

毛智慧,黎丽莉,程露,等. 广东省植被叶面积指数时空变化特征及其影响因素[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 907-919.  
MAO Zhi-hui, LI Li-li, CHENG Lu, et al. Spatio-temporal Variation of Vegetation Leaf Area Index and Its Influencing Factors in Guangdong Province, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 907-919.

DOI:10.19814/j.jese.2022.07007

• 环境与可持续发展专刊 •

## 广东省植被叶面积指数时空变化特征 及其影响因素

毛智慧<sup>1,2</sup>, 黎丽莉<sup>1,2\*</sup>, 程露<sup>1,2</sup>, 杜建军<sup>1,2</sup>

(1. 仲恺农业工程学院 资源与环境学院, 广东 广州 510225; 2. 仲恺农业工程学院  
广东省农业产地环境污染防控工程技术研究中心, 广东 广州 510225)

**摘要:**植被变化是评价生态环境和衡量地表植被状况的重要指标之一,探讨植被的时空动态变化特征及其影响因素对生态环境的保护及植被的恢复建设具有重要意义。基于 MODIS 叶面积指数 (LAI) 卫星遥感产品、气象数据和社会经济数据,运用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数分析和地理探测器等方法,探究了广东省 2003~2020 年叶面积指数的时空变化特征及其影响因素。结果表明:2003~2020 年,广东省叶面积指数年际变化呈现为波动上升趋势(增长率为 0.219/10a),叶面积指数季节均值的增长率从大到小依次为冬季(0.405/10a)、春季(0.251/10a)、秋季(0.139/10a)和夏季(0.111/10a);在空间上,叶面积指数表现为西北高、东南低的特征,低值区主要集中在珠江三角洲地区和沿海经济区;叶面积指数未来变化趋势以弱反持续性性和弱持续性为主,持续改善区域的面积远远大于持续退化区域的面积,说明广东省植被覆盖未来改善的可能性较大;叶面积指数主要影响因素为高程、人口密度和 GDP,其中高程的影响最为显著,对叶面积指数空间分异的解释力为 16.9%,且双因素的交互作用能增强对叶面积指数空间分异的解释力。

**关键词:**叶面积指数;Theil-Sen Median 趋势分析;Mann-Kendall 显著性检验;Hurst 指数;地理探测器;交互作用;时空变化;广东

中图分类号:X87;TP79

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2023)04-0907-13

## Spatio-temporal Variation of Vegetation Leaf Area Index and Its Influencing Factors in Guangdong Province, China

MAO Zhi-hui<sup>1,2</sup>, LI Li-li<sup>1,2\*</sup>, CHENG Lu<sup>1,2</sup>, DU Jian-jun<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Agricultural Land Pollution Prevention and Control, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, Guangdong, China)

**Abstract:** Vegetation variation is one of important indicators to evaluate the quality of ecological environment and measure the status of surface vegetation. Exploring the spatio-temporal dynamic variation of vegetation and its influencing factors is of great significance for the protection of

收稿日期:2022-07-04;修回日期:2022-11-24 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(42007205);广东省自然科学基金项目(2022A1515011077)

作者简介:毛智慧(1997-),女,四川乐山人,农学硕士研究生,E-mail:geminimao0522@163.com.

\* 通讯作者:黎丽莉(1989-),女,湖南岳阳人,副教授,理学博士,E-mail:lilili@gig.ac.cn.

ecological environment and the restoration of vegetation. Based on MODIS LAI satellite remote sensing products, meteorological data and socio-economic data, the spatial-temporal variation of LAI and its influencing factors in Guangdong province from 2003 to 2020 were explored through Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test, Hurst index analysis and geographic detector. The results show that the variation of LAI annual mean exhibits a fluctuating upward trend (0.219/10a) from 2003 to 2020, and the LAI seasonal average in the descending order are winter (0.405/10a), spring (0.251/10a), autumn (0.139/10a) and summer (0.111/10a); spatially, high values of LAI are distributed in the northwest, while low values are distributed in the southeast, mainly in the Pearl River Delta and coastal economic zone. LAI shows a weakly sustainable and weakly anti-sustainable trend in the future. Moreover, the area with sustainability and improvement is larger than the area showing stability and degradation, indicating the strong possibility of improvement for vegetation in Guangdong province in the future. The main influencing factors of LAI in Guangdong province are elevation, population density and GDP, of which elevation has the most impact with an explanatory power of 16.9% for LAI spatial distribution. Moreover, the interaction of two factors could enhance the explanatory power of LAI spatial distribution in Guangdong province.

**Key words:** LAI; Theil-Sen Median trend analysis; Mann-Kendall significance test; Hurst index; geographic detector; interaction; spatio-temporal variation; Guangdong

## 0 引 言

植被是陆地最重要的生态系统,覆盖了地球大部分陆地表面并强烈地影响着地球生态环境,同时又反映了气候变化和人类活动的影响,是描述生态环境变化的重要参数之一<sup>[1-2]</sup>。植被指数不仅可以直接反映植被的生长情况,同时也是监测水土流失、土壤侵蚀以及土壤干旱等各种灾害的重要指标,被广泛用于生态环境监测、作物估产、土壤墒情监测等各种领域<sup>[3-4]</sup>。到目前为止,已有 40 多种植被指数被开发用于量化反映植被生长状况和表征植被结构<sup>[5-6]</sup>。现阶段针对植被动态变化的研究多基于归一化植被指数(Normalized Vegetation Index, NDVI)来反映植被的时空动态变化,但有研究表明,叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)在研究植被动态变化时更能反映植被的结构参数,可以更加真实有效地反映植被与其他因素相互作用的结果<sup>[7]</sup>。

叶面积指数是指单位地表面积上植被叶子总表面积占地表面积的倍数,是植被冠层的重要结构参数之一<sup>[8]</sup>。传统获取叶面积指数的方法通常是通过光学仪器进行实地测量,这种方式虽然能够准确获取数据,但存在耗时费力、时效性差及效率低等问题<sup>[9]</sup>。遥感技术能在较大空间和时间范围内对叶面积指数进行长时间、周期性观测,已被广泛用于监测区域和全球范围内的陆地植被生长<sup>[10]</sup>。大量研究

表明,叶面积指数在植物冠层结构<sup>[11]</sup>、作物种植密度<sup>[12]</sup>、作物产量评估<sup>[13]</sup>等研究领域已成为必不可少的重要参数。目前,叶面积指数时空特征研究主要集中在基于历史数据的时空变化定量分析<sup>[14-15]</sup>,极少对其时空变化趋势进行预测。并且,随着城市现代化进程加快,城市扩张和工业建设导致了土地利用类型的结构改变,人类活动造成的植被覆盖变化越来越突出<sup>[16]</sup>。现有研究大多使用线性相关分析的方法分别探讨叶面积指数与自然、社会影响因素之间的相关性,无法实现对不同类型影响因素作用力的量化,而且无法探究影响因素之间的协同作用<sup>[17-18]</sup>。地理探测器是探测空间分异性的方法,不仅能有效识别植被覆盖空间分异的主要因素,还能解释两个影响因素之间的交互关系<sup>[19-20]</sup>。因此,本文拟使用长时间序列的卫星遥感数据对广东省叶面积指数未来变化趋势进行探索,结合地理探测器量化评估自然因素和社会经济因素对叶面积指数空间分异的影响,从而更加科学地了解植被变化情况,为区域环境治理和生态环境改善提供参考。

广东省作为沿海开放省份,近年来随着城市化和工业化进程,植被覆盖发生了较大变化。许多学者针对广东省植被时空变化特征及其影响因素展开了研究,但现有研究多以归一化植被指数作为研究对象。例如,Shobairi 等以 2001~2010 年的 MODIS 归一化植被指数月度合成数据为主要信息源,

