



基于GEE平台的海南岛植被覆盖度时空变化和影响因子探测

郭建超, 张林, 齐实, 陈家东, 李鹏, 王懋源

引用本文:

郭建超, 张林, 齐实, 等. 基于GEE平台的海南岛植被覆盖度时空变化和影响因子探测[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(5): 503–512.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4916>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全球气候变暖胁迫下的雅鲁藏布江流域植被覆盖度变化驱动机制探讨

Driving Mechanism of Vegetation Coverage Change in the Yarlung Zangbo River Basin under the Stress of Global Warming
热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 209–217 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3685>

一种改进的中国水资源空间网格化方法

An Improved Gridded Water Resource Distribution for China
热带亚热带植物学报. 2019, 27(3): 261–271 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3966>

海南岛油茶种质资源遗传多样性的SRAP分析

Genetic Diversity Analysis of Camellia oleifera Resources Based on SRAP Markers in Hainan Island
热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 659–668 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4027>

模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展

Effects of Simulated Atmospheric Nitrogen Deposition on Forest Ecosystems in China: An Overview
热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 500–522 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4113>

金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River
热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

向下翻页，浏览PDF全文

基于 GEE 平台的海南岛植被覆盖度时空变化和影 响因子探测

郭建超¹, 张林², 齐实², 陈家东^{1*}, 李鹏², 王懋源²

(1. 海南省水利水电勘测设计研究院有限公司, 海南 570203; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 植被是陆地生态系统重要的一部分, 研究植被覆盖度的时空变化特征及其影响因子对于区域生态保护和治理具有重要意义。该文采用 GEE (Google Earth Engine) 平台, 借助像元二分模型计算了 2000—2020 年海南岛植被覆盖度(FVC), 通过 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数等方法分析了 FVC 的时空变化特征, 最后采用结构方程模型和地理探测器分析气候、地形和人类活动等因子对植被空间变化的影响。结果表明, 海南岛近 21 a 的 FVC 呈显著增加趋势, 增速为 0.025/10 a。植被变化以不显著改善和极显著改善为主, 占研究区的 35.34%和 29.38%。未来植被变化以弱反持续性增加和弱持续性增加为主。土地利用类型、海拔、坡度和人口密度是影响 FVC 空间分布的主要驱动因子。各影响因子对 FVC 以双因子增强或者非线性增强为主, 其中, 土地利用类型 $\cap$ 人口密度和土地利用类型 $\cap$ 海拔的交互作用较强, q 值为 49.56% 和 48.38%。这可为海南岛植被恢复策略提供理论依据。

关键词: 植被覆盖度; Google Earth Engine; 时空变化; 影响因子; 地理探测器

doi: 10.11926/jtsb.4916

CSTR:32235.14.jtsb.4916

Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of Fractional Vegetation Cover in Hainan Island Based on Google Earth Engine Platform

GUO Jianchao¹, ZHANG Lin², QI Shi², CHEN Jiadong¹, LI Peng², WANG Maoyuan²

(1. Hainan Province Water Conservancy and Hydropower Survey Design and Research Institute Co. Ltd, Haikou 57100, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Vegetation is an important part of terrestrial ecosystems, and the study of the spatial and temporal variation characteristics of fractional vegetation cover (FVC) and its influencing factors is of great significance for regional ecological conservation and management. By using the Google Earth Engine (GEE) platform and pixel binary model, the FVC of Hainan Island from 2000 to 2020 was calculated. The spatial and temporal variability of the FVC was analyzed using the Theil-Sen Median trend analysis, the Mann-Kendall test and the Hurst index. Finally, structural equation modelling and geographic detector were used to analyze the response mechanisms of the spatial distribution characteristics of FVC in Hainan Island to climate, topography and human activities. The results showed that FVC in Hainan Island had a significant increasing trend in the past 21 years, with a growth rate of 0.025/10 a. The FVC changes were mainly not significantly improved and extremely significantly improved, accounting for 35.34% and 29.38% of the study area. In the future, the vegetation changes was dominated by weak counter-persistent increase and weak persistent increase. Land use type, elevation, slope, and population density were the dominant factors affecting the spatial distribution of FVC. Interaction type was

收稿日期: 2024-03-19

接受日期: 2024-09-19

基金项目: 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2021033)资助

This work was supported by the Project for Major Science and Technology in Hainan (Grant No. ZDKJ2021033).

作者简介: 郭建超(1988 年生), 男, 高级工程师, 主要从事水土保持治理研究。E-mail: 1822892459@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjdnsy@163.com

dominated by bivariate enhancement and nonlinear enhancement. The interaction between land use type $\cap$ population density and land use type $\cap$ elevation was stronger, with q values of 49.56% and 48.38%. Therefore, it might provide a theoretical basis for the vegetation restoration policy on Hainan Island.

