

基于地理探测器的汀江流域福建段植被覆盖 时空变化及驱动力分析

刘陵桦¹, 孟维彩¹, 蔡翠婷¹, 李毅杰¹, 袁宇奇¹, 王晓宇¹, 张翔^{1,2,3}, 侯晓龙^{1,2,3,4}

(1.福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2.南方红壤区水土保持

国家林业和草原局重点实验室, 福建 福州 350002; 3.福建长汀红壤丘陵生态系统

国家定位观测研究站, 福建 长汀 366300; 4.海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 科学评估南方红壤侵蚀区汀江流域植被覆盖的时空变化特征及其驱动力, 揭示影响植被覆盖空间分异驱动因子的作用强度和交互作用机制, 为汀江流域的生态系统的修复和水土流失的综合治理提供科学依据。[方法] 基于 2000—2020 年 20 a 间月尺度 MOD13Q1(250 m)数据集, 采用一元线性回归方法和皮尔逊相关分析方法探究植被 NDVI 与时间之间的关系, 综合温度、降水量和海拔等自然因子及人为因子, 利用地理探测器模型分析流域内植被 NDVI 时空变化特征及其驱动力强度。[结果] ①时间上, 2000—2020 年汀江流域植被覆盖度呈现出波动上升的趋势, 增长率为 7.11%, 上升平均速度为 0.002 2/a, 表明该区域的生态环境正稳定持续改善中。②空间上, 整体上以中高和高覆盖度为主, 呈现出明显各区县中部低于四周区域的空间分布格局, 具有显著的地域性差异, NDVI 改善区域面积为 86.33%, 远大于退化面积区域。③驱动因子探测结果: 降水量>海拔>温度>GDP>人口密度>土地利用类型>植被类型>坡度>土壤类型。[结论] 汀江流域植被覆盖度时空变化受自然因子和人为因子双重影响, 降水量因子解释力为 0.705, 是影响研究区植被覆盖度变化的主要驱动因子, 海拔、温度和 GDP 等为次要驱动因子, 解释力均为 0.58 以上。各因子之间的交互作用(q)较于单因子表现出了更高的解释力, 为双因子之间主要表现为增强和非线性增强效应的复杂关系。

关键词: 红壤侵蚀区; 汀江流域; NDVI; 地理探测器; 驱动因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0236-11

中图分类号: Q948

文献参数: 刘陵桦, 孟维彩, 蔡翠婷, 等. 基于地理探测器的汀江流域福建段植被覆盖时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 236-246. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.025; Liu Linghua, Meng Weicai, Cai Cuiting, et al. Analysis of spatio-temporal dynamics and driving force of vegetation cover in Fujian Province section of Tingjiang River basin based on geographical detector [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 236-246.

Analysis of Spatio-temporal Dynamics and Driving Force of Vegetation Cover in Fujian Province Section of Tingjiang River Basin Based on Geographical Detector

Liu Linghua¹, Meng Weicai¹, Cai Cuiting¹, Li Yijie¹,

Yuan Yuqi¹, Wang Xiaoyu¹, Zhang Xiang^{1,2,3}, Hou Xiaolong^{1,2,3,4}

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002,

China; 2.National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Soil and Water

Conservation in Red Soil Region of South China, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3.National Positioning

Observation and Research Station of Red Soil Hill Ecosystem in Changting, Changting, Fujian 364000,

China; 4.Cross-Strait Collaborative Innovation Center of Soil and Water Conservation, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal patterns of vegetation cover and its driving forces in the

收稿日期: 2023-11-08

修回日期: 2024-05-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“马尾松人工林林下覆被诱导恢复与土壤侵蚀控制技术”(2023YFF130440304); 福建省科技厅自然科学基金项目(2022J01121); 福建省科技厅公益类科研院所专项(2021R1015004)

第一作者: 刘陵桦(2000—), 男(汉族), 福建省宁德市人, 硕士研究生, 主要研究方向为退化生态修复。Email: 1220431004@fafu.edu.cn.

通信作者: 侯晓龙(1981—), 男(汉族), 山西省运城市人, 博士, 副教授, 主要从事退化生态修复方面的研究。Email: xl.hou@fafu.edu.cn.

Tingjiang River basin of the southern red soil erosion area, were scientifically evaluated to reveal the strength of the role of each driving factor in the spatial differentiation of vegetation cover and the mechanism of interaction in order to provide a scientific basis for the restoration of ecosystems and comprehensive control of soil erosion. [Methods] Based on the monthly scale MOD13Q1 (250 m) dataset for 20 years from 2000 to 2020, we used one-way linear regression and Pearson's correlation analysis to explore the relationship between normalised difference vegetation index (NDVI) and time and incorporated natural and anthropogenic factors such as temperature, precipitation, and elevation, as well as the spatial and temporal dynamics of vegetation NDVI in the watershed using the geoprobe model. A geoprobe model was used to analyse the temporal and spatial changes in vegetation NDVI in the watershed. [Results] ① Temporally, the vegetation cover in the Tingjiang River basin showed a fluctuating upward trend from 2000 to 2020, with a growth rate of 7.11% and an average rate of increase of 0.002 2/year, indicating that the ecological environment of the region was stable and continuously improving. ② Spatially, the overall medium-high and high coverage was dominant, showing a spatial distribution pattern that was lower than the surrounding area in the middle of each district and county, with significant geographical differences; the NDVI improved area was 86.33%, which was much larger than the degraded area region. ③ The driving factor detection results were: precipitation > elevation > temperature > GDP > population density > land use type > vegetation type > slope > soil type. [Conclusion] Temporal and spatial variations in vegetation cover within the Tingjiang River Basin were affected by both natural and anthropogenic factors. The explanatory power of the precipitation factor was 0.705, which was the main driving factor affecting the changes in vegetation cover in the study area. Elevation, temperature, and GDP were the secondary driving factors, with explanatory powers of 0.58 or more. The interactions (q) between the factors showed higher explanatory power than the single factors, mainly in the form of a complex relationship between the enhancement and nonlinear enhancement effects of the two factors.

Keywords: red soil erosion area; Tingjiang River basin; NDVI; geographical detector; driving factor

在中国南方红壤区中,福建省汀江流域的水土流失问题尤为严峻,已成为全国范围内水土流失治理的重要研究对象和重点研究区域之一^[1]。长期水土流失造成植被破坏、土壤肥力下降、生态系统功能退化等问题,严重影响区域生态和经济发展^[2]。近些年,汀江流域通过实施水土流失综合治理和生态修复工程,取得了显著的成效^[3],是南方红壤区典型的生态治理成功流域,但仍面临生态系统稳定性脆弱问题,存在再度退化风险。因此,科学评价汀江流域植被恢复和生态治理效果的驱动力,对汀江流域及其他流域今后的生态治理具有重要参考价值。

植被是地表生态系统的重要组成部分,对维持水土资源、气候平衡、生物多样性以及生态系统稳定等具有重要作用^[4]。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)作为评估地表植被覆盖状况的关键指标,能够有效反映某一个区域内植被的覆盖密度及生长态势,为植被监测和生态评估提供了重要依据^[5]。目前,利用长时间序列遥感数据研究大尺度 NDVI 时空变化已成为全球气候变化研究的重要内容且具有显著优势,NDVI 可以与气候因子、地形地貌因子以及人类活动因子等变量进行相关