发现广东省植被覆盖时间趋势总体保持不变<sup>[21]</sup>;王思等基于 MOD13Q1 数据对 2000~2020 年广东省植被覆盖时空特征进行分析,发现广东省植被覆盖呈波动增长趋势且以中高植被覆盖为主<sup>[22]</sup>;徐勇等采用同样的数据产品分析了 2001~2019 年广东省时空格局变迁及变化,发现广东省植被覆盖呈现波动下降趋势,且呈上升趋势的面积略低于呈下降趋势的面积<sup>[23]</sup>;邓玉娇等则使用 2000~2018 年 MOD13A3 数据,揭示广东省植被动态变化与气温、降水和日照时数显著相关<sup>[24]</sup>。但是,高植被覆盖区的归一化植被指数存在易于饱和的缺陷,即植被指数不再随着植物的生长而继续增加,不利于反映真实的植被动态变化情况<sup>[25]</sup>。Ren 等研究认为,在气候变化的背景下,将叶面积指数作为陆地生态循环系统的重要参数,对植被的生长情况进行监测,并探究其与相关影响因素之间的关系已逐步成为研究重点<sup>[26]</sup>。为了评估广东省植被变化趋势及其影响因素,本文采用 MODIS 叶面积指数卫星遥感产品,结合地学分析手段,揭示广东省植被时空变化特征及其相关影响因素,以期为广东省生态环境格局的构建提供科学依据。

## 1 研究区概况

广东省位于中国南方,经度范围为 109°45'E~117°20'E,纬度范围为 20°09'N~25°31'N,面积为 179 700 km<sup>2</sup>,地理特征如图 1 所示。地势主要呈北高南低,地貌以山地、丘陵占优势,其中山地约占总面积的 35%,丘陵占 28.5%,台地占 15%。广东省辖内河流众多,集水面积大于 100 km<sup>2</sup> 的河流有 345 条,大于 1 000 km<sup>2</sup> 的有 38 条,这些河流分属于珠江、韩江、粤东沿海和粤西沿海水系。广东省从北向南跨越了中亚热带、南亚热带、热带 3 个温度带,气候类型主要为亚热带季风气候。在复杂多样的气候条件及优越的水热条件下,广东省植被类型丰富多样,主要为常绿阔叶林,包括南亚热带常绿阔叶林、中亚热带常绿阔叶林和石灰岩半绿常绿阔叶林等。该地区是我国物种多样性最高的地区之一,具有明显的地带性植被特征。在社会经济方面,根据《2021 年广东统计年鉴》<sup>[27]</sup>,广东省 2020 年末常住人口 12 624 万人,GDP 达 110 760.94 亿元,连续 32 年居全国首位。此外,广东省是中国进出口贸易规模最大的省份,也是粤港澳大湾区经济发展的引擎,是我国经济最为发达的省份之一。

## 2 数据来源与分析方法

### 2.1 数据来源

本文所使用的遥感数据为 MODIS 叶面积指数卫星遥感数据集(MCD15A2H),空间分辨率为 500 m,来自美国国家航空航天局(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。该产品从 2002 年 7 月开始采集,为 8 天最大值合成数据,避免了生长期、云雨天气和大气条件的影响,能有效表征植被覆盖状况<sup>[28]</sup>。

本文使用的气象数据来源于国家气象数据中心(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),经数据清洗和反距离权重插值后,形成了广东省各城市的气象数据。行政区数据下载自国家测绘地理信息局标准地图服务网站(<http://bzdt.ch.mmr.gov.cn/>),审图号为 GS(2020)1822 号。DEM(Digital Elevation Model)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。社会经济数据来源于《2021 年广东统计年鉴》(<http://stats.gd.gov.cn/>)。

### 2.2 分析方法

#### 2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析又被称为 Sen's 斜率,是由 Sen 提出的一种对数据误差有较强抵抗能力的非参数趋势分析方法,能逐像元地分析植被的波动规律和动态变化<sup>[29]</sup>。其计算公式为

$$S_{LAI} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad 1 \leq i < j \leq n \quad (1)$$

式中: $x_i$  和  $x_j$  分别为时间序列数据中时刻  $i$  和时刻  $j$  的数据值; $n$  代表本研究的时间序列长度,即 2003~2020 年; $S_{LAI}$  指示数据的变化趋势,当  $S_{LAI} > 0$  时,表示增长趋势,当  $S_{LAI} < 0$  时,表示下降趋势。

#### 2.2.2 Mann-Kendall 显著性检验

由于运用 Theil-Sen Median 趋势分析时缺乏对趋势的统计显著性检验,所以本文引入 Mann-Kendall 显著性检验进行评估。该方法是由 Mann 和 Kendall 提出的,是一种非参数统计检验,可以确定植被覆盖变化在时间序列上的趋势变化是否显著<sup>[30]</sup>。它不受离群值的影响,不需要服从正态分布,常用于分析水文和气候变化特征<sup>[31]</sup>。具体计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

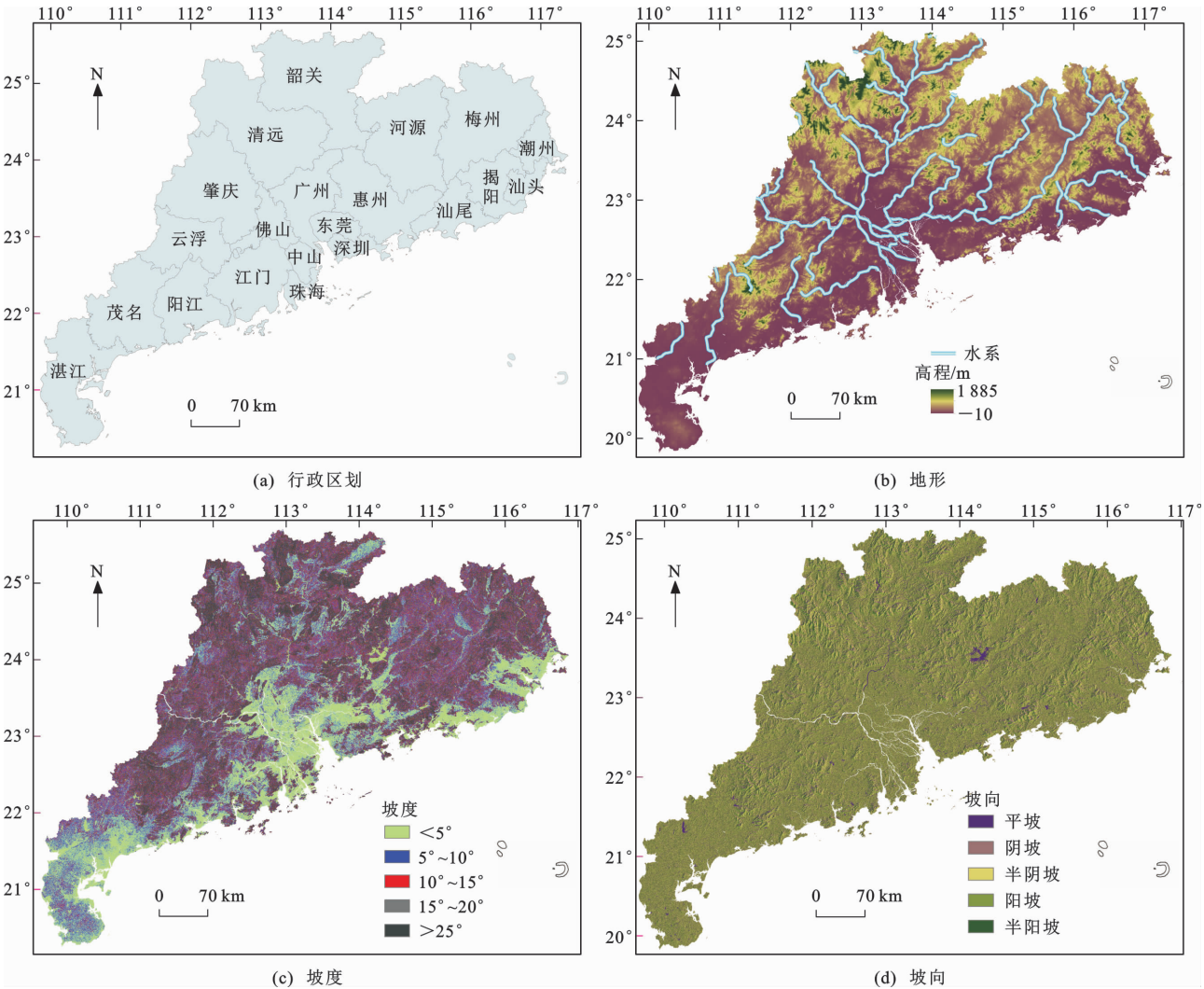


图 1 广东省地理特征

Fig. 1 Geographical Features of Guangdong Province

当  $n>10$  时,统计量  $S$  近似等于标准正态检验统计量( $Z$ ),可用于检验趋势。其表达式为

$$Z=\begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S<0 \end{cases} \quad (4)$$

