

# 植被覆盖度增加对辽宁地区气温变化的影响研究

易雪<sup>1,2</sup> 李得勤<sup>1,2\*</sup> 杨森<sup>1</sup> 李涛<sup>3</sup> 公颖<sup>1</sup> 潘晓<sup>1</sup> 崔锦<sup>1</sup>

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

2 东北冷涡研究重点开放实验室, 沈阳 110166

3 西安财经大学统计学院, 西安 710010

**摘要** 植被覆盖度 (Fractional Vegetation Coverage, FVC) 是陆面参数中重要的参数之一, 植被覆盖度变化直接影响地表能量的再分配进而影响区域乃至全球气候变化, 研究植被覆盖度增加对区域气候的影响对未来区域气候变化的预估具有重要意义, 这对适应和缓解全球气候变暖至关重要。本文利用 2001-2018 年中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 产品的 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 植被归一化指数) 数据制作植被覆盖度, 在辽宁地区分别进行了 WRF 模式默认植被覆盖度和实际植被覆盖度的长时间 (2001-2018 年) 模式模拟试验, 结论如下: (1) 辽宁地区因植被覆盖度增加全省年平均气温降低了 0.48°C, 其中夏季降温幅度最大, 降温 0.71°C, 春、秋两季平均降温 0.35 和 0.66°C, 冬季降温幅度最小 0.2°C。植被覆盖度增加对日最高、最低气温也有明显的降温作用, 其中日最低气温对植被覆盖度增加的响应大于最高气温, 且植被覆盖度增加与气温降温的空间分布具有较好一致性。(2) 2001-2018 年年和四季植被覆盖度的显著增加对年和四季平均气温、最高气温、最低气温均有降温趋势, 尤其是对最低气温降温作用更明显。(3) 植被覆盖度增加导致气温降低的主要原因是由于蒸散发的增加导致潜热通量增加, 感热通量减少; 而对于最低气温降低, 主要是由于植被覆盖度增加导致地表温度降低进而引起夜间向上长波辐射减少。总体而言, 植被覆盖度增加越多降温效果越明显, 进而减缓辽宁省气候变暖。

**关键词** 植被覆盖度 气温 WRF 模式 辽宁

文章编号 2022005B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.22005

## Impact of Fractional Vegetation Coverage Increase on Temperature Change in Liaoning Province

YIXue<sup>1,2</sup>, LI Deqin<sup>1,2</sup>, YANG Sen<sup>1</sup>, LI Tao<sup>3</sup>, GONG Ying<sup>1</sup>, PAN Xiao<sup>1</sup>, and CUI Jin<sup>1</sup>

**收稿日期** 2022-01-04; **网络预出版日期**

**作者简介** 易雪, 女, 1984 年出生, 高级工程师, 主要从事陆面过程、气候数值模拟和气候变化研究。E-mail: yixue@163.com

**通讯作者** 李得勤, Email: [lewen05@hotmail.com](mailto:lewen05@hotmail.com)

**资助项目** 国家重点研发计划项目 2018YFC1506803, 辽宁省气象局科研课题 202111, 国家社会科学基金 20CTJ008, 辽宁省科技农业攻关及产业化项目 2020JH2/10300091, 辽宁省自然科学基金 2019-ZD-0858, 中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金 2022SYIAEKFMS12

**Funded by** National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506803), Scientific research project of Liaoning Meteorological Bureau (Grant 202111), National Social Science Foundation of China (Grant 20CTJ008), Guiding plan for agricultural research and industrialization of Liaoning Provincial Department of science and technology (Grant 2020JH2/10300091), Natural Science Foundation of Liaoning Province (Grant 2019-ZD-0858), Joint Open Fund of Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration (2022SYIAEKFMS12)