分析,评估它们对植被分布情况的影响程度^[6],以揭示植被变化的规律和周期性,进一步理解流域内植被覆盖变迁与其影响因素的相互作用,对提升流域内的植被覆盖度,合理的水土流失综合治理和生态环境保护策略具有重要价值^[7]。国内外学者在探索 NDVI 时空变化及其影响因素时,广泛采用了相关分析法、残差分析法、偏最小二乘法以及 Hurst 指数法等^[8-10]多种方法。尽管这些方法取得了一定的研究成果,但仍然存在一些局限性,现有的研究多聚焦于气温和降水这两个气候因子对植被变化的影响,却往往忽视了其他气候因素,以及地形、土壤和人类活动等多种因素在植被变化中规律和内在机理。尤其在多因子交互作用的定量研究中,现有的方法往往缺乏深入的数据量化分析,难以揭示多变量之间的交互作用、多重共线性和异方差性等问题,而忽略了植被与环境之间错综复杂的相互作用^[11]。为了更准确地揭示植被变化的驱动机制,需要进一步探索新的方法和技术,以更全面、更深入地理解植被与环境之间的复杂关系。

地理探测器模型,作为一种基于空间方差分析的统计工具,旨在识别空间分布的差异性并揭示其背后

的驱动因素,其能够量化评估各类环境要素对目标变量的影响程度和交互效应机制^[12]。该模型已被广泛用于探索水土流失、生态系统健康和植被变化等研究领域。Zhang Shuhui等^[13]在三江源地区植被覆盖研究中发现该模型能够更好地反映植被覆盖的空间异质性,量化植被变化的驱动因素以及各个因素之间的相互作用。杨严攀等^[14]利用该模型对鄂西南土壤侵蚀脆弱性作出了评价,得出鄂西南土壤侵蚀脆弱性的分布格局是多因素协同作用的结论。该模型定量评估各种自然和人为因素对植被覆盖的影响,包括地形、土壤、气候以及人类活动等因素。目前,针对汀江流域的相关研究焦点于水土流失区长汀段的水沙动态、流域水质优化、水体污染的防控治理,以及人类活动对径流量波动的潜在影响等方面^[15-17],而对于汀江流域植被覆盖的时空变化、分布格局以及其与环境因子之间的关系等方面的研究还不够深入,大多集中于气温和降水等气候因子对植被变化的影响。因此,需要进一步加强汀江流域植被覆盖的监测和研究,以更全面地了解植被覆盖状况及其对流域生态环境的影响。鉴于此,本研究以汀江中上游流域为研究区域,利用2000—2020年期间分辨率为MODIS13Q NDVI数据作为遥感数据源,结合DEM数据、气象数据、土壤数据、人口数据等作为影响因子数据,运用趋势分析、相关分析和地理探测器模型方法,分析汀江流域植被覆盖的时空变化特征及各驱动因子间的作用,揭示影响植被覆盖空间分异驱动因子的作用强度和交互作用机制,旨在为汀江中上游流域的生态系统的修复和水土流失的综合治理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

福建省汀江是闽西最大的河流,也是韩江的重要上游支流,发源于武夷山南麓的赖家山,流经区域包括新罗、永定、武平、上杭、长汀、连城等6个县(区)。汀江干流长度约285 km,其中福建省内的流域面积为9 022 km²^[16]。汀江流域(115°59′—117°10′E, 24°28′—26°02′N)位于亚热带季风气候区,年均气温为18.5~20.5℃,年均降水量为1 400~2 000 mm。汀江流域地形复杂多样,主要由山地、丘陵和平原组成,土壤类型主要以红壤和黄壤为主。汀江流域植被主要由亚热带常绿阔叶林、针阔混交林、竹林和灌木林等组成^[15]。汀江流域的水土流失及生态治理是我国南方红壤区的典型代表,对退化地生态治理具有重要参考价值。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 NDVI数据 本研究选用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA, <https://www.earthdata.nasa.gov>)提供时效性好且分布广泛的NDVI时间序列产品MOD13Q1作为数据源,聚焦于条带号为h28v06的区域,时间分辨率为16 d,空间分辨率为250 m,数据覆盖时段为2000—2020年期间每年的5—9月植被生长旺季。通过运用MRT(MODIS Reprojection Tools)对原始数据进行了预处理,包括波段筛选、批量裁剪以及投影变换,最终得到了共计105幅影像(每年5幅,总计21 a),并以Geotiff格式输出。采用了最大值合成法(MVC),以消除异常值影响,并提取每年5—9月NDVI影像的最大值取平均,从而准确反映该流域在相应年份的植被生长覆盖状况^[18]。

1.2.2 气象数据 通过国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)获取分辨率为1 km×1 km的月降水量和月均温数据栅格数据。在ArcGIS中,通过“栅格计算器”得到研究区2000, 2005, 2010, 2015, 2020年的年均降水量和年均气温栅格数据。

1.2.3 资源数据 资源数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),包括土地利用类型、植被类型、土壤类型、人口密度和GDP密度数据,分辨率为1 km×1 km。从地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>)的ASTER GDEM V3高程数据获取分辨率30 m的区内DEM(Digital elevation model)数据。坡度数据,利用ArcGIS的“坡度”工具计算得到。以上数据年份均为2000, 2005, 2010, 2015和2020年共5期数据,不同来源的数据格式和分辨精度各不相同,为了使数据间具有较高的拟合度,将所有数据统一为WGS-1984坐标系和WGS_1984_UTM_Zone_50N投影,分辨率为1 km×1 km。

1.2.4 其他数据 通过对原始DEM数据依次进行填洼和流向分析,依据水利部对河流等级的规范,为流量计算结果设定了恰当的阈值,进行河网链接分级,并结合中国科学院资源环境科学数据中心提供的河网数据,确定水文站点,并捕捉倾泻点,最终使用集水区工具结合流向栅格和倾泻点等数据,完成对汀江流域矢量边界的精确划定^[19]。

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI等级划分 基于已有的研究^[19-21],本研究采用等间距重分类方法,将研究区内经过预处理的NDVI影像图细分5个等级,进行植被覆盖时空演变规律研究(表1)

表 1 基于归一化植被指数(NDVI)的植被覆盖状况分类标准
Table 1 Classification standard for vegetation coverage based on normalized difference vegetation index (NDVI)

覆盖分区	NDVI
低覆盖度	0~0.2
中低覆盖	0.2~0.4
中覆盖度	0.4~0.6
中高覆盖度	0.6~0.8
高覆盖度	0.8~1

1.3.2 趋势分析法 为了直观地表征研究区内植被覆盖的长时间序列数据变化情况,基于像元利用一元线性回归分析方法,进行研究区内 2000—2020 年植被覆盖度变化趋势研究^[20],其计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times (\sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:Slope 为一元线性方程的回归斜率; n 为监测时间段的累计年数($n=21$); NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 数值。通过分析植被覆盖度序列与时间序列之间的相关性,评估区域内植被覆盖度年际变化的显著性。若斜率为正,则表明植被覆盖度在增加,反之则表示降低。