Key words: Vegetation cover; Google Earth Engine; Spatial and temporal variation; Influencing factor; Geographic detector

植被作为森林群落的重要组成部分,其微小变化会对区域生境质量和全球气候产生深远影响^[1-2]。因此,科学合理的评估植被覆盖度的时空变化规律并探讨其驱动机制,对区域生态保护和维持生态平衡具有重要意义。植被覆盖度的时空变化受气候、地形地貌、人类活动等多重因素综合影响^[3-5],探究植被覆盖度的时空变化已成为生态学、林学、环境保护学等学科研究领域持续关注的热点^[6]。其中,在区域大尺度范围内,气候因子被广泛认为是限制植被覆盖度时空变化的主导因素^[7-8],特别是降雨和气温等因子对植被生长起决定作用。Ren 等^[9]基于 MYD13Q1 NDVI 数据和年均气温、降水等数据分析了 2000—2020 年黄河流域的植被覆盖度变化特征,认为降雨和气温是影响植被变化的主导因子;Zhu 等^[10]研究认为,植被变化主要受年均气温和降水量共同影响;Bai 等^[11]研究认为,温度是限制植被生长的关键因素。而在区域小尺度范围内,海拔、坡度、坡向等地形因子在控制植被变化中起着决定作用,特别是海拔梯度和土壤类型的时空变化对区域植被变化的演替发挥极其重要的作用^[12-13]。张会霞等^[14]、银朵朵等^[15]证实海拔和坡度等地形因子对植被变化起重要作用。此外,人类活动对植被覆盖度的时空变化会产生重要影响,如土地利用变化、人口密度、社会经济等因素^[16-17]。以前多采用线性分析和相关分析等方法对植被覆盖时空变化进行研究,并且在影响因子的选择上,气候、地形、土壤和人类活动对植被变化的耦合影响少有分析,这难以合理解释影响植被变化的关键因素。因此,选择科学合理的统计方法探究植被的变化趋势和驱动因素来说至关重要。结构方程模型对于处理复杂变量具有巨大优势,目前在研究气候、地形和人类活动等因素对植被变化的影响报道较少。地理探测器不仅可以解决单个影响因子对植被变化的贡献,还可以探测多因子对植被变化的交互影响^[18-20]。因此,结构方程模型和地理探测器模型可用于探究多个复杂变量对植被变化的影响。

海南岛植物多样性丰富,生态系统复杂多样,气候变化和人类活动会对区域生境质量产生深远影响,因此,定量分析气候、地形以及人类活动等因素对植被覆盖度的影响是极其重要的。本文应用 GEE (Google Earth Engine) 平台,采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、变异系数、Hurst 指数等方法定量分析海南岛植被覆盖度的时空变化和未来植被变化趋势特征;结合结构方程模型和地理探测器量化各影响因子对海南岛植被变化的影响,从而为海南省的植被保护和生态恢复提供科学理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

海南岛位于中国的最南部,位于 108°38′~111°05′ E, 18°10′~20°10′ N,全岛年均温为 22 °C~27 °C,年均降水量在 1 600 mm 以上。植被物种丰富,生态系统复杂多样。耕地、建筑用地主要分布于四周沿海平原区域,林地和园地主要分布在中部和南部地区。全岛土壤类型以砖红壤、水稻土、赤红壤等为主。

1.2 数据来源

植被覆盖度采用 GEE 平台(<https://code.earthengine.google.com/>)通过像元二分模型计算得到^[21-22],共得到 21 张影像数据,该影像分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d,2000—2013 年使用了 Landsat5 数据,2013—2020 年使用了 Landsat8 数据;使用自然间断点法将影响因子进行连续的数据重分类,影响植被变化的因子数据来源见表 1。

1.3 方法

像元二分模型 本研究基于像元二分模型对研究区植被覆盖度(FVC)进行计算^[23], $FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$,式中, $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 分别为完全植被覆盖和无植被覆盖像元的 NDVI 值。

Theil-Sen 趋势分析法 是一种非参数斜率

表 1 驱动因子数据来源

Table 1 Potential factors driving FVC in this study

数据类型 Data type	标号 Code	因子 Factor	单位 Unit	分辨率 Original resolution	来源 Source
气候 Climate	X1	年均降水量	℃	30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
	X2	年均气温	℃	30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
地形 Topography	X3	坡向	°	30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
	X4	坡度	°	30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
	X5	海拔		30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
人类活动 Human activity	X6	土地利用类型		30 m	中国科学院资源环境科学中心 http://westdc westgis.ac.cn/
	X7	人口密度		90 m	中国科学院资源环境科学中心 http://westdc westgis.ac.cn/
土壤 Soil	X8	土壤类型		90 m	中国科学院资源环境科学中心 http://westdc westgis.ac.cn/

估计方法, 不易受异常值影响, 能够直观有效地反映时间序列变化趋势^[24]。其变化斜率 $S_{FVC}>0$, 表示植被变化具有上升趋势, 反之下降。 $S_{FVC}=\text{median} [(FVC_j-FVC_i)/(j-i)]$, 式中, FVC_j 、 FVC_i 分别为 i 、 j 时间序列的 FVC 数值。

Mann-Kendall (MK) 显著性检验 可判断变化趋势是否具有显著性^[25], 计算公式为:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases}, \quad \text{sign}(FVC_i - FVC_j) = \begin{cases} 1 & (FVC_i - FVC_j) > 0 \\ 0 & (FVC_i - FVC_j) = 0, \text{ 当 MK 检验统计量的绝对值} \\ -1 & (FVC_i - FVC_j) < 0 \end{cases}$$

对值大于 2.56 时, 表明变化趋势在 0.01 水平上显著; 当绝对值大于 1.96 时, 表明变化趋势在 0.05 水平上显著; 绝对值小于 1.96 时, 变化趋势不显著^[26]。将变化斜率 S_{FVC} 和 MK 检验结果叠加分析, FVC 变化趋势划分为显著减少、轻微减少、无显著变化、轻微增加和显著增加 5 种类型。

变异系数(CV)是标准差和平均值的比值, 能够反映研究区植被变化的稳定程度^[27], $CV=\sigma/FVC$, 式中, σ 为植被覆盖度的标准差, FVC 为植被覆盖度的平均值。CV 值反映了植被覆盖度年际变化的稳定程度。可将稳定性等级分为: 低波动变化($CV<5\%$)、相对低波动变化($5\%\leq CV<10\%$)、中度波动变化($10\%\leq CV<15\%$)、相对较高波动变化($15\%\leq CV<20\%$)、高波动变化($CV\geq 20\%$)^[28]。

