

引用格式:李娅丽,汪小钦,陈芸芝,等.福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析[J].地球信息科学学报,2019,21(3):445-454. [ Li Y L, Wang X Q, Chen Y Z, et al. The correlation analysis of land surface temperature and fractional vegetation coverage in Fujian province[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(3):445-454. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180316

# 福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析

李娅丽<sup>1</sup>,汪小钦<sup>1\*</sup>,陈芸芝<sup>1</sup>,王苗苗<sup>2</sup>

1. 福州大学空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室,卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心,福州 350108;2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

## The Correlation Analysis of Land Surface Temperature and Fractional Vegetation Coverage in Fujian Province

LI Yali<sup>1</sup>, WANG Xiaochin<sup>1</sup>, CHEN Yunzhi<sup>1</sup>, WANG Miaomiao<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Land surface temperature (LST) and fractional vegetation coverage (FVC) are important indicators of ecological environment changes. Studying the temporal and spatial variations of LST and FVC as well as their interaction in Fujian Province are of great significance to the evaluation of ecological environment construction and improvement of regional ecological environment. In this study, the temporal and spatial variations of LST in Fujian Province and the interaction between LST and FVC are analyzed, based on the reconstruction time series data of MODIS 11A2 LST and 13Q1 NDVI from 2001-2015. The results showed that: (1) The overall LST in Fujian Province presented a slight downward trend from 2001 to 2015, and the downward trend of LST is more pronounced after 2010. The spatial distribution of LST and FVC had a good negative correlation consistency, which implies the LST value is lower in the higher area while the LST is higher in the lower FVC area. (2) LST is negatively correlated with FVC, DEM and latitude. And their negative correlation was increased or decreased regularly with the change of months in a year. The negative correlation between FVC and LST was higher in summer and became lower in winter with the correlation coefficient reduced from 0.7 to 0.4. (3) The decreasing trend of LST with the increase of FVC is piecewise linear and has an obvious "FVC inflection point". In front and behind "FVC inflection point", the decreasing trends of LST with the increase of FVC are "slowly first and fast afterwards" in summer and "fast followed by slow" in winter. Moreover, the difference of LST decreasing rate with the increase of FVC becomes smaller in spring and autumn. In summer, when FVC is greater than 0.4, the LST can reduce about 0.77 °C with FVC value increase 0.1, and the cooling effect is about twice as much as that when FVC is less than 0.4. Therefore, if we want to effectively reduce LST in summer, we should make the sur-

收稿日期:2018-07-04;修回日期:2019-01-02.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0504203);中央引导地方发展专项(2017L3012);海西政务大数据应用协同创新中心资助项目。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0504203; Central Guide Local Science and Technology Development Project, No.2017L3012; Program of Fujian Collaborative Innovation Center for Big Data Applications in Governments. ]

作者简介:李娅丽(1992-),女,山东菏泽人,硕士生,研究方向为遥感信息处理与应用技术。E-mail: luckyliyalili@163.com

\*通讯作者:汪小钦(1972-),女,福建古田人,博士,研究员,主要从事资源与环境遥感应用。E-mail: wangxq@fzu.edu.cn

face vegetation cover more than 40%. Only in this way can vegetation play a better role in cooling. (4) From January to August, the negative correlation of FVC on LST has a lag, and vegetation change has a greater impact on the spatial and temporal distribution of the next month's LST. This study has a certain significance for the construction and evaluation of ecological environment in Fujian Province, and provide an important reference for the development of vegetation to suppress regional high temperature.

**Key words:** Land surface temperature (LST); Fractional vegetation coverage (FVC); Temporal and spatial variation; Interrelationship between LST and FVC; Fujian province

**\*Corresponding author:** WANG Xiaoqin, E-mail: wangxq@fzu.edu.cn

**摘要:**地表温度(Land surface Temperature, LST)和植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)是生态环境变化的重要指标因子,研究两者的时空变化及相互关系对评价区域生态环境建设、改善区域生态环境具有重要意义。本文以福建省为研究区域,利用2001–2015年MODIS 11A2 LST和13Q1 NDVI数据,在时序数据重构的基础上对福建省LST时空变化及LST与FVC的相互关系进行分析。结果表明:①2001–2015年福建省LST总体呈轻微下降趋势,尤其是2010年之后其LST明显降低。LST与FVC的空间分布具有较好的负相关一致性:在FVC较高的区域,LST值较低;在FVC较低的区域,LST较高。②LST与FVC、DEM和纬度均成负相关关系,且负相关性在一年之中随着月份的变化而呈规律性增加或降低。夏季FVC对LST的负相关性最大为0.7,冬季FVC对LST的负相关性降低为0.4。③LST随着FVC增加而降低的趋势呈现分段线性关系,存在“FVC拐点”。“FVC拐点”前后随着FVC增加LST的降低速率在夏季“先慢后快”,而在冬季则“先快后慢”。春秋两季,LST随着FVC增加而降低的速率在“FVC拐点”前后差异变小。在夏季,当FVC大于0.4时,FVC每增加0.1可降低LST约0.77℃,降温效果大约是FVC小于0.4时的2倍。因此如果要有效地降低夏季地表高温,要使地表植被覆盖大于40%,才能较好的发挥植被的降温的作用。④在1–8月份,FVC对LST的负相关作用存在滞后性,FVC变化对滞后一个月的LST时空分布影响更大。研究成果对福建省生态环境建设与评估具有一定的意义,对于发挥植被对区域高温抑制作用提供了重要的参考依据。

**关键词:**地表温度(LST);植被覆盖度(FVC);时空变化;LST与FVC相互关系;福建省

## 1 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)作为陆地与大气之间能量交换的重要参数,是研究区域及全球生态环境及大气科学的基础<sup>[1–2]</sup>,其时空分布与区域生态、植被、气候、水文、环境等因素密切相关<sup>[1–4]</sup>,是生态环境变化重要的指示因子。在影响地表温度变化的众多环境因子中,植被对地表温度的影响比较复杂且容易受外界环境和人为因素的干扰<sup>[5–6]</sup>。

