

引用格式: CHEN Jiahao, HU Zhongmin, WU Kai. Spatiotemporal variations of NDVI and the analysis of its climate driving factors in Hainan Island during 1982~2015[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5): 1071-1080. [陈甲豪, 胡中民, 吴凯. 1982~2015年海南岛NDVI时空变化及气候驱动力分析[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1071-1080.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.5.1071

# 1982~2015年海南岛NDVI时空变化及气候驱动力分析

陈甲豪, 胡中民, 吴 凯

(海南大学 生态与环境学院, 海南 海口 570228)

**摘要:** 为了揭示海南岛植被覆盖长期变化趋势以及进一步确定影响海南岛植被变化的主要气候驱动因子, 为海南岛植被应对气候变化以及植被的良性发展提供科学指导。基于GIMMS NDVI数据, 采用趋势分析法, 探究1982~2015年海南岛植被的时空变化趋势; 利用偏相关分析和主成分回归分析研究34 a里温度、降水和太阳辐射对海南岛植被变化的影响。研究表明: ①空间上海南岛植被在北部和沿海地区呈明显增加趋势, 而三亚及周边地区存在多处植被退化区域; ②时间上海南岛植被整体以缓慢增长为主, 增速为0.019/10 a, 年际变化明显; ③温度和太阳辐射显著主导海南岛88%地区的植被生长, 其驱动因子存在如下关系: 太阳辐射作用>温度作用>降水的驱动作用; ④温度主导海南岛北部及西部地区植被的生长, 太阳辐射主导驱动岛屿南部的植被生长, 而降水是岛屿中部植被的主导气候驱动因子。综上所述, 海南岛植被总体呈现良性发展的趋势, 温度和太阳辐射是促进植被生长的主要气候因子。

**关键词:** 海南岛; 归一化植被指数; 时空变化; 气候驱动力

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)05-1071-10

## 1 引言

植被是地球陆地生态系统重要的组成部分, 紧密联系着大气、土壤和水分等要素。植被类型和覆盖度的时空变化受到陆地生态系统的潜在影响, 是监测生态环境变化的综合指示器<sup>[1-3]</sup>。植被指数是反映地表植被生长和覆盖、生物量大小和植被种类的间接指标, 其中归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)通过测量近红外和红光之间的差异来量化植被生长状态, 被广泛应用于植被覆盖的定量研究<sup>[4]</sup>。伴随着海南建设国家生态文明试验区政策的逐步实施, 海南岛植被覆盖

的时空变化规律及其对气候响应的研究逐渐受到人们的关注。

为了探究植被覆盖的时空变化及其对气候因素的响应, 许多学者基于NDVI数据对植被覆盖的动态变化进行了一系列研究<sup>[5-8]</sup>, 通过区域划分、季节划分和土地类型划分结合统计方法和数值模拟, 尝试找出植被与气候因子的响应关系。这些研究表明过去几十年里, 中国地区NDVI变化幅度呈从高纬度到低纬度地区减弱的趋势<sup>[9]</sup>, 温度、降水和太阳辐射则是影响NDVI变化的主要气候因素<sup>[10]</sup>。植被变化对气候要素驱动响应也呈现出明显的区域差异性, 比如东部沿海地区NDVI变化的主要驱

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-08-06

基金项目: 中国工程科技发展战略海南研究院咨询研究项目(21-HN-ZT-09), 海南大学科研启动基金项目(KYQD(ZR)-22084), 海南省科技项目(ZDYF2022SHFZ042)资助。

作者简介: 陈甲豪(1998-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事生态遥感研究。E-mail: cjh15546450951@163.com

通讯作者: 吴 凯(1990-), 男, 山东潍坊人, 博士, 主要从事遥感数据同化和误差分析研究。E-mail: kaiwu@hainanu.edu.cn

动因子是温度<sup>[11]</sup>,在西北干旱、半干旱区则是降水主导驱动NDVI变化<sup>[9]</sup>。

已经有部分学者对海南岛植被覆盖变化及其驱动力进行了研究讨论,发现海南岛NDVI从东部到西部呈现明显的下降趋势<sup>[12]</sup>,相比较降水,NDVI与温度相关性更强<sup>[13-15]</sup>,不同植被类型对气候因子的响应不同<sup>[16]</sup>,且气温的差异是驱动月NDVI变化的主导因素<sup>[17]</sup>。同时有学者指出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<sup>[18]</sup>,气候变化对海南岛植被生长有促进作用,人类活动对海南岛地区植被的建设作用大于破坏作用<sup>[19]</sup>。但是目前相关研究多集中在温度和降水两个气候要素,较少有考虑植被对太阳辐射变化响应的研究。近些年,已经有学者指出太阳辐射是影响华南地区NDVI变化的主要气候因子<sup>[20]</sup>,因此,我们认为考虑太阳辐射的影响会更好揭示海南岛NDVI对气候变化的响应。此外,目前的相关研究一般忽略了气候因子间共线性问题,从而导致研究分析结果可能并不准确。

基于上述研究缺陷,研究利用Theil-Sen median趋势法和Mann-Kendall检验分析了1982~2015年34 a间海南岛NDVI长时间序列数据的时空变化趋势,并采用偏相关分析和主成分回归(Principle Component Regression, PCR)研究海南岛植被对温度、降水和太阳辐射的响应特征。该研究对揭示海南岛植被覆盖变化趋势以及进一步确定影响海南岛植被生长的主要气候驱动因子有重要意义,同时为海南岛植被应对气候变化以及岛内森林与农田的良性发展提供科学指导。

## 2 数据及方法

### 2.1 研究区概况

本文研究区为海南岛,地理位置界于108°37′~111°03′ E, 18°10′~20°10′ N之间,陆地面积3.39万km<sup>2</sup>,为热带海洋性季风气候区域,年平均气温22.5~26℃,最低均温大于10℃,年平均降雨量为1 759 mm,其中8月和9月份降雨量较为充沛,同时也是暴雨和台风的高发期。年光照为1 750~2 650 h,光照率为50%~60%。雨水充足,光照充沛,光合潜力高使得海南岛拥有丰富的森林资源,森林面积占比从1982年的46%增加到2015年的61%左右。