Hurst 指数 可以预测海南岛 FVC 未来变化

趋势, 目前被广泛运用于气象、水文以及生态学等领域长时间序列变化过程^[29], 计算公式为:

Standard deviation: $S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_t)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

$\tau=1, 2, \dots$, Hurst index: $\frac{R_{\tau}}{S_{\tau}} = c\tau^H$, 式中, c 为关系

常数, H 为 Hurst 指数。结合 S_{FVC} 值和 H 值预测海南岛植被覆盖度未来的演变趋势, 可将植被覆盖度未来的演变趋势分为: 强持续性增加、强持续性减少、弱持续性增加、弱持续性减少、弱反持续性增加、弱反持续性减少、强反持续性增加、强反持续性减少^[29]。

结构方程模型 对于处理多个复杂变量具有巨大优势, 包括测量模型和结构模型 2 个部分, $X=\Lambda x\xi+\delta$ 和 $Y=\Lambda y\eta+\varepsilon$ 为测量模型, 用于描述潜变量与观察变量之间的关系, $\eta=B\eta+\Gamma\xi+\zeta$ 为结构模型, 用来反映潜变量间的相互关系^[30]。 X 表示外生观察变量; Y 表示内生观察变量; η 表示内生潜变量; Λx 和 Λy 分别表示变量 X, Y 的因子负荷量; δ 和 ε 分别表示外生观察变量和内生观察变量的测度; ξ 表示外生潜变量; B 表示反映内生潜变量间关系的结构系数矩阵; Γ 表示反映内生潜变量和外生潜变量之间的关系的结构系数矩阵; ζ 表示结构模型中的残差。

地理探测器 是一种探测事件空间分层异质性和揭示其背后驱动力的统计学方法, 常用于空间分层异质性的影响因素和作用机制的研究, 本研究采用因子探测、交互作用探测、风险探测 3 个模块来分析植被覆盖度时空变化的驱动因素。因子探测器主要用来探测植被覆盖度的空间分层异质性和不同因子对植被覆盖度空间分异性的解释程度,

其解释力大小用 q 值衡量, 根据 q 值大小可看出各因子对植被覆盖度影响的大小, 能够直观判断植被

覆盖度的主导因子^[31]。 $q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$, 式中, q 代表各因子对空间分异的解释力; L 代表各因子的分层数目; N 代表样本总数; N_h 代表因子分区内样本数目; σ^2 代表样本总方差; σ_h^2 代表因子区域内样本方差。交互作用探测器主要用于识别不同因子两两交互作用对植被覆盖度的影响^[31]。通过对比单因子 q 值及交互作用 q 值即可判断因子间交互影响类型(表 2)。

表 2 影响因子交互类型

Table 2 Interaction types of impact factors

交互关系 Interaction relationship	交互类型 Interaction types
$qX1 \cap X2 < \min(qX1, qX2)$	非线性减弱
$\min(qX1, qX2) < qX1 \cap X2 < \max(qX1, qX2)$	单因子减弱
$qX1 \cap X2 > \max(qX1, qX2)$	双因子增强
$qX1 \cap X2 = qX1 + qX2$	独立
$qX1 \cap X2 > qX1 + qX2$	非线性增强

2 结果和分析

2.1 海南岛植被覆盖度时空变化特征

2000—2020 年间, 海南岛植被覆盖度总体呈现增长态势(图 1), 增速为 0.025/10 a, 2000 年的 FVC 为 0.76, 2020 年增加到 0.81, 增长率为 6.57%; 研究区植被覆盖整体较高, 年均 FVC 大于 0.8 的区域占全岛的 83.2%, 主要分布在琼中、五指山等中部

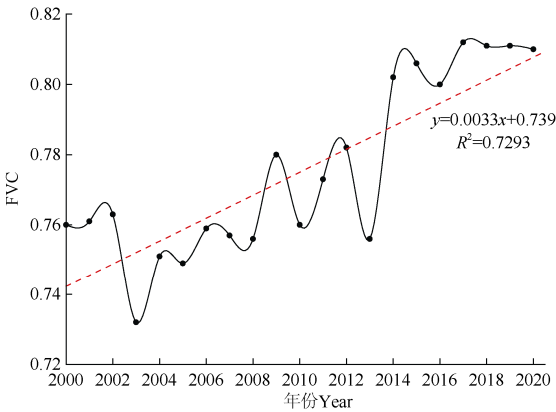


图 1 2000—2020 年海南岛年均植被覆盖度(FVC)的年际变化
Fig. 1 Interannual variation of average annual vegetation coverage (FVC) in Hainan from 2000 to 2020

山区。而植被覆盖较低的区域主要分布在海口、三亚等沿海城市。

研究区植被覆盖度为-0.05~0.04, 呈增加趋势的面积占比较大, 为 81.16%, 呈减少趋势的面积占比较少, 为 18.93%(表 3)。结合变化趋势显著性检验可知(图 2: A), 海南岛植被覆盖变化主要以不显著改善和极显著改善为主, 比重分别为 35.34%和 29.38%。不显著退化的面积占比为 16.79%。