1 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166

2 Key Opening Laboratory for Northeast China Cold Vortex Research, Shenyang 110166

3 College of Statistics, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710010

**Abstract** Fractional Vegetation Coverage (FVC) is one of the most important land surface parameters. The change of FVC directly affects the redistribution of land surface energy and then affects regional and even global climate change. Studying the effects of increased FVC on regional climate has great significance for future projections of regional climate change, which is essential for adaptation and mitigation of global warming. In this paper, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) of moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) from 2001 to 2018 were used to calculate the FVC, and long-term WRF model simulation experiment with default FVC of WRF and actual FVC were simulated in Liaoning province. The conclusions show that: (1) The annual average temperature in Liaoning decreased by 0.48°C due to the increase of vegetation coverage, with the largest drop of 0.71°C in summer, 0.35 °C and 0.66°C in spring and autumn, and the smallest drop of 0.2°C in winter. The increase of FVC also had a significant cooling effect on the daily maximum and minimum air temperature, among which the response of the daily minimum temperature to the increase of vegetation coverage was greater than that of the maximum temperature, and the increase of FVC had a good spatial consistency with the temperature cooling. (2) The significant increase in annual and seasonal FVC from 2001 to 2018 had a cooling trend on the annual and seasonal average, maximum and minimum temperature, especially on the minimum temperature. (3) The main reason for the decrease of air temperature caused by the increase of FVC is that the increase of evapotranspiration leads to the increase of latent heat flux and the decrease of sensible heat flux. For the minimum temperature, it is mainly due to the decrease of surface temperature caused by the increase of vegetation coverage, which leads to the decrease of upward long-wave radiation at night. In general, the more FVC increases, the more obvious the cooling effect will be, and the increase of FVC can slow down the climate warming in Liaoning Province.

**Keywords** Fractional Vegetation Coverage, Temperature, WRF model, Liaoning Province

## 1 引言

土地利用和土地覆盖变化通过影响土地与大气的相互作用,在不同时空尺度上对气候系统具有重要的调节作用 (Bounoua et al., 2002; 曹茜等, 2015; 毛慧琴等, 2011; Mahmood et al., 2013)。卫星数据显示,在过去30年里,陆地表面一直在变绿 (Zhu et al., 2016; Zhu et al., 2013; Piao et al., 2015), 植被绿化改变了陆地和大气之间的生物地球物理过程, 进而影响了

自然和农业生态系统以及人类健康 (Piao et al., 2020)。根据卫星观测, 发现地球变绿促进了北方地区的变暖和干旱地区的降温 (Forzieri et al., 2017)。最近的一项全球气候模型 (GCM) 评估推断, 自1982年以来, 地球的变绿使地表空气变暖速度减缓了  $0.09 \pm 0.02^{\circ}\text{C}$ , 而蒸发的增加解释了这种变冷的70% (Zeng et al., 2017)。地球表面植被的增加直接影响地表反照率以及热量和水分的再分配, 其中植被增加有利于能量分配给潜热而不是感热, 这种影响尤其是在全球缺水地区更加明显 (Forzieri et al., 2020)。

植被覆盖度 (Fractional Vegetation Coverage, FVC) 是陆面模式中最重要参数之一, 其定义为单位面积内植被 (包括叶、茎、枝) 垂直投影面积所占的百分比 (Gitelson et al., 2002), 也是衡量植被生长状况的重要指数。在陆面模式中, 植被覆盖度通过影响叶面积指数、地表蒸发、地表反照率、发射率和粗糙度等参数的计算, 从而影响土壤温度、湿度、地表能量和水文过程 (Chen and Dudhia, 2001; 何建军等, 2012), 进而对区域乃至全球气候产生重要影响。植被覆盖度主要是由植被类型以及当地的气候状况决定, 而植被的生长状况又对天气和气候的变化产生反馈作用。大量研究表明, 我国大部分地区植被覆盖度呈增加趋势 (孙睿等, 2001; 丁明军等, 2010; 穆少杰等, 2012; 白慧敏等, 2022), 而植被覆盖度的增加对区域气候的影响研究仍较少。

随着大气模式和陆面过程模式的发展, 数值模拟已成为研究植被对气候影响的常用方法。中国的绿化及其对气候的影响已经在不同气候带得到了很好的研究, 造林可以提高干旱和半干旱地区的地表温度, 降低潮湿地区的温度 (Peng et al., 2014; Huang et al., 2018)。此外, 植被绿化通过其对陆地水文循环的影响, 特别是通过地表蒸发蒸腾来缓解地球气候 (Zeng et al., 2017)。然而现大多数研究都是研究了极端情况下地表气温对植被变化的响应 (高学杰等, 2007; Giorgi and Mearns, 1991; Bonan, 2008), 如森林转为草地或农田通过影响比湿和潜热使局地变暖 (Wang et al., 2003), 北方造林通过减少反照率加剧了变暖 (Betts, 2000)。另有研究利用某一年的植被 (苟娇娇, 2018; 武利阳等, 2018) 或者几年的平均值来代表植被覆盖度的实际值进行研究 (Yu et al., 2020)。

