

# 2001—2014 年海南岛植被覆盖时空变化特征

罗红霞<sup>1,2</sup>, 戴声佩<sup>1,2</sup>, 刘恩平<sup>1,2</sup>, 谢铮辉<sup>1,2</sup>, 李茂芬<sup>1,2</sup>

(1. 中国热带农业科学院 科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室,  
海南 儋州 571737; 2. 农业部 农业遥感重点实验室, 北京 100100)

**摘 要:** 基于 2001—2014 年 MODIS NDVI 数据, 采用趋势分析法、标准差法、Hurst 指数法以及相关系数分析法研究了海南岛植被覆盖变化特征, 结合气象数据及统计年鉴数据分析了气候变化及人类活动对植被覆盖变化的影响情况。研究表明: 近 14 年海南岛 NDVI 呈显著增加趋势, 增速为  $0.02/10\text{ a}$  ( $p < 0.01$ ); 空间分布上, 植被覆盖呈由中心向四周递减的分布格局, 高值区分布于中部山区市县; 波动变化特征变现为中间波动小, 四周波动大, 高波动和较高波动区所占的比重为 42%, 高波动区主要集中于海口、琼海、万宁、东方、乐东等市县沿海区域; 在趋势上, 海南岛 14 年间植被覆盖变化以改善为主, 轻度改善和中度改善所占比重为 53.42%, 其中 22.65% 的区域呈显著增加; Hurst 指数表明研究区未来 NDVI 变化趋势呈持续性和反持续性的比重分别为 57.21% 和 42.71%, 其中持续改善和由退化转为改善的面积分别占 11.15% 和 40.90%。海南岛植被生长年际变化受降水影响要强于气温, 人类活动也是影响植被覆盖变化的重要因素。

**关键词:** 海南岛; 植被覆盖; 时空变化; 气候变化; 人类活动

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)05-0343-08

## Spatiotemporal Variable Vegetation on Hainan Island During 2001—2014

LUO Hongxia<sup>1,2</sup>, DAI Shengpei<sup>1,2</sup>, LIU Enping<sup>1,2</sup>, XIE Zhenghui<sup>1,2</sup>, LI Maofen<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Practical Tropical Crop Information Technology in Hainan, Danzhou, Hainan 571737, China*; 2. *Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture, Beijing 100100, China*)

**Abstract:** The variation of vegetation indicates the changes of global and regional environment. In this paper, spatial and temporal patterns of vegetation on Hainan Island were explored by using MODIS NDVI data from 2001 to 2014 based on Theil-Sen median method and standard deviation. Then, the future vegetation change tendency was analyzed based on Hurst exponent. Specially, the influence of climate change and human activities were assessed based on temperature, precipitation, and urbanization rate. The results showed that: (1) the annual NDVI values showed a significant increasing trend at an annual rate of 0.02 per year over the study period; (2) the vegetation standard deviation showed obvious characteristics: high at the boundary and low in the middle, and the high variation was apparent across 42% of the land, mainly distributed around the coastal areas of Haikou, Qionghai, Wanning, Dongfang, Ledong; (3) as a whole, the NDVI values of Hainan Island showed an upward trend of improvement, specifically, areas where improvement levels were light and moderate accounted for 53.42% of all area during 2001—2014, significantly improved with 22.65% of the region's vegetation; (4) the percentage of anti-persistence was 57.21%, and 42.71% for persistence. The four change characteristics of future vegetation were degradation into improvement, continual degradation, improvement into degradation, and continual improvement, and the percentages were 40.9%, 34.1%, 13.94%, and 11.15%, respectively; (5) the vegetation variation was influenced by precipitation even more than temperature; moreover, in EL Nino years, 34.48% of NDVI pixels showed positive anomaly, while 65.52% showed negative anomaly, conversely, 63.01% of NDVI pixels showed positive anomaly, while 36.99%

收稿日期: 2017-09-19

修回日期: 2017-10-18

资助项目: 海南省自然科学基金(417238); 国家自然科学基金(31601211); 公益性行业(农业)科研专项经费(201403075); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630072016009, 1630072016004)

第一作者: 罗红霞(1985—), 女, 湖北公安人, 助理研究员, 硕士, 主要从事生态环境遥感监测研究。E-mail: 120081008@163.com

showed negative anomaly for La Nina years; (6) the vegetation presented a upward trend based on the increase of afforested area, while urbanization can induce negative effect on vegetation growth.

**Keywords:** Hainan Island; vegetation coverage; spatiotem poral variation; climatic variation; afforested area

植被是陆地生态系统的主体,是生态环境监测的指示器<sup>[1-2]</sup>。植被的变化情况揭示了自然环境和人类活动的相关影响,以及两者之间的反馈影响<sup>[3]</sup>。归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)是监测植被覆盖变化最常用的指标之一。近年来,国内外学者对不同地区、不同时间序列、不同精度的遥感数据的植被覆盖变化特征及响应机制进行了深入广泛的研究,并取得了丰硕的成果<sup>[4-18]</sup>。总体来看,近几十年来,亚洲内陆地区 20 世纪 80 年代植被生长呈增加趋势,90 年代增加趋势停止,进入 21 世纪之后又开始呈现增加趋势,在寒带温带地区影响植被变化的主导因素是气温,干旱和半干旱地区植被变化则因降水量的变动而发生改变。