### 2.2 数据来源及处理

#### 2.2.1 NDVI数据

为量化植被生长,采用了美国宇航局(NASA)

最新提供的第3代NDVI数据集<sup>[21]</sup>(GIMMS ND-VI3g V1.0, <https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>)。该数据集提供全球NDVI数据,空间分辨率0.083°×0.083°,时间分辨率为15 d,分别融合了AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)传感器第二和第三代数据,并在融合前对传感器误差、轨道偏移、气溶胶以及云雨等问题进行了校正处理<sup>[22]</sup>。本文对1982~2015年海南岛区域NDVI逐半月数据采用最大值合成法获取NDVI年尺度的时间序列数据,该方法可以减少云覆盖、大气、太阳高度角等因素的影响,同时研究中对NDVI小于0.05的数据不予考虑。

#### 2.2.2 气候数据

温度、降水和太阳(短波)辐射数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn>)<sup>[23]</sup>。该数据集是以国际上现有的Princeton再分析资料、全球陆地数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)资料、长期地表辐射收支(Global Energy and Water Exchanges - Surface Radiation Budget, GEWEX - SRB)辐射资料,以及热带测雨任务卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission satellite, TRMM)降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。该数据集时间分辨率为每3 h,水平空间分辨率为0.1°×0.1°。用最邻近法将其插值到NDVI数据的空间网格,最终形成海南岛研究区逐半月的温度、降水和太阳辐射数据。

#### 2.2.3 土地利用类型

为了分析不同土地覆被下实验结果的差异,研究使用了宫鹏教授团队研发的GLASS-GLC数据集<sup>[24]</sup>。该产品以1982~2015年的全球陆表特征参量数据集(GLASS CDR)为数据源,借助谷歌地球引擎(Google Earth Engine)平台进行开发,空间分辨率为5 km,涵盖耕地、森林、草原、灌木、苔原、裸地和冰雪7个土地覆盖类别。实验中选取了2000年的海南岛土地利用类型,并重采样至NDVI空间网格,过程如下:逐像元统计位于NDVI网格内GLASS-GLC像元的数量和对应的土地利用类型,选取出现频率最大的类型赋值给对应NDVI网格,得到重采样后研究区的土地利用类型(图1),可以看出海南岛土地利用类型以农田和林地为主,农田多分布在海南岛北部、四周沿海区域,占海南岛总面积的55%左右,林地主要集中于中南部,占总面积

积的30%以上,这两种土地类型占据海南岛总面积的90%以上,其他土地利用类型面积占比较少。

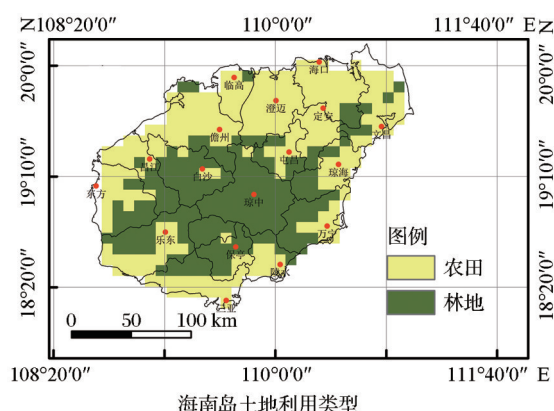


图1 2000年海南岛土地利用类型

Fig. 1 Land cover types of Hainan Island in 2000

## 2.3 方法

### 2.3.1 趋势分析

Theil - Sen median 趋势分析能够较好的描述NDVI的变化趋势,表示单位时间内NDVI的变化量,其计算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right), \forall 1982 \leq i < j \leq 2015 \quad (1)$$

其中:NDVI<sub>i</sub>和NDVI<sub>j</sub>分别为*i*、*j*时间上的NDVI值。当斜率 $\beta > 0$ 时,表示NDVI呈现增长趋势,反之则呈现下降趋势。

Mann-Kendall 检验(MK 检验)可判断趋势的显著性,且能够排除少数异常值对数据的干扰。计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sign}(x_k - x_i) \quad (2)$$

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1, \theta > 0 \\ 0, \theta = 0 \\ -1, \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

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

其中:*n*为数据集合的总长度;*x<sub>k</sub>*、*x<sub>i</sub>*为连续的NDVI数据;*Z<sub>c</sub>*正态分布统计量;sign为符号函数;Var(*S*)为方差。本文将二者相结合,用来判断研究区NDVI的变化趋势及其显著性。

### 2.3.2 偏相关分析

基于偏相关分析探究NDVI与气温、降水和太阳辐射的相关性,由于NDVI、气温、降水和太阳辐射的单位不统一,因此对原始数据依次进行标准化处理(即求其Z分数),过程如下:

$$X = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (6)$$

其中:*X*为标准化数据;*x*为原始数据; $\bar{x}$ 为原始数据的均值; $\sigma$ 为原始数据的标准差。依次得到NDVI、气温、降水和太阳辐射对应的标准化数据。

本文使用二阶偏相关,分析变量*i*和*j*之间的偏相关时,当控制了变量*h*和*m*的线性作用后,*i*和*j*之间的二阶偏相关系数定义为:

$$r_{ij \cdot hm} = \frac{r_{ij \cdot h} - r_{im \cdot h} r_{jm \cdot h}}{\sqrt{(1 - r_{im \cdot h}^2)(1 - r_{jm \cdot h}^2)}} \quad (7)$$

其中:变量*i*为标准化的NDVI时间序列数据;*j*、*h*、*m*分别对应标准化后的温度、降水和太阳辐射数据,最后得到排除其他两个因子目标变量与NDVI的偏相关系数,利用t检验对偏相关系数进行显著性检验。