1.3.3 显著性检验 本次研究使用皮尔逊相关系数(r)来表示 NDVI 与年份之间的相关性,以更准确地分析流域内植被覆盖度在研究时间段内的变化程度,其计算公式为^[21]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: n 为总年数(本研究中 $n=21$); i 为 $1\sim n$; x 为年份; y 为 NDVI 值; \bar{x}, \bar{y} 为研究时间段内的均值。样本数为 21 时,根据相关系数显著性临界值表,0.05 和 0.01 显著性水平的临界值分别为 0.413 和 0.526,结合变化趋势斜率与显著性临界值,将植被变化趋势分级划分为以下 6 类(表 2)。

表 2 植被覆盖变化趋势分级

变化水平	坡度(Slope)和相关系数(r)
极显著退化	(Slope<0, $r\geq 0.526$)
显著退化	(Slope<0, $0.413<r<0.526$)
不显著退化	(Slope<0, $0<r\leq 0.413$)
不显著增长	(Slope>0, $0\leq r<0.413$)
显著增长	(Slope>0, $0.413\leq r<0.526$)
极显著增长	(Slope>0, $r\geq 0.526$)

1.3.4 地理探测器模型 地理探测器作为一种创新的统计工具,旨在深入剖析地理要素的空间分异性,并揭示其背后的关键驱动因素,本研究利用该方法的因子探测工具和交互作用探测工具^[12],分析研究区内 NDVI 空间分异性,并评估不同驱动因子对其影响的具体强度。

(1) 因子探测器。用于探测为了确定驱动因子(X)对因变量(NDVI)空间分布变化的解释力(q)强度,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (3)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

$$\text{SST} = N\sigma^2 \quad (5)$$

式中: $h=1,2\cdots L$ 为 X 或 Y 的分类; q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大,表示 X 对 Y 的空间分异性的解释力越强; N_h, N 分别为 h 层的单元数和全区的单元数; σ^2, σ_h^2 分别为 h 类和区域内 Y 的方差;SSW, SST 分别为 L 类的方差之和与区域总方差。

基于以往关于流域植被覆盖变化及其驱动力分析的广泛研究^[19-21],本研究综合考虑了自然和人为两方面的影响因素。自然因素包括年均温、降水量、海拔、坡度、土壤类型和植被类型,而人为因素则涵盖了土地利用类型、人口密度和 GDP。通过自然断点法将年均温、年降水量、坡度、海拔、GDP 和人口密度数据进行离散化处理,并划分成 9 个等级。同时,根据大类标准对植被类型、土壤类型和土地利用类型进行了划分^[19]。利用 ArcGIS 中的渔网工具,将研究区域划细分成 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 网格,共计生成 9 159 个中心采样点,通过空间位置关联提取 NDVI 和驱动因子相对应的属性值,最后将其代入地理探测器模型中运行得出结果,以得出各驱动因子对植被覆盖及其变化的影响程度。

(2) 交互作用探测器。旨在揭示不同驱动因子 X 之间的交互作用,进一步探究当驱动因子 X_1 和 X_2 共同作用时,它们对 NDVI 的影响力是得到增强、减弱,还是保持独立,并用 $q[q(X_1 \cap X_2)]$ 得出 5 类交互作用类型(表 3)。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖时间变化特征

基于最大值合成法(MVC)得到 2000—2020 年期间研究区的年 NDVI 最大值栅格数据,通过栅格计算得出年均 NDVI 数据,由此获得研究区域近 20 a 期间 NDVI 变化拟合曲线。

由图 1 可知,20 a 期间里流域内植被覆盖度均值为0.809,整体变化呈现波动上升趋势,从 2000 年的 0.774 增长到 2020 年的0.829,增长率为 7.11%,上升平均速度为 0.002 2/a,NDVI 的最小值出现在 2000 年,为 0.774,而最大值则出现在 2016 年,高达 0.836,研究表明研究内植被覆盖情况整体上处于良性发展。

结合图 2 分析,2000—2002 年,汀江流域的年均

NDVI 呈现较大的增幅现象,长汀县中覆盖度及以下区域面积显著减少,各区县高度覆盖度区域比例均有提升,这可能由于至 2000 年开始,福建省政府以长汀重点的水土流失综合治理区的相关政策的大力实施以及人民积极参加治理,长汀县进入水土流失区治理快速发展阶段,通过实行崩岗侵蚀治理、封山育林和生态果园等综合治理措施,有效减少汀江流域水土流失面积,增加了植被覆盖度。

表 3 双因子交互作用类型
Table 3 Types of two-factor interactions

交互作用类型	q 值关系
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

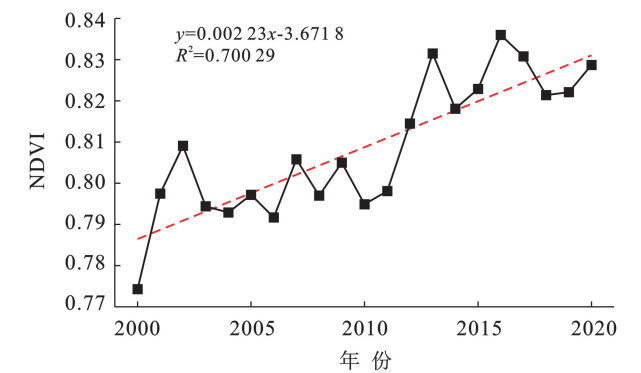


图 1 汀江流域 2000—2020 年各年均 NDVI 变化趋势
Fig.1 Trend of annual average NDVI in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

2.2 植被覆盖空间变化特征

由图 2 可见,5 个时期中,研究区内低、中低和中植被覆盖度区面积所占比例均很低,其变化趋势不显著。植被覆盖变化呈现明显的空间异质性,各区县周边植被覆盖度水平都呈现出大于中部区域的趋势,流域内各区县中部区域海拔较低、坡度较缓、年均温高

于区县周边山地丘陵地区,年均降水量低于周边区域,以此形成了一个适宜人类生产生活发展的环境条件,使得各区县中部地区的人为活动强度高于区县周边区域。各区县长汀县中覆盖度区域面积减少最为显著,高盖度区域比例逐年增大,其余 5 个县中高覆盖度区域也都在往高覆盖度区域转化。

根据表 4 可知,在 5 个时期中,汀江流域的中高和高覆盖度区域面积比例在空间上变化趋势显著,2000 年流域内中覆盖度区域面积比例最大,为 56.16%,高覆盖度区域次之,为 40.85%。2020 年,高植被覆盖度区域面积比例最大,为 71.52%,中高植被覆盖度次之,为 26.08%,高覆盖度区域面积比例呈现上升趋势,而中高覆盖度区域比例呈下降趋势,二者的变化速率分别为 1.533/a 和 -1.504/a。在 5 个时期中,低覆盖度和中低覆盖度区域面积比例极小,2020 年,二者地面积比例最大,分别 0.08%和 0.51%,且变化不显著。总体上,研究区域内的植被生态状况呈现良性发展趋势。

表 4 汀江流域 2000—2020 年植被 NDVI 动态变化
Table 5 Dynamic changes of vegetation NDVI in Tingjiang River basin from 2001 to 2020