$\text{Var}(S)=[n(n-1)(2n+5)-\sum_{p=1}^m t_p(t_p-1)(2t_p+5)]/18$  (5)  
式中: $m$  为时间序列数据中重复数据集的个数; $t_p$  为第  $p$  组中的重复数据集值。

当  $|Z|>Z_{1-a/2}$  时,可以拒绝零假设,意味着在该数据中存在一个显著的趋势;当  $|Z|<Z_{1-a/2}$  时,将接受趋势的零假设。本文将  $\alpha=0.05$  定义为给定的显著性水平,则  $Z_{1-a/2}=1.96$ 。

2.2.3 Hurst 指数

Hurst 指数由英国水文学家 Hurst 首先提出,

多用于研究长时间序列数据的变化趋势是否具有持续性特征,在水文学、气候学和地球化学等领域有着广泛应用<sup>[32]</sup>。其基本原理为:对于给定的叶面积指数时间序列  $\{I_{LAI,t}\},t=1,2,3,\cdots,n$ ,有任意时刻  $\tau\geq 1$ ,则可以构建该时刻的叶面积指数均值。

某一时刻  $\tau$  的叶面积指数均值( $\bar{I}_{LAI,\tau}$ )表达式为

$$\bar{I}_{LAI,\tau}=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}I_{LAI,t} \quad (6)$$

式中: $I_{LAI,\tau}$  为某一时刻  $\tau$  的叶面积指数, $\tau=1,2,3,\cdots,n$ 。

累积离差( $X_{(t,\tau)}$ )表达式为

$$X_{(t,\tau)}=\sum_{t=1}^{\tau}(I_{LAI,t}-\bar{I}_{LAI,\tau}) \quad 1\leq t\leq \tau \quad (7)$$

极差( $R_{(\tau)}$ )表达式为

$$R_{(\tau)}=\max_{1\leq t\leq \tau}X_{(t,\tau)}-\min_{1\leq t\leq \tau}X_{(t,\tau)} \quad (8)$$

标准差( $S_{(\tau)}$ )表达式为

$$S_{(\tau)}=[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(I_{LAI,t}-\bar{I}_{LAI,\tau})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

根据上述公式,定义  $R/S=R_{(\tau)}/S_{(\tau)}$ ,若有  $R/S \propto \tau^H$ ,则说明分析的时间序列具有 Hurst 现象。其中, $H$  即为 Hurst 指数,由  $\log(R/S)_n=a+H \times \log n$  拟合得到。叶面积指数序列的完全随机性和持续性由 Hurst 指数决定。当  $0<H<0.5$  时,表明叶面积指数序列具有反持续性,即将来会出现与之前相反的变化趋势;当  $H=0.5$  时,表明叶面积指数序列具有随机性;当  $0.5<H<1$  时,说明叶面积指数序列具有长期持续性,将来依然会保持与先前基本相同的走势,而且当  $H$  越接近 1,则对应着更强的持续性。

2.2.4 地理探测器模型

地理探测器由王劲峰等提出,是一种探测空间分异性,并解释其背后驱动力的统计学方法<sup>[33]</sup>。其核心思想为:如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应具有相似性。地理探测器既可以探测数值型数据、定性数据,也可以探测两因子交互作用于因变量。探测  $Y$  的空间分异性和探测某因素  $X$  多大程度上解释了属性  $Y$  的空间分异,一般用  $q$  值度量。其表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{10}$$

式中: $h=1,2,\cdots,L$ ,为变量  $Y$  或  $X$  的分层; $N_h$  和  $N$  分别为第  $h$  层和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  为第  $h$  层和全区  $Y$  值的方差; $q$  的值域为  $[0,1]$ ;当  $q=0$  时,说明  $X$  和  $Y$  之间不存在关联; $q$  值越大,说明  $Y$  的空间分异性越明显;当  $q=1$  时, $Y$  完全由  $X$  决定。

交互作用探测是评估因素  $X_1$  和  $X_2$  共同作用时是否会增强或者减弱对因变量  $Y$  的解释力,或者这些因素对因变量  $Y$  的影响是相互独立的。计算方法是:首先,评估两种因素  $X_1$  和  $X_2$  对  $Y$  的  $q$  值( $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ );然后,再计算这两种因素交互作用时的  $q$  值( $q(X_1 \cap X_2)$ );最后,对  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$  和  $q(X_1 \cap X_2)$  之间的关系进行比较。两个因素之间的关系可以分为 5 类,详见表 1。

3 结果分析

3.1 年际时空动态变化

图 2 为 2003~2020 年广东省叶面积指数年均值的时间序列变化趋势。由图 2 可知,广东省叶面积指数年均值变化范围为 1.94~2.63,研究期内叶面积指数平均值为 2.29,最高值出现在 2017 年(2.63),整体呈现波动上升趋势,增长率为 0.219/10a。广东省叶面积指数在 2005 年、2010 年、2012

表 1 地理探测器中交互关系的定义  
Table 1 Definition of Interaction Relationships in Geographical Detector

类型	判据	交互作用情况
类型一	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
类型二	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因素非线性减弱
类型三	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因素增强
类型四	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
类型五	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

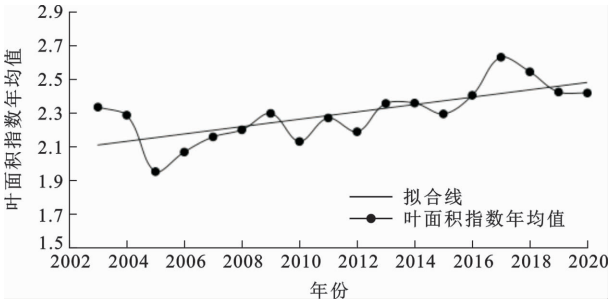


图 2 叶面积指数年均值变化

Fig. 2 Variation of LAI Annual Mean

年、2018~2020 年有所下降。姚新宇等研究指出,植被指数与降水之间有较为密切的关系<sup>[34]</sup>。而广东省在 2004 年末到 2005 年初、2010 年、2012 年等都发生了较为严重的旱情,这可能是叶面积指数下降的主要原因<sup>[35]</sup>。在经济发展带来生态环境破坏后,广东省十分重视城市绿化和植被保护,并于 2013 年启动了“新一轮绿化广东大行动”,实施了退耕还林、植树造林等一系列生态恢复措施,取得了显著效果,叶面积指数得到了一定的改善<sup>[36]</sup>。在整体上,广东省叶面积指数年均值的时间序列变化趋势与王思等基于归一化植被指数得到的广东省植被覆盖变化规律<sup>[22]</sup>一致,都表现为波动上升的趋势,一定程度上说明基于叶面积指数数据资料研究广东省植被覆盖和生态环境变化是可靠的。

