

# 中南半岛春季植被覆盖变化及其与 ENSO 的联系

陈海山<sup>①②</sup>, 钱满亿<sup>②</sup>, 华文剑<sup>①②\*</sup>

① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

② 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044

\* 联系人, E-mail: wenjian@nuist.edu.cn

2020-10-14 收稿, 2020-11-08 接受

国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41861144013)

**摘要** 利用归一化植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)、气候资料以及环流场数据,探讨了中南半岛地区植被覆盖变化特征及其与 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)的联系。研究表明,降水是影响春季植被生长的主要因子,与 NDVI 呈显著的正相关关系;而温度、辐射与 NDVI 呈负相关关系。进一步分析表明,当前期冬季赤道中东太平洋海温异常偏暖(发生厄尔尼诺事件)时,中南半岛附近海平面气压偏高、850 hPa 风场辐散,上升运动偏弱,不利于云和降水形成,而有利于太阳辐射增加和温度升高,降水减小和温度升高均抑制春季中南半岛植被生长;反之,当前期冬季发生拉尼娜事件时,有利于中南半岛植被生长。

**关键词**  
中南半岛;  
植被覆盖变化;  
春季;  
ENSO

植被是陆地生态系统的重要组成部分,是连接大气和土壤的“纽带”,与大气之间存在着复杂的相互反馈作用(Bonan, 2008)。作为陆地生物圈的主体,一方面,植被可以通过生物地球物理和生物地球化学过程影响地气之间的水分、热量、碳交换以及物质输送,进而影响局地或全球的天气和气候变化(Hua and Chen, 2013; Mayaux et al., 2013; 华文剑等, 2014; 陈海山等, 2019)。另一方面,气候因素也显著改变地表植被的生长状况、地理分布、生物物理、生物化学和生态过程等(Zhou et al., 2001; Zhou et al., 2003a)。因此,研究植被对气候变化的影响和响应具有重要的科学意义。

近几十年来,全球大部分地区的植被覆盖都呈现“变绿”趋势(Piao et al., 2011a; Zhu et al., 2016),尤其是气温升高造成北半球中高纬度的植被活动更加活跃(Zhou et al., 2001)。而热带地区的植被覆盖在 20 世纪 80 年代后总体处于上升趋势,在 2000 年以后呈现缓慢下降趋势(梁博毅等, 2016)。例如,亚马孙热带雨林东北部,刚果盆地西部以及几内

亚高原西南部植被明显减少(尹思阳, 2017)。由于气候变化和森林砍伐等人类活动的双重影响,热带地区的植被急剧减少,导致更为暖干的气候(de Jong et al., 2013; Lawrence and Vandecar, 2015)。温度、降水以及太阳辐射通常被认为是影响植被活动最主要的因子(Nemani et al., 2003)。然而,不同地区植被生长的主导因子存在差异。温度通常是温带和寒温带地区植被变化的控制因子(Zhou et al., 2003b; Zhang et al., 2004; Hua et al., 2017)。而植被与降水的显著关系往往出现在干旱半干旱地区和干湿季气候差异明显的区域(Spano et al., 1999)。在热带地区,通常认为降水和太阳辐射是主导植被生长的主要因素(Nemani, 2003)。关于全球和区域植被活动与气候变化的联系已有大量翔实的工作(Gong and Ho, 2003; Lee et al., 2011; Peng et al., 2014)。研究表明,欧亚中高纬植被的生长不仅受到中高纬系统的影响,如前期冬季北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)、北极极涡,还受到热带系统的影响,如当 El Niño 发生时会在孟加

引用格式: 陈海山, 钱满亿, 华文剑. 2020. 中南半岛春季植被覆盖变化及其与 ENSO 的联系 [J]. 大气科学学报, 43(6): 1065-1075.

Chen H S, Qian M Y, Hua W J. 2020. Vegetation cover change in the Indo-China Peninsula in spring and its relation to ENSO [J]. Trans Atmos Sci, 43(6): 1065-1075. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201014007. (in Chinese).

拉湾区域激发向极 Rossby 波列,通过大气环流异常对局地气温造成影响,从而抑制植被的生长(Li et al. 2016)。植被对大尺度气候系统的响应表现为直接和间接影响。一方面,大尺度气候系统一定程度上直接控制局地或区域气候,进而影响着植被覆盖或者植被生长;另一方面,大气环流、海温/海冰、陆面过程也会间接影响植被活动。例如,作为年际尺度上全球变化最强的信号,厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)或者热带太平洋海温异常可以通过影响非局地的降水进而影响植被覆盖变化。因此,植被对大尺度气候系统(如 ENSO)的响应研究也得到广泛的关注(Asner et al., 2000; Anyamba et al., 2002)。

中南半岛位于印度次大陆与西北太平洋之间,同时受到印度季风和东亚季风的影响(Ge et al., 2017),具有复杂的气候特征(Takahashi and Yasunari, 2006)。该地区的植被覆盖率高,气候变化对中南半岛的经济、农业、生态具有重要的影响。所以,研究中南半岛区域植被生长季状况的变化情况及其气候成因至关重要。然而,针对中南半岛植被覆盖变化及其对气候变化响应的研究还相对缺乏。中南半岛地区的植被覆盖变化特征如何?其对温度、降水和辐射的响应特征怎么样?与大尺度气候系统(如 ENSO)的联系如何?这些问题还有待深入研究。因此,本文利用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、气候资料以及环流场数据等,探讨中南半岛地区植被覆盖变化特征及其与 ENSO 的联系。

## 1 资料和方法

采用的研究资料包括植被指数、ENSO 指数、观测降水、温度、辐射、云量和海温数据以及美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料等。归一化植被指数(NDVI)是目前应用最为广泛和时间尺度较长的植被指数,是对地表植被状况最有效、简单的度量,能够准确地反映植被的覆盖程度和光合作用强度。因此,NDVI 常被用于植被生长、生物量、土地覆盖变化等方面的研究(Zhou et al., 2001; Zhou et al., 2003a; Hua et al., 2017; 黄清翰等, 2018)。NDVI 是基于 GIMMS (Global Inventory Modelling and Mapping Studies) 遥感产品得到的(Beck et al., 2011),该数据从 1981 年 7 月到 2015 年 12 月,本研究所采用的版本是 GIMMS-NDVI3g (<https://ecocast.arc.nasa.gov/>

[data/pub/gimms/3g.v1/](https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/)),空间分辨率为 $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ (大约 8 km)。NDVI 的月平均数据采用最大值合成方法(Max Value Composite, MVC)获取(Holben, 1986),MVC 方法能在很大程度上去除云、水汽吸收对 NDVI 的影响。NDVI 与植被覆盖度、叶面积指数、干物质积累及植被生产力等有很好的相关性,而且还可以消除大部分与太阳高度角、卫星视角不同等大气条件有关辐照度的变化,增强植被的响应能力(陈良富等, 2005)。土地覆盖数据来源于 MODIS 土地覆盖类型产品(MCD12C1),空间分辨率约为 $0.05^\circ$ 。该土地覆盖数据集中包含了 17 个主要土地覆盖类型,其中包括 11 个自然植被类型,3 个土地开发和镶嵌的地类和 3 个非草木土地类型定义类。