### 2.3.3 主成分回归(PCR)

为了消除气候因子之间的共线性影响,得到基于Seddon等<sup>[25]</sup>的研究进行了主成分回归,分析研究区每个像元驱动NDVI半月变化的气候变量的相对重要性。流程如下:对每个像元内的NDVI、气温、降水和太阳辐射的时序数据的求Z分数,并进行主成分分析,筛选贡献度累加>95%的主成分分数作为自变量,处理后的NDVI数据为因变量逐像元建立多元线性回归模型:

$$\text{NDVI} = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (8)$$

其中:NDVI为标准化处理后的NDVI数据;*X<sub>1</sub>*、*X<sub>2</sub>*、*X<sub>i</sub>*分别为贡献度累加>95%的前*i*个主成分; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_i$ 为对应的主成分回归系数; $\alpha$ 是常数; $\varepsilon$ 是残差。

利用t检验删除不显著的回归系数( $P > 0.05$ ),将每个变量的主成分分数乘以PCR的系数,并将结果相加,得到每个气候变量的权重。

### 2.3.4 主导气候驱动因子

为了探究哪个气候因素对海南岛植被影响作用最大,在每个实验像元内,对NDVI与温度、降水和太阳辐射主成分回归系数的绝对值进行排序比较大小,找到3个回归系数绝对值中的最大值,并标记出对应的气候因子,由此得到对NDVI影响最大气候因子的空间分布。在此基础上统计最大偏相



关系数的正负符号,判断主导驱动因子对 NDVI 是促进还是抑制作用。

### 3 结果与分析

#### 3.1 海南岛植被 NDVI 时空变化趋势

##### 3.1.1 空间变化趋势

对海南岛区域各像元的 NDVI 时间序列数据进行 Theil - Sen median 趋势分析及 MK 显著性检验 ( $P < 0.05$ ),得到 1982~2015 年海南岛区域 NDVI 逐半月变化趋势的空间分布。如图 2 所示,1982~2015 年间海南岛 NDVI 整体变化趋势以缓慢增长为主,总体来看,增长趋势东部高于西部,91.06% 的区域通过了显著性检验。斜率  $\beta$  值在  $-0.000\ 05 \sim 0.000\ 2$  之间,  $\beta > 0$  的区域占海南岛面积的 89.41%。其中  $\beta$  值较大的区域主要集中在海南岛东北部(澄

迈县、定安县和文昌市等)以及西北部沿海区域(临高县、儋州市、东方市等),这部分区域植被 NDVI 呈明显增加趋势。

总体来看,近几十年来这些城市城镇化建设加速扩张,在生态保护以及橡胶树产业扶持的大背景下<sup>[26]</sup>,人类活动较为活跃,对植被 NDVI 的增长有积极影响,表现出 NDVI 增加速度较快;而中部地区(五指山市、琼中县、屯昌县和白沙县等)  $\beta$  值较小,主要原因可能是海南岛热带雨林多集中于该地区,植被覆盖基数较大,草地减少并转化为林地是该地 NDVI 增加的主要原因<sup>[27]</sup>;相比较下,三亚地区多处出现 NDVI 减少趋势,这与当地房地产建设、旅游资源开发等人类活动有关,导致林地与农田减少,显著降低了三亚以及周边沿海地区植被 NDVI<sup>[28]</sup>。这表明对 NDVI 时空变化分析时应该考虑人类活动的影响。

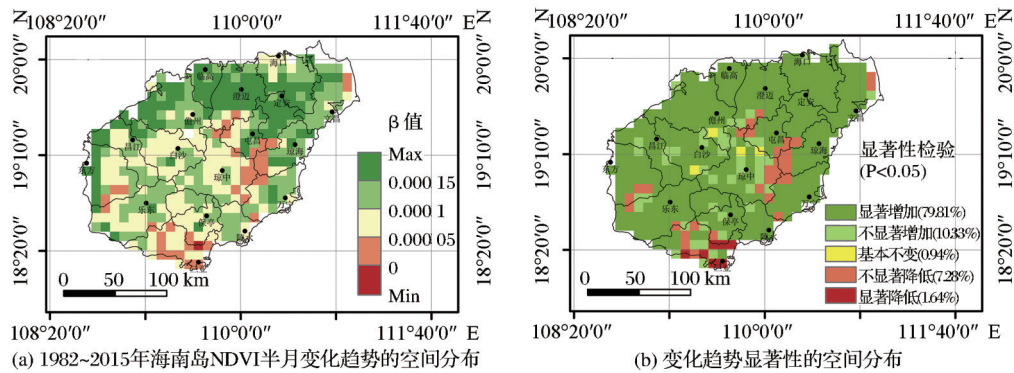


图 2 1982~2015 海南岛 NDVI 变化趋势空间分布和显著性检验

Fig.2 Spatial distribution of NDVI variation trend and corresponding significance test in Hainan Island from 1982 to 2015

##### 3.1.2 时间变化趋势

绘制 1982~2015 年海南岛逐半月和逐年的 NDVI 空间均值变化趋势图,从图 3(a)可以看出 34 年里海南岛 NDVI 变化呈增加趋势,增速为 0.019/10 a。年内变化幅度较大,变化范围主要集中在 0.45~0.70 之间,NDVI 数值普遍较高。

通过计算每年最大 NDVI 的空间均值,得到海南岛 NDVI 年际变化趋势,如图 3(b)所示,1982~2015 年海南岛 NDVI 增加趋势显著,海南岛 NDVI 空间均值从 1982 年的 0.784 3 增加到 2015 年的 0.814 5,增速为 0.007/10 a。农田网格的 NDVI 均值增速快于整体和林地网格,增速为 0.012/10 a,相比之下林地 NDVI 增速较缓慢增速仅 0.000 5/10 a。总体上,在 1990 年、1997 年、2002 年、2009 年和 2012 年 NDVI 数值较高,而 1991 年、1993 年、2000 年和 2005 年数值较小。近 30 a 来 NDVI 空间均值于

2005 年出现极小值,与当年的 18 号台风“达维”登陆海南岛有关,这表明极端天气、自然灾害在 NDVI 趋势分析中应该被考虑和重视。

#### 3.2 NDVI 与气候因子的偏相关分析

偏相关分析作为回归分析的基础和前提,采用偏相关系数分析了温度、降水和太阳辐射与 NDVI (逐半月)的相关性,结果如图 4 所示。

#### 3.3 主成分回归分析 NDVI 变化驱动力

通过偏相关分析得到对 NDVI 显著相关的气候因子,基于主成分分析,筛选累加贡献度前 95% 主成分与 NDVI 建立多元线性回归模型,解决自变量间共线性问题,更好地分析气候变化对植被生长的综合作用,如图 5 所示。

