区植被分布与地形的关系研究[J].地球信息科学学报,2020,22(3):482-493.
 Zhang X H,Zhang B P,Wang J, et al.Study on the relationship between terrain and distribution of the vegetation in Shennongjia forestry district [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22 (3):482-493.
- [13] Mendes M P, Rodriguez-Galiano V, Aragones D. Evaluating the BFAST method to detect and characterise changing trends in water time series: A case study on the impact of droughts on the Mediterranean climate [J]. The Science of the Total Environment, 2022, 846:157428.
- [14] 辛 宇,孙梦鑫,张 岳,等.2000—2020 年四川省植被覆盖时空 变化特征及其气候驱动因子[J].水土保持通报,2022,42(4): 312-319.

Xin Y, Sun M X, Zhang Y, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation cover and climate driving factors in Sichuan Province from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):312-319.

- [15] He C, Yan F, Wang Y, et al. Spatiotemporal variation in vegetation growth status and its response to climate in the Three-River Headwaters region, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19):5041.
- [16] 庞 鑫,刘 珺.气候变化对亚洲地区植被 NDVI 变化的影响
 [J].自然资源遥感,2023,35(2):295-305.doi:10.6064/zrzyyg.
 2022151.

Pang X, Liu J.Effects of climate changes on the NDVI of vegetation in Asia[J].Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 295-305.doi:10.6064/zrzyyg.2022151.

[17] 王叶兰,杨 鑫,郝利娜.2001—2021 年川西高原植被 NDVI 时
 空变化及影响因素分析[J].自然资源遥感,2023,35(3):212-220.doi:10.6064/zrzyyg.2022240.

Wang Y L, Yang X, Hao L N.Spatio-temporal changes in the normalized difference vegetation index of vegetation in the western Si· 140 ·

chuan Plateau during 2001—2021 and their driving factors [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 212-220. doi:10.6064/zrzyyg.2022240.

- [18] Geng S, Zhang H, Xie F, et al. Vegetation dynamics under rapid urbanization in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area urban agglomeration during the past two decades[J].Remote Sensing, 2022, 14(16):3993.
- [19] Zhong X, Li J, Wang J, et al. Linear and nonlinear characteristics of long-term NDVI using trend analysis: A case study of lancangmekong river basin[J].Remote Sensing, 2022, 14(24):6271.
- [20] 罗 爽,刘会玉,龚海波.1982—2018 年中国植被覆盖变化非线 性趋势及其格局分析[J].生态学报,2022,42(20):8331-8342.
 - Luo S, Liu H Y, Gong H B. Nonlinear trends and spatial pattern analysis of vegetation cover change in China from 1982 to 2018 [J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(20):8331-8342.
- [21] Schultz M, Clevers J G P W, Carter S, et al.Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring [J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 52:318-327.
- [22] Li L, Zhang Y, Liu Q, et al.Regional differences in shifts of temperature trends across China between 1980 and 2017[J].International Journal of Climatology, 2019, 39(3):1157-1165.
- [23] Brakhasi F, Hajeb M, Mielonen T, et al. Investigating aerosol vertical distribution using CALIPSO time series over the Middle East and North Africa (MENA), Europe, and India: A BFAST-based gradual and abrupt change detection [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264:112619.
- [24] Dupas R, Minaudo C, Gruau G, et al. Multidecadal trajectory of riverine nitrogen and phosphorus dynamics in rural catchments [J].
 Water Resources Research, 2018, 54(8):5327-5340.
- [25] Horion S, Ivits E, De Keersmaecker W, et al. Mapping European ecosystem change types in response to land-use change, extreme climate events, and land degradation [J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(8):951-963.
- [26] 秦格霞,吴 静,李纯斌,等.中国北方草地植被物候变化及其对 气候变化的响应[J].应用生态学报,2019,30(12):4099-4107.

Qin G X, Wu J, Li C B, et al. Grassland vegetation phenology change and its response to climate changes in North China[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12):4099-4107.

[27]方贺,张育慧,何月,等.浙江省植被生态质量时空变化及其 驱动因素分析[J].自然资源遥感,2023,35(2):245-254.doi: 10.6064/zrzyg.2022070.

Fang H,Zhang Y H,He Y, et al.Spatio-temporal variations of vegetation ecological quality in Zhejiang Province and their driving factors[J].Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 245-254.doi:10.6064/zrzyyg.2022070.

[28] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017, 72(1):116-134.

Wang J F, Xu C D.Geodetector:Principle and prospective[J].Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.