辽宁省地处中国东北地区南部, 属于温带大陆性季风气候, 南部濒临黄渤海, 第三次气候变化国家评估报告 (2016) 显示辽宁省气温显著升高, 植被覆盖度呈显著增加趋势 (易雪等, 2021)。故本文将关注植被的显著增加对辽宁省气温的影响, 以及可能的影响机制, 由于WRF (Weather Research and Forecasting) 模式其灵活的分辨率和丰富的参数化设置, 已被广泛用于区域气候模式和数值天气预报 (Skamarock et al., 2008), 故本文利用WRF模式, 在辽宁地区分别进行了WRF模式默认植被覆盖度和实际植被覆盖度的长时间 (2001-2018年)

模式模拟试验，通过对两个试验结果的对比分析，研究了植被覆盖度的增加对区域气候产生的影响，并对其影响机制进行了初步探讨。本研究的结果对未来区域气候变化的预估具有重要意义，这对适应和缓解全球气候变暖至关重要。

## 2 数据来源和方法介绍

### 2.1 资料

本文所用植被覆盖度数据是由 2001—2018 年 MODIS 卫星遥感产品 MOD13A3 中逐月 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 植被归一化指数) 数据, 利用像元二分模型 (Gutman and Ignatov, 1998) 计算而得, 植被覆盖度空间分辨率为 1 km, 其表达式如下:

$$\sigma_{fi} = \frac{NDVI_i - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{fi}$  为第  $i$  个像元的植被覆盖度;  $NDVI_i$  为第  $i$  个像元的 NDVI 值;  $NDVI_v$  为全植被覆盖像元的 NDVI 值, 为研究区最大值, 理论值为 1;  $NDVI_s$  为完全的裸土或无植被覆盖像元的 NDVI 值, 为研究区最小值, 理论值应接近于 0。但由于地表性质不同及植被类型和生长季的影响,  $NDVI_s$  和  $NDVI_v$  有变化, 故本文参考前人计算方法 (李得勤等, 2015; 赵鑫和王萍, 2018),  $NDVI_s$  和  $NDVI_v$  从研究区 NDVI 累积概率分布上分别找出不同时相的 5% 和 95% 置信区间值, 从所有时相内选出最小 5% 置信区间值和最大 95% 置信区间值, 分别作为  $NDVI_s$  和  $NDVI_v$  参数值。

2001-2018 年辽宁省地区逐日平均气温观测资料来自于 61 个国家级地面气象观测站(图 1a)。

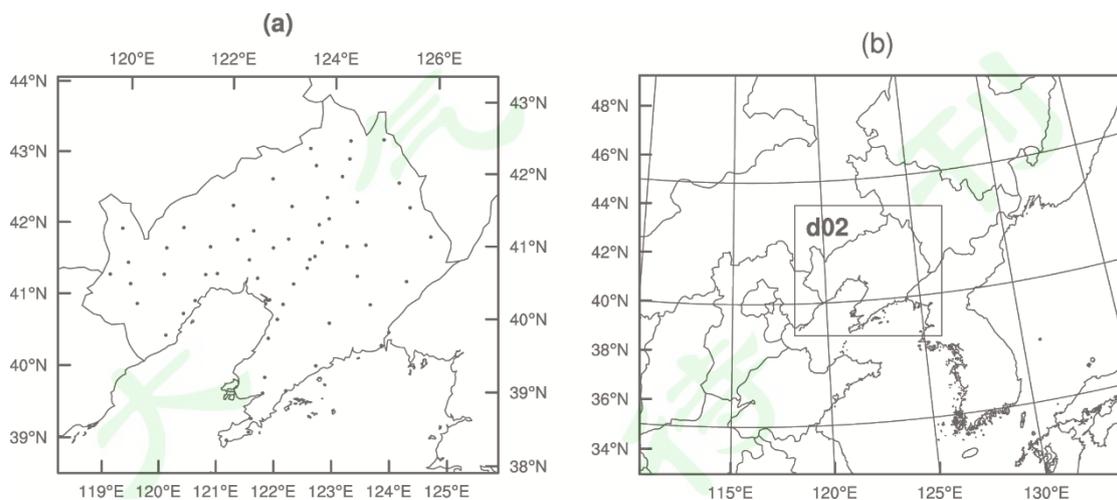


图 1 辽宁省地区 61 个国家级地面气象观测站 (a) 和模式模拟区域 (b) 分布情况

Fig.1 Distribution of national surface weather stations in Liaoning Province (a) and domains used in the WRF

model (b)