随着遥感技术的发展,大尺度长时序研究地表温度及其与植被因子的关系成为可能。但是目前对长时序LST和植被的研究多集中在LST、NDVI时序数据重构方法的研究<sup>[7–9]</sup>,以及LST、NDVI各自的时空变化分析<sup>[10–13]</sup>。对于LST与NDVI两者结合的研究则主要集中在城市热岛效应,对于省及以上大区域的研究较少且多集中在西北干旱区监测<sup>[14–15]</sup>以及西南地区青藏高原LST时空变化<sup>[16–19]</sup>。在城市热岛效应中,植被对于LST的影响显著,植被不同类型的变化及组合对城市LST的空间分布具有不同的影响<sup>[5,20]</sup>。在干旱区检测中,通过LST与NDVI

构建指数来检测干旱,说明LST与植被具有一定的关系,可以反映区域环境状况<sup>[21–22]</sup>。相关研究发现LST与植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)存在一定的负相关,且负相关强度与季节、时间及土地覆盖有很大关系<sup>[23]</sup>,在同一植被覆盖度下不同下垫面类型对LST的降温作用有明显差异<sup>[18–19,24]</sup>。由于植被可以吸收到达土层太阳辐射的54%~65%,且能降低近地表风速进而减少土层水分蒸发带来的温度上升,因此其增加或减少势必会影响区域甚至全球LST的时空变化<sup>[25–26]</sup>。

2000年以来,福建省经济快速发展,人类活动的增强与城市扩张导致LST增加,但是由于福建省一直注重生态环境建设,森林覆盖率从2001年60.5%提升到2016年的65.95%<sup>[27–28]</sup>。为了研究2001年以来福建省经济和生态双重发展下LST时空变化及植被覆盖度的温度效应,进而对福建省生态环境建设提出有效建议,本文利用MODIS的LST与NDVI数据,开展福建省LST与FVC时空变化分析,并在此基础上对福建省LST与FVC的相互作用进行深入研究。

## 2 研究区概况、数据源与研究方法

### 2.1 研究区概况

福建省位于中国东南沿海,介于 $23^{\circ}33'N$ – $28^{\circ}19'N$ 、 $115^{\circ}50'E$ – $120^{\circ}47'E$ 之间,东与台湾省隔海相望,东北与浙江毗邻,西北横贯武夷山脉与江西相交,西南与广东相连。地处亚热带,属亚热带海洋湿润性季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,气候条件优越,雨量充沛,光照充足,年平均气温 $17\sim 28^{\circ}C$ 、年平均降雨量 $1400\sim 2000\text{ mm}$ 。

福建省西部和中部以占全省面积80%的山地丘陵为主,形成沿海岸线方向由东北–西南斜贯全省的闽西大山带和闽中大山带(图1),其中闽西大山带北高南低,长约530 km,平均海拔约1000 m。闽中大山带被闽江、九龙江截为三部分,其中山带中段的海拔最高,山体最宽。在东部沿海地区,由于河海的交互堆积,地形以丘陵和平原为主,海拔高度在200 m以下。根据全国第八次森林资源清查通报<sup>[29]</sup>,福建省森林面积801.27万 $\text{hm}^2$ ,森林蓄积60 796.15万 $\text{m}^3$ ;森林覆盖率65.95%,连续37年居全国首位。

### 2.2 数据源

本研究所需要数据主要包括MODIS LST和NDVI以及地形和气温数据(表1)。

MODIS 11A2(V005)LST产品(2001–2015)利用31和32两个热红外波段通过劈窗算法计算获

得,空间分辨率为1 km,时间分辨率是8 d,每年46景,2001–2015年共计690景。MODIS 13Q1的NDVI数据空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,2001–2015共345景。MODIS 11A2和13Q1数据在<https://lpdaac.usgs.gov>网站获取。

DEM数据为SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)的DEM数据,空间分辨率为90 m,在地理空间数据云获取(<http://www.gscloud.cn/>)。为了和LST数据空间分辨率保持一致,将其重采样为1000 m。

气温数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)气象站点(图1)的逐月数据集,包括每月平均最高气温 $T_{\max}$ 、每月平均最低气温 $T_{\min}$ 以及每月平均气温 $T$ 。由于采用的LST数据是MODIS 11A2白天温度数据,该数据过境时间是每天11:30 am,故采用每月平均最高气温 $T_{\max}$ 对重构的LST数据进行精度分析。

表1 数据基本情况

Tab. 1 Basic information on data

数据类型	数据来源	时间长度	时间精度	空间精度
LST	MODIS 11A2	2001–2015年	8 d	1000 m
NDVI	MODIS 13Q1	2001–2015年	16 d	250 m
DEM	SRTM数据			90 m
气温	气象站点观测	2001–2015年	逐月	

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 MODIS产品时序数据处理

由于福建省常年多云多雨,所获得的MODIS数据会有一定程度的缺失。因此先基于常用的S-G算法<sup>[30–31]</sup>对福建省2001–2015年LST和NDVI数据集进行重构。重构之前的数据处理主要包括数据预处理、利用QA信息过滤质量差的像元、利用影像直方图去除异常值等,对重构之后的数据用平均值合成法生成每月平均LST,用最大值合成法生成每月平均NDVI等。具体流程见图2。

#### 2.3.2 LST与FVC时空分布分析

利用ArcGIS栅格计算器根据式(1)和式(2)得到15年年平均LST及15年1–12月月平均温度 $LST_m$  ( $m=1,2,\dots,12$ )。

$$LST = \frac{\sum_{y=1}^{15} LST_y}{15} \quad (1)$$

$$LST_m = \frac{\sum_{y=1}^{15} LST_{(y,m)}}{15} \quad (2)$$

式中: $LST_y$ 表示 $y$ 年年平均LST, $LST_{(y,m)}$ 表示 $y$ 年 $m$

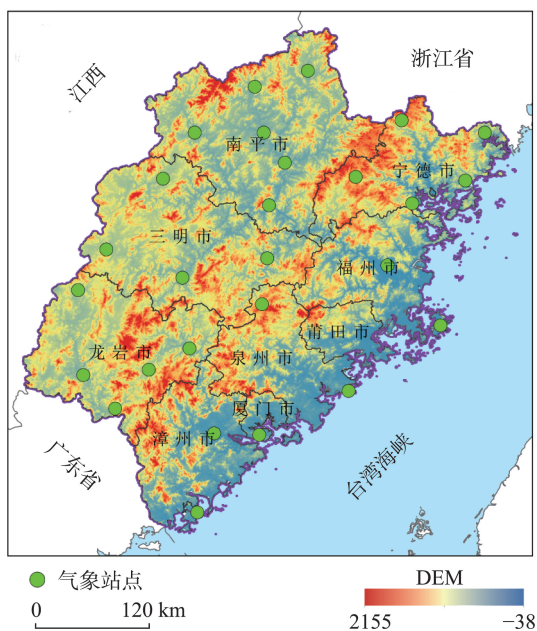


图1 研究区域概况及气象站点分布

Fig. 1 The overview of the study area and distribution of meteorological stations