覆盖度分区	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年		2000—2020 年	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积 变化/km ²	变化率/ %
低覆盖度	0.25	0.003	2.06	0.02	4.81	0.05	4.50	0.05	7.63	0.08	7.38	0.08
中低覆盖度	17.25	0.19	22.88	0.25	36.38	0.40	33.94	0.37	46.69	0.51	29.44	0.32
中覆盖度	255.75	2.79	178.38	1.95	223.88	2.44	138.69	1.51	165.63	1.81	-90.13	-0.98
中高覆盖度	5 144.06	56.16	3 880.63	42.37	4 025.38	43.90	2 388.19	26.08	2 388.94	26.08	-2 755.10	-30.08
高覆盖度	3 741.56	40.85	5 074.94	55.41	4 868.44	53.16	6 593.56	71.90	6 550.00	71.52	2 808.44	30.66

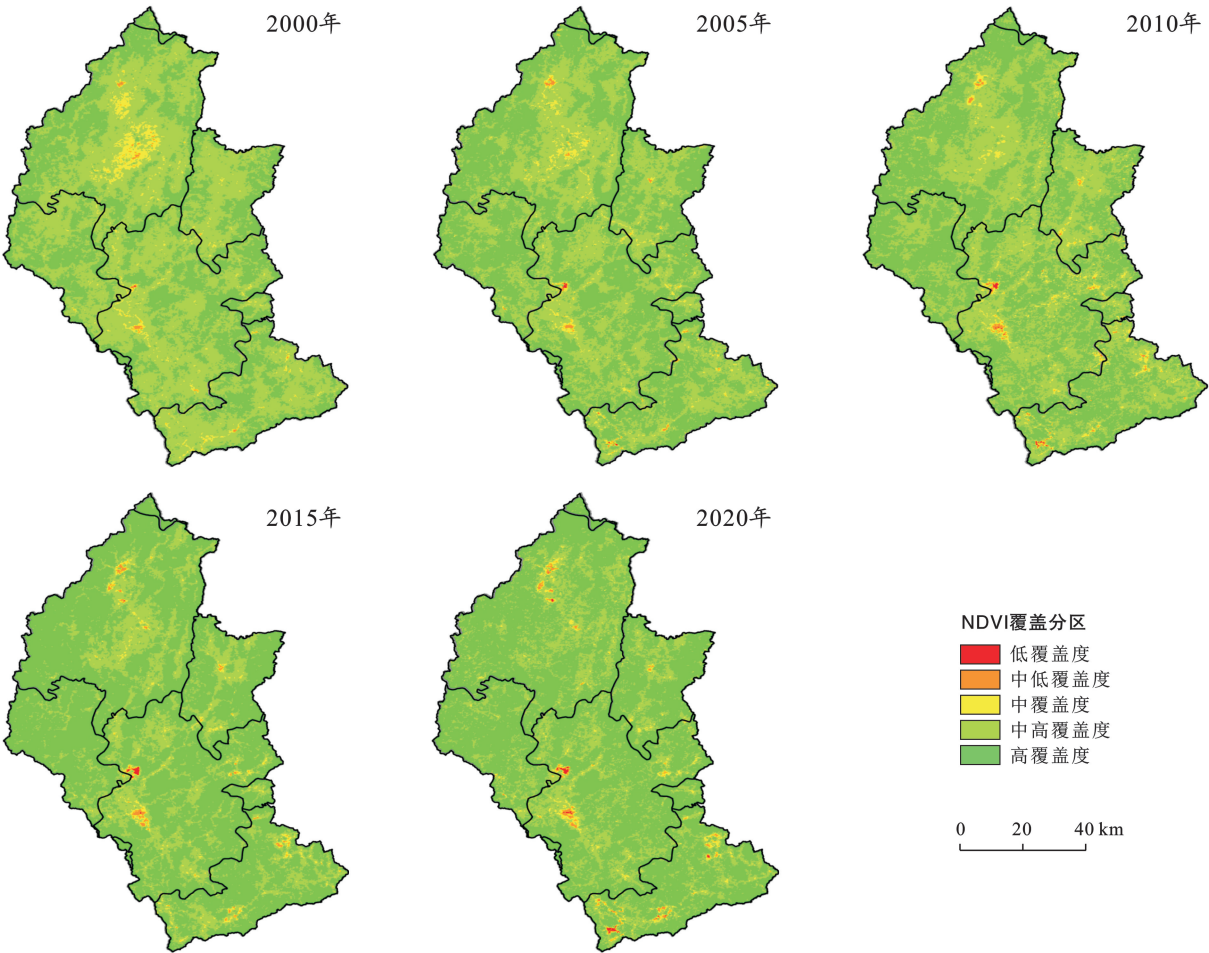


图 2 汀江流域 2000—2020 年 NDVI 空间分布变化

Fig.2 Changes in spatial distribution of NDVI in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

2.3 植被覆盖变化趋势分析

利用一元线性回归的方法,分析研究区内植被覆盖变化趋势情况。根据图 3 和表 5 可知,2000—2020 年研究区 Slope 平均指数为 0.002 1,植被恢复情况显著。汀江流经长汀、武平、连城、上杭、新罗和永定 6 个县区的面积比例分别为 32.02%,11.86%,10.45%,29.02%,1.18%和 15.45%。其中 NDVI 变化率最高区域集中在长汀县,且 NDVI 极显著增长的区域中面积比例最多为 38.41%,上杭县次之为 25.25%,集中于县区中下部区域,其余区县则均呈现斑点状分布。

NDVI 不显著退化的区域在各区县均有分布,其中属上杭县比例最高为 35.9%,长汀县和永定区比例分别为 23.8%和 20.83%。研究区内植被覆盖度变化趋势存在明显的空间异质性,植被恢复情况以不显著增长为主,比例为 41.93%,显著增长和极显著增长区域的面积比例分别为 15.71%和 28.68%,不显著退化区域面积仅占 13.67%。汀江流域内各区县的 NDVI 变化趋势与区县的面积覆盖度有着密切的关系,但总体上看,研究区内植被覆盖改善区域的面积比例高达 86.33%,表明区内植被生态状况正稳定恢复中。

表 5 汀江流域 2000—2020 年 NDVI 变化趋势面积比例

Table 5 Proportion of NDVI change trend area in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

NDVI 变化趋势分级	长汀县/ km ²	武平县/ km ²	连城县/ km ²	上杭县/ km ²	新罗区/ km ²	永定区/ km ²	面积/ km ²	比例/ %
不显著退化	297.88	74.63	148.13	449.31	20.81	260.75	1 251.50	13.67
不显著增长	1 174.50	442.81	445.88	1 145.31	57.31	573.56	3 839.38	41.93
显著增长	450.63	211.81	143.94	399.94	14.63	217.44	1 438.38	15.71
极显著增长	1 009.13	356.69	219.38	663.31	15.19	363.50	2 627.19	28.68