图 5(a) 显示温度回归系数的空间分布存在明显的南北差异,温度对 NDVI 的促进作用呈北方强于南方的空间格局。海南岛北部地区 NDVI 对温度

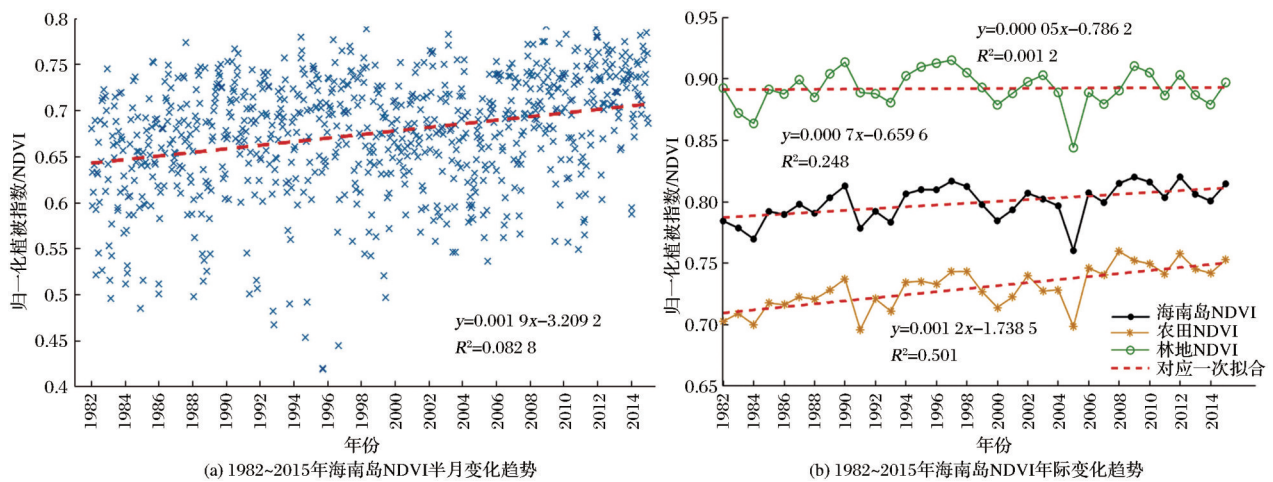
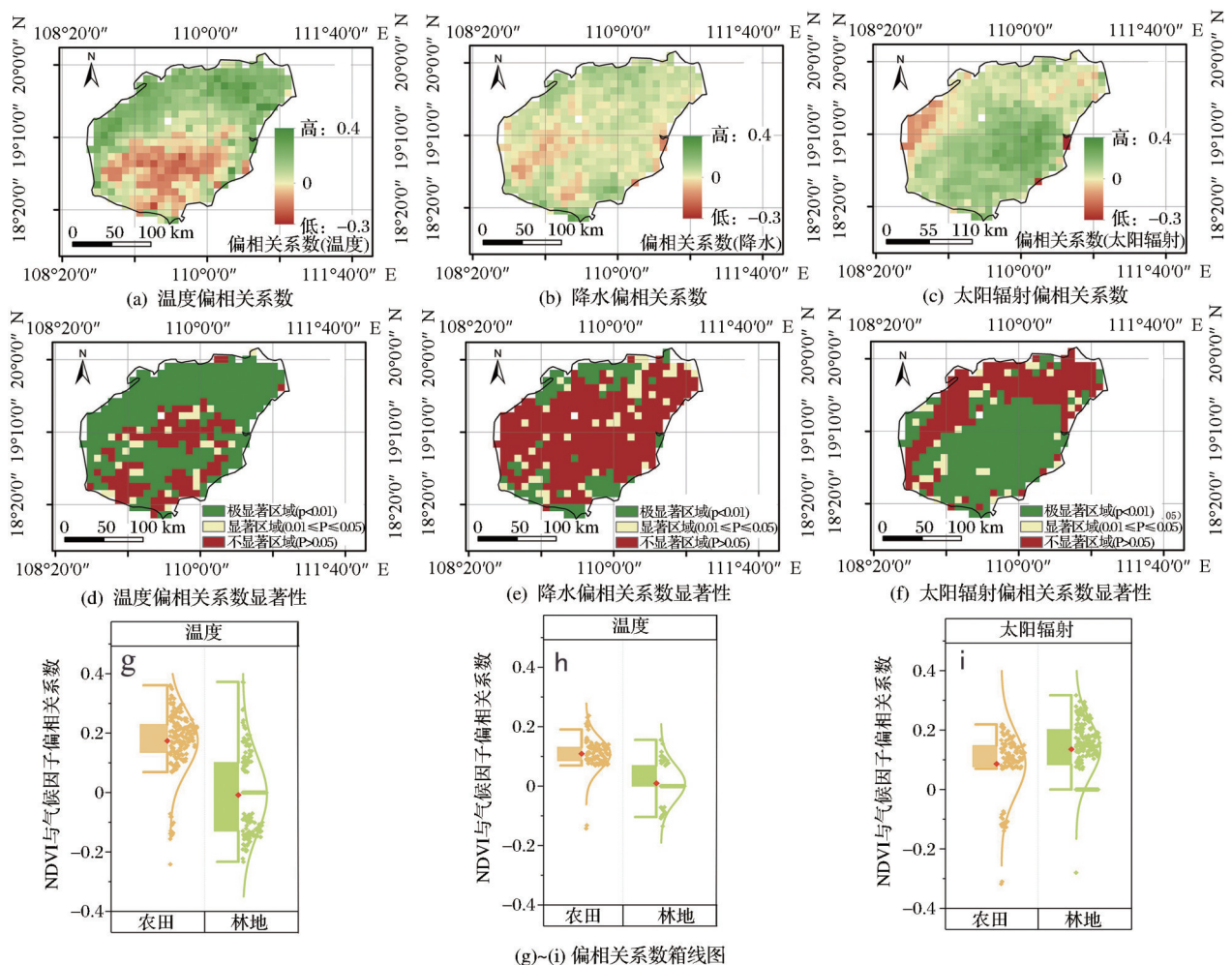