表 3 植被覆盖度变化显著性统计

Table 3 Statistical of significance of FVC change

变化趋势 Change trend	显著性 Significant	变化类型 Change type	%
$\beta < 0$	$P < 0.01$	极显著减少	3.24
$\beta < 0$	$0.01 \leq P < 0.05$	显著减少	2.33
$\beta < 0$	$P \geq 0.05$	不显著减少	16.79
$\beta > 0$	$P \geq 0.05$	不显著增加	35.34
$\beta > 0$	$0.01 \leq P < 0.05$	显著增加	12.91
$\beta > 0$	$P < 0.01$	极显著增加	29.37

2.2 植被变化稳定性及未来变化趋势

研究区内植被覆盖度的变异系数为 0.005~4.58, 均值为 0.06, 低波动变化、较低波动变化的区域占比较大, 分别为 47.63%和 41.55%, 主要分布在中部山区和人类活动较少的区域。而中等波动变化、较高波动变化和高波动变化的占比较少, 主要分布在人为活动较强的沿海区域和城镇开发区域。结合 β 值和 Hurst 指数预测海南岛未来植被变化趋势, Hurst 指数范围为 0.06~0.98, 平均值为 0.51, 说明海南岛植被以弱持续性为主。从持续性特征上看, 海南岛植被覆盖度呈弱反持续性和弱持续性的面积占比较大, 分别为 45.15%和 53.17%; 强持续性和强反持续性的面积占比较少, 分别为 1.38%和 0.29%。由图 2: B 和表 4 可知, 海南岛植被覆盖度未来呈上升趋势的面积占比为 52.16%, 呈下降趋势的面积占比为 47.84%。其中, 弱反持续性增加和弱持续性增加的面积占比较大, 分别为 36.79%和 42.62%; 而强持续性减少和强反持续性增加的面积占比最小, 均为 0.25%。

2.3 影响植被变化的结构方程模型

使用结构方程模型检验年均气温、地形以及人类活动等因素对植被覆盖度变化的耦合影响。结构方程模型的路径显示, 年均气温、地形和人类活动对植被覆盖度变化均有显著影响, 总路径系数分别为 0.18 ($P < 0.05$)、0.27 ($P < 0.05$)和 0.52 ($P < 0.01$)。地

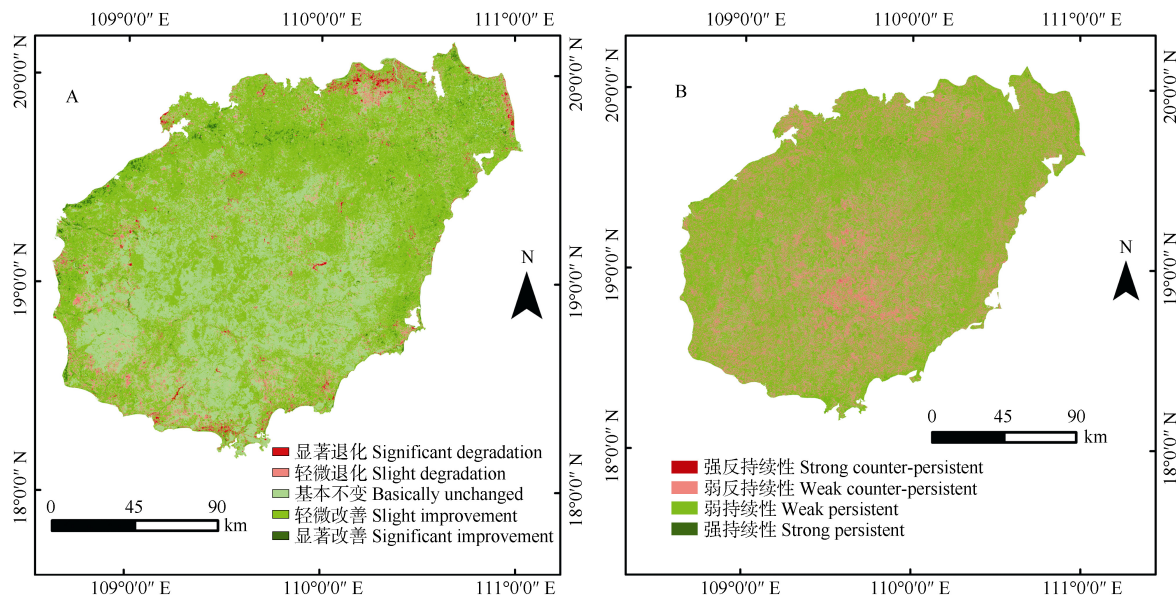


图 2 植被覆盖变化趋势的空间分布(A)和未来趋势(B)

Fig. 2 Spatial distribution (A) and future trend (B) of FVC change

表 4 FVC 变化趋势持续性

趋势改变 Change trend	持续性 Persistence	改变类型 Change type	%
$\beta < 0$	$0.75 \leq H < 1$	强持续减少	0.25
$\beta < 0$	$0.50 \leq H < 0.75$	弱持续减少	10.54
$\beta < 0$	$0.25 \leq H < 0.50$	弱反持续减少	8.36
$\beta < 0$	$0 < H < 0.25$	强反持续减少	0.03
$\beta > 0$	$0.75 \leq H < 1$	强持续增加	0.25
$\beta > 0$	$0.50 \leq H < 0.75$	弱持续增加	36.79
$\beta > 0$	$0.25 \leq H < 0.50$	弱反持续增加	42.62
$\beta > 0$	$0 < H < 0.25$	强反持续增加	1.13

形对年均气温和人类活动的路径系数分别为−0.08 ($P>0.05$)和−0.11 ($P>0.05$) (图 3)。地形对植被覆盖度变化不仅存在直接影响, 还通过其他因子的作用间