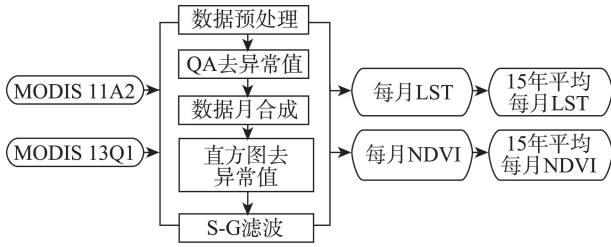


图2 MODIS LST及MODIS NDVI时序数据异常值重构及分析流程

Fig. 2 The time-series data outliers reconstruction of MODIS LST and MODIS NDVI as well as analysis process

月LST,  $y$  从1-15分别代表2001-2015年,  $m$  从1-12分别代表1-12月。

对于NDVI数据, 首先根据式(3)把NDVI数据转换成植被覆盖度FVC数据<sup>[32]</sup>。然后对每年月平均  $FVC_{(y,m)}$  ( $y=1, 2, \dots, 15; m=1, 2, \dots, 12$ ), 根据式(4)和式(5)得到15年年平均FVC及15年1-12月月平均  $FVC_m$  ( $m=1, 2, \dots, 12$ )。由于NDVI的空间分辨率与LST空间分辨率不同, 将FVC的空间分辨率重采样为1000 m。

$$FVC = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (3)$$

$$FVC = \frac{\sum_{y=1}^{15} FVC_y}{15} \quad (4)$$

$$FVC_m = \frac{\sum_{y=1}^{15} FVC_{(y,m)}}{15} \quad (5)$$

式中:  $y$  和  $m$  与式(1)和(2)中含义一致。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 LST 重构数据验证

由于定点LST数据在实际中不易获得, 本文采用时间序列2001-2015年气象站点每月平均气温  $T_{\max}$  观测数据对S-G重构后的LST进行验证。虽然近地表气温  $T_{\max}$  和地温LST在时间及物理意义上有所偏差, 但都是受各自区域内小气候特征所决定的热量因子, 具有明显的一致性和很强的相关性<sup>[33-34]</sup>。

根据站点经纬度信息, 提取S-G重构前和重构后2001-2015年每月LST, 并与站点气温  $T_{\max}$  进行回归分析(图3), 其中重构前LST与气温的拟合方程不包含缺失的0值。对比重构前后LST与气温散点图及拟合曲线方程可知, 如果不考虑重构前的缺失数据, 重构后散点图变密且更集中, 重构后影像在将地温为0的缺失值进行填补的基础上, 能够很好地保持重构前影像的数据特性。

重构后各站点地温与气温相关性分析如表2。由表2的相关系数可知, 除龙岩和漳平LST与气温相关系数分别为0.810和0.872, 其余各站点重构后的LST和  $T_{\max}$  相关系数  $R$  均大于0.920, 说明重构后LST与气温具有很强的相关性和一致性。进一步说明S-G对LST数据重构效果较好, 且保持了原有影像的LST值。

#### 3.2 LST 与 FVC 变化分析

##### 3.2.1 LST 与 FVC 年际变化分析

福建省15年平均LST具有较强的空间分布规

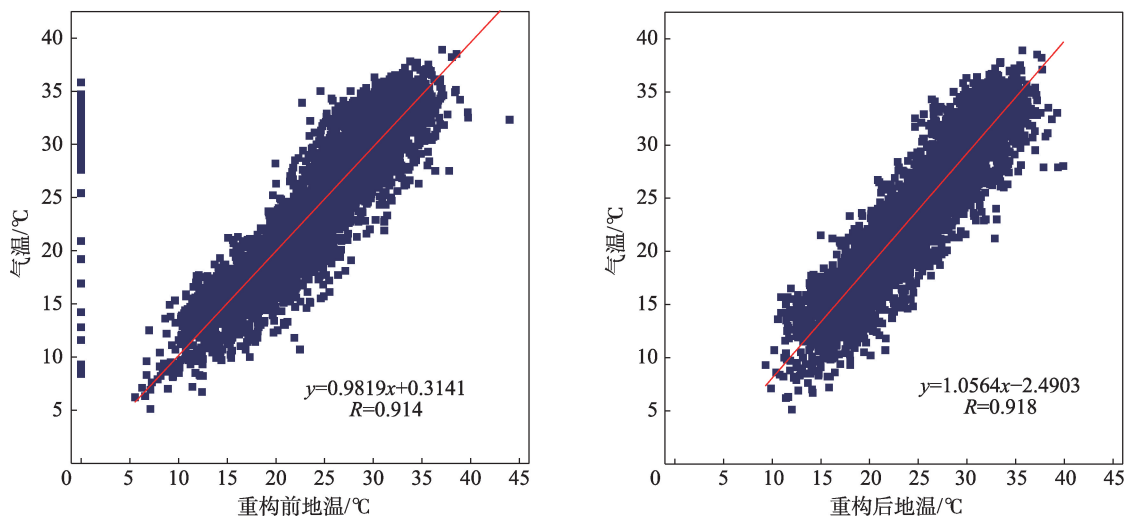


图3 重构前后LST与气温散点图

Fig. 3 Scatter plots of original LST and reconstructed LST with air temperature



表2 2001–2015年福建省各站点平均每月最高气温(Tmax)和LST相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of monthly highest average air temperature (Tmax) and LST in Fujian Province 2001– 2015

站点编号	站点名	相关系数	站点编号	站点名	相关系数	站点编号	站点名	相关系数
58725	邵武	0.956	58911	长汀	0.946	59134	厦门	0.957
58730	武夷山	0.963	58918	上杭	0.930	59321	东山	0.934
58731	浦城	0.962	58921	永安	0.945	58744	寿宁	0.936
58737	建瓯	0.961	58926	漳平	0.872	58818	宁化	0.935
58754	福鼎	0.939	58931	九仙山	0.923	58837	尤溪	0.931
58820	泰宁	0.948	58933	屏南	0.937	58843	霞浦	0.936
58834	南平	0.965	58944	平潭	0.934	9113	永定	0.934
58846	宁德	0.954	59126	漳州	0.929	58927	龙岩	0.810
58847	福州	0.946	59133	崇武	0.949	58734	建阳	0.959