图3 1982~2015海南岛NDVI年内变化和年际变化趋势

Fig.3 Inter-annual and Intra-annual variation trends of NDVI in Hainan Island from 1982 to 2015

图4 海南岛NDVI与温度、降水和太阳辐射偏相关系数 ( $P<0.05$ )Fig. 4 Partial correlation coefficients ( $P<0.05$ ) between NDVI and temperature, precipitation, and solar radiation in Hainan Island

的响应较强,这些区域占海南岛总面积的82%,可能原因是温度的升高显著延长了植物的生长季节,进而促进NDVI的增加<sup>[29]</sup>。但海南岛南部区域(占

研究区域18%面积)植被与温度的回归系数为负值,海南岛南部土地利用类型多为林地,NDVI在植被高覆盖区容易饱和<sup>[30]</sup>。图5(d)箱线图结果显示

表 1 海南岛 NDVI 与气候因子偏相关系数和显著性

Table 1 Partial correlation coefficients and corresponding statistical significance between NDVI and climatic factors in Hainan Island							
气候因子	正相关 面积比	正相关系数 空间均值	负相关 面积比	负相关系数空 间均值	极显著区域 ( $P<0.01$ )	显著区域 ( $0.01\leq P\leq 0.05$ )	不显著区域 ( $P>0.05$ )
温度	68.47%	0.16	31.53%	-0.10	67.76%	7.06%	25.18%
降水	76.00%	0.06	24.00%	-0.04	19.29%	11.06%	69.65%
太阳辐射	87.06%	0.12	12.94%	-0.09	56.00%	7.53%	36.47%

温度对农田区域 NDVI 的促进作用整体高于林地，农田区域内 75% 面积的温度回归系数大于 0，表明温度促进了海南岛大部分农田 NDVI 的增长，相比较农田，林地对温度变化的响应较弱，且回归系数分布离散程度高。

如图 5(b) 所示，海南岛地区 NDVI 与降水回归系数整体偏小，对降水的响应弱于温度，这与其他学者研究结果基本一致<sup>[14-15,17]</sup>。降水成为海南岛中南部林地（约占总面积 30%）NDVI 的增长的限制因素，原因是海南岛位于热带气候区，气候湿润，全年降雨量充沛，宏观上降水对植被的影响力减弱，甚至部分地区降水出现过饱和现象，对植被生长产生

抑制作用<sup>[29]</sup>，这一点也体现在图 5(e)，可以明显看出降水促进了大部分农田 NDVI 的增长，同时对林地 NDVI 的影响具有两面性，即适量降水促进 NDVI 增长而过量降水则对 NDVI 增长起到抑制作用。

图 5(c) 和 5(f) 显示海南岛绝大部分地区 NDVI 受太阳辐射影响显著，太阳辐射促进了海南岛总面积 98% 的地区 NDVI 增长。原因在于辐射能促进植被光合作用，对植被 NDVI 的增长产生了积极的影响。目前已有研究指出太阳辐射对中国中南部地区植被生长具有重要贡献，尤其在中国华南地区，太阳辐射已经成为影响植被生长的重要气候因子<sup>[31, 32]</sup>，这与本文研究结果一致。

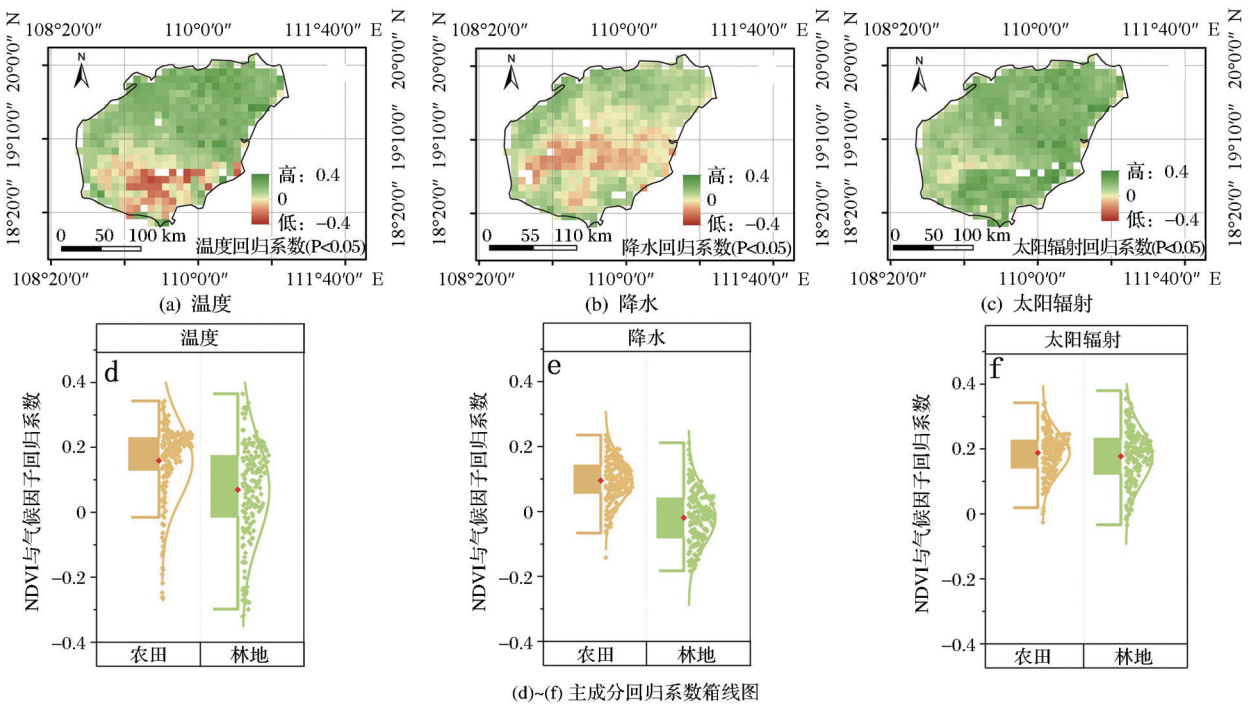


图 5 海南岛 NDVI 与温度、降水和太阳辐射的主成分回归系数 ( $P<0.05$ )