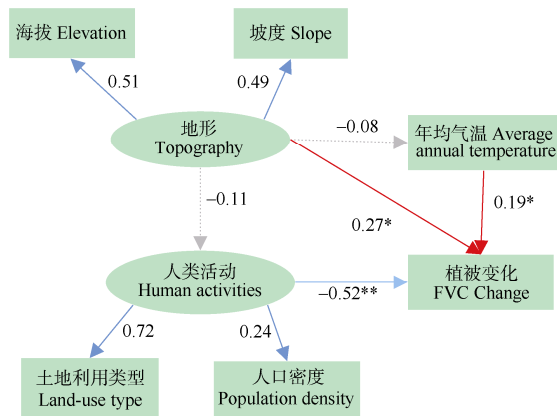


图 3 影响植被覆盖度变化的结构方程模型

Fig. 3 Structural equation model affecting changes in vegetation coverage

接影响植被覆盖度。地形对植被覆盖度变化的直接效应为 0.27, 间接效应为−0.09; 年均气温和人类活动对植被覆盖度变化仅存在直接效应, 直接效应分别为−0.52 和 0.19 (表 5)。

2.4 植被变化影响因子探测

因子探测 因子探测器反映了各因子对海南岛植被变化影响依次为土地利用类型>海拔>坡度>人口密度>年均气温>年均降雨量>土壤类型>坡向。土地利用类型的 q 值最大, 解释力达到了 46.97%, 因此, 土地利用变化是影响海南岛植被变化的主要驱动因子; 其次为海拔(15.00%)、坡度(14.08%)、年均气温(11.08%)和人口密度(13.66%), 解释力均在 10%以上, 对植被变化的分布也有较大影响; 而年均降雨量(2.34%)、土壤类型(1.08%)和坡向(0.15%)对植被变化无显著影响。

交互探测器 从表 6 可见, 各驱动因子对植

表 5 各因子对植被变化的标准化影响效应

Table 5 Standardized effects of factors on FVC

影响因子 Impact factor	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
地形 Topography	0.27	−0.09	0.18
人类活动 Human activity	0.52		0.52
年均气温 Average annual temperature	0.19		0.19

被覆盖度的影响均呈现出双因子增强和非线性增强关系，其中，年均降雨量与坡向、人口密度、土壤类型的交互作用，年均气温与坡向的交互作用及坡向与坡度、土地利用类型、人口密度、土壤类型的交互作用呈现非线性增强关系，其他影响因子的交互作用均呈现双因子增强关系。土地利用类型和人口密度的相互作用最强，解释值为 0.49。其次是海拔与其他因子的交互作用，解释值都在 0.15 以上。这表明，土地利用类型与其他

因子的相互作用增强了其对于海南岛植被覆盖度空间变化的影响力。

风险探测 由表 7 可见，随着降水量和温度的升高，FVC 呈现上升趋势，年均降水量和气温的最适宜区间分别为 1534.23~1637.21 mm 和 21.91~23.12。在坡度为 21.42°~29.93°时，海拔为 394~613 m 时 FVC 达到最大值。林地的植被覆盖度最高，随着人口密度的增加，植被覆盖度逐渐减小。土壤类型方面，砖红壤的植被覆盖度最高。

表 6 各因子之间交互作用的探测结果

Table 6 Interaction detection result among factors

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
x1								
x2	0.121 559**							
x3	0.027 012*	0.113 421*						
x4	0.153 981**	0.168 518**	0.143 275*					
x5	0.161 854**	0.154 632**	0.151 632**	0.178 610**				
x6	0.474 834**	0.480 790**	0.473 196*	0.484 308**	0.483 807**	0.469 656**		
x7	0.172 889*	0.217 485**	0.143 293*	0.235 428**	0.241 428**	0.495 586**	0.136 627**	
x8	0.038 228*	0.113 172**	0.014 809*	0.144 325**	0.152 250**	0.473 131**	0.151 244**	0.010 836*

**：双因子增强；*：非线性增强。

**：Two-factor enhancement；*：Nonlinear enhancement.

表 7 影响因子对 FVC 的适宜区间

Table 7 Optimal range of effect factors to FVC

驱动因子 Driver factor	最佳范围 Optimal range	植被覆盖度 Fractional vegetation coverage
年均降雨 Average annual rainfall	1 534.23~1 637.21 mm	0.834
年均气温 Average annual temperature	21.91 °C~23.12 °C	0.890
海拔 Elevation	394~613°	0.890
坡度 Slope	21.42°~29.93°	0.890
坡向 Aspect	117.85°~180.12°	0.815
土地利用类型 Type of land use	林地 Forest land	0.860
人口密度 Population density	0.39~1 000.31 人/km ²	0.820
土壤类型 Soil type	砖红壤 Latosol	0.850

3 讨论和结论

3.1 海南岛植被时空变化特征分析

本研究表明，海南岛近 21 a 植被覆盖度变化呈

S 型增加趋势，增速为 0.025/10 a，这与前人^[32–33]的研究结论基本一致。植被覆盖度变化的原因是政府在此区间实施了大规模的退耕还林工程和城市化扩张。从空间分布来看，植被覆盖度的空间分布

具有差异。总体来说,平均 FVC 高值区位于白沙、琼中、五指山等中部山区,这是因为该区域植被受人为因素干扰较轻,植被生长状况较好。此外,海南岛在 2003 年期间,在中部水土流失较为严重的地区实施了退耕还林工程,因此,中部山区植被覆盖度逐渐提高。低植被覆盖的区域主要位于海口西南部和三亚南部等沿海城市,这主要因为沿海城市人类活动强度较大,城市化扩张和国际旅游业的不断发展,导致这些地方的 FVC 值较低^[34-35]。