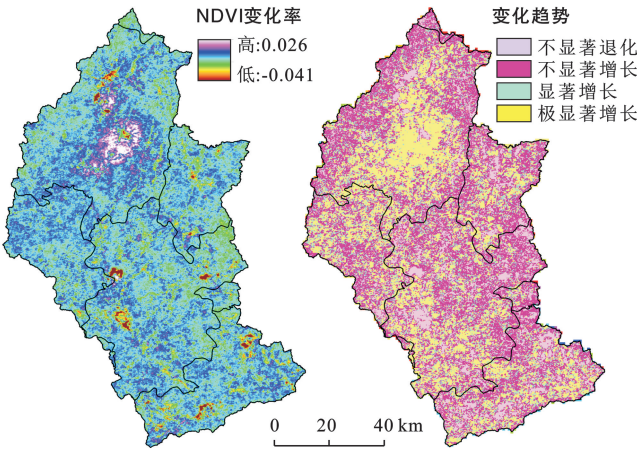


图 3 汀江流域 200—2020 年 NDVI 变化率和变化趋势
Fig.3 Rate of change and trend of change of NDVI in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

2.4 不同驱动因子对植被覆盖变化的驱动分析

2000—2020 年,汀江流域各驱动因子(温度、降水量、海拔、坡度、植被类型、土壤类型、土地利用类型、人口密度和 GDP)变化,如图 4 所示。

通过地理探测器模型分别就 NDVI 空间分异特征和变化趋势进行归因,分析了单因子 q 值大小,各因子对 NDVI 空间分异特征的解释力大小如表 6 所示:降水量(0.705)>海拔(0.657)>温度(0.608)>GDP(0.586)>人口密度(0.499)>土地利用类型(0.383)>植被类型(0.265)>坡度(0.096)>土壤类型(0.020)。自然因子中的温度、降水量、和海拔以及

人为因子中的 GDP 和人口密度型都具有较强的解释力,其 q 值均大于 0.5,对植被覆盖的空间分异性起到了主导作用,而土地利用类型、土壤侵蚀、植被类型驱动因子的解释力相对较弱,坡度和土壤类型驱动因子的解释力最低均不超过 0.1。结合图 2 和图 4 分析可知:①流域内的 NDVI 空间分布与自然因子中年均温、年降水量和海拔有显著的相关性,表现为 5 个时期内 NDVI 值在年均温 19.8℃ 以下区域,随着年均温的降低而增加,在年均降水量高于 1 533 mm 的区域内,随着年降水量的增高而上升,在海拔 467 m 以上的区域,随着海拔的上升而增大;②流域内的 NDVI 空间分布与人为因子中 GDP 和人口密度的分布具有相似性,大致表现为随着人口密度的降低而增高,GDP 相对较高的区域与各时期 NDVI 中覆盖度以下区域具有较高的重合度。结合图 3—4,研究发现,20 a 期间,汀江流域福建段上游流域整体年均温普遍低于中游流域,而年均降雨量却呈现相反趋势,上游区域的坡度也比中游流域较缓,上游流域中人口密度除城镇中心区域外均低于中游流域。上游流域与中游相比,具有较适宜植被生长的自然条件和较小的人为因素的干扰,上游流域植被覆盖改善情况优于中游流域。研究还发现,土壤类型中的水稻土、土地利用类型中的耕地和建设用地的空间分布同流域内植被覆盖不显著退化区域具有高度的一致性,因此人为因素也在一定程度上影响着植被的覆盖。

表 6 2000—2020 年汀江流域 NDVI 驱动因子 q 值
Table 6 NDVI driver q value in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

驱动因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
q 值	0.608**	0.705**	0.657**	0.096*	0.020*	0.383**	0.265*	0.586**	0.499**

注:表中:① X_1 表示温度(℃), X_2 表示降水量(mm), X_3 表示海拔(m), X_4 表示坡度(°), X_5 表示土壤类型, X_6 表示土地利用类型, X_7 表示植被类型, X_8 表示 GDP(元/km²), X_9 表示人口密度(人/km²);②*表示 $p<0.05$ 显著差异;**表示 $p<0.01$ 显著差异。下同。

根据表 6 和图 5 数据对比可知,在影响研究区 NDVI 变化中,双因子之间的交互作用呈现出两种关系,即非线性增强和双因子增强,不存在独立起作用的因子。除了坡度和土壤类型因子之间主要呈现非线性增强交互作用外,其余各驱动因子间的交互作用均显示为双因子增强效应,任意两个驱动因子交互作用的效应都要超过它们各自独立作用。

双因子之间的交互作用对植被 NDVI 变化的解释率较高的 12 组为: $X_2 \cap X_6$ (0.923)> $X_2 \cap X_3$ (0.893)> $X_1 \cap X_8$ (0.890)> $X_1 \cap X_9$ (0.882)> $X_3 \cap X_8$ (0.876)> $X_1 \cap X_6$ (0.851)> $X_3 \cap X_9$ (0.839)> $X_2 \cap X_8$ (0.833)> $X_3 \cap X_6$ (0.830)> $X_1 \cap X_3$ (0.826)> $X_3 \cap X_4$ (0.810)> $X_2 \cap X_4$ (0.806)。降水量与土地利用类型之间的交互作用最显著, q 值为 0.923,温度、

降水量和海拔因子同其余驱动因子间的交互作用显著, q 值均大于 0.6。GDP 和人口密度因子与其余驱动因子间的交互作用后, q 值均大于 0.58。人口密度因子与其他驱动因子间的交互作用都具有显著差异($p<0.05$),人口密度的空间分布是极具能反映人类活动的最具代表性的数据之一,所以该结果表明人为因素在影响研究区内植被生长覆盖方面具有一定的作用,且的影响力在不断上升中。绝大部分驱动因子间的交互作用均有显著差异($p<0.05$),极少数交互作用无显著差异,这进一步说明自然因子和人为因子共同影响着研究区 NDVI 值的大小。综上所述,自然因子中的温度、降水量和海拔因子与人为因子中的 GDP 和人口密度因子是影响汀江中上游流域 20 a 期间植被覆盖空间分异特征情况的主要驱动力。