律并呈现出从东南到西北逐渐降低、东部高于西部的变化趋势(图4(a))。西部山区LST空间差异受海拔影响较明显,海拔高的区域LST较高,海拔低的区域LST较低。从植被覆盖来看,福建省绝大部分区域FVC较高,FVC较低区域主要集中在河流、人口较集中的城镇、水土流失较严重的长汀县、安溪县以及东部沿海区域。FVC空间分布一定程度上影响LST的空间分布,在中部FVC较低区域其LST明显比周边LST高,在FVC较低的东部沿海区域LST高温效应聚集明显,最高LST达到30.57℃。东部地势平坦又沿海,比较适合发展经济,城市化进程较快。以闽三角为例,2001–2015年城镇化水平从33.29%上升到64.35%,人口密度由549.56人/km<sup>2</sup>上升到686.17人/km<sup>2</sup>,且人口集聚效应明显<sup>[35]</sup>。经济的快速发展,导致植被区域被城市化,从而引起

LST快速上升,产生了以城市为中心的“热岛效应”,经济越发达的区域其“热岛效应”越明显。

图5显示了福建省LST及FVC从2001–2015年逐年变化过程。从图中可以看出,2001–2015年,福建省LST总体呈轻微降低趋势,尤其是2010年之后,LST明显低于2010年前。从细节上来看,福建省LST在2001–2005年呈现先升高后降低趋势,2005–2009年呈现逐年升高趋势,2010–2015年,LST值在22.3~23.0℃之间波动,总体上呈现较明显的降低。而福建省FVC除了2005年和2011年呈轻微下降趋势,总体上一一直波动上升。从LST和FVC的年际变化来看,两者具有负相关性,FVC的累年增加一定程度上使得LST不易出现高温情况。

### 3.2.2 LST与FVC 2001–2015年平均年内变化分析

福建省平均LST(2001–2015年)从1–7月依次

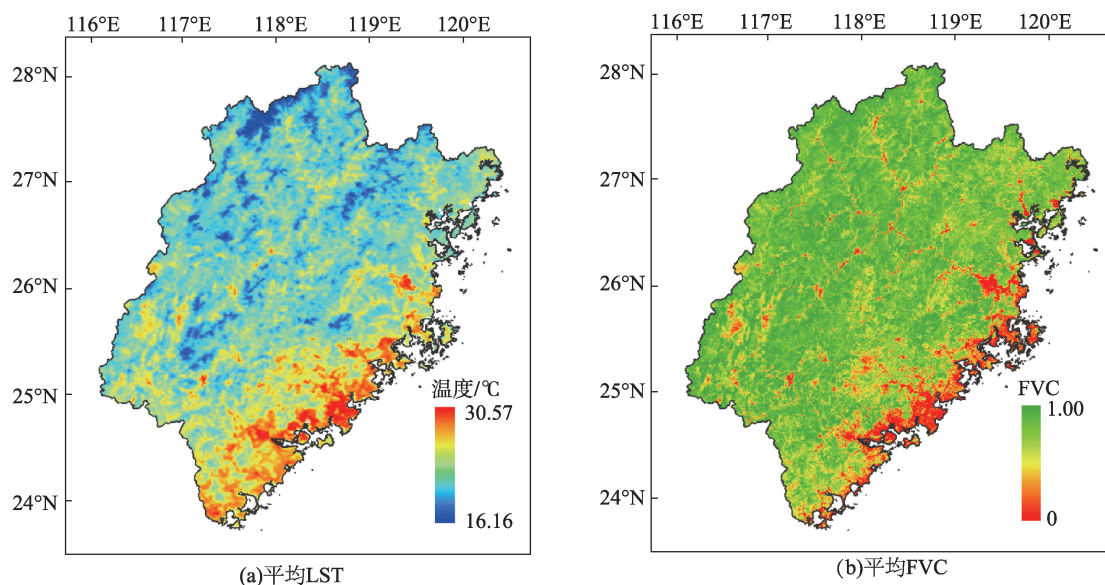


图4 2001–2015年福建省平均LST与FVC空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average LST and FVC of 15 years of Fujian province from 2001 to 2015

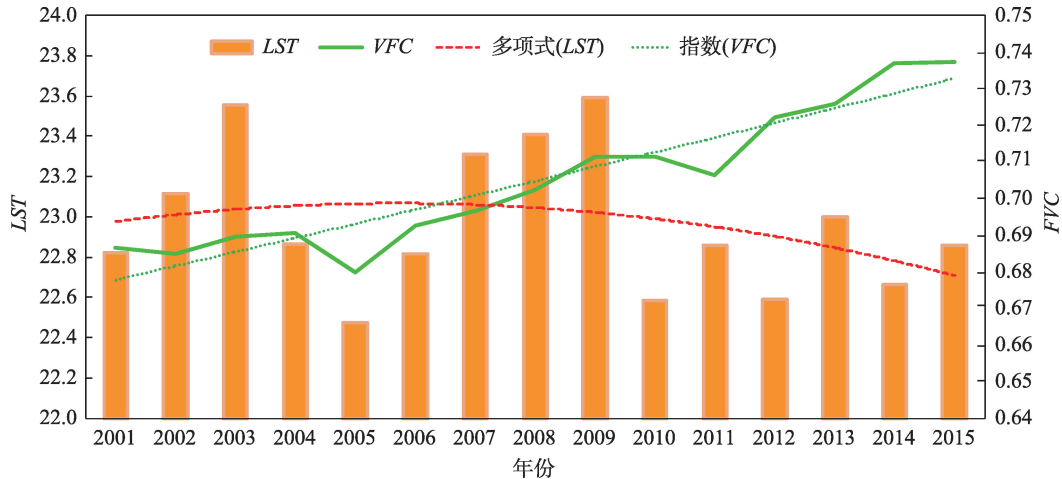


图5 2001–2015年福建省LST及FVC年际变化

Fig. 5 Annual variation of LST and FVC of Fujian province from 2001 to 2015

递增,7月之后LST呈现逐渐递减趋势,夏季比较稳定,冬春季波动性较大(图6)。7月是福建省LST最热的月份,月平均LST达到29 °C左右,1月是LST最低的月份,月平均LST在15 °C左右,年内平均最高温和最低温的温差为15 °C。福建省FVC从2–8月依次增加,其中5–8月FVC增加最快;8月之后FVC开始降低,一直持续到次年2月(图7)。8月FVC最高,为0.743;2月FVC最低,为0.656,FVC在夏季和冬季最大差值仅为0.087,说明福建省FVC即使在冬季仍处于较高水平。LST最高与FVC最高分别出现在7月和8月,年内的变化趋势并不完全同步,有一定的滞后性。