初始场及侧边界场使用了美国环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）的第三代气候预报系统提供的再分析数据CFSR，包括CFSR-surface、CFSR-pressure每天00、06、12和18时四个时次的再分析数据，其中CFSR-surface的空间分辨率为 $0.205^{\circ} \times 0.204^{\circ}$ ，CFSR-pressure的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，较第二代再分析资料具有更高的水平和垂直分辨率（Saha et al., 2011）。CFSR全球再分析资料的主要特点为耦合了新的海洋模式，增加了新的海冰模式，同化了历史卫星遥感辐射资料，陆面模式采用Noah陆面模式，在辐射的参数化方案中考虑了二氧化碳、气溶胶等的变化（Saha et al., 2010; 易雪等, 2018a）。

## 2.2 模式设置和试验设计

本文使用 WRFv4.1 开展植被覆盖度增加对区域气候影响的数值模拟研究，受计算成本的影响，采用两层嵌套网格，图 1b 给出了 WRF 模式两层嵌套的区域，模式中心位置的经纬度为  $116.0^{\circ} \text{E}$ ， $42.0^{\circ} \text{N}$ ，两层嵌套水平分辨率分别为 36 km 和 12 km，对应第一层的网格数为  $60 \times 50$ ，第二层的网格数为  $55 \times 49$ ，其中第一层区域包含中国东北、华北以及朝鲜半岛区域，第二层区域为辽宁省范围，并且开启子区域对母区域的反馈。模式垂直分层为 51 层，顶层气压为 10 hPa。

参考以往气候模拟的参数化方案设置（易雪等, 2018b），这里使用WSM3微物理过程参数化方案，RRTM长波辐射方案，Dudhia短波辐射方案，YSU行星边界层方案，Kain-Fritsch积云对流参数化方案，Noah陆面过程参数化方案。其中Noah陆面过程模式是一维垂直陆面过程模式（Chen et al., 1996; 2001），Noah模式中的反照率（ $\alpha$ ）、地表发射率（ $\varepsilon$ ）、粗糙度（ $Z_0$ ）和叶面积指数（LAI）由参数表中的各土地利用类型对应的最大、最小值以及植被覆盖度来计算，公式如下：

$$\alpha = \alpha_{max} - \frac{\sigma_f - \sigma_{fmin}}{\sigma_{fmax} - \sigma_{fmin}} \times (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{min} + \frac{\sigma_f - \sigma_{fmin}}{\sigma_{fmax} - \sigma_{fmin}} (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \quad (3)$$

$$Z_0 = Z_{0min} + \frac{\sigma_f - \sigma_{fmin}}{\sigma_{fmax} - \sigma_{fmin}} (Z_{0max} - Z_{0min}) \quad (4)$$

$$\text{LAI} = \text{LAI}_{min} + \frac{\sigma_f - \sigma_{fmin}}{\sigma_{fmax} - \sigma_{fmin}} (\text{LAI}_{max} - \text{LAI}_{min}) \quad (5)$$

此外陆面模式中的地表蒸发也受植被覆盖度影响，见公式（6）-（8）：

$$E_{dir} = (1 - \sigma_f) \times \beta \times E_p \quad (6)$$

$$E_c = \sigma_f \times E_p \times \left(\frac{W_c}{S}\right)^n \quad (7)$$

$$E_t = \sigma_f \times E_p \times B_c \times \left[1 - \left(\frac{W_c}{S}\right)^n\right] \quad (8)$$