海南岛占全国热带和亚热带土地面积的 42.5%<sup>[19]</sup>,是重要的生态涵养功能区。海南岛四面环海,由于其独特的地理位置,生态系统的抗外界干扰和自我修复能力较低,生态环境具有明显的脆弱性,生态环境一旦破坏则很难恢复<sup>[20]</sup>。近年来,全球气候变化引发的诸如厄尔尼诺现象等导致海南极端天气频现,新型工业化、城镇化建设步伐的提速都对海南生态环境的保护产生了极大的影响。因此,在全球气候变化的大背景下,全面认清海南岛长时间序列植被覆盖变化格局,探讨气候因素及人类活动的驱动作用,对评价陆地生态系统的环境质量具有重要的理论和现实意义,同时对促进海南岛可持续性发展具有十分重要的作用。基于此,本文采用趋势分析法、标准差法、Hurst 指数法以及相关系数分析法研究海南岛植被覆盖变化特征,分析气候变化及人类活动对植被覆盖变化的影响。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

海南岛位于中国最南端,位于东经 108°37′—111°05′,北纬 18°10′—20°10′,陆地面积 3.39 万 km<sup>2</sup>,是我国热带雨林、热带季雨林的原生地之一<sup>[21]</sup>。海南岛地势四周低平,中间高耸,地形以五指山、鹦哥岭为隆起核心,向外围逐级下降,山地、丘陵、台地、平原构成环形层状地貌(图 1)。海南岛四面环海,属于热带季风气候,作为热带亚热带及海陆交界的典型代表区,年平均温度在 22~26℃,全岛年平均降雨量在 1 600 mm 以上,其中 8 月、9 月份降雨量较为充沛,

时见暴雨出现,也常有台风侵袭。

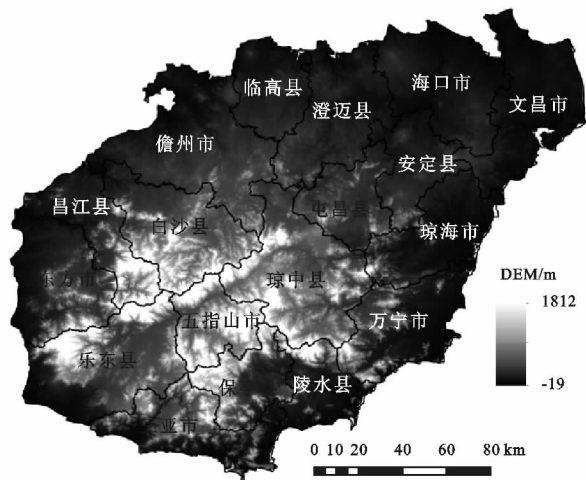


图 1 研究区域

### 1.2 数据来源

本文使用数据来源于美国国家航空航天局 NASA 的 MOD13Q1 NDVI 数据产品,其空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d;研究区域在全球正弦投影中的编号为 h28v06 和 h28v07,时间跨度为 2001—2014 年。

气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),包括 2001—2014 年海南岛 7 个气象站点日平均气温、日降水量数据。造林面积来源于 2001—2014《海南统计年鉴》。

### 1.3 研究方法

1.3.1 变化趋势分析 本文采用非参数化趋势度(Theil-Sen median)与 Mann-Kendall 检验方法进行海南岛 NDVI 变化的变化趋势分析及显著性检验。

Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数统计趋势计算方法,其计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$\beta = \text{meidian} \left( \frac{\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j}{i - j}, \forall i > j \right) \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为植被变化趋势; $i, j$ 为时间序列数; $i > j = 1, \dots, 14$ ;  $\text{NDVI}_i, \text{NDVI}_j$ 分别表示第  $i, j$  时间的 NDVI 值。若  $\beta > 0$ ,表明植被呈上升趋势;若  $\beta < 0$ ,表明植被呈下降趋势。

Mann-Kendall 检验法不受异常值的干扰,不需要样本服从一定的分布,对测量误差或者离群数据具有较强的规避能力<sup>[10]</sup>,更适合作为顺序变量。用 Mann-Kendall 法进行 NDVI 趋势检验时,将时间序列 NDVI 值当做独立分布的样本数据,其计算的公式为<sup>[23]</sup>:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sign}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) = \begin{cases} 1 & (\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) > 0 \\ 0 & (\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) = 0 \\ -1 & (\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:sign 为符号函数。在置信水平 0.05 上,若  $|Z_c| < 1.96$  表明 NDVI 变化趋势显著;在置信水平 0.01 上,若  $|Z_c| < 2.56$  则表明 NDVI 变化趋势极显著。

为了更好地评价海南岛植被覆盖变化状况,参考已有研究<sup>[8,11,24]</sup>将植被变化趋势划分为 7 个等级:严重退化( $\beta < -0.0080$ )、中度退化( $-0.0080 \leq \beta < -0.0035$ )、轻度退化( $-0.0035 \leq \beta < -0.0010$ )、保持不变( $-0.0010 \leq \beta < 0.0010$ )、轻度改善( $0.0010 \leq \beta < 0.0035$ )、中度改善( $0.0035 \leq \beta < 0.0080$ )、明显改善( $\beta \geq 0.0080$ )。

1.3.2 标准差分析 标准差即变量偏离常态距离的平均数,能够较好地反映出时间序列数据集的离散程度,其值越大,表明各像元 NDVI 偏离平均值越远,植被覆盖的变化特征也越大<sup>[11]</sup>。其公式为:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (6)$$

式中:S 为第  $i$  年的 NDVI 标准差; $i$  为年份时间序列值,取值为 1~14; $\text{NDVI}_i$  为第  $i$  年的 NDVI 值; $\overline{\text{NDVI}}$  为 2001—2014 年海南岛年均 NDVI 的平均值。为了更好地分析海南岛植被覆盖变化波动特征,我们将标准差分为 5 类:高( $S \geq 0.055$ )、较高( $0.04 \leq S < 0.055$ )、中( $0.30 \leq S < 0.04$ )、较低( $0.02 \leq S < 0.03$ )、低( $S < 0.02$ )。