ENSO 指数(热带太平洋海温指数)采用美国气候预报中心提供的 Niño3.4 指数([https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)),Niño3.4 指数的具体区域为:  $170^\circ \sim 120^\circ \text{W}$ 、 $5^\circ \text{N} \sim 5^\circ \text{S}$ 。温度、降水、云量等气候变量采用东英吉利(East Anglia)大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)的格点化数据集(CRU TS v4.04; Harris et al., 2014),它以全球气象站点观测数据为基础构建,是当前应用最广泛的全球格点化的陆面资料,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,数据从 1901 年到 2019 年。太阳辐射数据采用 CRUNCEP Version 7 资料中到达地面的太阳辐射(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds314.3/>),空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,CRUNCEP 资料融合了 CRU 观测资料和 NCEP 再分析资料。观测海表面温度资料来自英国哈德莱中心(HadISST1),分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。NCEP/NCAR 提供环流场数据,包括海平面气压(SLP)、风场和位势高度场等再分析资料,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

考虑到资料时间尺度的统一性,研究的时段选取为 1982—2015 年。分析方法主要包括相关分析、合成分析、回归分析等,显著性检验采用  $t$  检验。本文所定义的春季是指 4—5 月。

## 2 中南半岛植被覆盖变化特征

图 1a 是 1982—2015 年中南半岛地区多年平均植被 NDVI 的季节变化,可以看出,中南半岛植被覆盖变化存在较大的年际变化。该地区从 4 月开始到 10 月是植被的生长季,其中春季(4—5 月)和秋季(9—10 月)是植被覆盖增长最显著的月份。本文主

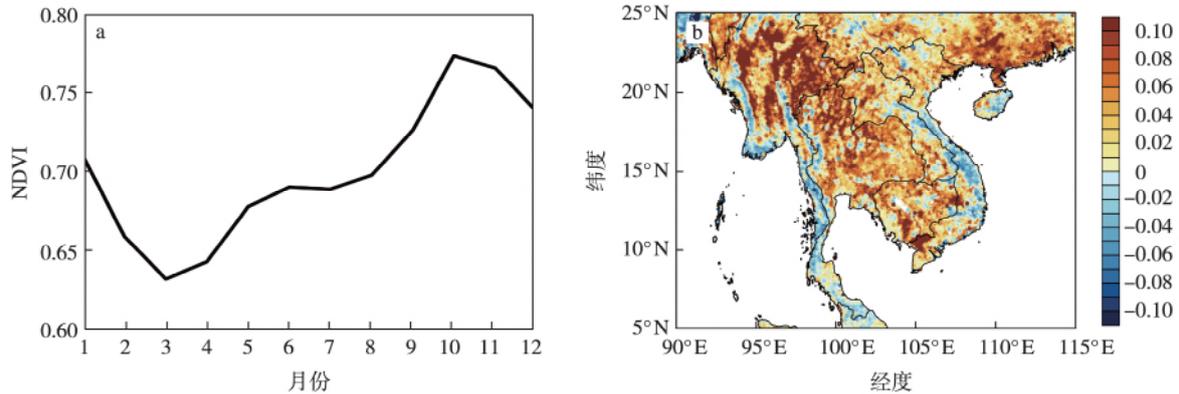


图1 中南半岛地区 NDVI 的季节变化( a) 和生长季 5 月与 4 月 NDVI 差值的空间分布( b)

Fig.1 (a) Seasonal variation of NDVI in the Indo-China Peninsula and (b) spatial distribution of NDVI difference between May and April (April and May are defined as growing season)

要研究的时间段是春季, 所以将 5 月和 4 月的 NDVI 指数做差值得到植被指数的空间分布(图 1b)。中南半岛地区植被覆盖格局整体呈现“北方高、南方低”的分布特征, 高值区主要分布在泰国和老挝北部以及缅甸的东部, 因为这些地方主要植被类型为阔叶林、针叶林和混交林, 植被的长势较好(图 2); 而低值区主要分布于泰国境内, 以及沿海等局部地区, 以上地区多为农田和耕地, 植被较为稀疏, 因此 NDVI 变化较低。总体而言, 中南半岛大部分区域植被覆盖都有明显增长, 因此将 4—5 月定义为春季生长季。值得注意的是, 9—10 月植被也有明显地植被生长, 将会在后续的工作中开展, 本文暂不讨论。

从春季 NDVI 植被指数的多年平均的气候态的空间分布(图 3a) 上看, NDVI 的大值区主要出现在缅甸北部、泰国南部、老挝以及越南中部地区, NDVI 大于 0.6 的区域占全区的一半以上(图 3a)。NDVI 的高值区基本上与植被类型相对应, 在高值区的 NDVI 主要的植被类型是阔叶林、针叶林以及混交林为主(图 2)。而在低值区的 NDVI(小于 0.4) 主要的植被类型是农田和耕地, 分布于泰国和缅甸的中南部区域(图 2)。相对于中南半岛植被覆盖变化的多年平均气候态, 该地区的植被活动的变率也存在明显的区域性差异(图 3b)。1982 年以来, 植被活动变率最明显的区域主要位于泰国境内以及老挝和越南的南部, 说明这些地区的植被活动可能收到人类活动和气候变化的双重影响(Piao et al., 2011b; Hsu et al., 2014; 廖谔嫫等 2014)。

图 4 给出了中南半岛区域 NDVI 变化的时间序列, 可以发现, 春季 NDVI 的变化存在明显的年际变化, 其中 1983 年植被生长最弱。已有研究表明, 植

被在生长季对气候变化的响应更为敏感(龚道溢等 2002; 张佳华等 2002)。

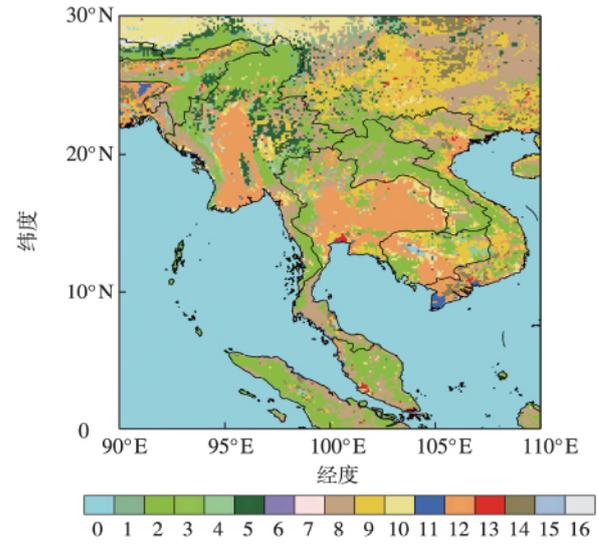


图2 中南半岛地区主要植被类型的空间分布(0. 水体; 1. 常绿针叶林; 2. 常绿阔叶林; 3. 落叶针叶林; 4. 落叶阔叶林; 5. 混交林; 6. 稠密灌木; 7. 稀疏灌木; 8. 木本热带稀树草原; 9. 热带稀树草原; 10. 草地; 11. 永久湿地; 12. 农用地; 13. 城市与建筑区; 14. 农用地/自然植被拼接; 15. 雪和冰; 16. 稀疏植被)