Fig. 5 Coefficients of PCR ( $P<0.05$ ) between NDVI and temperature, precipitation, and solar radiation in Hainan Island

为了探究不同区域内哪个气候因素对海南岛植被影响作用最大，对每个实验像元内 NDVI 与温度、降水和太阳辐射主成分回归系数的绝对值进行排序比较大小，绝对值最大的，在对应像元中标记

出对应的气候因子，得到海南植被变化主导气候驱动因子的空间分布图 6(a) 和主导气候驱动因子呈现促进、抑制作用的区域分布。

如图 6(a) 所示，海南岛东北部及西部沿海区域



(占总面积的38.82%)温度与NDVI的偏相关系数绝对值最大,岛屿南部(占总面积的49.18%)太阳辐射与NDVI的偏相关系数绝对值最大,中部及少数沿海地区(占总面积的12%)降水与NDVI的偏相关系数绝对值最大。这表明温度作为主导气候因素,控制着海口市、文昌市、澄迈县、定安县、东方市西部沿海等地区的NDVI变化。太阳辐射则主导着儋州市、屯昌县、白沙琼中黎族苗族自治县北部、保亭黎族苗族自治县和乐东黎族自治县南部地区的NDVI变化。降水主导着南部沿海区域,如三亚市、

陵水黎族自治县南部、乐东黎族自治县北部等区域的NDVI变化。温度和太阳辐射主导海南岛88%总面积的NDVI变化。图6(b)展示了研究区内各主要气候驱动力促进或抑制植被生长的区域及其空间分布。其中呈促进作用的地区占总面积的88.24%,而呈抑制作用的区域多分布在岛屿西南部,占总面积的11.76%,且位于降水作为主导驱动力的区域,这表明降水作为主导该地区NDVI变化的气候驱动因子,成为该地区NDVI增长的主要限制因子。

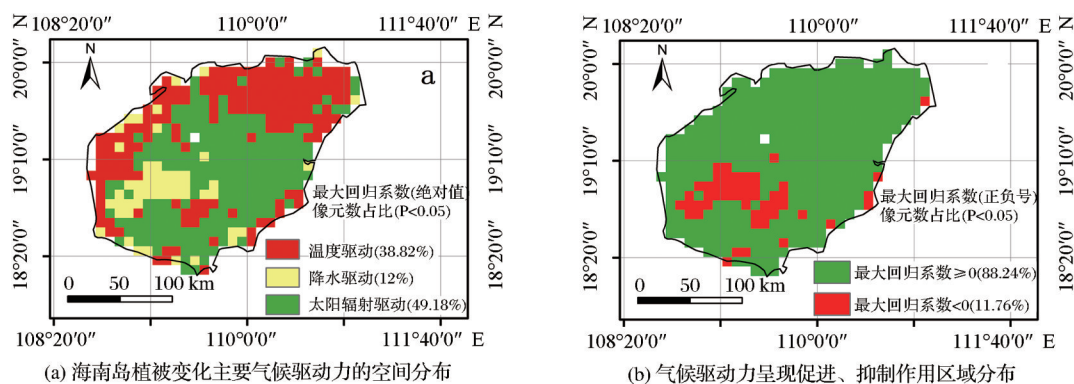


图6 海南岛植被变化气候驱动力

Fig. 6 Climatic driving factor of vegetation variability in Hainan Island

## 4 讨论

为了更好地探究海南岛植被对气候因子的变化响应,研究中使用了1982~2015年NDVI长时间序列数据,时间跨度大且样本数量多,但缺点是NDVI在高植被覆盖地区容易出现过饱和现象<sup>[30]</sup>,使用增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)数据虽然可以解决这一问题,但目前最长时间的EVI数据是MODIS产品,其起始时间是2000年,时间跨度远小于本文使用的NDVI产品。研究结果显示1982~2015年里海南岛90%地区的植被显著增加,其中温度和太阳辐射是海南岛植被NDVI增长的主要气候驱动力,显著主导了海南岛88%地区的植被生长。这与当前全球气候气候变暖导致北半球大部分地区植被发生显著变化的主流观点相一致<sup>[2, 4]</sup>。

以往针对海南岛植被气候驱动力的研究多集中在温度和降水<sup>[14, 17]</sup>,较少考虑太阳辐射的影响,本文的实验结果表明海南岛植被覆盖变化的气候驱动因子存在如下关系:太阳辐射作用>温度作用>降水的驱动作用,说明研究海南岛NDVI对气候响应机制时,太阳辐射是一个不能忽视的重要气候变

量。海南岛植被,尤其是森林,对降水的响应较弱,毛德华等<sup>[11]</sup>指出,相比较耕地,森林受降水影响较小。同时海南岛地处华南地区,充足的降水使得植被对水分变化的响应不敏感,因此光照和温度是导致海南岛植被覆盖变化的主要原因,这与现有研究结果一致<sup>[16, 31]</sup>。

海南岛植被对气候因子的响应存在空间异质性,这与刘少军<sup>[14]</sup>、罗红霞<sup>[16, 18-19]</sup>等的研究结果基本吻合。因为土壤类型、植被类型、土壤水分和高程等多种因素的影响了温度、降水和辐射的分布,使得植被在不同热量带、不同湿润地带、不同地形单元甚至不同季节,对气候因子的响应具有差异,并形成明显的区域性特点<sup>[9]</sup>。此外,从植被类型上来看,海南岛农田多分布在北部以及四周沿海区域,林地主要集中于中南部,而不同植被类型对温度、降水和太阳辐射的响应存在差异。温度促进海南岛北部及西部NDVI变化,太阳辐射促进了岛上大部分植被的生长,同时也是岛屿南部林地NDVI的变化主导气候驱动因子。