### 3.3 2001–2015平均年内FVC变化对LST的影响

在一年之中LST与FVC、DEM和纬度(LAT)均成负相关关系(图8),且负相关随着月份变化呈现规律性的变化。FVC对LST的负相关性一直处于较

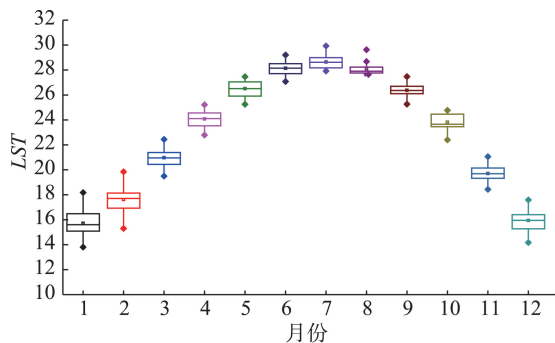


图6 福建省2001–2015年平均年内LST变化

Fig. 6 Box plot of temperature change in a year of 15 years

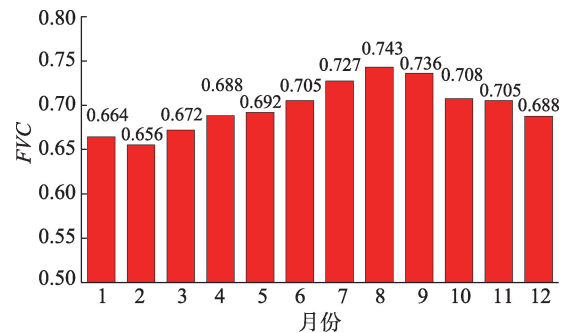


图7 2001–2015年福建省平均每月植被年内变化

Fig. 7 The annual change of average monthly vegetation in Fujian Province from 2001 to 2015

高状态, $R$ 绝对值介于0.4~0.7之间,其负相关作用虽然从1–8月逐月增加,9–12月逐月降低,但即使在最低的月份,其负相关性也大于0.4。从相关性变化规律来看,夏季FVC对LST的影响较大,其次是DEM,纬度对LST的负相关性几乎可以忽略不计;冬季纬度对LST的影响较大,其次是FVC。总体上FVC对LST变化的影响全年都处于较高状态。

LST随着FVC的增加而降低,但降低趋势在不同月份有明显不同(图9)。在FVC与LST相关性较高的夏季,LST随着FVC的增加呈现“先慢后快”的降低趋势;而在FVC与LST相关性较低的冬季,LST降低趋势随着FVC的增加“先快后慢”。显然LST随着FVC的增加而下降的趋势有一个较明显变化的“FVC拐点”,在拐点前后LST随着FVC的增加呈现两种不同程度的下降趋势。

为了得到不同月份LST下降趋势发生变化的

“FVC 拐点”,以及拐点前后 LST 随着 FVC 变化的趋势,经多次试验获得最佳线性拟合方程和拐点(图 10 和表 3),图 10 中|K1|代表拐点之前 LST 变化斜率的绝对值,|K2|代表拐点之后 LST 变化斜率的绝对值,ΔK 代表拐点前后 LST 下降斜率 K1 与 K2 的差值。

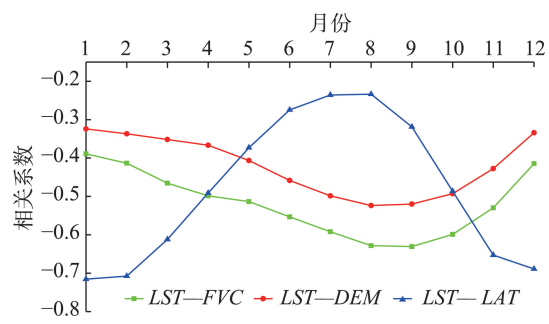


图8 2001–2015年平均年内LST与FVC、DEM和纬度的相关性分析

Fig. 8 Annual correlation analysis of LST and other factors in a year of 15 years

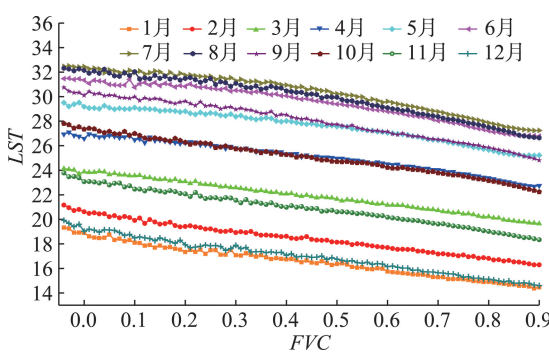


图9 2001–2015年不同月份LST随FVC变化

Fig. 9 The LST change with FVC in different months from 2001 to 2015

由表 3 可知,FVC 拐点前后具有明显的分段线性关系,线性拟合方程都具有较高的决定系数,拐点之前的决定系数除 4–6 月之外,都高于 0.90;而拐点之后的方程,决定系数都高于 0.98,拟合结果的可信度较高。“FVC 拐点”在 1–7 月逐月上升,在 8–12 月逐月降低。夏季“FVC 拐点”最高,在 0.4 左右;冬季“FVC 拐点”最低,在 0.25 左右;春季和秋季,使 LST 变化趋势发生变化的“FVC 拐点”值在 0.25~0.35 之间。因此,要使得在炎热的夏季,植被对 LST 有较为明显的降温作用,区域的 FVC 要大于 40%。

由|K1|及|K2|变化曲线可知,在“FVC 拐点”之前,FVC 增加对 LST 降温作用在 1–6 月逐渐降低,在 6–12 月逐渐增加。“FVC 拐点”之前,1 月是 FVC 增加对 LST 降温作用最大的月份,FVC 每增加 0.1 可降低 LST 约 0.73 °C,而 6 月 FVC 对 LST 的影响最小,FVC 每增加 0.1 对 LST 的降温作用约 0.24 °C。“FVC 拐点”之后,FVC