公式(2)-(4)中,  $\sigma_f$ 为植被覆盖度,  $\sigma_{fmax}$ 、 $\sigma_{fmin}$ 为植被覆盖度的最大值、最小值,  $\alpha_{max}$ 、 $\alpha_{min}$ 为反照率的最大值、最小值,  $\varepsilon$ 、 $Z_0$ 、LAI与公式(2)类似。公式(6)-(8)中,  $E_{dir}$ 为直接蒸发,  $E_c$ 为植被截留水蒸发,  $E_t$ 为植被蒸腾,  $\beta$ 为土壤含水量的函数,  $E_p$ 为潜在蒸发量,  $W_c$ 为植被层截留水量,  $S$ 为植被层最大截留水量,  $B_c$ 为植被阻抗的函数,  $n$ 为经验参数(何建军等, 2014)。

本文设计两组试验方案:(1)控制试验(CTL):采用WRF模式默认植被覆盖度作为控制试验。(2)植被增加试验(VEG),采用2001-2018年逐年逐月MODIS-NDVI数据制作的植被覆盖度。CTL和VEG试验植被覆盖度对比如图2所示,由图2a、b可见,2001-2018年MODIS植被覆盖度(图2b)与WRF模式默认植被覆盖度(图2a)空间分布相似,受植被覆盖类型影响(图2c),均是东部高、中西部低,但默认植被覆盖度在辽宁全省范围内普遍低于MODIS数据制作的植被覆盖度,平均偏低0.139,从2001-2018年植被覆盖度的年际变化上来看(图2d),MODIS植被覆盖度均高于默认值,且有上升趋势,说明采用2001-2018年MODIS植被覆盖度可以很好的表征植被覆盖度增加即植被绿化。两组试验除植被参数不同外,采用完全相同的模拟范围、模拟时间、侧向边界条件和物理参数化设置。因此,VEG模拟与CTL模拟的差异反映了植被增减的气候效应(Ge et al., 2014)。由于本文研究目的是植被覆盖度增加对辽宁区域的气候影响,故研究结果均只讨论辽宁区域范围内,其他地区结果不在本研究分析结果内。