Fig.2 Spatial distribution of main vegetation types in the Indo-China Peninsula (0. Water body; 1. Evergreen needleleaf forest; 2. Evergreen broadleaf forest; 3. Deciduous needleleaf forest; 4. Deciduous broadleaf forest; 5. Mixed forest; 6. Closed shrublands; 7. Open shrublands; 8. Woody savanna; 9. Savanna; 10. Grassland; 11. Permanent wetland; 12. Cropland; 13. Urban and built-up; 14. Cropland/natural vegetation mosaic; 15. Snow and ice; 16. Barren or sparsely vegetated)

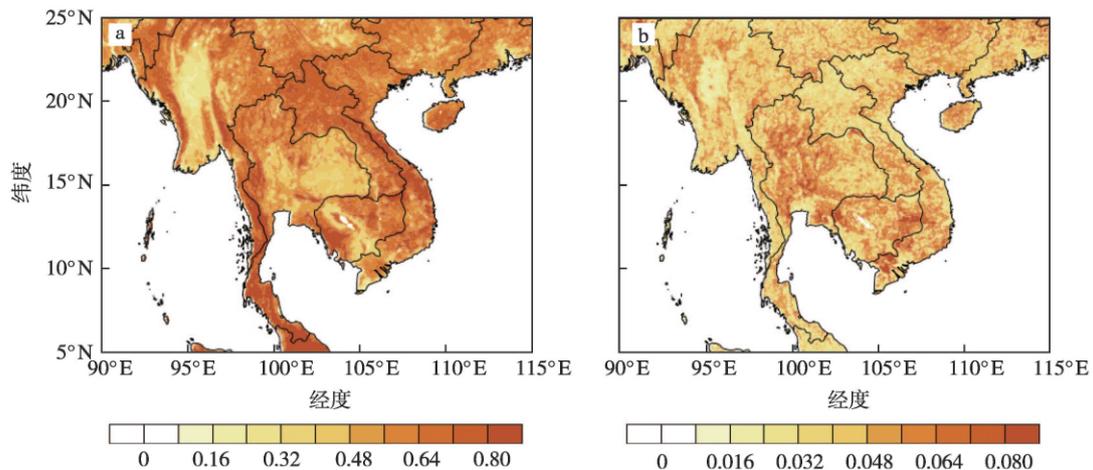


图3 生长季(4—5月)中南半岛 NDVI 的气候态(a)和标准差(b)的空间分布

Fig.3 Spatial distributions of (a) climatology and (b) standard deviation of NDVI in the Indo-China Peninsula during the growing season (from April to May)

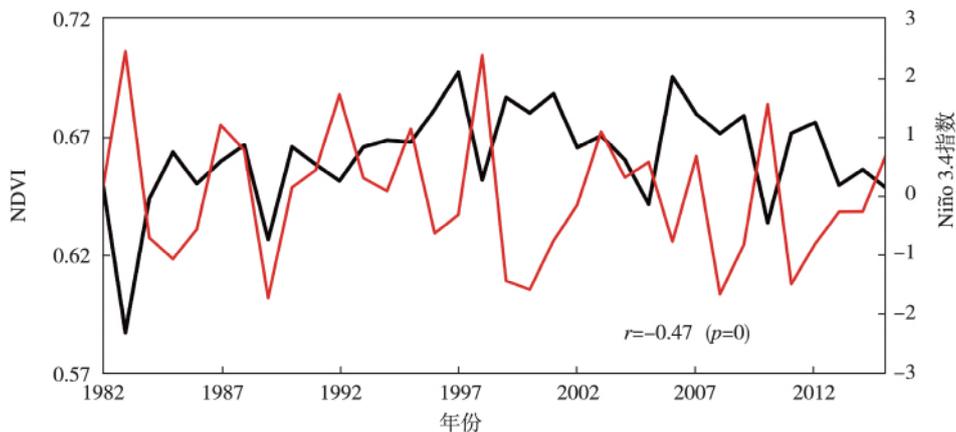


图4 1982—2015年中南半岛(95°~110°E,10°~20°N)春季NDVI(黑线)和冬季Niño3.4指数(红线)的时间序列( $r$ 代表两者的相关系数  $p$ 代表显著性水平)

Fig.4 Time series of spring NDVI (black line) in the Indo-China Peninsula (10°—20°N 95°—110°E) and winter Niño3.4 index (red line) from 1982 to 2015 ( $r$  indicates the correlation coefficient between NDVI and Niño3.4 index and  $p$  shows the significance level)

### 3 中南半岛气候特征及其与植被变化的联系

中南半岛植被覆盖变化可以对区域气候产生影响,也对气候变化存在不同的响应特征。本文分析了中南半岛地区温度、降水、辐射等主要气候特征(图5)。研究表明,该地区的温度最大值主要位于缅甸南部、以及泰国境内,以及围绕中南半岛的东南角,局地春季温度可以达到30℃以上,而其他地区的温度相对偏低(图5a)。春季降水的极大值中心主要分布于中国华南、孟加拉国,中南半岛地区主要的降水中心在老挝的北部地区(图5b)。云量和太阳辐射的空间分布基本上是反的,云量偏多的地区,

太阳辐射偏低(图5c、d)。为了探讨1982年以来中南半岛地区春季温度、降水和太阳辐射的变化情况,本文也分析了1982—2015年主要气候变量的变化趋势,但是温度、降水和辐射在中南半岛地区的变化不明显。

温度、降水和辐射等气候因素能够显著影响植被覆盖变化(Nemani et al., 2003; Hua et al., 2017)。对于温度而言,温度与植被NDVI的总体正相关关系主要出现在北半球的中高纬度,反映出这些地区的植物生长的主要限制因子是温度(张佳华等, 2002; Nemani et al., 2003)。而在中南半岛地区,温度与植被NDVI呈现负相关关系(图6a)。一方面,由于中南半岛处于热带和副热带交界地带,生长季