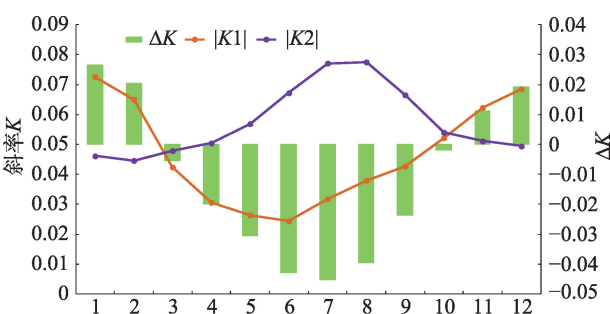


图10 2001–2015年福建省不同月份FVC拐点之前与之后LST变化斜率

Fig. 10 Slope of LST change before and after FVC inflection point in different months of Fujian from 2001 to 2015

表3 2001–2015年不同月份FVC拐点及LST变化趋势

Tab. 3 The inflection point of FVC and LST trend in different months from 2001 to 2015

月份	FVC 拐点	拐点之前		拐点之后	
		方程式	R <sup>2</sup>	方程式	R <sup>2</sup>
1	0.25	y=−7.26x+19.22	0.953	y=−4.61x+18.79	0.990
2	0.25	y=−6.50x+21.00	0.950	y=−4.46x+20.58	0.996
3	0.30	y=−4.24x+24.14	0.956	y=−4.79x+24.27	0.996
4	0.30	y=−3.06x+27.01	0.845	y=−5.04x+27.67	0.984
5	0.35	y=−2.64x+29.39	0.889	y=−5.69x+30.60	0.983
6	0.35	y=−2.44x+31.43	0.770	y=−6.72x+33.07	0.994
7	0.40	y=−3.18x+32.51	0.928	y=−7.71x+34.49	0.996
8	0.40	y=−3.80x+32.32	0.902	y=−7.75x+34.09	0.995
9	0.35	y=−4.27x+30.54	0.941	y=−6.65x+31.42	0.994
10	0.30	y=−5.52x+27.70	0.956	y=−5.34x+27.73	0.988
11	0.25	y=−6.23x+23.56	0.936	y=−5.11x+23.40	0.990
12	0.25	y=−6.85x+19.70	0.922	y=−4.94x+19.36	0.988



的增加对 LST 降温作用在 2-7 月逐渐增加,在 8-12 月逐渐降低,其中 7、8 月是 FVC 增加对 LST 降温作用最明显的月份,FVC 每增加 0.1 可降低 LST 约  $0.77^{\circ}\text{C}$ ,降温效果是“FVC 拐点”之前的 2 倍。

由  $\Delta K$  可知,在夏季“FVC 拐点”之前 FVC 降温趋势小于“FVC 拐点”之后,冬季则正好相反。4-9 月, $\Delta K$  先降低后增加,在 7 月达到最小,说明 7 月是“FVC 拐点”前后,FVC 对 LST 的降温作用差异最大的月份。11 月-次年 2 月  $\Delta K$  先增加后降低,在 1 月达到最大。3 月和 10 月“FVC 拐点”前后 FVC 对 LST 的降温作用没有明显差别,随着 FVC 从 0~1, LST 基本为线性降低趋势。

### 3.4 年内 LST 与 FVC 相互影响分析

福建省最高和最低 LST 分别出现在 7 月和 1 月,最高和最低 FVC 分别出现在 8 月和 2 月(图 6-7),说明两者变化并不同步。因此对 FVC 与 LST 月对应、FVC 滞后 LST 一个月、LST 滞后 FVC 一个月进行时滞相关性变化分析(图 11)。以 FVC 与 LST 月份相同作为参照,FVC 滞后 LST 一个月来表示 LST 对 FVC 的影响,LST 滞后 FVC 一个月来表示 FVC 对 LST 的影响。

由图 11 可知,LST 对当月和次月的植被生长均起到一定的促进作用,而 FVC 对 LST 的降温作用则具有较明显的时滞性。由图 11(a)可知,在 8 月之前,LST 与滞后一个月的 FVC 负相关性总体上略大于两者相同月份的负相关性,且均随着 LST 的升高而增加,说明 LST 的升高对于促进当月和次月的 FVC 增长效果相当;8 月之后随着秋冬季节的到来,LST 对 FVC 负相关作用逐渐降低,且两相关系数之间差异极小。由图 11(b)可知,在 8 月之前 LST 与

滞后 FVC 一个月的相关系数高于与 LST 与 FVC 月份相同的变化曲线,说明 FVC 对次月 LST 负相关性高于两者相同月份的负相关性,FVC 的增加更多的是影响次月 LST 的变化,具有较为明显的滞后性;8 月份之后随着秋冬季节的到来,FVC 降低主要对当月 LST 降低的作用更为明显,滞后性消失。

## 4 结论与讨论

为了研究 2001 年以来福建省经济与生态双重发展模式下,LST 的时空变化及植被因子的温度效应,本文利用 MODIS 11A2 LST 和 13Q1 NDVI 数据对福建省 LST 时空变化及 LST 与 FVC 相互关系进行了深入分析,主要结论如下:

(1) 2001-2015 年福建省 LST 总体呈略轻微下降趋势,尤其是 2010 年之后 LST 明显低于 2010 年之前。而 FVC 从 2001-2015 年一直呈上升状态,从 0.68 上升为 0.74,在全球变暖的大趋势下福建省 LST 轻微下降和 FVC 的持续增加有一定的关系。在空间分布上,LST 总体呈现从东南到西北逐渐降低的变化趋势,与福建省 DEM 从东南到西北逐渐升高的变化趋势正好相反,说明福建省 LST 总体变化趋势受 DEM 控制。区域 LST 空间分布受 FVC 影响,FVC 较高的区域 LST 较低,而 FVC 较低的区域 LST 相对较高。

(2) LST 与 FVC、DEM 与 LAT 均成负相关关系,且负相关性在一年之中呈现规律性的变化趋势。夏季 FVC 对 LST 的影响大,冬季 LAT 对 LST 的影响大,而太阳辐射受 LAT 影响较大,也就造成了冬季 LST 不稳定。虽然 FVC 对 LST 的负相关性在冬季较低,但即使在最低的 12 月也大于 0.4。由于区域 LAT 是不变的,DEM 在较长时间内也基本稳定,因此通过增加 FVC 来降低区域 LST 是改善区域