利用 2003~2020 年广东省叶面积指数年均值可计算得出其多年平均值的空间分布(图 3)。由图 3 可知,广东省叶面积指数多年平均值变化范围为 0.11~5.30,总体为 2.30,呈现明显的空间分异特征。根据计算结果,将广东省叶面积指数空间分布分为 5 个等级。其中,低植被覆盖区(叶面积指数低于 1)占全省总面积的 14.44%,主要集中分布在珠江三角洲地区;中低植被覆盖区(叶面积指数介于 1~2)占全省总面积的 43.14%,主要分布在粤西地区和粤北梅州、清远地区;中高植被覆盖区(叶面积指数介于 3~4)占全省总面积的 20.21%,主要分布



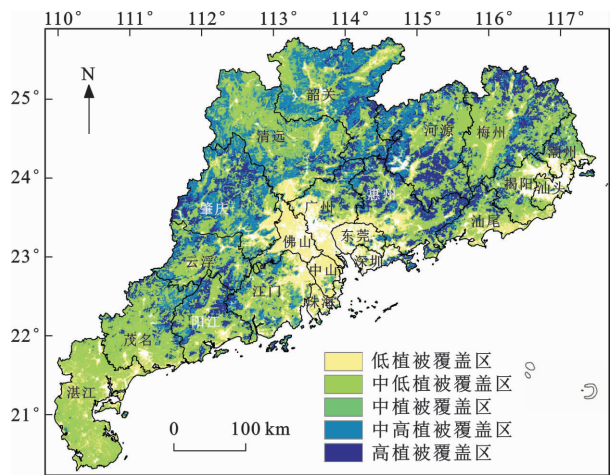


图 3 叶面积指数年均值空间分布特征

Fig. 3 Spatial Distribution Characteristics of LAI Annual Mean

在粤北韶关、清远地区和珠江三角洲的肇庆地区;中植被覆盖区(叶面积指数介于 2~3)和高植被覆盖区(叶面积指数高于 4)分别占全省总面积的7.43%和14.78%,无明显集中分布区域。整体来看,广东省主要以中低植被覆盖区和中高植被覆盖区为主,总体呈北部生态发展区植被覆盖高、沿海经济带植被覆盖低的特征。

Mann-Kendall 显著性检验可以确定植被覆盖变化在时间序列上的趋势变化是否显著,Theil-Sen Median 趋势分析则能逐像元地分析植被的波动规律和动态变化。结合 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验,对广东省 2003~2020 年叶面积指数年均值长时间序列的年变化趋势进一步分析,可以得到像元尺度上叶面积指数变化趋势。由于基本不存在叶面积指数变化趋势严格等于 0 的区域,所以本文参照已有研究<sup>[37-38]</sup>并结合实际情况,将 Theil-Sen Median 趋势分析结果介于-0.000 5~0.000 5的区域划分为稳定区域,小于-0.000 5的区域划分为退化区域,大于 0.000 5的区域划分为改善区域;将 Mann-Kendall 显著性检验在 0.05 置信水平下的显著性检验结果划分为显著变化( $|Z| > 1.96$ )和不显著变化( $|Z| \leq 1.96$ ),并据此将广东省叶面积指数变化趋势的空间分布划分为 5 种类型(图 4 和表 2)。结果表明:广东省植被覆盖严重退化、轻微退化、稳定、轻微改善和明显改善的区域分别占全省总面积的 2.79%、6.75%、1.06%、36.04%和 53.37%;广东省植被覆盖变化主要以改善为主,改善区域的面积占比为 89.41%。这种变化趋势与其他学者的研究结果基本一致,但

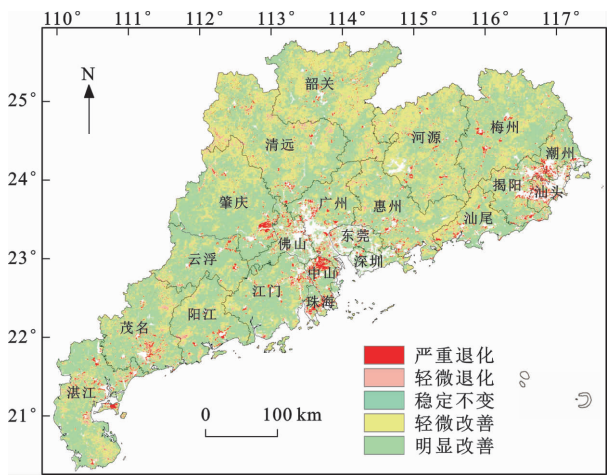


图 4 叶面积指数变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of LAI Variation Trends

表 2 叶面积指数变化趋势统计结果

Table 2 Statistical Results of LAI Variation Trends

类型	$S_{LAI}$	$ Z $	趋势变化类型	面积占比
类型一	$< -0.000\ 5$	$> 1.96$	严重退化	2.79%
类型二	$< -0.000\ 5$	$\leq 1.96$	轻微退化	6.75%
类型三	$-0.000\ 5 \sim 0.000\ 5$	$\leq 1.96$	稳定	1.06%
类型四	$> 0.000\ 5$	$\leq 1.96$	轻微改善	36.04%
类型五	$> 0.000\ 5$	$> 1.96$	明显改善	53.37%

改善区域面积占比(89.14%)与王思等使用 MOD13Q1 归一化植被指数产品分析得到的植被覆盖改善区域面积占比(78.18%)<sup>[22]</sup>和邓玉娇等使用 MOD13A3 归一化植被指数产品分析得到的植被改善区域面积占比(94.50%)<sup>[24]</sup>存在些许差异。造成差异的原因可能是:一方面,两位学者使用的植被指数、数据空间分辨率以及时间跨度与本研究均有所不同;另一方面,这两个研究使用了一元线性回归进行趋势分析,而本研究是基于 Theil-Sen Median 趋势分析进行的,分析方法的不同也会导致结果存在差异。植被覆盖严重退化区域主要是粤东潮汕地区和珠江三角洲中部地区,轻微改善区域主要在粤北地区,明显改善区域则主要在粤西地区,轻微退化和稳定区域则在研究区域内无明显集中分布的情况。

3.2 季节时空动态变化

将研究区 3 月至 5 月(春季)、6 月至 8 月(夏季)、9 月至 11 月(秋季)和 12 月至次年 2 月(冬季)的叶面积指数取平均值得到研究区各季节的叶面积指数,其中 2020 年冬季叶面积指数使用 2021 年 1 月和 2 月数据。广东省 2003~2020 年各季节的叶面积指数随时间变化趋势如图 5 所示。由图 5 可知,冬季和春季叶面积指数波动较大,而夏季和秋季变化平缓。叶面积指数季节均值在秋季最高,为

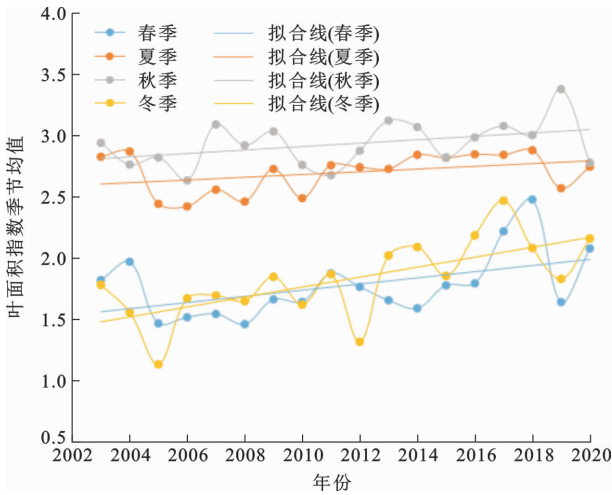


图 5 叶面积指数季节均值变化

Fig. 5 Variation of LAI Seasonal Average

2.93,其次为夏季(2.70)、冬季(1.82)和春季(1.78)。广东省叶面积指数季节均值增长率由大到小依次为冬季、春季、秋季、夏季,增长率分别为0.405/10a、0.251/10a、0.139/10a、0.111/10a。降水对植被的生长有强烈影响。广东省的降水主要集中在4月和9月(夏季和秋季),植被生长同期出现高值,因此,夏季和秋季叶面积指数较高<sup>[39]</sup>。