此外,趋势分析表明,海南岛近 21 a 植被覆盖变化以不显著改善和极显著改善为主,其中改善区域面积占整个研究区的 77.62%,而显著退化和极显著退化区域仅占 5.57%。FVC 明显改善区域主要分布在白沙、五指山、保亭等中部山区市县,然而严重退化区域主要在海口、三亚等人类活动较强的沿海城市。海南岛 2000—2020 年的植被覆盖度以低波动变化、较低波动变化为主,整体上波动较小。最稳定的区域主要集中分布在中部山区,中等波动变化区域主要位于西北部,而波动变化较大的区域位于东北部和西南部的城市建设和沿海区域。海南岛植被覆盖度未来呈上升趋势的面积占比为 52.16%,呈下降趋势的面积占比为 47.84%,这是人类活动与气候变化共同影响的结果,人类活动范围的增加和全球极端天气频繁爆发都将会影响植被覆盖度。其中,未来植被变化以弱反持续性增加和弱持续性增加为主,占研究区面积的 89.41%;主要分布在澄迈南部、儋州、白沙、昌江东南部、琼中、屯昌和定安。

3.2 海南岛植被变化影响因素定量分析

结构方程模型和因子探测器结果均表明,人类活动因子对 FVC 变化的影响极显著,其中,土地利用类型对植被覆盖度影响的路径系数和 q 值最大,分别为 0.72 和 0.46,由此可见,土地利用类型是海南岛植被覆盖度空间分异的主要驱动力,这与罗红霞等^[33]的研究结果基本一致。根据《海南统计年鉴》,海南岛自 2003 年开始实施大规模退耕还林工程,累计造林面积达到 452 954 hm²,植被覆盖度显著增加。城市化扩张与重构导致了三亚和海口沿海城市周边 FVC 的下降^[36-37]。2000—2021 年,造林面积、森林覆盖率、城市绿化面积的增加,说明植树造林促进了海南岛 FVC 的增加等。

气候变化是植被生长的关键因素^[32,38],在 2001—2014 年间,海南岛气温呈微弱下降趋势,而

降水呈增加趋势,这些变化直接或间接的改变了植被的生境条件,进而影响植被生长过程^[18,39]。研究表明,年均气温是影响植被覆盖度变化的重要影响因子,而年均降雨量对植被覆盖度变化无显著影响,这是因为适宜的温度作为植被生长的必要条件,而年均降雨量的差异性较小,因此植被覆盖度变化与年均降雨无显著关系。但也有研究^[18]认为,年均降雨量是影响植被覆盖度变化的主要驱动因子,这主要是研究样地的立地类型和树种组成产生的差异。

相关研究表明海拔、坡向、坡度等地形条件的异质性对山区植被覆盖度起着重要作用^[41]。本研究发现,海拔和坡度是影响植被覆盖度变化的主要地形因子,在海拔为 394~613 m,坡度为 21.42°~29.93°时,植被覆盖度达到最高,这些区域的植被受人类影响较小,适合植被生长。海拔决定了植物生长所需的光、热、水、肥等基本条件,高海拔和低海拔均不利于植被生长^[42-43]。坡度影响了植被生长所必须的水分和养分,在陡坡上,土壤养分容易受到降雨和地表径流的影响,进而使得林木生长效果较差^[44-45]。

3.3 植被生长的适宜区间分析

本研究结果表明,FVC 在年均气温为 21.91 °C~23.12 °C 时达到最大,该气温促进了植被生长。此外当年均降水在 1 534.23~1 637.21 mm 时,FVC 达到最大值,降雨充沛时最有利于海南岛的植被生长。不同海拔、坡度和坡向范围的 FVC 无显著差异,其中 FVC 在 394~613 m 海拔区间、21.42°~29.93°坡度范围和东坡向最大,这主要是因为中高海拔地区,地形陡峭人类活动较少,植被受到的影响较小。FVC 在林地和人口密度在 0.39~1 000.31 人/km² 区间达到峰值,砖红壤土是海南岛植被生长的最佳适宜土壤类型。结合结构方程模型和地理探测器分析植被变化的影响因素,不仅可以探究各个自变量对植被变化的直接影响和间接影响,还可以解决单个影响因子对植被变化的贡献以及探测多因子对植被变化的交互影响,两者结合更能解释各因子对植被变化的贡献。

综上,本研究结果揭示了 2000—2020 年海南岛植被覆盖呈增加趋势,增速为 0.025/10 a。植被覆盖变化主要以基本不变和极显著改善为主。土地利用类型、海拔、坡度、人口密度是影响 FVC 变化的主要驱动因子,各影响因子对 FVC 变化以双因子

增强或非线性增强为主, 其中土地利用类型、海拔和坡度的相互作用对 FVC 变化的影响最大。本研究结果有助于理解海南岛植被覆盖度的时空变化规律, 揭示了各驱动因子对植被覆盖度的相对贡献, 并探测了促进植被生长的各驱动因子的最佳区间, 为海南省的植被保护政策提供参考依据。