1.3.3 未来趋势分析 R/S 分析法最早由英国水文学家 Hurst 提出的一种统计方法——变标度极差分析法(Rescaled Range Analysis 简称 R/S 分析),后来经过 Mandebrot 与 Wallis 在理论上对该方法进一步补充完善,把它发展为研究时间序列的分形理论<sup>[10,23,25]</sup>。其基本原理是:

给定一时间序列  $\{\xi(t)\}$ ,  $t=1,2,\dots,14$ ,对于任意正整数  $\tau$ ,

定义均值序列:

$$[\xi]_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau=1,2,\dots,14 \quad (7)$$

累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - [\xi]_\tau) \quad (8)$$

极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (9)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - [\xi]_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

若存在如下关系  $R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$ ,则说明所分析的时间序列存在 Hurst 现象, $H$  值称为 Hurst 指数,其值可在双对数坐标系( $\ln \tau, \ln R/S$ )中用最小二乘法拟合得到。Hurst 指数主要有 3 种形式:(1) 当  $0.5 < H < 1$  时,表明该时间序列是一个正向持续性序列,未来变化趋势与过去趋势一致,且  $H$  越接近于 1,持续性越强;(2) 当  $H = 0.5$  时,表明该时间序列为随机序列,未来变化趋势与过去趋势无关;(3) 当  $0 < H < 0.5$  时,表明该时间序列具有反向持续性,即未来的变化趋势与过去趋势相反,且  $H$  越接近于 0,反向持续性越强。

## 1.4 数据处理

1.4.1 遥感数据的处理 采用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件将 MODIS NDVI 进行格式转换和影像拼接,并将影像投影至 WGS84 坐标下。尽管 MODIS NDVI 数据已经经过水、云、重气溶胶等数据处理,但为了进一步消除异常值对本研究的影响,采用最大值合成法(Maximum Value Composites, MVC),合成月最大 NDVI 值,进而将月 NDVI 数据合成年均 NDVI 值;最后,利用海南岛行政边界矢量数据裁剪 NDVI 数据,最终形成 2001—2014 年海南岛逐年 NDVI 数据集。

1.4.2 气象数据的处理 将 2001—2014 年各气象站点日平均气温、日降水量数据进行整理计算得到逐年年均气温、年降水量数据。采用 Pearson 相关系数法分析 NDVI 与年均气温、年降水的相关关系。具体计算公式等见相关文献<sup>[26-28]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 海南岛植被覆盖年际变化特征

从图 2 可以看出,在 2001—2014 年海南岛年均 NDVI 呈波动性增加趋势,增速为 0.02/10 a。2001 年 NDVI 为 0.717,2014 年增加到 0.724,增加率为 0.99%;在 2005 年、2008 年、2011 年出现明显波谷,2007 年、2009 年、2013 年出现明显的波峰。海南岛

植被变化曲线呈 S 型增加趋势(图 2),大致能分为 4 个阶段:第一次下降阶段(2003—2005 年)、第一次增加阶段(2005—2007 年)、第二次下降阶段(2009—2011 年)、第二次增加阶段(2011—2013 年)。其中两次下降阶段,NDVI 下降率分别为 5.6%,4.99%;两次增加阶段,NDVI 增长率分别为 7.46%,5.98%。

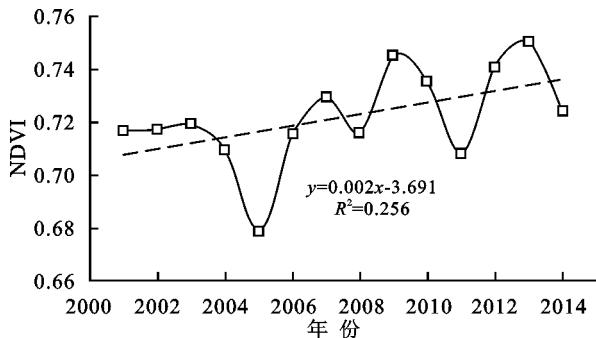
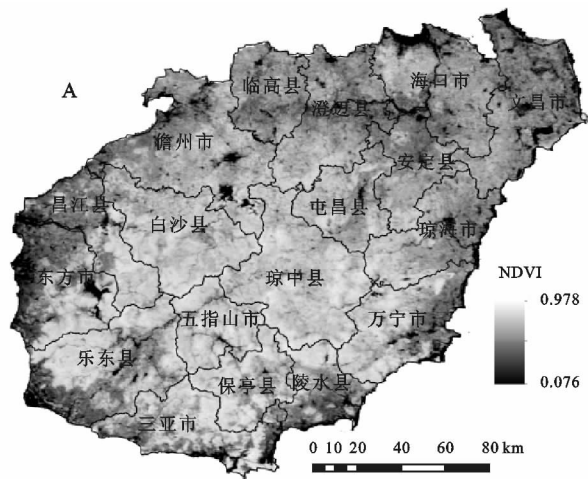