本文为理解热带植被动态变化及其气候影响机制提供参考依据,然而热带地区季节不分明,森

林覆盖面积广且植被类型多样。因此在未来,将会考虑植被和气候数据的季节性趋势以及植被(尤其是森林)的时间滞后效应<sup>[25]</sup>,结合多种土地利用类型,量化其他因素(人类活动、二氧化碳以及氮沉降等),进一步完善相关研究。

## 5 结 论

基于1982~2015年海南岛NDVI长时间序列数据,采用Theil-Sen Median法分析了34 a里海南岛植被NDVI的变化趋势,并采用偏相关分析和主成分回归分析探究植被NDVI对气候驱动因子变化响应的空间格局,得出以下结论:

(1)1982~2015年间海南岛植被覆盖整体变化趋势以缓慢增长为主,增速为0.019/10 a。从空间分布看,海南岛90%左右的区域植被覆盖增加,其中东北部(澄迈县、定安县和文昌市等)和西北部沿海区域(临高县、儋州市、东方市等)呈明显改善的趋势,这得益于生态保护政策和橡胶树产业的振兴;三亚及周边地区出现多处植被覆盖退化区域,可能与当地房地产建设、旅游资源开发等人类活动侵占了原有的林地与农田有关。从时间分布来看,34 a间海南岛NDVI年内变化显著,整体呈现缓慢增长的趋势,其中农田区域NDVI增速快于林地。

(2)海南岛NDVI与不同气候因子相关性存在差异。岛屿北部地区NDVI与温度呈显著正相关关系,南部区域NDVI和温度呈显著负相关。NDVI与降水的相关性较弱,偏相关系数空间分布上呈西南部低于东北部,NDVI与太阳辐射的偏相关系数在空间上表现为从南到北,从东到西减小的趋势。

(3)海南岛不同的植被类型对气候因子的响应也存在差异。农田对温度和降水的响应整体高于林地;适量降水促进了植被的生长,但过量的降水却成为林地NDVI增长的限制因素;太阳辐射促进了植物的光合作用,对海南岛农田和林地NDVI的增长产生积极的影响。

(4)温度和太阳辐射主导海南岛88%总面积的NDVI变化。其中温度是海南岛东北部及西部沿海区域NDVI变化的主导驱动力,太阳辐射则主导驱动着岛屿南部NDVI的变化,而降水作为岛屿中部(占总面积12%)NDVI的主导气候驱动因子,限制了该地区植被的生长。太阳辐射是显著影响海南岛NDVI变化的一个关键气候因子,在往后的相关研究中,应当考虑太阳辐射的影响。

## 参考文献(References):

- [1] GAO J, JIAO K, WU S, *et al.* Past and future effects of climate change on spatially heterogeneous vegetation activity in China[J]. *Earths Future*, 2017, 5(7): 679-692.
- [2] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [3] FANG Jingyun, SONG Yongchang, LIU Hongyan, *et al.* Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(9): 1105-1122.[方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 等. 植被气候关系与我国的植被分区(英文)[J]. *植物学报(英文版)*, 2002, 44(9): 1105-1122.]
- [4] 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]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 75(5): 961-974.[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.]
- [5] MIAO Zhenghong, LIU Zhiming, WANG Zongming, *et al.* Dynamic monitoring of vegetation fraction change in Jilin Province based on MODIS NDVI[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(3): 387-393.[苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于MODIS NDVI的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(3): 387-393.]
- [6] XIA Lu, LIU Yongmei, KE Changqing. Study on the dynamic changes of vegetation in The Loess Plateau based on data from SPOT4[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(1): 67-71, 126.[夏露, 刘咏梅, 柯长青. 基于SPOT4数据的黄土高原植被动态变化研究[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(1): 67-71, 126.]
- [7] FANG Jingyun, PIAO Shilong, HE Jinsheng, *et al.* Vegetation of China invigorated in last 20 years[J]. *Science in China: Series C*, 2003 33(6): 554-565.[方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近20年来中国植被活动在增强[J]. *中国科学*, 2003 33(6): 554-565.]
- [8] KAWABATA A, ICHII K, YAMAGUCHI Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation[J]. *International journal of remote sensing*, 2001, 22(7): 1377-1382.
- [9] SUN Hongyu, WANG Changyao, NIU Zheng, *et al.* Analysis of the vegetation cover change and the relationship between ndvi and environmental factors by using NOAA time series data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 3(2): 204-210.[孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于NOAA时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 1998, 3(2): 204-210.]
- [10] MA Mingguo, WANG Jian, WANG Xuemei, *et al.* Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 421-431.[马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感