参考文献

- [1] XU Y, ZHENG Z W, GUO Z D, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environ Sci*, 2022, 43(7): 3730–3740. [徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000—2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 [J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3730–3740. doi: 10.13227/j.hjks.202112081.]
- [2] MA X H, LIN F, YUAN L M, et al. Vegetation coverage change and its response to ecological protection project in Fenhe River Basin [J]. *J Desert Res*, 2023, 43(3): 86–95. [马小红, 林菲, 原黎明, 等. 2000—2020 年汾河流域植被覆盖度变化及其对生态工程的响应 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3): 86–95. doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00144.]
- [3] LI J, QIN T T, ZHANG C Y, et al. A new method for quantitative analysis of driving factors for vegetation coverage change in mining areas: GWDF-ANN [J]. *Remote Sens*, 2022, 14(7): 1579. doi: 10.3390/RS14071579.
- [4] CUNNICK H, RAMAGE J M, MAGNESS D, et al. Mapping fractional vegetation coverage across wetland classes of sub-arctic peatlands using combined partial least squares regression and multiple endmember spectral unmixing [J]. *Remote Sens*, 2023, 15(5): 1440. doi: 10.3390/RS15051440.
- [5] GU F Y, XU G C, WANG B, et al. Vegetation cover change and restoration potential in the Ziwoiling Forest Region, China [J]. *Ecol Eng*, 2023, 187: 106877. doi: 10.1016/J.ECOLENG.2022.106877.
- [6] LI S B, HE S Y, XU Z, et al. Desertification process and its effects on vegetation carbon sources and sinks vary under different aridity stress in Central Asia during 1990—2020 [J]. *CATENA*, 2023, 221: 106767. doi: 10.1016/J.CATENA.2022.106767.
- [7] CHEN L F, ZHANG H, ZHANG X Y, et al. Vegetation changes in coal mining areas: Naturally or anthropogenically driven? [J]. *CATENA*, 2022, 208: 105712. doi: 10.1016/J.CATENA.2021.105712.
- [8] QU S, WANG L C, LIN A W, et al. Distinguishing the impacts of climate change and anthropogenic factors on vegetation dynamics in the Yangtze River Basin, China [J]. *Ecol Indic*, 2020, 108: 105724. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105724.
- [9] REN H, CHEN C N, LI Y H, et al. Response of vegetation coverage to climate changes in the Qinling-Daba Mountains of China [J]. *Forests*, 2023, 14(2): 425. doi: 10.3390/F14020425.
- [10] ZHU L Y, SUN S, LI Y, et al. Effects of climate change and anthropogenic activity on the vegetation greening in the Liaohe River Basin of northeastern China [J]. *Ecol Indic*, 2023, 148: 110105. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2023.110105.
- [11] BAI X Y, FU J X, LI Y, et al. Attributing vegetation change in an arid and cold watershed with complex ecosystems in northwest China [J]. *Ecol Indic*, 2022, 138: 108835. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108835.
- [12] TIAN D, ZHANG H X, LIU Z, et al. Impacts of topographical factors on temporal and spatial characteristics of fractional vegetation coverage in Changting County [J]. *J Fujian Agric For Univ (Nat Sci)*, 2019, 48(6): 796–802. [田地, 张厚喜, 刘政, 等. 地形因子对长汀县植被覆盖度时空特征的驱动影响 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2019, 48(6): 796–802. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2019.06.018.]
- [13] SONG X W, DENG J, WANG W M, et al. Temporal and spatial variations of vegetation coverage in Zhejiang Province based on MODIS data [J]. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2021, 38(5): 40–46. [宋立旺, 邓健, 王伟民, 等. 基于 MODIS 数据的浙江省植被覆盖度时空变化分析 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(5): 40–46. doi: 10.11988/ckyyb.20200285.]
- [14] ZHANG H X, LI Y M, ZHANG N. Relationship between temporal and spatial characteristics of vegetation coverage and topographic factors in Fenhe River Basin [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2022, 42(1): 353–359. [张会霞, 李永梅, 张娜. 汾河流域植被覆盖度时空特征与地形因子的关系 [J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 353–359. doi: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.046.]
- [15] YING D D, WANG Y H. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41(3): 1158–1167. [银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 1158–1167. doi: 10.5846/stxb201912092672.]
- [16] LIU C X, ZHANG X D, WANG T, et al. Detection of vegetation coverage changes in the Yellow River Basin from 2003 to 2020 [J]. *Ecol Indic*, 2022, 138: 108818. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108818.
- [17] MU B H, ZHAO X, ZHAO J C, et al. Quantitatively assessing the impact of driving factors on vegetation cover change in China's 32 major cities [J]. *Remote Sens*, 2022, 14(4): 839. doi: 10.3390/RS14040839.
- [18] XIONG Y L, LI Y R, XIONG S Y, et al. Multi-scale spatial correlation between vegetation index and terrain attributes in a small watershed of the upper Minjiang River [J]. *Ecol Indic*, 2021, 126: 107610. doi: 10.