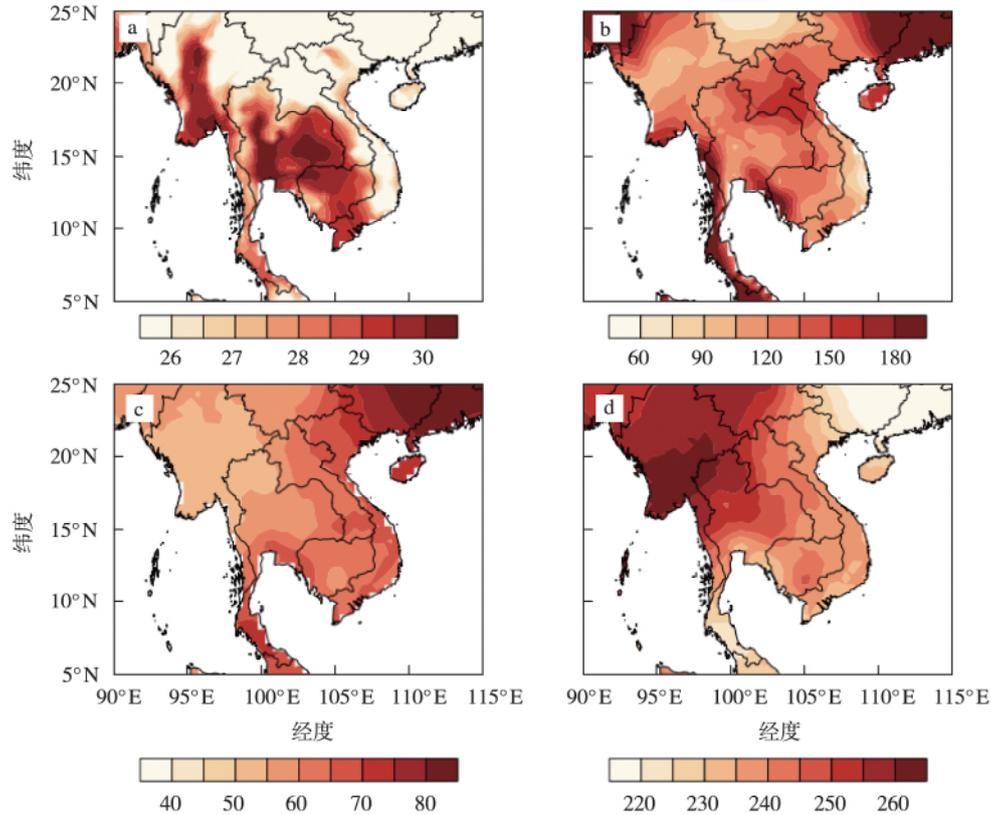


图5 1982—2015年中南半岛春季温度(a;单位:°C)、降水(b;单位:mm/month)、云量(c;单位:%)和太阳辐射(d;单位:W/m<sup>2</sup>)的气候态的空间分布

Fig.5 Spatial distributions of climatology of spring (a) temperature (units: °C), (b) precipitation (units: mm/month), (c) cloud cover (units: %) and (d) solar radiation (units: W/m<sup>2</sup>) in the Indo-China Peninsula from 1982 to 2015

节的温度较高有利于抑制植被的生长。另一方面,温度和NDVI的负相关关系也反映出温度并不是限制该地区植物生长的第一因子(图5a)。值得注意的是,降水很可能是春季植被生长的主要因子(图6b),显著相关地区主要位于缅甸和泰国境内,这些区域生长的主要植被类型包括农用地和稀疏草原(图2)。众所周知,在热带地区,控制植被生长或者植被生物量的大小主要是靠植物的光合有效辐射,即太阳总辐射中参与光合作用的部分(Nemani et al., 2003)。在中南半岛地区,太阳辐射与植被也呈现负相关关系(图5c),这其中可能原因是降水的增加,云量的增多,使得该地区的总太阳辐射减小,进而引起植被光合作用的能力下降,由此太阳辐射与NDVI呈负相关。从温度、降水和太阳辐射三个气候因素与中南半岛地区植被NDVI的相关分析可以看出,不同气候因子对植被生长的影响也存在区域差异。

为了证实温度、降水和辐射与植被的联系,本文也选取典型年份(超过1个标准差的年份)通过合

成分析来揭示气候因素与NDVI的统计关系(图6d—f)。研究表明,降水与植被呈现正相关,而温度、辐射与植被呈现负相关关系。即降水增加,对应于云量增多,使得中南半岛地区的太阳辐射减小,另外降水的增多也有利于温度降低。研究发现,温度并不是影响热带和副热带植被的主要因子(Nemani et al., 2003),温度越高越不利于植被的生长,所以在中南半岛地区呈现出温度与植被反相关关系。

#### 4 中南半岛植被覆盖变化与 ENSO 的联系

从前面的研究可以发现,中南半岛的NDVI与降水存在显著正相关,说明降水是控制该地区春季植被生长的主要因子。然后,降水的变化往往与大尺度气候系统相联系,其中,ENSO常常被看作是影响植被的重要因素(Li et al., 2016)。许多研究也表明,ENSO对热带和副热带降水有着重要的影响(Asner et al., 2000; Anyamba et al., 2002; 朱益民和杨修群, 2003)。那么,ENSO是否会导致年际尺度