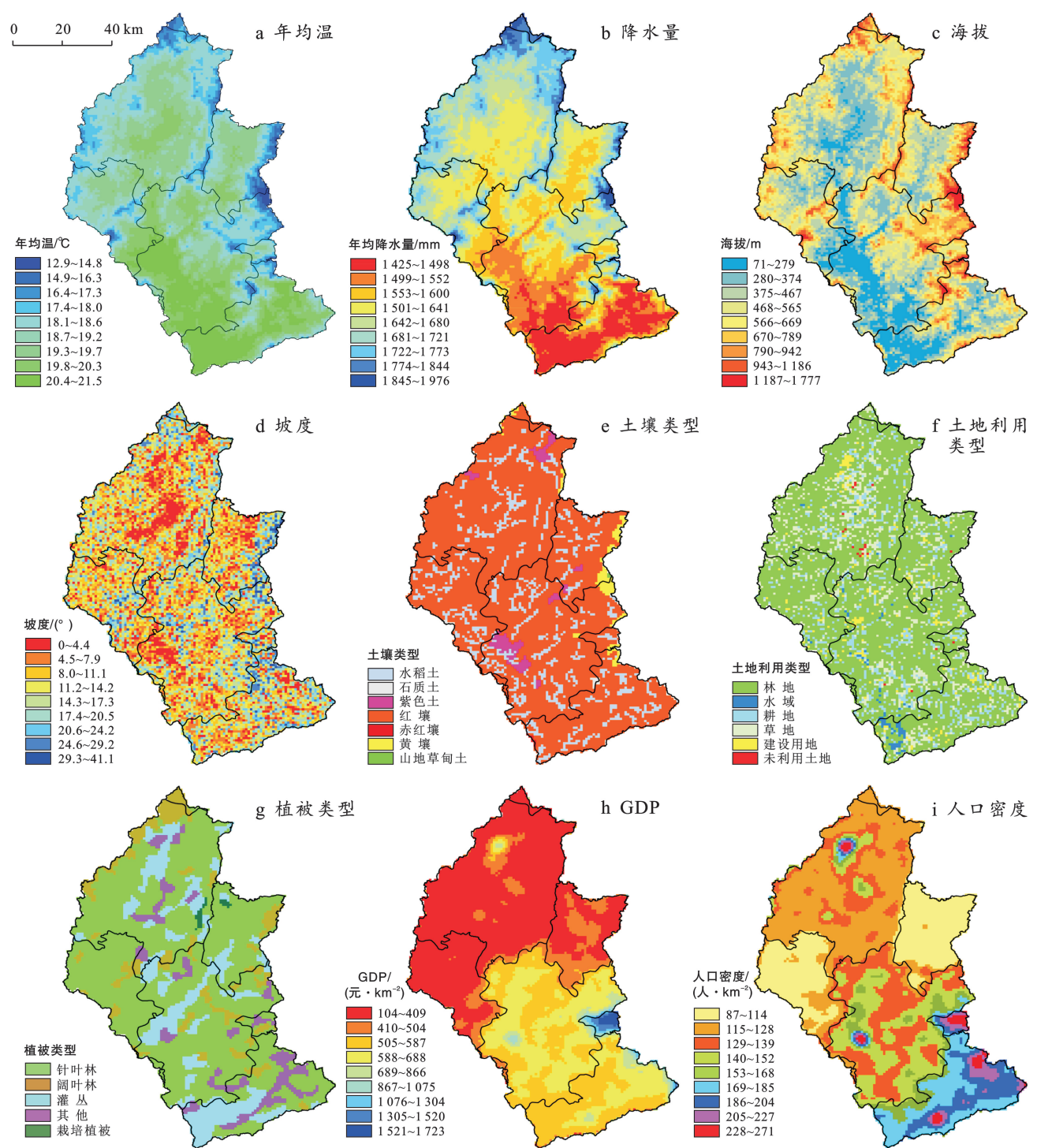


图 4 2000—2020 年汀江流域各驱动因子空间分布

Fig.4 Spatial distribution of drivers in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

3 讨论

汀江流域的植被覆盖在过去 20 a 间呈现出波动上升的趋势,平均增速为 0.002 2/a,流域植被覆盖改善区域的面积比例高达 86.33%,大部分 NDVI 为中高覆盖度区域向高覆盖度区域转变,说明流域内植被状况有所改善,这一结果与前人对福建地区 NDVI 变化的研

究相吻合^[22-23],但与全国平均改善水平 0.004 5/a^[6]相比,本研究区的 NDVI 增速较低。福建省在该流域实施的一系列水土流失综合治理和生态修复工程,如崩岗治理、退耕还林还草、封山育林和天然林保护等,降低了水土流失和植被破坏面积,改善土壤质量,对改善植被覆盖起到了积极作用^[24-25]。此外,许多研究也证实了生态修复工程对促进植被恢复具有显著效果^[26-27]。

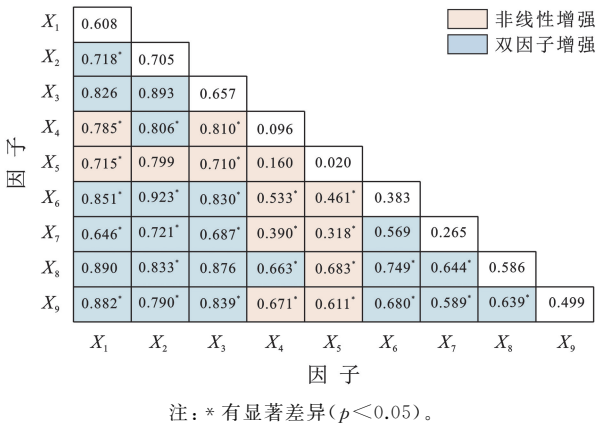


图 5 2000—2020 年汀江流域 NDVI 驱动因子交互作用 (q) 值
Fig.5 Interaction (q) values of NDVI drivers in Tingjiang River basin from 2000 to 2020

植被覆盖变化是一个在持续而复杂的动态过程，它受到自然因素和人类活动的双重影响。在自然因子中，年降水量是影响研究区内 NDVI 的空间分异情况的首要因子，其次是海拔和温度因子，且 NDVI 的空间分布变化特征与降水、海拔和温度的空间变化存在高度的一致性。20 a 间，流域内植被覆盖度较高区域主要分布于高海拔地区，表现为降雨量充沛、温度适宜、人口密度低、人为干扰因素较小且植被类型以林地为主的特征，故植被稳定性较高，抵抗水土侵蚀和水土流失等自然灾害能力较强，植被覆盖度变化幅度较小，植被覆盖度呈现稳定增长的趋势。与吕勇等^[21]在湟水流域的研究、彭文甫等^[7]在四川省的研究以及，汀江流域的植被覆盖变化驱动力在某些方面存在相似性，如海拔和土壤类型的影响。但也存在显著差异，湟水流域植被 NDVI 的空间变化差异是高程、土壤以及植被类型起主导作用，土壤类型、海拔和年均温是影响四川省植被 NDVI 的主要驱动力。该流域中降水量因子对植被 NDVI 的解释力大于海拔和温度，这与丁永康等^[19]研究结果保持一致。一方面，汀江流域内降水量的空间变异性显著，海拔和气温因子的空间分布变异性相对较小，这可能是由于流域内复杂地形地貌对降水分布产生显著影响，而海拔和气温因子虽然对植被生长有重要影响，但在该流域内的空间变化范围相对较小，从而导致了降水量在影响植被 NDVI 空间分异中占据主导地位；另一方面，降水和气温是植被生长的关键限制因素^[28]，而气候变化对植被生长和分布的影响存在滞后和累积效应^[29]。该流域的植被类型以真阔叶林为主，主要分布于海拔 468 m 以上的区域，该流域内的温度空间差异变化，受海拔和地形的共同影响，与 Li Yali 等^[30]的对福建省中西部地区的研究结果具有相似性，海拔

因子则通过影响研究区局部地区的水热通量来的改变气候特征，随着海拔的升高，气温逐渐下降，风速逐渐上升，从而影响着植物光合速率、生理代谢和物质运输等生物活动，导致不同海拔的植物类型和生长特性不同^[28,30]。另外，土壤作为生态系统中物质与能量交换的重要介质，其类型在汀江流域内表现出显著的差异。以红壤类型为主的土壤，其不同理化性质为环境梯度变化的形成提供了基础^[31]。