图6展示了广东省2003~2020年叶面积指数季节均值的空间分布。由图6可知,广东省叶面积指数季节性空间特征差异明显。春季和冬季主要以低植被覆盖区和中低植被覆盖区为主,春季两种植被覆盖区占全省总面积的63.98%,秋季占63.63%;夏季和秋季则以中低植被覆盖区、中植被覆盖区和高植被覆盖区为主,夏季3种植被覆盖区占全省总面积的83.17%,秋季占87.91%(表3)。珠江三角洲地区的植被覆盖远低于其他区域,原因可能是珠江三角洲地区是广东省主要的居住聚集地,植被在生长过程中受到人为因素的干扰较大,且珠江三角洲地区作为发展最快速的城市群,在其高度城镇化和经济发展的过程中,土地的利用类型发生了改变,大量的耕地转为经济价值更高的建设用地<sup>[39]</sup>。而

表 3 叶面积指数季节均值不同等级面积占比统计结果

Table 3 Statistical Results of Area Proportion of Different Grades of LAI Seasonal Average

季节	低植被覆盖区	中低植被覆盖区	中植被覆盖区	中高植被覆盖区	高植被覆盖区
春季	26.98%	37.00%	19.70%	15.94%	0.38%
夏季	8.27%	29.65%	25.19%	8.56%	28.33%
秋季	8.01%	29.64%	23.84%	4.08%	34.43%
冬季	37.31%	26.32%	11.26%	19.01%	6.11%

粤北地区作为珠江三角洲的生态屏障,是广东省用材林、水源林和重点毛竹基地,以常绿阔叶林为主,因此,粤北地区在各个季节的植被覆盖均高于其他区域<sup>[40]</sup>。

3.3 叶面积指数变化可持续分析

为预测广东省叶面积指数在未来的变化趋势,本文对2003~2020年广东省叶面积指数逐年时间序列数据进行Hurst指数分析(图7),并根据计算结果将其划分为6个等级(表4)。由表4可知,广东省叶面积指数逐年时间序列的Hurst指数最大值为0.973,最小值为0.104,主要以弱反持续性和弱持续性为主,分别占全省总面积的43.18%和40.12%。强反持续性和强持续性的区域较少,分别占比0.36%和1.79%。整体来看,Hurst指数小于0.5(反向持续特征)的像元数所占比例为49.95%;Hurst指数大于0.5(同向持续特征)的像元数所占比例为50.05%。这说明广东省植被变化特征在未来既存在反向趋势,也存在同向趋势,且两种变化趋势的面积占比相差不大。

表 4 叶面积指数逐年时间序列的 Hurst 指数统计结果

Table 4 Statistical Results of Hurst Indexes of LAI Year-by-year Time Series

Hurst 指数范围	持续性强度	面积占比
$0 < H < 0.25$	强反持续性	0.36%
$0.25 < H < 0.35$	中反持续性	6.41%
$0.35 < H < 0.50$	弱反持续性	43.18%
$0.50 < H < 0.65$	弱持续性	40.12%
$0.65 < H < 0.75$	中持续性	8.14%
$0.75 < H < 1.00$	强持续性	1.79%

为综合反映广东省植被变化趋势及未来变化的可持续性,本文将Hurst指数与广东省叶面积指数年际变化特征进一步耦合,得到广东省植被变化趋势的可持续性特征。耦合结果可划分为5种情形,即持续改善、持续退化、稳定不变、反持续改善和反持续退化(图8和表5)。结果表明:广东省植被覆盖未来变化趋势中,稳定不变区域的面积占比为1.06%;持续改善和持续退化区域的面积共占比49.51%,持续改善区域的面积占比43.78%,持续退化区域的面积占比5.72%;反持续改善和反持续退化区域的面积共占比49.43%,反持续退化区域的面积占比3.80%,反持续改善区域的面积占比45.63%。整体来看,持续改善区域的面积远大于持续退化区域的面积,说明广东省未来植被覆盖得到改善的可能性更大。