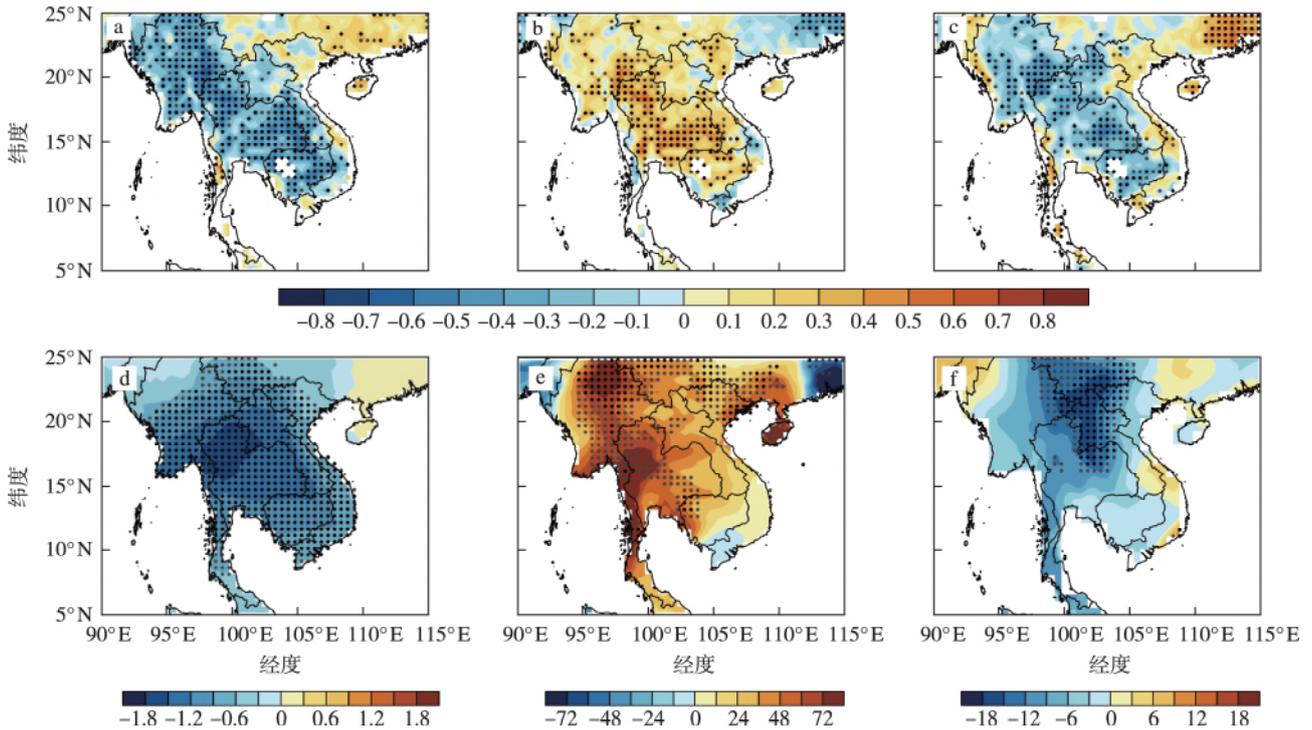


图6 中南半岛区域平均的春季NDVI与温度(a)、降水(b)、太阳辐射(c)的相关系数的空间分布,以及典型NDVI变化年(NDVI变化超过±1个标准差)温度(d)、降水(e)、太阳辐射(f)合成差值的空间分布(打点区域表示通过0.1信度的显著性检验)

Fig.6 Spatial distributions of correlation coefficients between regional average spring NDVI in the Indo-China Peninsula and (a) temperature (b) precipitation and (c) solar radiation, and spatial distributions of composite differences of (d) temperature (e) precipitation and (f) solar radiation between the typical NDVI change years (NDVI changes exceed ±1 standard deviation) (Areas with dots are statistically significant at the 0.1 level)

的降水变化,进而引起植被活动的年际波动?

本文将中南半岛春季区域平均的NDVI植被指数回归到全球海温场(图7)发现,春季中南半岛的植被活动与赤道中东太平洋前期冬季的海表面温度存在显著的负相关关系。当前期冬季赤道中东太平洋海温异常偏暖(厄尔尼诺 El Niño)时,不利于中南半岛生长季植被的生长,反之,当赤道中东太平洋海温异常偏冷(拉尼娜 La Niña)时,有利于中南半岛植被的生长。同时,从空间场上可以看到,在印度洋上也有较为显著的负相关信号,但印度洋海盆的变化与 ENSO 循环紧密联系,常常是伴随着 ENSO 事件发生(吴国雄和孟文,1998;谭言科等,2004)。研究表明,通过“大气桥”或印度洋印度尼西亚贯穿流等机制,当赤道中东太平洋有 El Niño (La Niña) 事件发展时,在冬季至次年春、夏季,热带印度洋海温往往表现为全区一致增暖(偏冷)(谭言科等,2004)。本文也发现,同期春季印度洋海盆模态与中南半岛 NDVI 也呈现负相关关系,此空间分布型与春季 NDVI 和前期 Niño3.4 指数相一致。因此,本文没

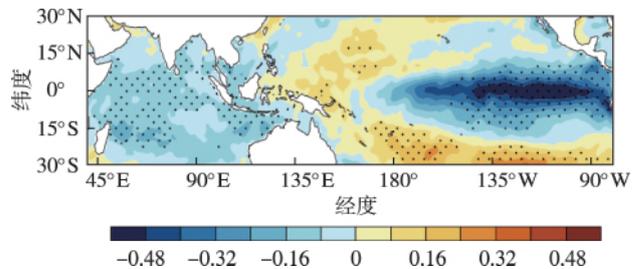


图7 中南半岛区域平均的春季NDVI与前期冬季海温距平回归系数分布(单位:℃;打点区域表示通过0.1信度的显著性检验)

Fig.7 Regression of sea surface temperature anomalies in preceding winter onto the regional average NDVI in the Indo-China Peninsula in spring (units: °C; Areas with dots are statistically significant at the 0.1 level)

有将其考虑为独立的影响因子。

为了进一步说明中南半岛地区植被NDVI和 ENSO 的联系,利用 ENSO 指数来表征热带太平洋海温异常。考虑到 Niño3.4 指数可以很好地反映厄尔尼诺的强度和变化,因此,本文将春季 NDVI 植被指数与前期冬季 Niño3.4 指数进行回归分析(图

8)。从图 8 中可以看出,在中南半岛地区,NDVI 与 Niño3.4 指数两者存在显著的负相关关系,负相关比较显著的区域主要位于缅甸南部,泰国境内以及中南半岛以南地区。这同样说明,前期赤道中东太平洋的海温升高不利于植被的生长,和前面的结论是一致的。由 Niño3.4 指数与中南半岛地区植被变化的时间相关(图 4)看出,NDVI 与 Niño3.4 指数存在负相关,相关系数达到  $-0.47(p < 0.05)$ ,进一步证实植被生长和前冬中东太平洋海温的关系。即当前期冬季赤道中东太平洋海温异常偏暖(厄尔尼诺年),不利于春季中南半岛植被的生长;相反,当前期冬季是拉尼娜年时,有利于中南半岛植被的生长。

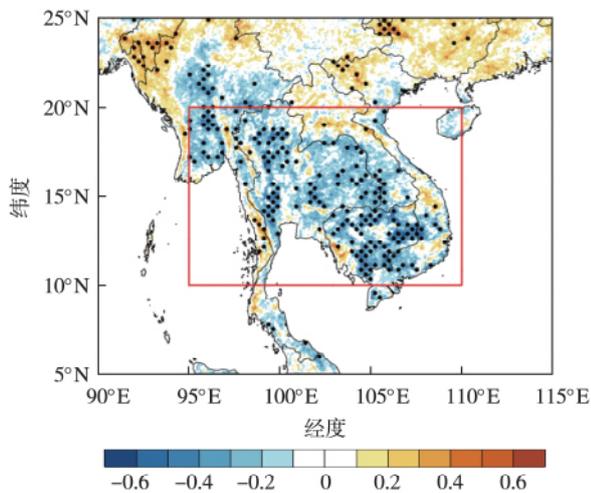


图 8 前期冬季 Niño3.4 指数与中南半岛植被生长季 NDVI 的相关系数(打点区域表示通过 0.1 信度的显著性检验;红色方框区域为  $95^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ 、 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ )

Fig. 8 Spatial distribution of correlation coefficients between Niño3.4 index in preceding winter and NDVI in the Indo-China Peninsula during the growing season (Areas with dots are statistically significant at the 0.1 level. Red box area is  $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$  and  $95^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ )

前面的研究已经发现,前期冬季 ENSO 对春季中南半岛植被有显著的影响,那么,ENSO 如何影响该地区的植被覆盖变化?通过对温度、降水和太阳辐射的相关分析,本文认为中南半岛植被活动受温度和降水的影响较大(图 6),并且是春季影响植被的主要气候因子(Spano et al., 1999; Namani et al., 2003)。图 9 分别给出了对应 El Niño 和 La Niña 年份下中南半岛春季 850 hPa 风场以及海平面气压的合成场。研究表明,El Niño 年对应热带中东太平洋海温是正异常,而西太平洋暖池区偏冷,对应气压

高,850 hPa 为辐散的低层风场,上升运动较弱,不利于云量和降水的形成(图 9a)。相反,La Niña 年对应热带中东太平洋海温是负异常,而西太平洋地区温度偏高,海平面气压偏低,而东西向气压差增加,850 hPa 为辐合的低层风场,有利于为中南半岛输送水汽,上升运动也较强烈,导致云量和降水偏多(图 9b)。

另外,本文从温度和降水的合成场上也能发现与环流场有很好的对应关系(图 10)。在 El Niño 年中南半岛的降水是减少的,在 La Niña 年是显著增加的。在厄尔尼诺年降水的减少不利于植被的生长,因此在厄尔尼诺年对应植被减少。同样的,在 El Niño 年,伴随着降水减小,云量减小,太阳辐射和温度偏高,不利于植被的生长,在 La Niña 年情况相反。

## 5 结论与讨论

利用 GIMMS-NDVI3g 植被指数和温度、降水、太阳辐射、海温等气候资料以及环流场数据等,分析了 1982—2015 年中南半岛地区的植被覆盖变化特征、植被与气候变化的联系以及植被对 ENSO 的响应及可能影响途径。主要结论如下:

1) 中南半岛植被覆盖存在较大的年际变化,其中春季和秋季是植被覆盖增长最显著的季节。春季植被变化主要分布在泰国和老挝北部以及缅甸的东部,NDVI 的高值区基本上与植被类型相对应,主要是阔叶林、针叶林以及混交林为主。

2) 在中南半岛地区,降水是影响春季植被生长的主要因子,与 NDVI 呈显著正相关关系。从温度、降水和太阳辐射三个气候因素与中南半岛地区植被 NDVI 的分析来看,不同气候因子对植被生长的影响也存在区域差异。

3) 春季中南半岛的植被指数与 Niño3.4 指数存在显著的负相关关系,当前期冬季赤道中东太平洋海温异常偏暖(厄尔尼诺年),对应中南半岛附近气压高,850 hPa 为辐散风场,上升运动较弱,不利于云量和降水的形成,温度偏高,同时抑制春季中南半岛植被的生长;相反,当前期冬季是拉尼娜年时,有利于中南半岛植被的生长。

本文主要基于观测和再分析资料,利用统计诊断手段分析了中南半岛植被覆盖变化及其与 ENSO 的联系。其中,与 ENSO 相伴随的西北太平洋异常反气旋的维持很可能是冬季 ENSO 影响春季中南半岛气候的关键过程(张人禾等, 2017)。当冬季出

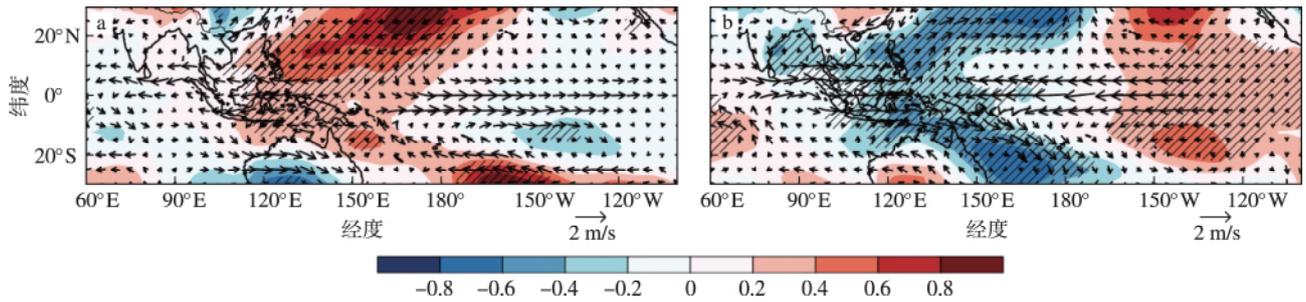


图9 El Niño年(a)、La Niña年(b)4—5月850 hPa风速距平(箭头;单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 和海平面气压距平(彩色阴影区;单位: hPa)的合成分布(斜线区域表示海平面气压距平通过0.1信度的显著性检验)

Fig.9 Composite distributions of 850 hPa wind speed anomalies( arrows; units:  $m \cdot s^{-1}$ ) and sea level pressure anomalies( color shaded areas; units: hPa) in spring( April-May) in ( a) El Niño and ( b) La Niña years( Areas with slashes indicate that the sea level pressure anomalies are statistically significant at the 0.1 level)

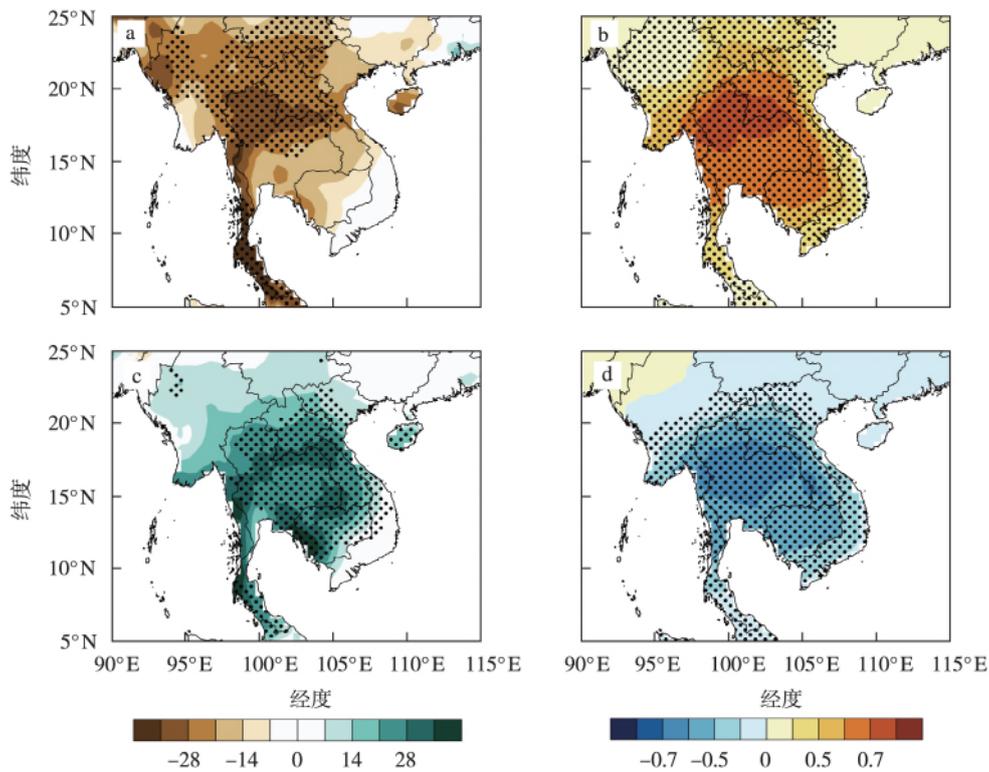


图10 El Niño年(a,b)、La Niña年(c,d)4—5月降水距平(a,c;阴影区,单位:mm)和温度距平(b,d;阴影区,单位:°C)的合成分布(打点区域表示通过0.1信度的显著性检验)