- [29] Song Y, Wang J, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J].GIScience & Remote Sensing, 2020,57(5):593-610.
- [30] 王 巨.基于时序 NDVI 植被变化检测与驱动因素量化方法研究——以河西地区为例[D].兰州:兰州大学,2020.
 Wang J. Methods for detecting vegetation changes and quantifying the driving factors using NDVI timeseries by taking Hexi as a case area[D].Lanzhou:Lanzhou University,2020.
- [31] Fang X, Zhu Q, Ren L, et al. Large-scale detection of vegetation dynamics and their potential drivers using MODIS images and BFAST: A case study in Quebec, Canada [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 206:391-402.
- [32] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series [J].Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1):106–115.
- [33] Berveglieri A, Imai N N, Christovam L E, et al. Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, 24:100622.
- [34] Kovács G M, Horion S, Fensholt R. Characterizing ecosystem change in wetlands using dense earth observation time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 281:113267.
- [35] R Core Team.2018.R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna [EB/OL].https://www.R-project.org.
- [36] Higginbottom T P, Symeonakis E. Identifying ecosystem function shifts in Africa using breakpoint analysis of long-term NDVI and RUE data[J].Remote Sensing, 2020, 12(11):1894.
- [37] Smith V, Portillo-Quintero C, Sanchez-Azofeifa A, et al. Assessing the accuracy of detected breaks in Landsat time series as predictors of small scale deforestation in tropical dry forests of Mexico and Costa Rica[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221:707-721.
- [38] 钟旭珍,张 素,吴瑞娟,等.沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动 力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):43-49,56.
 Zhong X Z,Zhang S,Wu R J, et al. Analysis of dynamic changes and driving forces of soil erosion in Tuojiang River basin[J].Research of Soil and Water Conservation,2022,29(2):43-49,56.
- [39] 朱思佳, 冯徽徽, 邹 滨, 等. 2000—2019 年洞庭湖流域植被 NPP 时空特征及驱动因素分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34 (3):196-206.doi:10.6064/zrzyyg.2021283.
 Zhu S J, Feng H H, Zou B, et al. Spatial-temporal characteristics of 2000—2019 vegetation NPP of the Dongting Lake basin and their driving factors[J].Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34 (3):196-206.doi:10.6064/zrzyg.2021283.
- [40] 马炳鑫,和彩霞,靖娟利,等.1982—2019 年中国西南地区植被 变化归因研究[J].地理学报,2023,78(3):714-728.
 Ma B X,He C X,Jing J L, et al. Attribution of vegetation dynamics in Southwest China from 1982 to 2019[J]. Acta Geographica Sinica,2023,78(3):714-728.

Analysis of changing trends in NDVI and their driving forces in the Tuojiang River basin based on an improved BFAST model

ZHONG Xuzhen ^{1,2,3}, WU Ruijuan^{1,4}

 School of Geography and Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China; 2. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 3. Southwest United Graduate School, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 4. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101, China)

Abstract: Vegetation, the main body of a terrestrial ecosystem, serves as an important indicator of environmental changes in a regional ecosystem. The Tuojiang River basin is an economically and industrially developed area in Sichuan. Dynamic vegetation monitoring and the analysis of factors driving its changes hold great significance for ecological change assessment and ecological protection. This study investigated the Tuojiang River basin. Based on MODIS data of normalized difference vegetation index (NDVI) from 2000 to 2021, this study detected, analyzed, and compared linear and nonlinear characteristics of the data, including mutation types and years, using linear regression Slope and an improved BFAST01 model. Additionally, this study explored the factors influencing the NDVI using the Optimal Parameters-based Geographic Detector (OPGD) model. The results indicate that more than 95% of the Tuojiang River basin exhibited NDVI values exceeding 0.6. The linear regression analysis for NDVI trends revealed that regions with significantly improved and significantly degraded vegetation coverage accounted for 18.07% and 10.60%, respectively, of the total area of the river basin, as indicated by image pixels. The BFAST01 nonlinear mutation analysis showed that the NDVI trends in the Tuojiang River basin over the 22 years can be categorized into eight mutation types, with the proportion of regions exhibiting improved vegetation coverage (58.62%) exceeding that of regions with degraded vegetation coverage (41.38%). These findings were consistent with the linear regression analysis, suggesting that the vegetation in the river basin was well protected in the 22 years. Mutations were concentrated between 2002 and 2018, with "interruption-+" and "reversal+-" representing the most common mutation types, accounting for 14.83% and 13.19%, respectively. In contrast, other mutation types exhibited a relatively even distribution across different stages. The results of the OPGD model revealed slight variations in the factors influencing NDVI across different years. Generally, the most influential factors included land use/land cover (LULC), elevation, and terrain and landforms, followed by meteorological factors such as temperature and precipitation. In contrast, other factors produced relatively minor impacts. Overall, despite some impacts, human factors like population and GDP exerted less influence on vegetation than natural factors in the Tuojiang River basin. Therefore, vegetation protection and restoration should consider the combined effects of both natural factors and anthropogenic activities.

Keywords: NDVI; nonlinear trend; BFAST improved model; OPGD; Tuojiang River basin

(责任编辑:张仙)