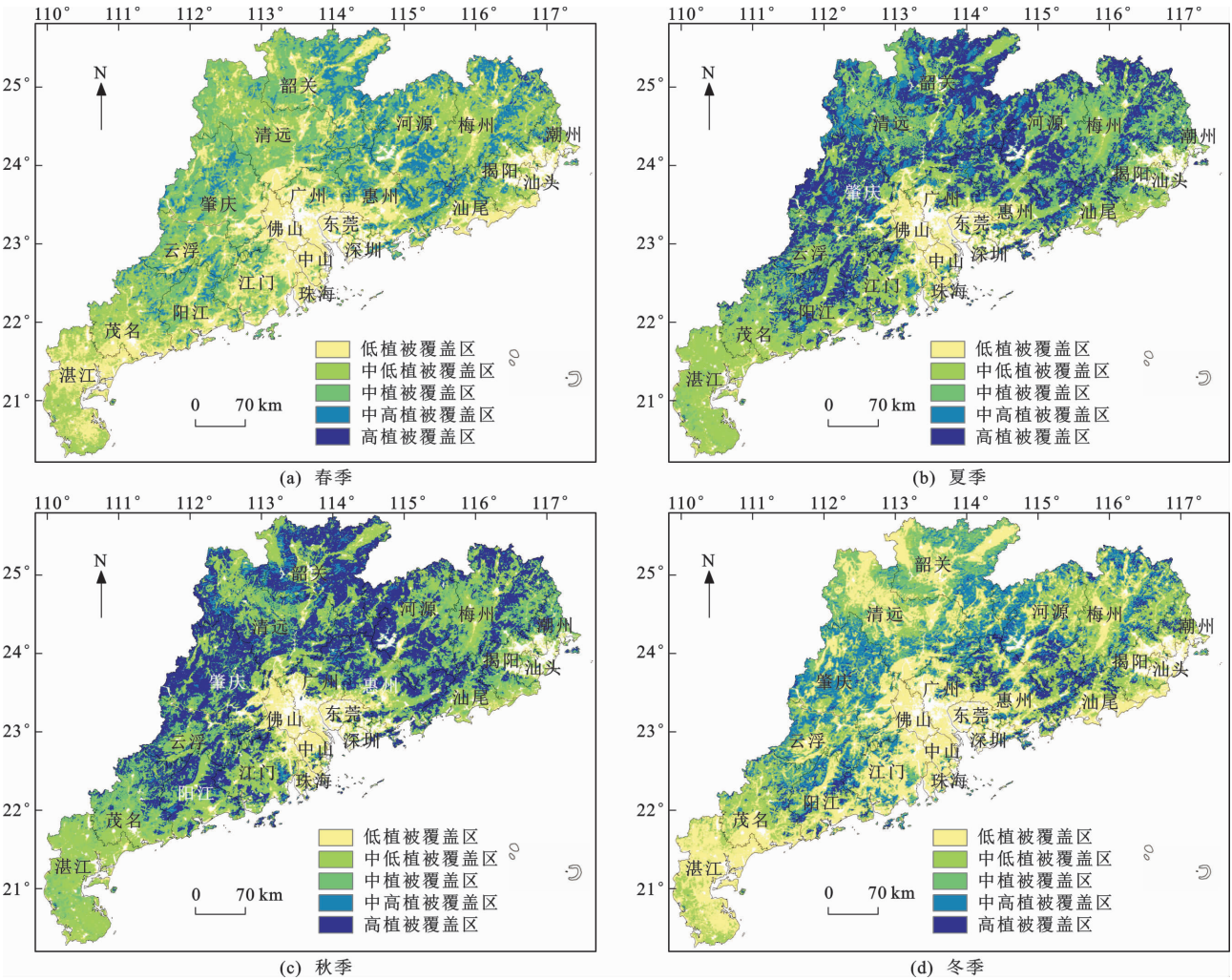


图 6 叶面积指数季节均值空间分布

Fig. 6 Spatial Distributions of LAI Seasonal Average

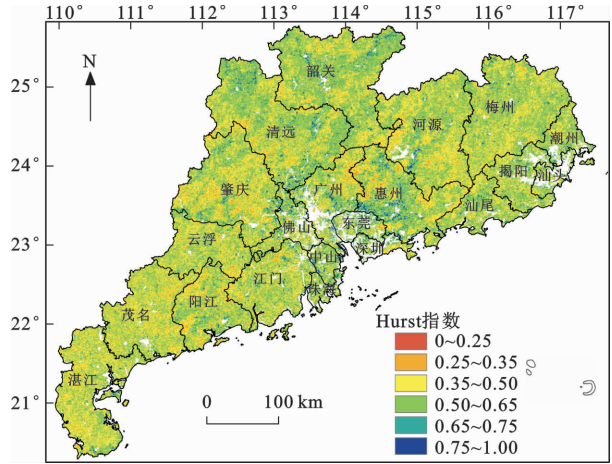


图 7 叶面积指数逐年时间序列的 Hurst 指数空间分布

Fig. 7 Spatial Distribution of Hurst Indexes of Year-by-year LAI Time Series

3.4 影响因素分析

3.4.1 因素影响

叶面积指数时空变化是多个因素协同作用后的

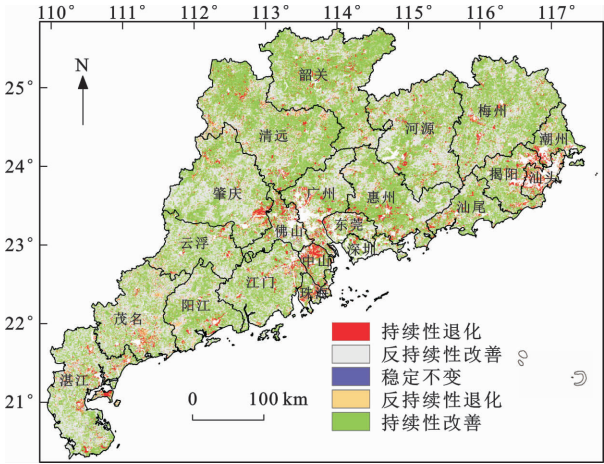


图 8 叶面积指数变化趋势持续性特征

Fig. 8 Characteristics of Sustainability of LAI Variation Trends

结果,因此,需综合考虑自然因素和社会因素对叶面积指数的影响<sup>[41]</sup>。基于地理探测器,本文选取研究区的高程( $X_1$ )、坡度( $X_2$ )、坡向( $X_3$ )、气温( $X_4$ )、降



表 5 叶面积指数变化趋势持续性统计结果  
Table 5 Statistical Results of Sustainability of LAI

Variation Trend			
$S_{LAI}$ 范围	Hurst 指数范围	类型	面积占比
$<-0.000\ 5$	$H>0.50$	持续退化	5.72%
$>0.000\ 5$	$H>0.50$	持续改善	43.78%
$-0.000\ 5\sim0.000\ 5$	$H=0.50$	稳定不变	1.06%
$<-0.000\ 5$	$H<0.50$	反持续退化	3.80%
$>0.000\ 5$	$H<0.50$	反持续改善	45.63%

水量( $X_5$ )、湿度( $X_6$ )、日照时数( $X_7$ )、GDP( $X_8$ )、人口数量( $X_9$ )、人口密度( $X_{10}$ )共 10 种因素,对影响叶面积指数变化的因素进行了探测。高程、坡度、坡向等 3 个因素是基于 ASTER GDEM V3 30 m 分辨率数字高程数据提取信息作为输入数据,其余因素均求取 2003~2020 年的均值作为输入数据,探测结果如图 9 所示。各因素对广东省叶面积指数空间分异的解释力  $q$  值从大到小依次为高程、人口密度、GDP、气温、降水量、日照时数、人口数量、坡度、湿度、坡向(除坡向和湿度外,其余各因素显著性检验值均小于 0.01)。高程是影响广东省叶面积指数空间分异最主要的影响因素,其  $q$  值为 0.169。坡向和湿度对叶面积指数空间分异的影响最小,且显著性检验值大于 0.01,说明坡向、湿度与叶面积指数之间没有明显的线性关系。在自然因素中,气温和降水量对研究区叶面积指数的解释力低于高程,原因可能是研究区处于热带和亚热带地区,常年气温较高,降水充沛,为植被生长提供了有利条件,故气温和降水量对植被空间分异的影响不明显<sup>[42]</sup>。此外,随着“退耕还林还草”政策的实施,人类活动对叶面积指数的影响力逐渐上升,GDP 和人口密度等社会因素比起自然因素更容易引起叶面积指数变化。

3.4.2 交互作用探测

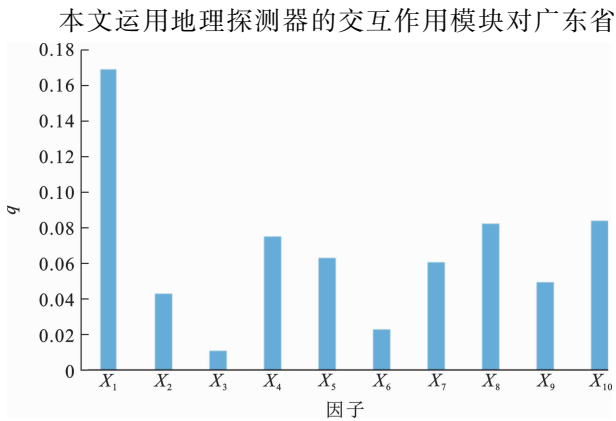


图 9 因素探测结果  
Fig. 9 Results of Factors Detection

叶面积指数影响因素进行了交互作用探测,评估双因素共同作用时是否会增强或者减弱对叶面积指数的解释力及因素作用是否相对独立(表 6)。结果表明:任意两种因素交互作用效果都表现为双因素增强或者非线性增强,双因素交互作用的  $q$  值均大于单因素作用。其中,高程和 GDP 的交互作用对广东省叶面积指数空间分异的解释力最强,高达 25.8%,是导致广东省叶面积指数空间分异最主要的交互因素。其次是高程和人口密度的交互、高程和日照时数的交互,分别解释了 25.5%和 24.9%的叶面积指数空间分异。湿度和人口数量的交互作用对叶面积指数空间分异的解释力最弱,二者呈非线性增强,解释力为 8.4%。由于自然因素、社会因素与叶面积指数之间存在着复杂的互馈效应,长时间序列的植被监测对于植被与生态环境之间的机理研究更加必要。

4 结 语

(1) 基于 MODIS-LAI 遥感数据产品,结合 2003~2020 年气象和社会经济数据,利用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验等方法,探究了近 20 年广东省植被动态变化及其影响因素。研究发现,2003~2020 年广东省叶面积指数呈增长趋势,增长率为 0.219/10a,且增长率具有季节差异,增长率从大到小依次为冬季、春季、秋季、夏季。这说明近 20 年来,广东省叶面积指数以微弱的趋势好转。尽管严重旱情的发生导致广东省植被覆盖在部分年份出现下降,且随着城市化的进程,大量耕地和林地向城乡、工矿和居民用地转化,植被覆盖也受到一定的影响,但自从退耕还林还草工程实施以来,广东省生态环境总体得到了较大的改善<sup>[43]</sup>。

(2) 广东省叶面积指数空间分布格局总体上呈现西北高、东南低的特征,高值区主要位于北部生态发展区,低值区主要位于东南沿海经济区。叶面积指数空间分布格局受到社会因素的制约,珠江三角洲城市群和东南沿海经济区随着城市扩张,人口大量涌入,引发了植被破坏等诸多环境问题,这也导致了该区域的叶面积指数较低<sup>[39]</sup>。因此,在叶面积指数低值区应制定合理的植被恢复措施,着重考虑人类活动对植被的干扰,选择生长快、适应性强且具有一定景观价值的植物种类。而对于植被覆盖较好的区域,在保证现有植物正常生长的前提下,可以适当增加植物的种类和生物多样性。