Fig.10 Composite distributions of ( a, c) precipitation anomalies( shaded areas; units: mm) and ( b, d) temperature anomalies( shaded areas; units: °C) in spring( April-May) in ( a, b) El Niño and ( c, d) La Niña years( Areas with dots are statistically significant at the 0.1 level)

现 El Niño 时,西北太平洋对流减弱,产生异常反气旋环流,不利于降水的产生,这种机制一直维持到次年,可以造成春季中南半岛地区的降水减小,植被活动减弱。另外,热带西太平洋冷海温和西北太平洋异常反气旋之间的相互作用(Wang et al., 2000)、热带印度洋(Xie et al., 2009)和热带北大西洋(容新尧等, 2010)的暖海温异常也有利于导致西北太平洋异常反气旋的维持,有关 ENSO 对中南半岛气候和

热带降水的滞后影响,以及植被活动与 ENSO 之间的物理机制,还需要通过数值模拟手段来进一步验证。

本文从降水和 ENSO 影响的角度分析了中南半岛地区植被覆盖变化的原因,但是中南半岛地区的植被覆盖变化受到自然因素和人类活动等多重影响,包括大气环流、陆面过程、海冰等在内,也会对区域植被覆盖变化产生影响。此外,植被的反馈作用

在气候变化中也十分重要, 这些问题值得进一步研究深入。其次, 中南半岛存在 4—5 月和 8—10 月两个生长季, 本文主要探讨了春季的情况, 并没有对秋季植被覆盖变化做进一步分析和讨论。最后, 关于 ENSO 的非对称特性也引起了科学界的广泛关注。由于非对称性的存在, ENSO 冷暖时间的位相并不完全对应。例如, 图 6 中关于典型年份的合成分析

中, 温度、降水和辐射的响应与相关的空间分布型还是存在一些差别的。由于本文只是基于多源数据分析了 ENSO 与中南半岛植被之间的联系, 而并未研究 ENSO 非对称性对其的影响。在今后的研究工作中, 结合数值模拟进行深入的研究与探索, 将会具有更高的应用价值。

## 参考文献(References)

- Anyamba A, Tucker C J, Mahoney R. 2002. From El Niño to La Niña: vegetation response patterns over east and southern Africa during the 1997—2000 period[J]. *J Climate*, 15(21): 3096-3103.
- Asner G P, Townsend A R, Braswell B H. 2000. Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity[J]. *Geophys Res Lett* 27(7): 981-984.
- Beck H E, McVicar T R, van Dijk A I J M, et al. 2011. Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: intercomparison and assessment against Landsat imagery[J]. *Remote Sens Environ*, 115(10): 2547-2563.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 320(5882): 1444-1449.
- 陈海山, 穆梦圆, 尹伊 等. 2019. CLM4.5 冠层截留方案的敏感性试验与改进[J]. *大气科学学报* 42(3): 334-347. Chen H S, Mu M Y, Yin Y, et al. 2019. Sensitivity study and improvement of canopy interception scheme in CLM4.5[J]. *Trans Atmos Sci* 42(3): 334-347. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180313001. (in Chinese).
- 陈良富, 高彦华, 程宇 等. 2005. 基于 CBERS-02 卫星数据和地面测量的生物量估算及其影响因素分析[J]. *中国科学 E 辑* 35(S1): 113-124. Chen L F, Gao Y H, Cheng Y, et al. 2005. Biomass estimation based on CBERS-02 satellite data and ground measurements and analysis of its influencing factors[J]. *Sci China Ser E* 35(S1): 113-124. (in Chinese).
- de Jong R, Schaepman M E, Furrer R, et al. 2013. Spatial relationship between climatologies and changes in global vegetation activity[J]. *Glob Chang Biol*, 19(6): 1953-1964.
- Ge F, Zhi X F, Babar Z A, et al. 2017. Interannual variability of summer monsoon precipitation over the Indochina Peninsula in association with ENSO[J]. *Theor Appl Climatol*, 128(3/4): 523-531.
- Gong D Y, Ho C H. 2003. Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere[J]. *J Geophys Res*, 108(D16): 4498.
- 龚道溢, 史培军, 何学兆. 2002. 北半球春季植被 NDVI 对温度变化响应的区域差异[J]. *地理学报* 57(5): 505-514. Gong D Y, Shi P J, He X Z, et al. 2002. Spatial features of the coupling between spring NDVI and temperature over Northern Hemisphere[J]. *Acta Geogr Sin* 57(5): 505-514. (in Chinese).
- Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset[J]. *Int J Climatol*, 34(3): 623-642.
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *Int J Remote Sens*, 7(11): 1417-1434.
- Hsu H H, Zhou T J, Matsumoto J. 2014. East Asian, Indochina and western North Pacific summer monsoon: an update[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 50(1): 45-68.
- Hua W J, Chen H S. 2013. Impacts of regional-scale land use/land cover change on diurnal temperature range[J]. *Adv Clim Chang Res* 4(3): 166-172.
- 华文剑, 陈海山, 季兴. 2014. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J]. *地球科学进展* 29(9): 1025-1036. Hua W J, Chen H S, Li X. 2014. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects[J]. *Adv Earth Sci* 29(9): 1025-1036. (in Chinese).
- Hua W J, Chen H S, Zhou L M, et al. 2017. Observational quantification of climatic and human influences on vegetation greening in China[J]. *Remote Sens* 9(5): 425.
- 黄清瀚, 陈海山, 华文剑. 2018. 近 30 年来中国干旱生态区增暖放大现象及其与植被覆盖的联系[J]. *气候与环境研究* 23(1): 72-82. Huang Q H, Chen H S, Hua W J. 2018. Stronger warming amplification over arid ecoregions and its relationship to vegetation cover in China since 1982[J]. *Clim Environ Res* 23(1): 72-82. (in Chinese).
- Lawrence D, Vandecar K. 2015. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture[J]. *Nature Climate Change* 5(1): 27-36.
- Lee X, Goulden M L, Hollinger D Y, et al. 2011. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes[J]. *Nature* 479(7373): 384-387.
- Li J, Fan K, Xu Z Q. 2016. Asymmetric response in Northeast Asia of summer NDVI to the preceding ENSO cycle[J]. *Clim Dyn* 47(9/10): 2765-2783.
- 梁博毅, 刘素红, 瞿瑛 等. 2016. 利用 GLASS LAI 数据分析 1982—2012 年亚马逊热带雨林变化[J]. *遥感学报* 20(1): 149-156. Liang B Y, Liu