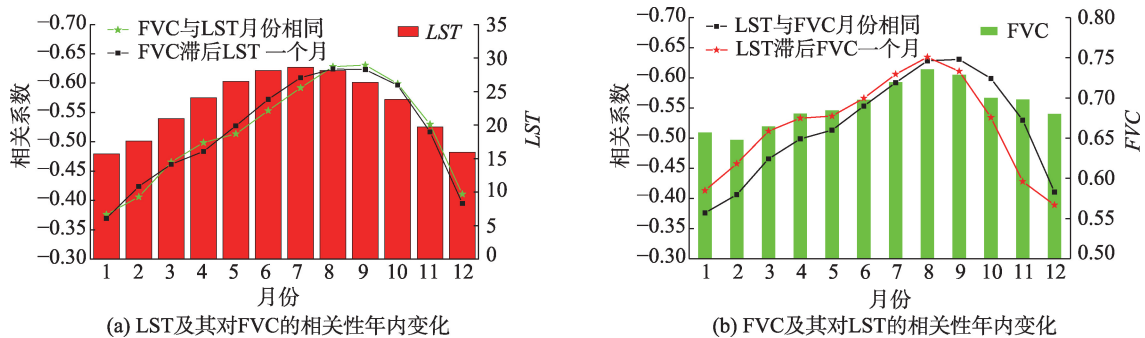


图 11 2001-2015 年福建省 LST 与 FVC 年内相互影响变化分析

Fig. 11 Analysis of the interaction between LST and FVC in Fujian province from 2001 to 2015

生态环境的主要手段。

(3) LST随着FVC的增加而降低的趋势具有明显的“FVC拐点”,“FVC拐点”前后FVC对LST的降温强度不同,“FVC拐点”位置也随着月份的变化而变化:夏季“FVC拐点”为0.4,冬季降低为0.25。“FVC拐点”前后,随着FVC的增加,夏季LST降低趋势由慢变快,而冬季则正好相反。我们认为“FVC拐点”是受人类影响区域和自然区域的分界点,FVC从0到“FVC拐点”,主要集中在人类活动较强的城镇区域,而FVC从“FVC拐点”到1,则主要集中在较少受人类活动影响的森林等区域。植被在夏季生长最好冬季最差,故“FVC拐点”夏季较高,冬季变低。夏季FVC对LST的降温作用较大,但低植被区有限的植被增加无法有效抵消人类活动产生的“热岛效应”,故随着FVC的增加,LST降低趋势先慢后快。在冬季FVC对LST的降温作用变小,“热岛效应”造成的升温大于自然状态下FVC对LST的降温作用,所以从城市区到非城市区,LST降低趋势先快后慢。

(4) LST对主要对当月和次月FVC的生长均有促进作用,LST越高对FVC的生长促进作用越强。而在1-8月FVC对LST的降温作用存在一定的滞后性,植被的变化主要是对下月LST产生影响。8月之后FVC对LST的降温的滞后性消失。由于植被的生长存在一定的时间积累,所以LST的升高并不一定马上使得FVC明显增加,理论上也存在一定的滞后性。如果以半个月为单位开展分析,有可能获得LST对FVC的影响也具有一定滞后性。

FVC对LST的影响虽然不能改变LST空间分布的总体趋势,但是对区域LST的空间分布影响较大,增加FVC可以降低区域LST。由于城市发展的需要,在城市区大面积种植植被不太可能,可以在城市内外充分利用一切可能的区域增加植被覆盖,这样在经济发展的同时还能适当控制人类活动引起的升温,一定程度上缓解城市区域的“热岛效应”。从本文结果来看,如果通过增加FVC来明显降低夏季LST,要使区域FVC达到0.4以上。由于本文所使用的LST数据为1000 m分辨率,若要应用到城市范围,需要更高分辨率的数据。由于本文研究整个福建省,DEM和纬度差异较大,如果能在海拔和纬度差异不大的小区域进行分析,则可以在一定程度上排除两者对LST的影响,对于FVC对LST影响的拐点更具有说服力和实际应用意义。

#### 参考文献(References):

- [1] He J J, Yu Y, Yu L J, et al. Impacts of uncertainty in land surface information on simulated surface temperature and precipitation over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2017,37(7-8):829-837.
- [2] Jia H J. Analysis of the ecological environment changes in land surface temperature, and NDVI based on MODIS remote sensing data[J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 2014(3):855-856.
- [3] Roșca C F, Harpa G V, Croitoru A E, et al. The impact of climatic and non-climatic factors on land surface temperature in southwestern Romania[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2016,130(3-4):775-790.
- [4] 时忠杰,高吉喜,徐丽宏,等.内蒙古地区近25年植被对气温和降水变化的影响[J]. *生态环境学报*, 2011,20(11):1594-1601. [ Shi Z J, Gao J X, Xu L H, et al. Effect of vegetation on changes of temperature and precipitation in inner Mongolia, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011,20(11):1594-1601. ]
- [5] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 577:349-359.
- [6] Deng Y, Wang S, Bai X, et al. Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area [J]. *Scientific Reports*, 2018,8(1):641-653.
- [7] 刘建文,周玉科.站点尺度的青藏高原时序NDVI重构方法比较与应用[J]. *地理科学进展*, 2018,37(3):427-437. [ Liu J W, Zhou Y K. Comparison and application of NDVI time-series reconstruction methods at site scale on the Tibetan Plateau[J]. *Progress in Geography*, 2018,37(3):427-437. ]
- [8] Cai Z, Jönsson P, Jin H, et al. Performance of smoothing methods for reconstructing NDVI time-series and estimating vegetation phenology from MODIS data[J]. *Remote Sensing*, 2017,9(12):1271-1289.
- [9] 臧琳,宋冬梅,单新建,等.基于被动微波与时空联合算法的云下像元LST重建[J]. *遥感技术与应用*, 2016,31(4):764-772. [ Zang L, Song D M, Shan X J, et al. Reconstruction of LST under the cloud based on passive microwave remote sensing and spatio-temporal domain algorithm[J]. 2016,31(4):764-772. ]
- [10] Romshoo S A, Rafiq M, Rashid I. Spatio-temporal variation of land surface temperature and temperature lapse rate over mountainous Kashmir Himalaya[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(3):563-576.
- [11] 慈晖,张强.新疆NDVI时空特征及气候变化影响研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017,19(5):662-671. [ Ci H, Zhang Q. Spatio-temporal patterns of NDVI variations and possible relations with climate changes in Xinjiang province [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(5):662-671. ]
- [12] 郭金停,胡远满,熊在平,等.中国东北多年冻土区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2017(8):2413-2422. [ Guo J T, Hu Y M, Xiong Z P, et al. Spatiotemporal variations of growing-season ND-