(3) 广东省叶面积指数未来的变化趋势主要以

表 6 因素交互作用结果  
Table 6 Results of Interaction Detectors

因素	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>
X <sub>1</sub>	0.169									
X <sub>2</sub>	0.215	0.043								
X <sub>3</sub>	0.217	0.100	0.011							
X <sub>4</sub>	0.240	0.147	0.130	0.075						
X <sub>5</sub>	0.248	0.153	0.127	0.113	0.063					
X <sub>6</sub>	0.244	0.136	0.102	0.128	0.128	0.023				
X <sub>7</sub>	0.249	0.153	0.129	0.128	0.127	0.128	0.061			
X <sub>8</sub>	0.258	0.186	0.147	0.117	0.128	0.127	0.106	0.082		
X <sub>9</sub>	0.233	0.129	0.102	0.127	0.128	0.084	0.105	0.128	0.050	
X <sub>10</sub>	0.255	0.166	0.143	0.120	0.128	0.128	0.121	0.121	0.120	0.084

弱持续性和弱反持续性为主。其中,持续改善区域的面积占比43.78%,远大于持续退化区域的面积(5.72%),说明广东省未来植被覆盖更有可能会继续改善。冯娴慧等通过预测粤港澳大湾区植被未来变化趋势得出,未来20年该地区一半以上的植被覆盖将面临退化风险<sup>[44]</sup>;王晓利通过对中国沿海地区的植被覆盖变化趋势进行持续性预测研究,得出华南沿海地区的植被覆盖将减少<sup>[45]</sup>。造成上述结果的原因是这些研究将Hurst指数分析结果中反持续改善区域定义为植被退化风险区域;实际上,反持续改善区域既有可能退化,也有可能保持不变,存在较大的不确定性。

(4)地理探测器分析结果表明,高程、人口密度和GDP分别可以解释16.9%、8.5%和8.3%的广东省叶面积指数空间分异,是影响广东省叶面积指数空间分异的主要因素。研究区在水热条件适宜的情况下,降水量和气温对植被的空间分异影响不明显<sup>[42]</sup>。阮柱基于地理探测器分析2000~2018年广东省植被变化的影响因素,发现随着时间的推移,气温对植被的影响呈现显著减弱趋势<sup>[46]</sup>,这和本文的研究成果较为一致。自然因素和社会因素对叶面积指数空间分异的解释力表现出差异性。而随着人类活动对地表环境的不断改造,人类活动既对植被覆盖增长起促进作用(如退耕还林还草政策),也会破坏植被覆盖使其退化(如城市扩张)。人类活动对叶面积指数的影响可能会逐渐超过自然因素,成为影响植被空间分异的主要因素。

参考文献:

References:

[1] SMITH A M S, KOLDEN C A, TINKHAM W T, et al. Remote Sensing the Vulnerability of Vegetation

in Natural Terrestrial Ecosystems[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 322-337.

[2] 李登科, 王 钊. 气候变化和人类活动对陕西省植被NPP影响的定量分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1071-1079.

LI Deng-ke, WANG Zhao. Quantitative Analysis of the Impact of Climate Change and Human Activities on Vegetation NPP in Shaanxi Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(6): 1071-1079.

[3] NOLASCO M, OVANDO G, SAYAGO S, et al. Estimating Soybean Yield Using Time Series of Anomalies in Vegetation Indices from MODIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(2): 405-421.

[4] SHARMA M, BANGOTRA P, GAUTAM A S, et al. Sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Land Surface Temperature, Soil Moisture and Precipitation over District Gautam Buddh Nagar, UP, India[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2022, 36(6): 1779-1789.

[5] 解 晗, 同小娟, 李 俊, 等. 2000~2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4536-4549.

XIE Han, TONG Xiao-juan, LI Jun, et al. Changes of NDVI and EVI and Their Responses to Climatic Variables in the Yellow River Basin During the Growing Season of 2000-2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4536-4549.

[6] 邱思静, 胡 涛, 胡熠娜, 等. 从光谱指数到融合数据集的全球植被遥感数据产品[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1102-1119.

QIU Si-jing, HU Tao, HU Yi-na, et al. Remote Sensing Based Global Vegetation Products: From Vegetation Spectral Index to Fusion Datasets[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1102-1119.

- [7] 刘洋,刘荣高,陈镜明,等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 734-743.  
LIU Yang, LIU Rong-gao, CHEN Jing-ming, et al. Current Status and Perspectives of Leaf Area Index Retrieval from Optical Remote Sensing Data[J]. Journal of Geo-information Science, 2013, 15(5): 734-743.
- [8] PARKER G G. Tamm Review: Leaf Area Index(LAI) Is Both a Determinant and a Consequence of Important Processes in Vegetation Canopies[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 477: 118496.
- [9] 曹中盛,李艳大,黄俊宝,等. 基于无人机数码影像的水稻叶面积指数监测[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(3): 308-317.  
CAO Zhong-sheng, LI Yan-da, HUANG Jun-bao, et al. Monitoring Rice Leaf Area Index Based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Digital Images [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2022, 36(3): 308-317.
- [10] ZHENG G, MOSKAL L M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors[J]. Sensors, 2009, 9(4): 2719-2745.
- [11] CLAUDIA G S, ALEXANDRA W, RAPHAEL P, et al. Biodiversity Facets Affect Community Surface Temperature via 3D Canopy Structure in Grassland Communities[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(5): 1969-1985.
- [12] 王全九,王康,苏李君,等. 灌溉施氮和种植密度对棉花叶面积指数与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 300-312.  
WANG Quan-jiu, WANG Kang, SU Li-jun, et al. Effect of Irrigation Amount, Nitrogen Application Rate and Planting Density on Cotton Leaf Area Index and Yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 300-312.
- [13] KANNING M, KUHLLING I, TRAUTZ D, et al. High-resolution UAV-based Hyperspectral Imagery for LAI and Chlorophyll Estimations from Wheat for Yield Prediction[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 2000.
- [14] PAUL M, RAJIB A, NEGAHBAN A M, et al. Improved Agricultural Water Management in Data-scarce Semi-arid Watersheds: Value of Integrating Remotely Sensed Leaf Area Index in Hydrological Modeling [J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148177.
- [15] MANUEL C T, FRANCISCO JAVIER G H, GUSTAU C V, et al. Multitemporal and Multiresolution Leaf Area Index Retrieval for Operational Local Rice Crop Monitoring [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 187: 102-118.
- [16] 季杨,蒋金豹. 长三角城市群城市扩张区环境质量变化遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1131-1146.  
JI Yang, JIANG Jin-bao. Remote Sensing Analysis of Environmental Change in Urban Expansion Area of Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1131-1146.
- [17] 戴声佩,罗红霞,郑倩,等. 基于MODIS LAI产品的海南岛橡胶林叶面积指数时空变化特征及其影响因素分析[J]. 中国农业信息, 2021, 33(2): 1-12.  
DAI Sheng-pei, LUO Hong-xia, ZHENG Qian, et al. Spatio-temporal Changes and Its Driving Factors of Leaf Area Index of Rubber Plantations in Hainan Island Based on MODIS LAI Data [J]. China Agricultural Informatics, 2021, 33(2): 1-12.
- [18] 吕泳洁,丁文广,邓喆,等. 基于地理探测器的甘肃省植被覆盖时空变化及驱动力分析[J]. 地球环境学报, 2022, 13(2): 185-195.  
LYU Yong-jie, DING Wen-guang, DENG Zhe, et al. Spatio-temporal Variation of Vegetation Cover and Its Driving Forces in Gansu Province Based on Geodetector[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(2): 185-195.
- [19] MENG X Y, GAO X, LI S Y, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Vegetation NDVI Changes and the Driving Forces in Mongolia During 1982—2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 603.
- [20] ZHAO W, YU X B, JIAO C C, et al. Increased Association Between Climate Change and Vegetation Index Variation Promotes the Coupling of Dominant Factors and Vegetation Growth[J]. Science of the Total Environment, 2021, 767: 144669.
- [21] SHOBAIRI S O, 荣媛,李明阳,等. 广东省植被覆盖度时空变化及驱动因素分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(1): 144-148.  
SHOBAIRI S O, RONG Yuan, LI Ming-yang, et al. Analysis of Spatial-temporal Dynamics and Driving Factors of Vegetation Fractional Coverage in Guangdong Province[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2017, 37(1): 144-148.
- [22] 王思,张路路,林伟彪,等. 基于MODIS归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2149-2163.  
WANG Si, ZHANG Lu-lu, LIN Wei-biao, et al. Study on Vegetation Coverage and Land-use Change of