图 2 海南岛 2001—2014 年 NDVI 变化



## 2.2 海南岛植被覆盖变化特征

**2.2.1 海南岛植被覆盖空间分布特征** 海南岛植被覆盖整体状态好,空间上呈现出四周低,中间高的分布特征(图 3A),14 a 间,年均 NDVI 值大于 0.7 的区域占全岛的 98.59%(图 3B),植被覆盖较高的区域主要分布在白沙、琼中、五指山等中部山区市县,因为这些市县的植被覆盖主要为阔叶林、季雨林,植被覆盖度高。此外,海南岛自 2002 年开始大规模退耕还林工程,重点退耕还林区为中部山区水土流失地<sup>[29]</sup>,退耕还林政策的实施提高了植被覆盖程度。而植被覆盖较低的区域主要分布在海口、三亚、文昌、东方、陵水等沿海城市,这主要与海南岛沿海区域人类活动强度较大有关。这些地区植被覆盖主要为农业植被,植被覆盖相对较低,加之近年沿海地区城市化进程的加速,尤其是国际旅游岛建设的不断发展,导致这些地方的 NDVI 值较低。

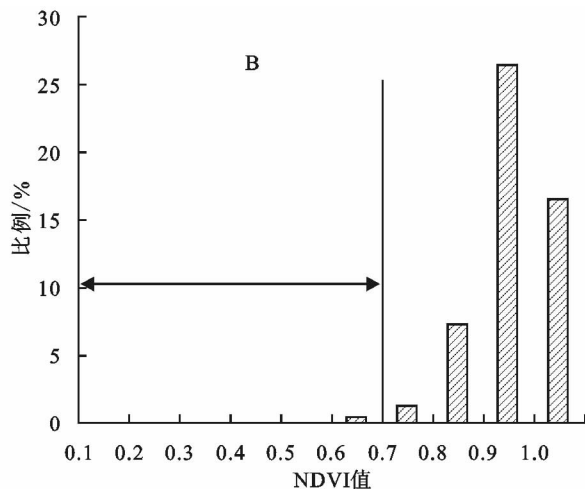


图 3 海南岛 NDVI 空间分布及像元个数统计直方图

**2.2.2 海南岛植被覆盖波动变化特征** 海南岛植被 14 a 间植被覆盖标准差在 0.007~0.268 波动,植被变化整体上表现为中间波动小,四周波动大(图 4)。高波动区主要分布于临高南部、澄迈中部、海口文昌北部、琼海、万宁东部,占全岛的 16.9%。较高波动区集中展布于在高波动区的边缘,占全岛的 25.1%。中度波动区分布于白沙、琼中、五指山、保亭等中部山区市县,所占比重为 24.3%。较低波动区与中度波动区分布特征较为相似,除了在中部山区市县有分布,在三亚市县也有一定分布面积,主要是因为中部山区的植被覆盖程度高,而三亚一带则是由于建筑用地增加,本身植被覆盖度低,故波动程度较小。较低波动区的面积占全岛的 26.8%。低波动区的所占的比重较小,仅为 6.8%,主要分布于昌江—白沙一带。

**2.2.3 海南岛植被覆盖变化趋势分析** 海南岛植被变化趋势平均值为 0.002 5,植被覆盖变化主要以轻度改善为主(图 5A),比重为 28.01%,中度改善次

之,比重为 25.41%,严重退化的比重仅占 1.11%。从图 5B,5D 中可以看出,海南岛植被改善面积占总区域的 62.93%,其中 22.65%的区域植被覆盖变化呈现显著增加( $p < 0.05$ );植被退化面积比重为 15.57%,其中 3.46%的区域植被覆盖表现为显著减少( $p < 0.05$ );基本保持不变的区域占总面积的 21.5%。空间分布上来看(图 5A,C),显著增加的区域主要集中于儋州、临高南部、文昌北部、琼海东南部,白沙、澄迈、屯昌等也有零星分布;显著减少的面积主要分布在海口西南部、文昌中北部、陵水东部、三亚南部沿海区域,东方、乐东、琼海、万宁也有部分分布。

## 2.3 海南岛植被覆盖未来变化特征

海南岛植被覆盖的 Hurst 指数平均值为 0.491,海南岛反向持续性像元面积占 57.21%,正向持续性像元面积占 42.79%。Hurst 指数介于 0.35~0.5 的区域占 33.98%,小于 0.35 的区域占 23.22%;介于 0.5~0.65 的区域占 28.45%,大于 0.65 的区域占

14.33%。空间分布上来看,正向持续性集中分布于儋州、澄迈、临高、琼中等地区,即未来变化趋势与过去变化趋势一致。反向持续性较强的区域主要分布在海口市西北部、文昌市西南部、三亚市、保亭县等地区(图 6A),这些区域未来变化趋势与过去变化趋势相反。将植被覆盖变化趋势与 Hurst 指数结果进行耦合分析,得到海南岛变化趋势与未来变化持续性的耦合结果空间分布图(图 6B)。统计表明,40.90%的区域将由退化转为改善,持续退化区域占 34%,13.84%的区域将由改善转为退化,持续改善区域占 11.15%;空间分布上,退化转为改善的区域主要分布在白沙、儋州、定安等地区。