本研究将人为因子进行了量化分析，其中人口密度的分布对研究区内 NDVI 变化趋势强度和方向有着显著的影响，研究内植被 NDVI 较低的区域主要分布于人类活动频繁的区域，如各区县中部和周边地区，植被覆盖变化呈现不显著退化的特点。城市化过程中人口密度的不断增加，人类活动强度显著提高，这也导致了对土地资源的更大需求。随着 GDP 的提高，城市化进程不断加快，原有的林地、草地等自然景观被建设用地所侵占而城市绿化面积不足^[32]，改变了土地利用类型的空间分布情况，逐渐形成了各区县中心地带植被 NDVI 偏低和植被退化的现象。部分低植被 NDVI 区域主要由于各地矿产资源的开采，未及时采取有效水保措施，从而造成水土流失和环境污染等一系列生态问题^[33]，植被遭受破坏，故退化区域呈现斑点状分布。尽管坡度、土壤类型、植被类型和土地利用类型与其他驱动力，特别是温度、年降水量和海拔因子相互作用后，它们的解释力得到大幅度提高。这揭示了 NDVI 与驱动因子间关联的复杂性，它不仅受到单一因子的独立作用，还受到多因子间的综合影响。Zhao Yi 等^[34]研究发现，较高地势的林地比较低海拔的林地更密集，这与本研究区内 NDVI 的变化趋势大致相同。海拔高度对植被生长和人类活动有着重要的影响，人类活动的强烈区域主要发生在海拔较低、地势平坦的区域，为人类获取资源提供了便利，也随之导致研究区各区县中部地区的植被覆盖发生了快速的变化。

本研究在综合多位学者利用地理探测器对不同流域植被覆盖变化驱动力研究成果的基础上，力求全面收集影响该区域内 NDVI 时空变化的自然和人为因子数据，严格依据国家大类分类标准，统一分类级数，减小人为主观性因素影响，以确保研究的准确性和可靠性。通过计算得出各因子解释力大小，量化不同因子对目标变量的影响程度，以及因子间的交互作用，从而揭示了自然因素和人为因素的相对重要性和协同作用。总体而言，研究区内山地和丘陵地貌复杂多样，水热条件丰富，为植被提供了广泛的有利生长环境，植被覆盖情况整体上趋于良性发展。随着人类

活动的日益频繁,其与流域内 NDVI 变化及生态环境演化的关系愈发紧密,既可能促进植被正向发展,也可能抑制其生长,所以植被覆盖较低的区域以及存在潜在退化风险的区域,仍需加强实地勘探和生态监测力度,从而为该流域的水土流失的整治、生态环境的可持续发展以及植被覆盖变化的科学监测与管理提供数据支撑和理论依据。

4 结 论

(1) 时间上,2000—2020 年汀江流域植被覆盖度呈现出波动上升的趋势,增长率为 7.11%,上升平均速度为 0.002 2/a,表明该区域的生态环境正稳定持续改善中。空间上,整体上以中高和高覆盖度为主,呈现出明显各区县中部低于四周区域的空间分布格局,具有显著的地域性差异,NDVI 改善区域面积为 86.33%,远大于退化面积区域。

(2) 驱动因子探测结果表明,汀江流域植被覆盖度时空变化受自然因素和人为因素双重影响。各驱动因子影响力排序为:降水量>海拔>温度>GDP>人口密度>土地利用类型>植被类型>坡度>土壤类型,其中降水量因子解释力为 0.705,是影响研究区植被覆盖度变化的主要驱动因子,海拔、温度和 GDP 等为次要驱动因子,解释力均为 0.580 以上。各因子之间的交互作用(q)较于单因子表现出了更高的解释力,双因子之间主要表现为增强和非线性增强效应的复杂关系。

参考文献 (References)

[1] 陈国光,刘红樱,陈进全,等.福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策[J].水文地质工程地质,2020,47(6):26-35.
Chen Guoguang, Liu Hongying, Chen Jinquan, et al. Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020,47(6):26-35.

[2] Wu Hui, Sun Liying, Liu Zhe. Ecosystem service assessment of soil and water conservation based on scenario analysis in a hilly red-soil catchment of Southern China [J]. Water, 2022,14(8):1284.

[3] Li Zhongwu, Ning Ke, Chen Jia, et al. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: Evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,260:121109.

[4] Suzuki R, Masuda K, Dye D G. Interannual covariability between actual evapotranspiration and PAL and GIMMS

NDVIs of northern Asia [J]. Remote Sensing of Environment, 2007,106(3):387-398.

[5] Bai Hexiang, Li Deyu, Ge Yong, et al. Spatial rough set-based geographical detectors for nominal target variables [J]. Information Sciences, 2022,586:525-539.

[6] 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.
Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):961-974.

[7] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].地理学报,2019,74(9):1758-1776.
Peng Wenfu, Zhang Dongmei, Luo Yanmei, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1758-1776.

[8] SLeroux L, Bégué A, Seen D L, et al. Driving forces of recent vegetation changes in the Sahel: Lessons learned from regional and local level analyses [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,191:38-54.

[9] Barbosa H A, Lakshmi Kumar T V, Silva L R M. Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall [J]. Natural Hazards, 2015,77(2):883-899.

[10] 孔冬冬,张强,黄文琳,等.1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J].地理学报,2017,72(1):39-52.
Kong Dongdong, Zhang Qiang, Huang Wenlin, et al. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):39-52.

[11] 王小霞,刘志华,焦珂伟.2000—2017 年东北森林 NDVI 时空动态及其驱动因子[J].生态学杂志,2020,39(9):2878-2886.
Wang Xiaoxia, Liu Zhihua, Jiao Kewei. Spatiotemporal dynamics of normalized difference vegetation index (NDVI) and its drivers in forested region of Northeast China during 2000—2017 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(9):2878-2886.

[12] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[13] Zhang Shuhui, Zhou Yuke, Yu Yong, et al. Using the geodetector method to characterize the spatiotemporal dynamics of vegetation and its interaction with environ-