- Guangdong Province Based on MODIS-NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2149-2163.
- [23] 徐 勇, 吴杰峰, 郭振东, 等. 2001~2019 年广东省植被 NDVI 时空演变特征及持续性分析[J]. *无线电工程*, 2021, 51(8): 691-698.
- XU Yong, WU Jie-feng, GUO Zhen-dong, et al. Spatial-temporal Variation of Vegetation NDVI in Guangdong Province from 2001 to 2019[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(8): 691-698.
- [24] 邓玉娇, 王捷纯, 徐 杰, 等. 广东省 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 37-43.
- DENG Yu-jiao, WANG Jie-chun, XU Jie, et al. Spatio-temporal Variation of NDVI and Its Response to Climatic Factors in Guangdong Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 37-43.
- [25] 吴国训, 阮宏华, 李显凤, 等. 基于 MODIS 反演的 2000~2011 年江西省植被叶面积指数时空变化特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1): 11-17.
- WU Guo-xun, RUAN Hong-hua, LI Xian-feng, et al. Spatial-temporal Variations of Leaf Area Index (LAI) in Jiangxi Province During 2000—2011 Based on MODIS Data[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 37(1): 11-17.
- [26] REN X Y, ZHANG M K, QIAN J C, et al. Analyzing Spatio-temporal Change in Ecosystem Quality and Its Driving Mechanism in Henan Province, China, from 2010 to 2020[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11742.
- [27] 广东省统计局, 国家统计局广东调查队. 2021 年广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Statistics Bureau of Guangdong Province, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Guangdong. *Guangdong Statistical Yearbook of 2021*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [28] 侯吉宇, 周艳莲, 刘 洋. 不同叶面积指数遥感数据模拟中国总初级生产力的时空差异[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(5): 1015-1027.
- HOU Ji-yu, ZHOU Yan-lian, LIU Yang. Spatial and Temporal Differences of GPP Simulated by Different Satellite-derived LAI in China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(5): 1015-1027.
- [29] JIANG W G, YUAN L H, WANG W J, et al. Spatio-temporal Analysis of Vegetation Variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [30] 马雄伟, 赵庆志, 姚顽强. 黄土高原植被对气候变化的时滞响应及其时变特征[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(1): 157-166.
- MA Xiong-wei, ZHAO Qing-zhi, YAO Wan-qiang. Time Lags of Vegetation to Climate Change and Temporal Characteristics in Loess Plateau[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(1): 157-166.
- [31] 易 浪, 任志远, 张 翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 166-174.
- YI Lang, REN Zhi-yuan, ZHANG Chong, et al. Vegetation Cover, Climate and Human Activities on the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 166-174.
- [32] LI S J, WANG J M, ZHANG M, et al. Characterizing and Attributing the Vegetation Coverage Changes in North Shanxi Coal Base of China from 1987 to 2020[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102331.
- [33] 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 Jin-feng, XU Cheng-dong. Geodetector: Principle and Prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [34] 姚新宇, 袁 飞, 张利敏, 等. 赣江上游区 LAI 时空变化及其与气候要素的关联性分析[J]. *水文*, 2020, 40(4): 46-52.
- YAO Xin-yu, YUAN Fei, ZHANG Li-min, et al. Spatio-temporal Variation of LAI and Its Relationship with Climate Change in the Upper Ganjiang River Region[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(4): 46-52.
- [35] 李维娇, 王云鹏. 基于 VCI 的 2003~2017 年广东省干旱时空变化特征分析[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(3): 85-91.
- LI Wei-jiao, WANG Yun-peng. An Analysis of the Spatial-temporal Characteristics of Drought in Guangdong Based on Vegetation Condition Index from 2003 to 2017[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 52(3): 85-91.
- [36] 姜 春, 吴志峰, 程 炯, 等. 气候波动和土地覆盖变化对广东省植被净初级生产力的相对影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(4): 397-405.
- JIANG Chun, WU Zhi-feng, CHENG Jiong, et al. Relative Effects of Climatic Fluctuation and Land Cover Changes on Net Primary Productivity of Vegetation in Guangdong Province[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2016, 24(4): 397-405.
- [37] 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.
- YUAN Li-hua, JIANG Wei-guo, SHEN Wen-ming, et al. The Spatio-temporal Variations of Vegetation Cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [38] 代子俊, 赵 霞, 李冠稳, 等. 2000~2015 年青海省植被覆盖的时空变化特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 54-65.
- DAI Zi-jun, ZHAO Xia, LI Guan-wen, et al. Spatial-temporal Variations of Vegetation Coverage in Qinghai from 2000 to 2015[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2018, 46(7): 54-65.
- [39] 何全军. 基于 MODIS 数据的珠三角地区 NDVI 时空变化特征及对气象因素的响应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1722-1730.
- HE Quan-jun. Spatio-temporal Variation of NDVI and Its Response to Meteorological Factors in Pearl River Delta Based on MODIS Data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9): 1722-1730.
- [40] 陈传国, 薛春泉, 汪求来, 等. 基于 2017 年森林资源连续清查样地的广东省典型植被型植物多样性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(2): 60-65.
- CHEN Chuan-guo, XUE Chun-quan, WANG Qiu-lai, et al. Diversity of Typical Vegetation Types in Guangdong Province Based on Continuous Forest Inventory in 2017 [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2020, 36(2): 60-65.
- [41] 黄 辉, 郑昌玲, 孟 平, 等. 2001~2019 年太行山南麓栓皮栎人工林叶面积指数与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1646-1654.
- HUANG Hui, ZHENG Chang-ling, MENG Ping, et al. Relationship Between Leaf Area Index and Climate Factors in a *Quercus Variabilis* Plantation at the Southern Foot of Taihang Mountain from 2001 to 2019 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1646-1654.
- [42] 李国洋, 徐启恒, 陈宽文, 等. 2005~2015 年广东省森林生态系统净初级生产力时空变化特征[J]. 气象科技进展, 2020, 10(3): 62-65, 68.
- LI Guo-yang, XU Qi-heng, CHEN Kuan-wen, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Net Primary Productivity of Forest Ecosystem in Guangdong Province from 2005 to 2015[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(3): 62-65, 68.
- [43] 刘逸滨, 刘宝元, 成 城, 等. 退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 197-208, 218.
- LIU Yi-bin, LIU Bao-yuan, CHENG Cheng, et al. Spatio-temporal Changes and Influencing Factors of Vegetation Coverage in Yulin City During the Past 20 Years Since the Implementation of the "Grain for Green" Program[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 197-208, 218.
- [44] 冯娴慧, 曾芝琳, 张德顺. 基于 MODIS NDVI 数据的粤港澳大湾区植被覆盖时空演变[J]. 中国城市林业, 2022, 20(1): 1-6, 28.
- FENG Xian-hui, ZENG Zhi-lin, ZHANG De-shun. Temporal-spatial Evolution of Vegetation Coverage in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area Based on MODIS NDVI Data[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2022, 20(1): 1-6, 28.
- [45] 王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- WANG Xiao-li. Variation of Extreme Climate and Its Impact on NDVI in the Coastal Area of China[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [46] 阮 柱. 基于 NDVI 重构的广东省 NDVI 变化及其驱动因素分析[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2021.
- RUAN Zhu. Analysis of Vegetation Changes and Driving Factors in Guangdong Province Based on the Reconstructed NDVI[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2021.