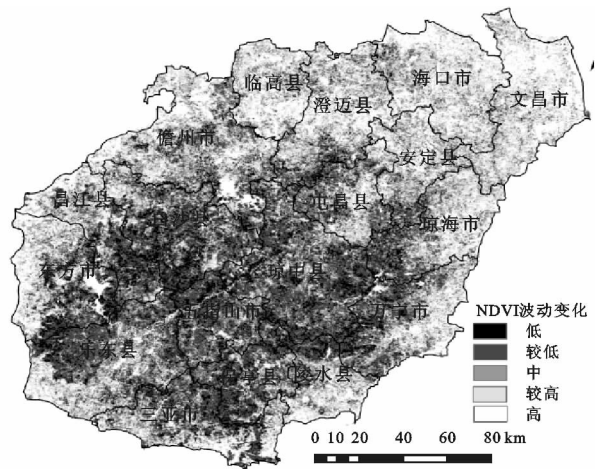
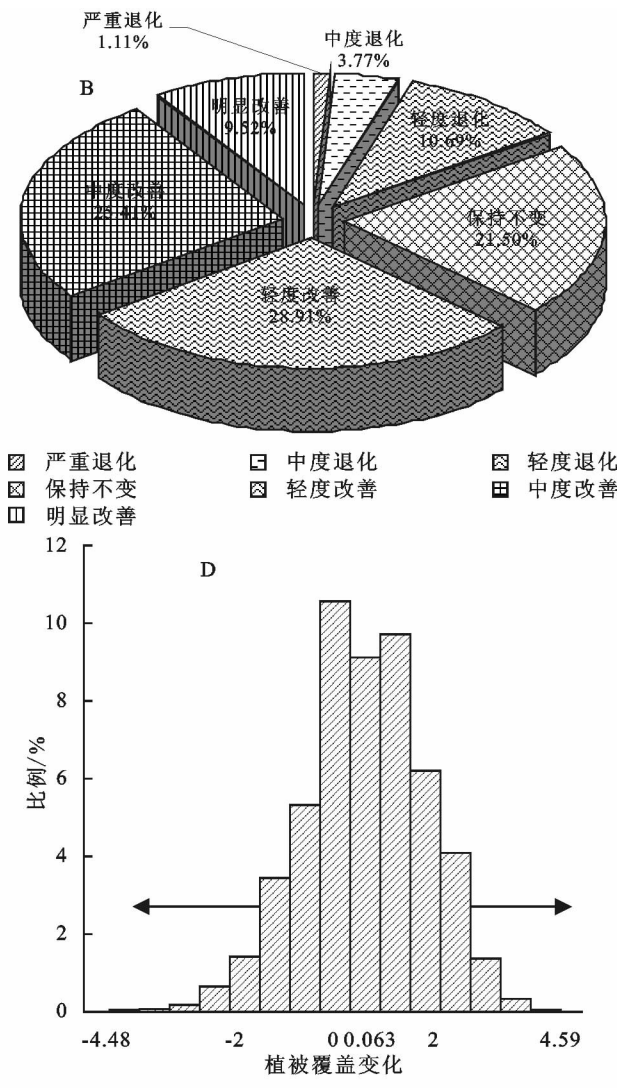
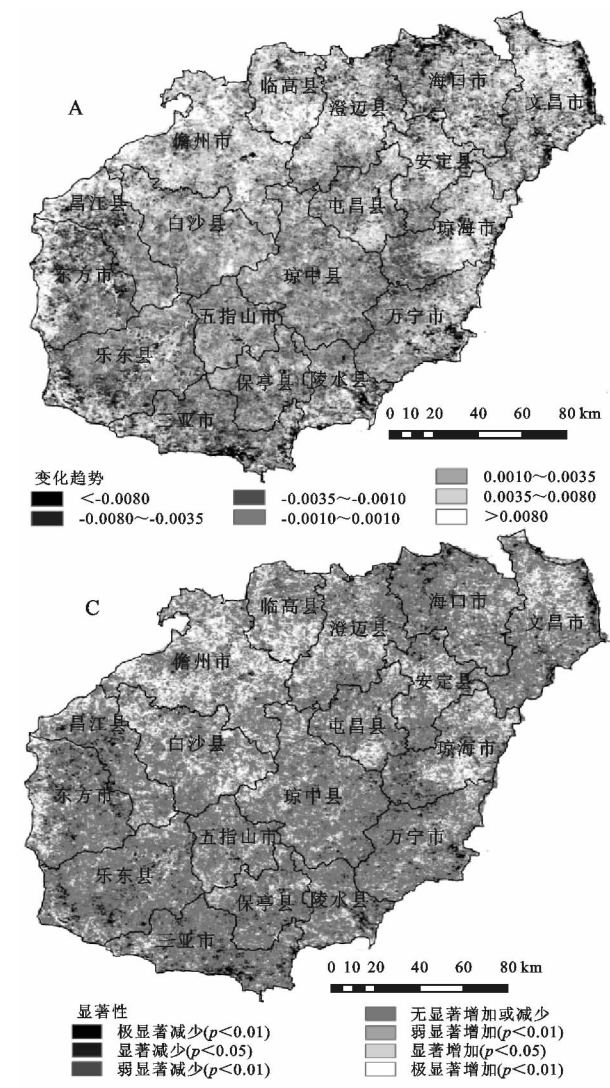


图 4 2001—2014 年海南岛 NDVI 波动变化



严重退化 1.11% 中度退化 3.77% 轻度退化 10.69% 保持不变 21.50% 轻度改善 28.91% 中度改善 25.41% 明显改善 9.52%

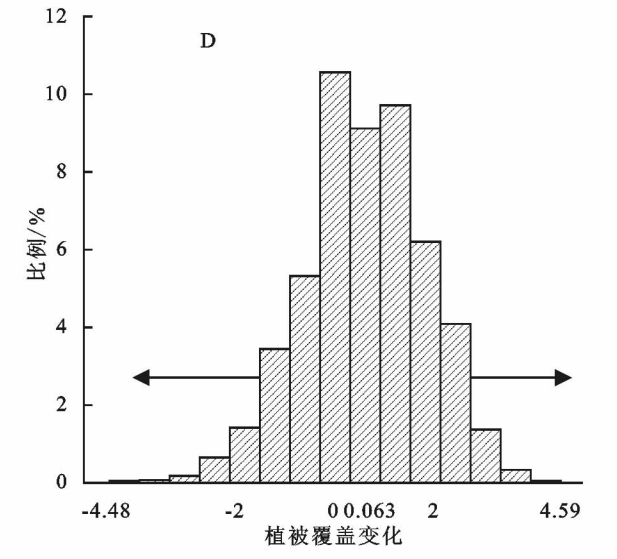


图 5 2001—2014 年海南岛植被覆盖变化趋势(A)、海南岛植被变化各等级所占比重(B)、海南岛植被覆盖变化显著性分析(C)和海南岛植被覆盖变化显著性分析直方图(D)