- mental factors in the Qinba mountains, China [J]. Remote Sensing, 2022,14(22):5794.
- [14] 杨严攀,田培,沈晨竹,等.基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价[J].水土保持学报, 2024,38(1):91-103.
- Yang Yanpan, Tian Pei, Shen Chenzhu, et al. Vulnerability assessment of soil erosion in southwestern Hubei Province based on RUSLE model and geographic detector [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38 (1):91-103.
- [15] 林蔚,徐建刚,杨帆.汀江上游流域生态水文分区研究 [J].水土保持研究,2017,24(5):227-232.
- Lin Wei, Xu Jiangang, Yang Fan. Research on eco-hydrological regions of upper reaches of the Tingjiang River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(5):227-232.
- [16] 王海龙.基于小波分析的汀江水沙通量变化规律研究 [J].泥沙研究,2012(2):61-67.
- Wang Hailong. Characteristics of water discharge and sediment load variability of Tingjiang River by wavelet analysis [J]. Journal of Sediment Research, 2012(2): 61-67.
- [17] 张杰,张正栋,万露文,等.气候变化和人类活动对汀江径流量变化的贡献[J].华南师范大学学报(自然科学版),2017,49(6):84-91.
- Zhang Jie, Zhang Zhengdong, Wan Luwen, et al. The contributions of climate change and human activities on runoff of the Tingjiang River [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2017,49(6):84-91.
- [18] 李林叶,田美荣,梁会,等.2000—2016 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2018,34(7):584-591.
- Li Linye, Tian Meirong, Liang Hui, et al. Spatial and temporal changes of vegetation coverage and influencing factors in Hulun Buir grassland during 2000-2016 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34 (7):584-591.
- [19] 丁永康,叶婷,陈康.基于地理探测器的滹沱河流域植被覆盖时空变化与驱动力分析[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(11):1737-1749.
- Ding Yongkang, Ye Ting, Chen Kang. Analysis of spatio-temporal dynamics and driving forces of vegetation cover in the Hutuo River Basin based on the geographic detector [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(11):1737-1749.
- [20] 高思琦,董国涛,蒋晓辉,等.基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析[J].水土保持研究, 2022,29(4):336-343.
- Gao Siqi, Dong Guotao, Jiang Xiaohui, et al. Analysis of vegetation coverage changes and natural driving factors in the Three-River Headwaters Region based on geographical detector [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):336-343.
- [21] 吕勇,修丽娜,姚晓军.2000—2020 年湟水流域植被 NDVI 变化及其驱动力分析[J].水土保持学报,2023, 37(4):150-157.
- Lü Yong, Xiu Lina, Yao Xiaojun. Vegetation NDVI change and driving force analysis in Huangshui watershed from 2000 to 2020 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):150-157.
- [22] 胡鸿,许延丽,鞠洪波,等.基于遥感影像的福建省长汀县级植被覆盖变化监测及分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(3):92-98.
- Hu Hong, Xu Yanli, Ju Hongbo, et al. Monitoring and analysis of county-level vegetation cover change in Changting, Fujian based on remote sensing images [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019,43(3):92-98.
- [23] 王一帆,徐涵秋.利用 MODIS EVI 时间序列数据分析福建省植被变化(2000—2017 年)[J].遥感技术与应用,2020,35(1):245-254.
- Wang Yifan, Xu Hanqiu. Analysis of vegetation changes in Fujian Province using MODIS EVI time series data (2000-2017) [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020,35(1):245-254.
- [24] 陈达兴.汀江(韩江)流域生态补偿机制试点的实践与创新[J].环境保护,2017,45(7):31-33.
- Chen Daxing. Practice and innovation of Eco-compensation mechanism pilot in Tingjiang-Hanjiang River Basin [J]. Environmental Protection, 2017,45(7):31-33.
- [25] 余红红,杨加猛,万紫璇.基于水源涵养服务视角的汀江(韩江)流域森林横向生态补偿标准[J].林业科学, 2023,59(2):1-9.
- Yu Honghong, Yang Jiameng, Wan Zixuan. Horizontal compensation standards for forest ecological benefits in Tingjiang (Hanjiang) River basin based on the perspective of water retention service [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023,59(2):1-9.
- [26] Bao Gang, Qin Zhihao, Bao Yuhai, et al. NDVI-based long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau [J]. Remote Sensing,2014,6(9):8337-8358.
- [27] Barbieri A F, Carr D L. Gender-specific out-migration, deforestation and urbanization in the Ecuadorian Amazon [J]. Global and Planetary Change, 2005,47(2/3/4): 99-110.

hydrological regime change in Weihe River Basin based on IHA-RVA method [J]. Journal of China Hydrology, 2022,42(4):76-82.

[27] 石永强,左其亭.基于多种水文学法的襄阳市主要河流生态基流估算[J].中国农村水利水电,2017(2):50-54.

Shi Yongqiang, Zuo Qiting. The estimation of ecological base flow of main rivers in Xiangyang city based on multiple hydrological methods [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(2):50-54.

[28] 邓振华,张晶,于明洋,等.济南南部山区土地利用的时空变化分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2010,31(1):69-73.

Deng Zhenhua, Zhang Jing, Yu Mingyang, et al. Spatio-temporal change of land use in south mountain of Jinan [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2010,31(1):69-73.

[29] 杨志刚,杨洪昌,谷湘潜,等.近年来黄河下游断流的干旱背景分析[J].气象学报,2000,58(6):751-758.

Yang Zhigang, Yang Hongchang, Gu Xiangqian, et al. Climatic background analysis of flow-break episode of lower reaches of Yellow River in recent years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000,58(6):751-758.

[30] 熊国平,程亚午,徐武.济南南部山区东片保护和发展规划探索[J].中国科技论文,2013,8(5):481-486.

Xiong Guoping, Cheng Yawu, Xu Wu. Exploration of conservation and development planning for southern mountain areas (east zone) of Jinan City [J]. China Sciencepaper, 2013,8(5):481-486.

[31] 魏童彤.华北地区小麦—玉米轮作月尺度灌溉需水量研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2020.

Wei Tongtong. Study on monthly scale irrigation water requirement of wheat-maize rotation in North China [D]. Taian, Shandong: Shandong Agriculture University, 2020.

[32] 刘玉年.贯彻落实“四个统一”强化沂沭泗流域治理管理工作[J].治淮,2022(6):4-6.

Liu Yunian. Carrying out the “four unifications” and strengthening the management of Yishusi River basin [J]. Harnessing the Huaihe River, 2022(6):4-6.

[33] 王怡冰,李成亮,张鹏,等.济南南部山区土地利用/覆被变化对碳储量的影响研究[J].中国环境科学,2024:1-15.

Wang Yibing, Li Chengliang, Zhang Peng, et al. Research on the impact of land use/cover changes in the southern mountainous area of Jinan on carbon storage [J]. China Environmental Science, 2024:1-15.

~~~~~

(上接第 246 页)

[28] 陈欢,任志远.中国大陆植被覆盖对降水与温度变化的响应[J].水土保持通报,2013,33(2):78-82.

Chen Huan, Ren Zhiyuan. Response of vegetation coverage to changes of precipitation and temperature in Chinese mainland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(2):78-82.

[29] Chu Hongshuai, Venevsky S, Wu Chao, 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.

[30] Li Yali, Wang Xiaoqin, Chen Yunzhi, et al. Land surface temperature variations and their relationship to fractional vegetation coverage in subtropical regions: A case study in Fujian Province, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2020,41(6):2081-2097.

[31] Farrar T J, Nicholson S E, Lare A R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture [J]. Remote Sensing of Environment, 1994,50(2):121-133.

[32] 黄鹏,郭闽,夏思颖,等.城市化与生态环境耦合状况分析:以福建龙岩为例[J].内江师范学院学报,2015,30(4):52-56.

Huang Peng, Guo Min, Xia Siying, et al. Analysis of the coupling effects between urbanization and eco-environment: A case study of Longyan city, Fujian province [J]. Journal of Neijiang Normal University, 2015,30(4):52-56.

[33] 陈森,汪小钦,林敬兰,等.土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响[J].水土保持学报,2023,37(5):168-177.

Chen Miao, Wang Xiaoqin, Lin Jinglan, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):168-177

[34] Zhao Yi, Tomita M, Hara K, et al. Effects of topography on status and changes in land-cover patterns, Chongqing City, China [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2014,10(1):125-135.