- 1016/J.ECOLIND.2021.107610.
- [19] HAO J, CHEN X Q, ZHANG Z, et al. Quantifying the temporal-spatial scale dependence of the driving mechanisms underlying vegetation coverage in coastal wetlands [J]. CATENA, 2021, 204: 105435. doi: 10.1016/j.catena.2021.105435.
- [20] LIU C L, LI W L, WANG W Y, et al. Quantitative spatial analysis of vegetation dynamics and potential driving factors in a typical alpine region on the northeastern Xizang Plateau using the Google Earth Engine [J]. CATENA, 2021, 206: 105500. doi: 10.1016/j.catena.2021.105500.
- [21] GAO W D, ZHENG C, LIU X H, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China [J]. Ecol Indic, 2022, 137: 108745. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108745.
- [22] ZHANG X C, JIN X M. Vegetation dynamics and responses to climate change and anthropogenic activities in the Three-River Headwaters Region, China [J]. Ecol Indic, 2021, 131: 108223. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108223.
- [23] XIE P J, SONG X Y, SUN W Y, et al. Research on the shift change of vegetation greenness line in the Loess Plateau based on GEE [J]. China Environ Sci, 2023, 43(12): 6518–6529. [谢佩君, 宋小燕, 孙文义, 等. 基于 GEE 的黄土高原植被绿度线推移变化研究 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6518–6529. doi: 10.3969/j.issn.1000-6923.2023.12.028.]
- [24] JIAN S Q, ZHANG Q K, WANG H L. Spatial-temporal trends in and attribution analysis of vegetation change in the Yellow River Basin, China [J]. Remote Sens, 2022, 14(18): 4607. doi: 10.3390/RS14184607.
- [25] MAO P P, ZHANG J, LI M, et al. Spatial and temporal variations in fractional vegetation cover and its driving factors in the Hulun Lake region [J]. Ecol Indic, 2022, 135: 108490. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108490.
- [26] HUO H, SUN C P. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: A case study of the north-western Yunnan Plateau, China [J]. Ecol Indic, 2021, 130: 108005. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.108005.
- [27] LI J, WANG J L, ZHANG J, et al. Dynamic changes of vegetation coverage in China-Myanmar Economic Corridor over the past 20 years [J]. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 2021, 102: 102378. doi: 10.1016/j.jag.2021.102378.
- [28] ZUO Y F, LI Y H, HE K N, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000–2020 [J]. Ecol Indic, 2022, 143: 109429. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109429.
- [29] LI J, WANG J L, ZHANG J, et al. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector [J]. Ecol Indic, 2022, 136: 108620. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108620.
- [30] HOU G R, BI H X, HUO Y M, et al. Determining the optimal vegetation coverage for controlling soil erosion in *Cynodon dactylon* grassland in north China [J]. J Cleaner Prod, 2020, 244: 118771. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118771.
- [31] WU W, ZHANG J, YU J, et al. Attribution analysis of soil degradation using change vector analysis and the geographical detector from 2010 to 2020 on Hainan Island [J]. Ecol Inf, 2024, 80: 102484. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118771.
- [32] ZHANG Y Y, LIU T D, GONG W F, et al. Analysis of the characteristics of temporal and spatial changes and driving forces of vegetation cover on Hainan Island from 2001 to 2021 [J]. J Gansu Agric Univ, 2023, 58(2): 145–154. [张阳阳, 刘铁冬, 龚文峰, 等. 2001—2021 年海南岛植被覆盖时空动态变化与驱动力分析 [J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 145–154. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2023.02.019.]
- [33] LUO H X, DAI S P, LIU E P, et al. Spatiotemporal variable vegetation on Hainan Island during 2001–2014 [J]. Res Soil Water Conserv, 2018, 25(5): 343–350. [罗红霞, 戴声佩, 刘恩平, 等. 2001–2014 年海南岛植被覆盖时空变化特征 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 343–350. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.05.050.]
- [34] WU W Y, ZHANG J, SUN Z Y, et al. Attribution analysis of land degradation in Hainan Island based on geographical detector [J]. Ecol Indic, 2022, 141: 109119. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109119.
- [35] WANG F X, YAO F, CHEN Y L, et al. Monitoring study on the influence of Hainan international tourism island construction to the mangrove forest based on RS and GIS [J]. Adv Mater Res, 2011, 1198(187): 33–38. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.187.33.
- [36] HU X H, LIN X A. A study of the relationship between electricity consumption and GDP growth in Hainan international tourism island of China [J]. Res World Econ, 2013, 4(1): 109–115. doi: 10.5430/rwe.v4n1p109.
- [37] WANG P J, WANG J W, ZHANG J H, et al. Spatial-temporal changes in ecosystem services and social-ecological drivers in a typical coastal tourism city: A case study of Sanya, China [J]. Ecol Indic, 2022, 145: 109607. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109607.
- [38] HE S K, CHEN K B, LIU Z J, et al. Exploring the impacts of climate change and human activities on future runoff variations at the seasonal scale [J]. J Hydrol, 2023, 619: 129382. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2023.129382.

- [39] CHEN A Q, LEI B K, HU W L, et al. Temporal-spatial variations and influencing factors of nitrogen in the shallow groundwater of the nearshore vegetable field of Erhai Lake, China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25(5): 4858–4870. doi: 10.1007/s11356-017-0791-7.
- [40] CHEN Y X, REN L X, LOU Y S, et al. Effects of climate change on climate suitability of green orange planting in Hainan Island, China [J]. *Agriculture*, 2022, 12(3): 349. doi: 10.3390/agriculture12030349.
- [41] ZHANG X, LI X, JI X D, et al. Elevation and total nitrogen are the critical factors that control the spatial distribution of soil organic carbon content in the shrubland on the Bashang Plateau, China [J]. *CATENA*, 2021, 204: 105415. doi: 10.1016/J.CATENA.2021.105415.
- [42] ZHANG Y X, SUN J Y, SONG X Q, et al. Revealing the main factors affecting global forest change at distinct altitude gradients [J]. *Ecol Indic*, 2023, 148: 110131. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2023.110131.
- [43] ORMAN O, ADAMUS M, FOREMNIK K. Norway spruce sapling plasticity in their responses of architecture and growth to light gradient decreases with altitude in subalpine stands [J]. *For Ecol Manage*, 2023, 536: 120898. doi: 10.1016/J.FORECO.2023.120898.
- [44] WU B C, ZHOU L J, QI S, et al. Effect of habitat factors on the understory plant diversity of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas based on MaxEnt model [J]. *Ecol Indic*, 2021, 129: 107917. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107917.
- [45] YANG S Q, ZHAO W W, PEREIRA P. Determinations of environmental factors on interactive soil properties across different land-use types on the Loess Plateau, China [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 738: 140270. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140270.