### 3 植被覆盖变化的影响因素

#### 3.1 气候变化对植被覆盖的影响

全球气候变化会导致区域气温和降水格局发生变化<sup>[10]</sup>。2001—2014 年,海南岛气温呈微弱下降趋

势,其气候倾向率为 0.73℃/10 a;降水呈增加趋势,其气候倾向率为 282.8 mm/10 a。气候变化将导致植被生境变化,进而影响植被生长过程<sup>[30]</sup>。本文从气温降水与 NDVI 相关性分析以及极端气候两个方面分析气候变化对植被覆盖的影响。

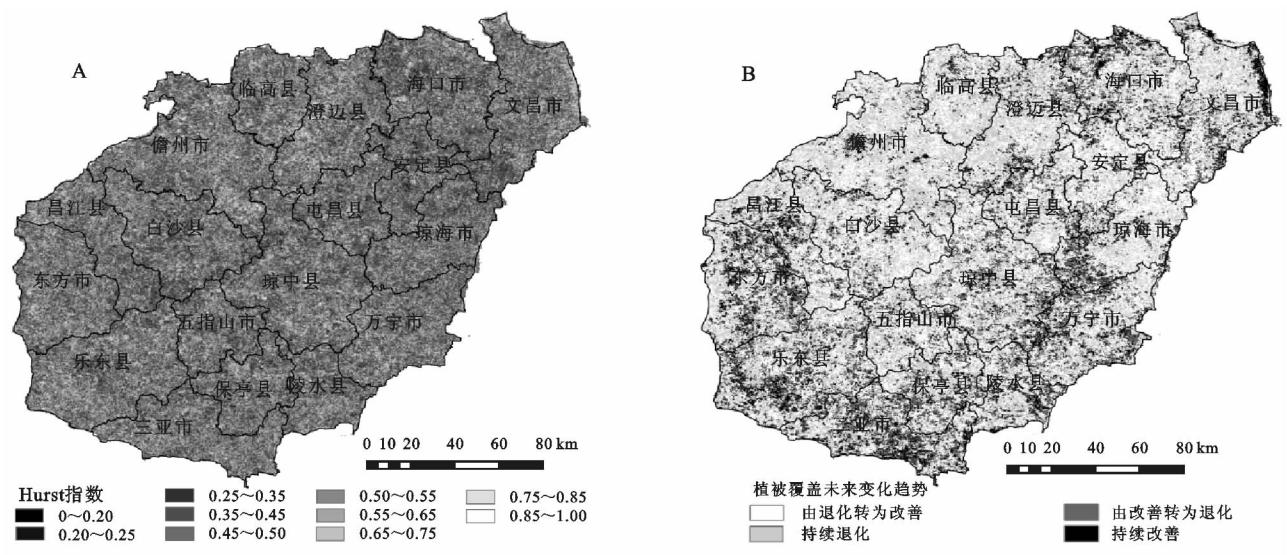


图 6 海南岛 Hurst 指数空间分布及未来变化趋势

年 NDVI 与气温随时间变化的散点图如图 7 所示。经相关性计算,两者的相关系数为 $-0.187$ ,并通过 $0.001$ 显著性检验,无偏相关系数为 $-0.196$ ,可以看出温度对 NDVI 有一定的影响作用。温度的变化趋势与 NDVI 变化趋势一致,但在少数年份随温度的降低,NDVI 反而增加,如 2007 年、2013 年,这一方面显示了植被 NDVI 对温度的敏感性,也说明温度不是唯一影响植被变化的因素,从而导致 NDVI 变化与年平均温度变化不完全吻合<sup>[28]</sup>。年 NDVI 与降水的关系见图 7,两者的相关系数为 $0.469$ ,呈较强的正相关关系,相关性通过 $0.001$ 显著性检验( $p <$

$0.001$ ),无偏相关系数为 $0.487$ ,表明 NDVI 与降水量相关性显著。年 NDVI 变化与降水量变化趋势存在一定的滞后性,海南岛 NDVI 与降水的相关系数大于与气温相关系数,表明海南岛植被生长年际变化受降水影响要强于气温。2004 年,海南岛经历了“无热带气旋影响年”,导致全年降水明显减少,从 2004 年 9 月至 2005 年 7 月,出现全岛大范围的秋、冬、春连旱,成为 55 a 来最大的一次干旱<sup>[31-32]</sup>。从图 2 中可以看出,NDVI 第一次剧烈下降阶段与这一时间吻合,干旱化势必会对植被生长产生影响,由此可以进一步佐证降水对植被 NDVI 的影响。