- 的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.]
- [11] MAO Dehua, WANG Zongming, LUO Ling, *et al.* Correlation analysis between NDVI and climate in Northeast China based on AVHRR and GIMMS data sources[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1): 77-85. [毛德华, 王宗明, 罗玲, 等. 基于MODIS和AVHRR数据源的东北地区植被NDVI变化及其与气温和降水的相关分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 77-85.]
- [12] ZHANG Ming, ZHANG Peisong, LIU Hongbin, *et al.* Study of annual vegetation variability in hainan island based on spot vegetation data[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2009, 31(3): 148-153. [章明, 张培松, 刘洪斌, 武伟, 罗微, 林清火. 基于SPOT VEGETATION数据的海南岛年际植被变化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(3): 148-153.]
- [13] LIU Shaojun, HUANG Yanbin, CHEN Huilin, *et al.* Vegetation index seasonal change and vegetation cover analyzing in Hainan Island[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 86-88. [刘少军, 黄彦彬, 陈汇林, 等. 海南岛植被指数季节性变化及植被覆盖分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 86-88.]
- [14] LIU Shaojun, HUANG Yanbin, LI Tianfu, *et al.* Study on driver factors of vegetation index based on MODIS in Hainan Island[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2007, 19(1): 56-59. [刘少军, 黄彦彬, 李天富, 等. 基于MODIS的海南岛植被指数变化的驱动因子分析[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(1): 56-59.]
- [15] Guo P, Zhao X, Shi J, *et al.* The influence of temperature and precipitation on the vegetation dynamics of the tropical island of Hainan[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 143(1): 429-45.
- [16] LI Weiguang, TIAN Guanghui, ZOU Haiping, *et al.* Typical vegetation area EVI characteristics and responses to meteorological factors in Hainan Island[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(35): 190-194. [李伟光, 田光辉, 邹海平, 等. 海南岛典型植被区EVI特征及其对气象因子的响应[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 190-194.]
- [17] LUO Hongxia, WANG Lingling, CAO Jianhua, *et al.* NDVI variables and its relationship with temperature and precipitation in Hainan Island from 2001 to 2014 based on MODIS NDVI[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(4): 856-861. [罗红霞, 王玲玲, 曹建华, 等. 海南岛2001-2014年植被覆盖变化及其对气温降水响应特征研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 856-861.]
- [18] LUO Hongxia, DAI Shengpei, LIU Enping, *et al.* Spatio-temporal variable vegetation on Hainan Island during 2001-2014[J]. Research of Soil and Water Conservation, 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.]
- [19] LUO Hongxia, DAI Shengpei, LI Maofen, *et al.* Relative roles of climate changes and human activities in vegetation variables in Hainan Island[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(1): 154-161. [罗红霞, 戴声佩, 李茂芬, 等. 海南岛植被覆盖变化驱动因子及相对作用评价[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 154-161.]
- [20] JIANG P, DING W, YUAN Y, *et al.* Interannual variability of vegetation sensitivity to climate in China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301(6): 113769.
- [21] The National Center for Atmospheric Research. (2018). 全球1/12度 AVHRR GIMMS 均一化植被指数(1981-2015) [DB]. National Tibetan Plateau Data Center, 2018.
- [22] PINZON J E, TUCKER C J. A Non-stationary 1981 - 2012 AVHRR NDVI3g Time Series[J]. Remote Sensing, 2014, 6(8): 6929-6960.
- [23] YANG K, HE J. China Meteorological Forcing Dataset (1979-2018) [DB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369. file.CSTR: 18406.11.AtmosphericPhysics.tpe.249369. file.
- [24] LIU H, GONG P, WANG J, *et al.* Annual Dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015 [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(2): 1217-1243.
- [25] SEDDON A W R, MACIAS-FAURIA M, LONG P R, *et al.* Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability[J]. Nature, 2016, 531(7593): 229-232.
- [26] WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, *et al.* The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7364-7374. [王树东, 欧阳志云, 张翠萍, 等. 海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7364-7374.]
- [27] DAI Shengpei, LUO Hongxia, HU Yingying, *et al.* Dynamic land use change of hainan island in recent 20 years based on GLC30 data[J]. Agriculture & Engineering, 2021, 11(9): 61-69. [戴声佩, 罗红霞, 胡盈盈, 等. 基于GLC30数据的近20年海南岛土地利用动态变化研究[J]. 农业工程, 2021, 11(9): 61-69.]
- [28] WANG Jieyong, LIU Yansui. Land use and land cover change and its driving forces in Sanya[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(8): 1458-1466. [王介勇, 刘彦随. 三亚市土地利用/覆被变化及其驱动机制研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1458-1466.]
- [29] XU Xingkui, LIN Chaohui, XUE Feng, *et al.* Correlation analysis between meteorological factors and the ratio of vegetation cover[J]. Acta Ecology Sinica, 2003, 23(2): 221-230. [徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 221-230.]
- [30] WANG Zhengxin, LIU Chuang. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in Vegetation Index research [J]. Acta Ecology Sinica, 2003, 23(5): 979-987. [王正兴, 刘闯. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987]
- [31] HE Yong, DONG Wenjie, GUO Xiaoyan, *et al.* The terres-

trial growth and its relationship with climate in China based on the MODIS data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 27(12): 5086-5092. [何勇, 董文杰, 郭晓寅, 等. 基于MODIS的中国陆地植被生长及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2003, 27(12): 5086-5092.]

[32] CHEN S, ZHANG Y, WU Q, *et al.* Vegetation structural change and CO<sub>2</sub> fertilization more than offset gross primary production decline caused by reduced solar radiation in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296(5993): 108-207.

## Spatiotemporal Variations of NDVI and the Analysis of Its Climate Driving Factors in Hainan Island During 1982~2015

CHEN Jiahao, HU Zhongmin, WU Kai

(*College of Ecology & Environment, Hainan University, Haikou 570228, China*)

**Abstract:** To reveal the long-term variation trend of vegetation cover and further determine the main climatic driving factors affecting vegetation variation in Hainan Island. Also, to provide scientific evidence related to the impact of climate change on vegetation and scientific basis for achieving vegetation optimum development in island regions. The spatiotemporal variation trend of vegetation in Hainan Island from 1982 to 2015 was explored by applying trend analysis method to the GIMMS NDVI data. The effects of temperature, precipitation, and solar radiation on vegetation variability in Hainan Island were investigated by partial correlation analysis and principal component regression analysis over the 34 years. Results show that: ① Spatially, vegetation exhibited a significant increasing trend in the northern and coastal regions of Hainan Island while displayed a degeneration trend in Sanya city and its surrounding areas. ② Temporally, we found the vegetation in Hainan Island showed a slowly increased trend in most areas with a speed of 0.019/10 a and its intra-annual variability was obvious. ③ In general, temperature and solar radiation jointly dominate the vegetation growth in 88% areas of Hainan Island in a significant way. Solar radiation was the most important climate driving factor to control vegetation variability in Hainan Island, followed by temperature, and precipitation had a small impact on the vegetation variability. ④ Temperature dominated the vegetation variability in the northern and western areas of the Hainan Island. By contrast, solar radiation dominated the vegetation variability in the southern areas of the Hainan Island. Precipitation was the dominant climate driving factor to explain the variability of forests in the middle of the Hainan Island. Overall, this study found that temperature and solar radiation were two major climate driving factors which affected vegetation growth in the Hainan Island.

**Key words:** Hainan Island; NDVI; Spatiotemporal variations; Climate driving factors