- S H Qu Y et al. 2016.Changes in the Amazon rainforest from 1982 to 2012 using GLASS LAI data[J].J Remote Sens ,20( 1) : 149-156.( in Chinese) .
- 廖谡嫒,封志明,李鹏,等.2014.中南半岛森林覆被变化研究进展[J].地理科学进展,33( 6) : 853-864. Liao C H ,Feng Z M ,Li P ,et al. 2014. Progress of research on forest land cover change in the Indo-China Peninsula[J].Prog Geogr ,33( 6) : 853-864.( in Chinese) .
- Mayaux P ,Pekel J F ,Desclée B et al. 2013.State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010[J].Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci ,368( 1625) : 20120300.
- Nemani R R ,Keeling C D ,Hashimoto H et al. 2003.Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J].Science ,300( 5625) : 1560-1563.
- Peng S S ,Piao S L ,Zeng Z Z et al. 2014.Afforestation in China cools local land surface temperature[J].PNAS ,111( 8) : 2915-2919.
- Piao S L ,Wang X H ,Ciais P et al. 2011a.Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J].Glob Chang Biol,17( 10) : 3228-3239.
- Piao S L ,Ciais P ,Lomas M et al. 2011b.Contribution of climate change and rising CO<sub>2</sub> to terrestrial carbon balance in East Asia: a multi-model analysis[J].Glob Planet Change ,75( 3/4) : 133-142.
- 容新尧,张人禾,李天明.2010.大西洋海温异常在 ENSO 影响印度-东亚夏季风中的作用[J].科学通报,55( 14) : 1397-1408. Rong X Y ,Zhang R H ,Li T ,2010.Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship[J].Chin Sci Bull ,55( 14) : 1397-1408.( in Chinese) .
- Spano D ,Cesaraccio C ,Duce P et al. ,1999.Phenological stages of natural species and their use as climate indicators[J].Int J Biometeorol ,42( 3) : 124-133.
- Takahashi H G ,Yasunari T ,2006.A climatological monsoon break in rainfall over Indochina: a singularity in the seasonal March of the Asian summer monsoon[J].J Climate ,19( 8) : 1545-1556.
- 谭言科,张人禾,何金海,等.2004.热带印度洋海温的年际变化与 ENSO [J].气象学报,62( 6) : 831-840. Tan Y K ,Zhang R H ,He J H ,et al. , 2004.Relationship of the interannual variations of sea surface temperature in tropical Indian ocean to ENSO [J].Acta Meteorol Sin ,62( 6) : 831-840.( in Chinese) .
- Wang B ,Wu R G ,Fu X ,2000.Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J].J Climate ,13( 9) : 1517-1536.
- 吴国雄,孟文,1998.赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件[J].大气科学,24( 1) : 15-25. Gearing between the Indo-monsoon Circulation and the Pacific-Walker Circulation and the ENSO [J].Scientia Atmospherica Sinica ,24( 1) : 15-25.( in Chinese) .
- Xie S P ,Hu K M ,Hafner J et al. 2009.Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J].J Climate ,22( 3) : 730-747.
- 尹思阳.2017.热带森林 NPP 时空变化及其气候响应的对比分析[D].北京:中国科学院大学. Yin S Y ,2017.Comparative analysis of NPP spatial-temporal variation and its climate response in tropical forests[D].Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.( in Chinese) .
- 张佳华,符焄斌,延晓冬,等.2002.全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究[J].地球物理学报,45( 5) : 631-637. Zhang J H ,Fu C B ,Yan X D et al. 2002.Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations[J].Chin J Geophys ,45( 5) : 631-637.( in Chinese) .
- 张人禾,闵庆焯,苏京志.2017.厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响:西北太平洋异常反气旋的作用[J].中国科学:地球科学,47( 5) : 544-553. Zhang R H ,Min Q Y ,Su J Z ,2017.Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: role of the anomalous western North Pacific anticyclone[J].Science China Earth Sciences ,47( 5) : 544-553.( in Chinese) .
- Zhang X Y ,Friedl M A ,Schaaf C B et al. 2004.Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data[J].Glob Chang Biol ,10( 7) : 1133-1145.
- Zhou L M ,Tucker C J ,Kaufmann R K et al. ,2001.Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J].J Geophys Res ,106( D17) : 20069-20083.
- Zhou L M ,Kaufmann R K ,Tian Y et al. 2003a.Comparison of seasonal and spatial variations of albedos from Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer( MODIS) and Common Land Model[J].J Geophys Res ,108( D15) : 4488.
- Zhou L M ,Dickinson R E ,Tian Y et al. 2003b.Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999[J].J Geophys Res ,108( D1) : 4004.
- 朱益民,杨修群.2003.太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J].气象学报,61( 6) : 641-654. Zhu Y M ,Yang X Q ,2003.Relationships between Pacific decadal oscillation( PDO) and climate variabilities in China[J].Acta Meteorol Sin ,61( 6) : 641-654.( in Chinese) .
- Zhu Z C ,Piao S L ,Myneni R B et al. 2016.Greening of the Earth and its drivers[J].Nature Climate Change ,6: 791-795.

## Vegetation cover change in the Indo-China Peninsula in spring and its relation to ENSO

CHEN Haishan<sup>1 2</sup>, QIAN Manyi<sup>2</sup>, HUA Wenjian<sup>1 2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC) / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>2</sup>School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

This paper investigates the characteristics of vegetation cover change in the Indo-China Peninsula and its relationship with ENSO (El Niño-Southern Oscillation) using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), climate data and circulation field data. Results show that precipitation is the main factor of vegetation growth in spring and has a significant positive correlation with NDVI, while temperature and radiation have negative correlations with NDVI. Further analysis reveals that when sea surface temperature in the equatorial central and eastern Pacific in the preceding winter is warmer (El Niño event occurs), the sea level pressure is higher and the 850 hPa wind field is divergent near the Indo-China Peninsula, where the upward movement is weaker, which is not conducive to the formation of cloudiness and precipitation, but conducive to the increase of solar radiation and temperature. The reduced precipitation and higher temperature both inhibit the growth of vegetation in the Indo-China Peninsula in spring. On the contrary, La Niña event in the preceding winter is favorable for the vegetation growth in the Indo-China Peninsula.

**Indo-China Peninsula; vegetation cover change; spring; ENSO**

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201014007

(责任编辑: 张福颖)