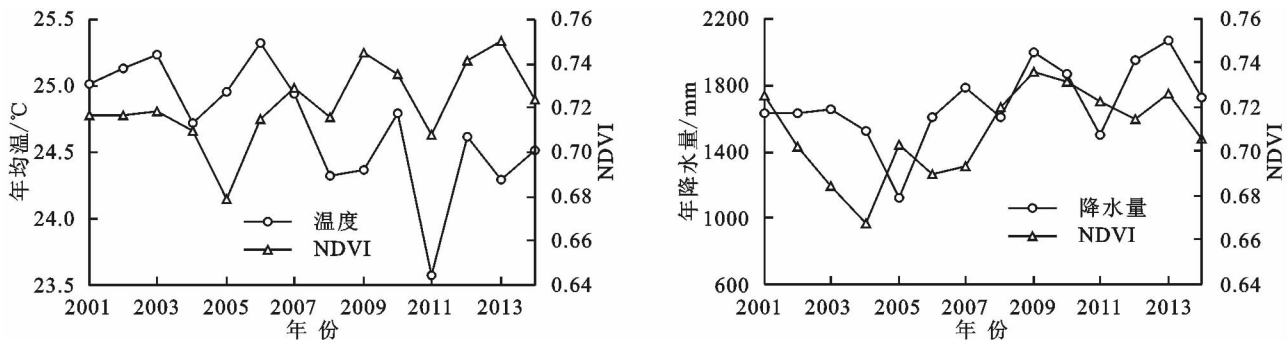


图 7 2001—2014 年 NDVI 与温度和降水量变化

海南岛是一个受热带气旋影响最严重的地区之一,热带气旋的发生对植被覆盖变化会产生不同程度的影响,所以研究 ENSO(厄尔尼诺)事件对植被的影响能够一定程度揭示极端气候因素对植被覆盖的作用。依据国家气候中心网站的 ENSO 历史事件表,选取厄尔尼诺峰值年(2002 年、2004 年、2006 年、2009 年)和拉尼娜峰值年(2008 年、2010 年、2011 年),分别计算厄尔尼诺和拉尼娜年份的 NDVI 平均值,然后计算厄尔尼诺和拉尼娜年份 NDVI 平均值与 14 a 年均 NDVI 值差值。结果显示,厄尔尼诺年植被 NDVI 正距平像元占 $34.48\%$ ,负距平像元占

$65.52\%$ ;而拉尼娜年植被 NDVI 正距平像元占 $63.01\%$ ,负距平像元占 $36.99\%$ ,可以看出拉尼娜年植被覆盖情况明显要好于厄尔尼诺年,这一结果与刘宪锋对秦巴山区的研究一致<sup>[10]</sup>。导致这一现象的原因可能为:海南岛属于热带季风气候区,厄尔尼诺年份降水减少,气温偏高,导致土壤干化增加<sup>[33]</sup>,影响植被的光合作用,进而抑制植被生长<sup>[34-35]</sup>,导致植被生产力下降。综合来看,全球尺度的气候变化对海南岛植被变化具有重要影响,若未来极端气候事件的发生持续增加,植被生长也将面临更大的风险和胁迫。

### 3.2 人类活动对植被覆盖的影响

气候的变化对植被覆盖变化具有重要的作用,但是人类活动对植被覆盖的影响也不可忽视,人类活动的作用会引起植被的局部空间变化<sup>[36]</sup>。我们从植被建设和城市扩张两方面分析人类活动产生的影响。

统计2001—2014年《海南统计年鉴》中逐年海南岛造林面积,结果显示随着累积造林面积的不断增加(图8),海南岛植被覆盖总体在波动中呈现上升趋势,二者呈显著相关性( $r=0.73$ ,  $n=14$ ,  $p<0.001$ )。自2002年开始海南开始实施大规模退耕还林工程,2002—2003年海南岛造林面积达到75 250 hm<sup>2</sup>,2003森林覆盖率提高到54.5%,同比上升1.2个百分点,14 a间海南累计造林382 954 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率由2001年的51.2%增加到2014年的61.5%。2007年我国退耕还林工作重点由增加森林面积逐步转向完善退耕还林政策,以巩固退耕还林成果。政策的调整使得造林面积相较之前有所减少,但退耕还林整的完善,使得植被覆盖仍有明显提升。总体来看,大规模的退耕还林工程实施使得海南岛的整体生态环境得到改善,植被覆盖程度在不断提高。

城市扩张与重构,引发了植被破坏等诸多环境问题,进而导致城市周边NDVI的下降。本文以海口市为例定量分析城市扩张对NDVI的影响,参照已有的研究方法<sup>[33]</sup>,以海口市驻地为圆心,生成10个1 km间隔的缓冲区,计算2001—2014年NDVI变化率,并统计不同环内的NDVI变化率。结果表明,除东南部等个别区域外,海口市城市周边大部分区域NDVI均表现为下降的趋势,表明城市扩张是导致NDVI下降的一个因素。然而,人类活动和气候变化在海南岛植被覆盖时空演变过程中的相对贡献量化仍有待下一步的探讨。

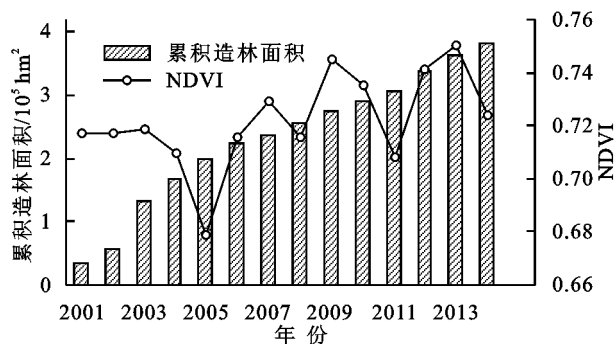


图8 海南岛植树造林面积

## 4 结论

(1) 2001—2014年海南岛植被覆盖呈增加趋势,增速为0.02/10 a。植被覆盖变化呈S型增加趋势,两次下

降阶段:2003—2005年、2009—2011年,下降率分别为5.6%,4.99%;两次增加阶段:2005—2007年、2011—2013年,增长率分别为7.46%,5.98%。