- VI and response to climate change in permafrost zone of northeast china[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017(8):2413-2422. ]
- [13] 屈创,殷嘉霖,张海筱.基于MODIS数据的中国热环境时空变化研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(8):45-51. [ Qu C, Yin J L, Zhang H X. Spatio-temporal thermal environment in china based on MODIS data[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2013,27(8):45-51. ]
- [14] Khan J, Wang P, Xie Y, et al. Mapping MODIS LST NDVI imagery for drought monitoring in Punjab Pakistan[J]. IEEE Access, 2018,99:19898-19911.
- [15] Mühlbauer S, Costa A C, Caetano M. A spatiotemporal analysis of droughts and the influence of north Atlantic Oscillation in the Iberian Peninsula based on MODIS imagery[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2016,124(3-4):703-721.
- [16] Li P, Peng C, Wang M, et al. Dynamics of vegetation autumn phenology and its response to multiple environmental factors from 1982 to 2012 on Qinghai-Tibetan Plateau in China[J]. Science of the Total Environment, 2018,637-638:855-864.
- [17] Sun J, Qin X. Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(4):1-9.
- [18] 李磊磊,范建容,张茜戎,等.西藏自治区植被与气候变化的关系[J].山地学报,2017,35(1):9-15. [ Li L L, Fan J R, Zhang X Y, et al. Relationships between NDVI and climate changes in Tibet, China[J]. Mountain Research, 2017,35(1):9-15. ]
- [19] 周婷,张寅生,高海峰,等.青藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系[J].冰川冻土,2015,37(1):58-69. [ Zhou T, Zhang Y S, Gao H F, et al. Relationship between vegetation index and ground surface temperature on the Tibetan Plateau alpine grassland[J]. Journal of Glaciology & Geocryology, 2015,37(1):58-69. ]
- [20] 王蕾,张树文,姚允龙.绿地景观对城市热环境的影响——以长春市建成区为例[J].地理研究,2014,33(11):2095-2104. [ Wang L, Zhang S W, Yao Y L. The impacts of green landscape on urban thermal environment: A case study in Changchun city[J]. Geographical Research, 2014, 33(11):2095-2104. ]
- [21] 沙莎,郭锐,李耀辉,等.温度植被干旱指数(TVDI)在陇东土壤水分监测中的适用性[J].中国沙漠,2017,37(1):132-139. [ Sha S, Guo N, Li Y H, et al. Applicability of TVDI in monitoring drought in Longdong area of Gansu, China [J]. Journal of Desert Research, 2017,37(1):132-139. ]
- [22] Cao X, Feng Y, Wang J. An improvement of the Ts-NDVI space drought monitoring method and its applications in the Mongolian Plateau with MODIS, 2000-2012[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016,9(6):433-447.
- [23] Marzban F, Sodoudi S, Preusker R. The influence of land-cover type on the relationship between NDVI - LST and LST- Tair[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018,39(5):1377-1398.
- [24] 李斌,王慧敏,秦明周,等. NDVI、NDMI与地表温度关系的对比研究[J].地理科学进展,2017,36(5):585-596. [ Li B, W H M, Qin M Z, et al. Comparative study on the correlations between NDVI, NDMI and LST[J]. Progress in Geography, 2017,36(5):585-596. ]
- [25] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over east Asia coupled with temperature and rainfall variations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010,115(D14):14101-14113
- [26] 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.
- [27] Peng S S, Piao S, Zeng Z, et al. Afforestation in China cools local land surface temperature[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014,111(8):2915-2919.
- [28] 中华人民共和国环境保护部.从生态省到生态文明先行示范区再到国家生态文明试验区福建先行先试奋楫勇进 [ED]. [ [http://www.zhb.gov.cn/xxgk/hjyw/201606/t20160629\\_356429.shtml](http://www.zhb.gov.cn/xxgk/hjyw/201606/t20160629_356429.shtml), 2016-06-29. ]
- [29] 福建省森林资源管理总站.福建省第八次全国森林资源清查及森林资源状况调查报告[J].福建林业,2014(2):9-10. [ Fujian forest resource management general station, Report on the eighth national forest inventory and forest resources survey of Fujian province[J]. Forestry in Fujian, 2014(2):9-10. ]
- [30] Krishnan S R, Seelamantula C S. On the selection of optimum Savitzky-Golay filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013,61(2):380-391.
- [31] 边金虎,李爱农,宋孟强,等. MODIS植被指数时间序列 Savitzky-Golay滤波算法重构[J].遥感学报,2010,14(4): 725-741. [ Bian J H, Li A N, Song M Q, et al. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky- Golay filter[J]. Journal of Remote Sensing, 2010.14(4):725-741. ]
- [32] 顾祝军,曾志远,史学正,等.基于ETM+图像的植被覆盖度遥感估算模型[J].生态环境学报,2008,17(2):771-776. [ Gu Z J, Zeng Z Y, Shi X Z, et al. A model calculating vegetation fractional coverage from ETM + imagery[J]. Ecology and environment. 2008,17(2):771-776. ]
- [33] Cai Y, Chen G, Wang Y, et al. Impacts of land cover and seasonal variation on maximum air temperature estimation using MODIS imagery[J]. Remote Sensing, 2017,9(3):233-247.
- [34] Zeng L, Wardlow B D, Tadesse T, et al. Estimation of daily air temperature based on MODIS land surface temperature products over the corn belt in the US[J]. Remote Sensing, 2015,7(1):951-970.
- [35] 林金煌,陈文惠,祁新华,等.闽三角城市群生态系统格局演变及其驱动机制[J].生态学杂志,2018,37(1):203-210. [ Lin J H, Chen W H, Qi X H, et al. Evolution pattern of ecosystem and its driving mechanism in urban agglomeration in Fujian delta region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(1):203-210. ]