(2) 海南岛植被覆盖标准差在0.007~0.268,整体表现出中间波动小,四周波动大,大部分区域呈现中度波动形态。高波动区主要集中于海口、琼海、万宁、东方、乐东等市县沿海区域。

(3) 海南岛植被覆盖整体呈上升趋势,呈增加趋势的面积占62.93%,其中22.65%的区域呈显著增加,主要集中于儋州、临高南部、文昌北部、琼海东南部,白沙、澄迈等市县。

(4) Hurst指数分析统计结果表明,海南岛Hurst指数平均值为0.491,反向持续性像元面积占57.21%,正向持续性占42.71%,空间分布上来看,正向持续性主要分布于儋州、澄迈、临高、琼中等地区。植被覆盖变化趋势与Hurst指数耦合分析表明,未来海南岛40.90%的区域将由退化转为改善,持续退化区域占34.1%,13.94%的区域将由改善转为退化,持续改善区域占11.15%。

(5) 海南岛气温对海南岛NDVI变化的影响要大于降水,厄尔尼诺年植被NDVI正距平像元占34.48%,负距平像元占65.52%;而拉尼娜年植被NDVI正距平像元占63.01%,负距平像元占36.99%,表明拉尼娜年份的植被覆盖情况明显要好于厄尔尼诺年。

(6) 海南岛植被覆盖变化受到气候变化与人类活动的共同影响,植树造林面积的不断增加使得海南岛植被覆盖总体呈现上升趋势。

### 参考文献:

- [1] Kutiel P, Cohen O, Shoshany M, et al. Vegetation establishment on the southern Israeli Coastal sand dunes between the years 1965 and 1999[J]. Landscape & Urban Planning, 2004, 67(1/4):141-156.
- [2] Zhang X, Liao C, Li J, et al. Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2013, 21(1):506-512.
- [3] 阿多,赵文吉,宫兆宁,等. 1981—2013年华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2):576-592.
- [4] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends, 198—1990[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(18):3873-3878.



- [5] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationship to temperature and precipitation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010,22(7):1377-1382.
- [6] Mohammat A, Wang X, Xu X, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013,178:21-30.
- [7] Ren J, Liu H, Yin Yi et al. Drivers of greening trend across vertically distributed biomes in temperate arid Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007,34(7):1-5.
- [8] Li S, Yang S, Liu X, et al. NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia region, central China[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(9):11163-11182.
- [9] Miao L, Jiang C, Xue B, et al. Vegetation dynamics and factor analysis in arid and semi-arid Inner Mongolia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73(5):2343-2352.
- [10] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等. 2000—2014 秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015,70(5):705-716.
- [11] 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012,67(7):960-970.
- [12] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013,68(7):897-908.
- [13] 张学珍,戴君虎,葛全胜. 1982—2006 年中国东部春季植被变化的区域差异[J]. *地理学报*, 2012,67(1):53-61.
- [14] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012,67(9):1255-1268.
- [15] 贺振,贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. *农业机械学报*, 2017,48(2):179-185.
- [16] 张圣微,张睿,刘廷玺,等. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2017,48(3):1-11.
- [17] 丁文荣. 滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素[J]. *水土保持通报*, 2016,36(6):252-257.
- [18] 王永财,孙艳玲,王中良. 1998—2011 年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. *资源科学*, 2014,36(3):594-602.
- [19] 刘恩平. 中国热带地区农业信息化发展研究[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2013.
- [20] 陈海鹰,李洁琼. 海南省生态旅游发展的 SWOT 分析[J]. *资源环境与发展*, 2009(1):35-38.
- [21] 吴华盛. 海南省热带雨林的保护和利用[J]. *热带林业*, 2002,30(2):4-5.
- [22] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American statistical association*, 1968,63(324):1379-1389.
- [23] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J]. *干旱区研究*, 2017,34(1):10-19.
- [24] 宋怡,马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. *中国沙漠*, 2007,27(1):89-93.
- [25] 冯新灵,冯自立,罗隆诚,等. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J]. *干旱区地理*, 2008,31(2):175-181.
- [26] 刘琳,李月臣,朱翠霞,等. 2001—2010 年重庆地区 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系[J]. *遥感信息*, 2013,28(5):99-108.
- [27] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,等. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2014,34(18):5220-5228.
- [28] 陈广州,李鑫梅,焦利锋,等. 2000—2012 年淮南煤矿区植被净初级生产力的时空变化特征[J]. *生态环境学报*, 2017,26(2):196-203.
- [29] 郝玉清,刘强,钟琼芯,等. 海南省重点退耕还林区 5 年植被恢复调查与分析[J]. *防护林科技*, 2009(5):5-8,53.
- [30] 岳天祥,范泽孟. 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究[J]. *科学通报*, 2014,59(3):217-231.
- [31] 李海亮,戴声佩,胡盛红,等. 基于空间信息的农业干旱综合监测模型及其应用[J]. *农业工程学报*, 2012,28(22):181-188.
- [32] 俞胜宾,翟盘茂,张强. 1961—2004 海南岛干旱演变特征分析[J]. *热带作物学报*, 2006,27(3):111-115.
- [33] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *中国环境科学*, 2016,36(5):1568-1578.
- [34] 吴韶辉,蔡妙珍,石学根. 高温对植物叶片光合作用的抑制机理[J]. *现代农业科技*, 2010(15):16-18.
- [35] 苏伟,刘晓暄,罗倩,等. 北方农牧交错植被对气象因子变化的响应规律研究[J]. *农业机械学报*, 2015,46(11):352-359.
- [36] 韦振锋,王德光,张翀,等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. *中国沙漠*, 2014,34(6):1665-1670.