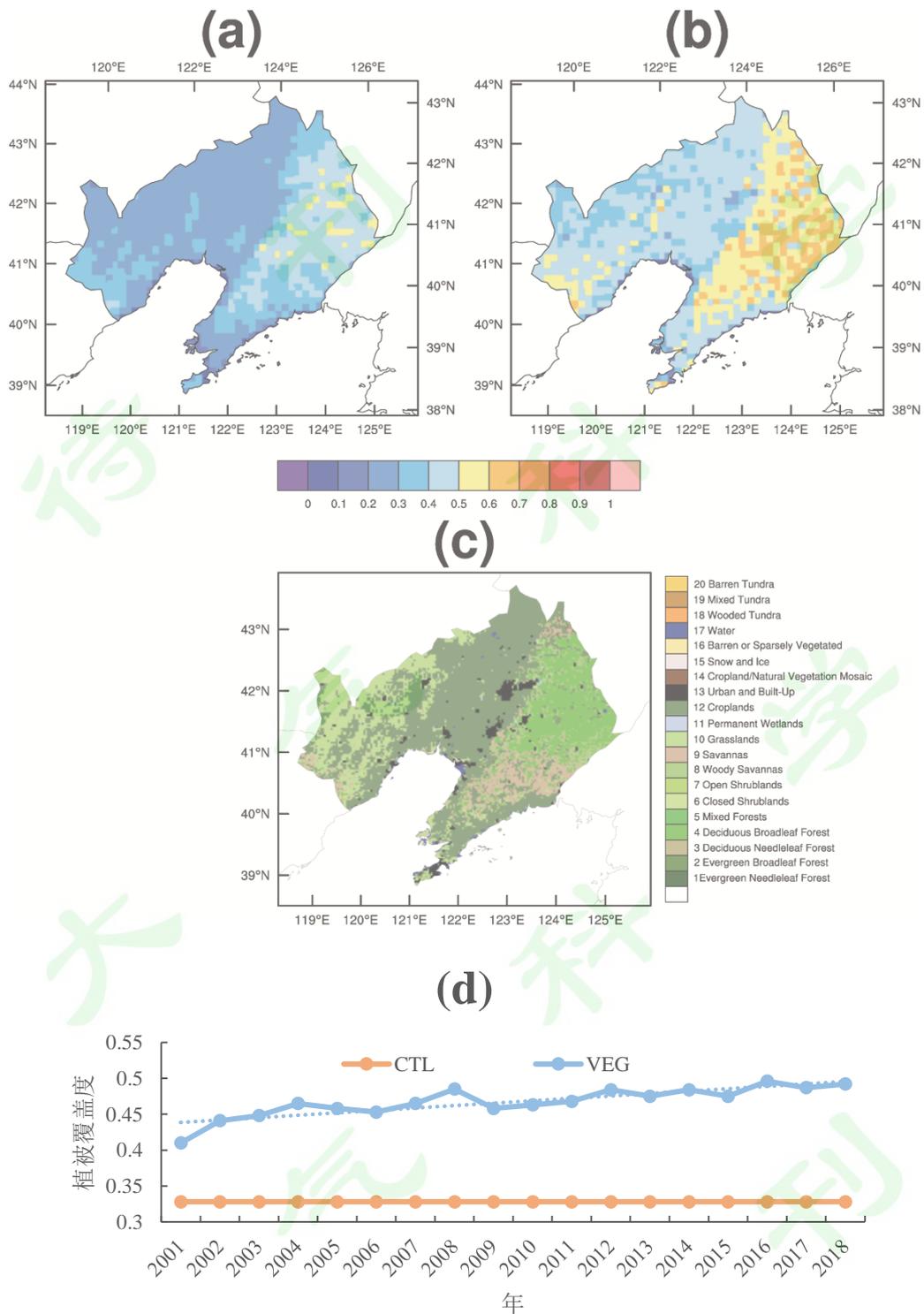


图2 辽宁省WRF模式默认植被覆盖度 (a)、2001-2018年平均MODIS植被覆盖度 (b)、辽宁省2019年MODIS土地利用覆盖 (c) 空间分布和CTL、VEG试验植被覆盖度年际变化图 (d)

Fig. 2 Spatial distribution of default FVC in WRF model (a), MODIS FVC from 2001 to 2018(b) , MODIS landuse in 2019 (c) in Liaoning Province and annual change of FVC for CTL and VEG test (d)

两组试验模拟时间均为2001-2018年，为了避免WRF模式长时间连续积分对模式模拟结

果带来的不确定性，参考Lo et al. (2008) 的办法，采用一种气候降尺度常用的方法——重新初始化的方法，每年从前一年的12月29日00时模拟到当年的12月31日23时连续积分368天（闰年369天），输出结果为逐小时，考虑模式初始积分的平衡和稳定性，将模拟前72小时作为模式的spin-up时间，1月1日00时—12月31日23时为模式的模拟分析时段。为了提供更加准确和动态的表面信息，使用每6 h更新一次的海表温度、植被覆盖度等数据。

## 3 结果分析

### 3.1 植被覆盖度增加对气温的影响

#### 3.1.1 植被覆盖度增加对平均气温的影响

WRF 模式由于其具有比较完善的物理参数化过程，已被广泛应用于研究区域气候变化（Leung et al., 2006）、区域气候降尺度（Yi et al., 2020）和陆气相互作用（Zhang et al., 2013; Yan et al., 2019）。

为了检验模式在辽宁地区的气候模拟能力，首先将 2001-2018 年 CTL 试验第二层嵌套气温模拟结果与观测值进行比较（图 3），由图 3a、b 可见，CTL 试验模拟的气温空间分布与观测值一致，均是呈现出由沿海向内陆逐渐递减的一个空间分布，将模拟的逐日气温插值到 61 个观测站，并对所有观测站的逐日气温进行模拟与观测的相关性分析，其相关系数为 0.984，通过信度为 0.001 的显著性检验，但 CTL 试验模拟的日平均气温空间分布普遍低于观测值，图 3c 给出了 2001-2018 年逐年观测和 CTL 试验平均气温的时间变化序列，发现这种冷偏差逐年存在，2.4-3.5°C。在辽宁地区，Yi et al.(2020)曾使用观测 Nudging 和分析 Nudging 方法同化了大尺度再分析资料和地面观测资料，发现可以减少部分冷偏差，但冷偏差仍存在。高学杰等（2007）也曾指出中国地区温度数值模拟存在系统性冷偏差。由于本文重点关注的是植被覆盖度增加后，对气温的模拟影响，所以只讨论植被覆盖度的变化对气温变化的影响。

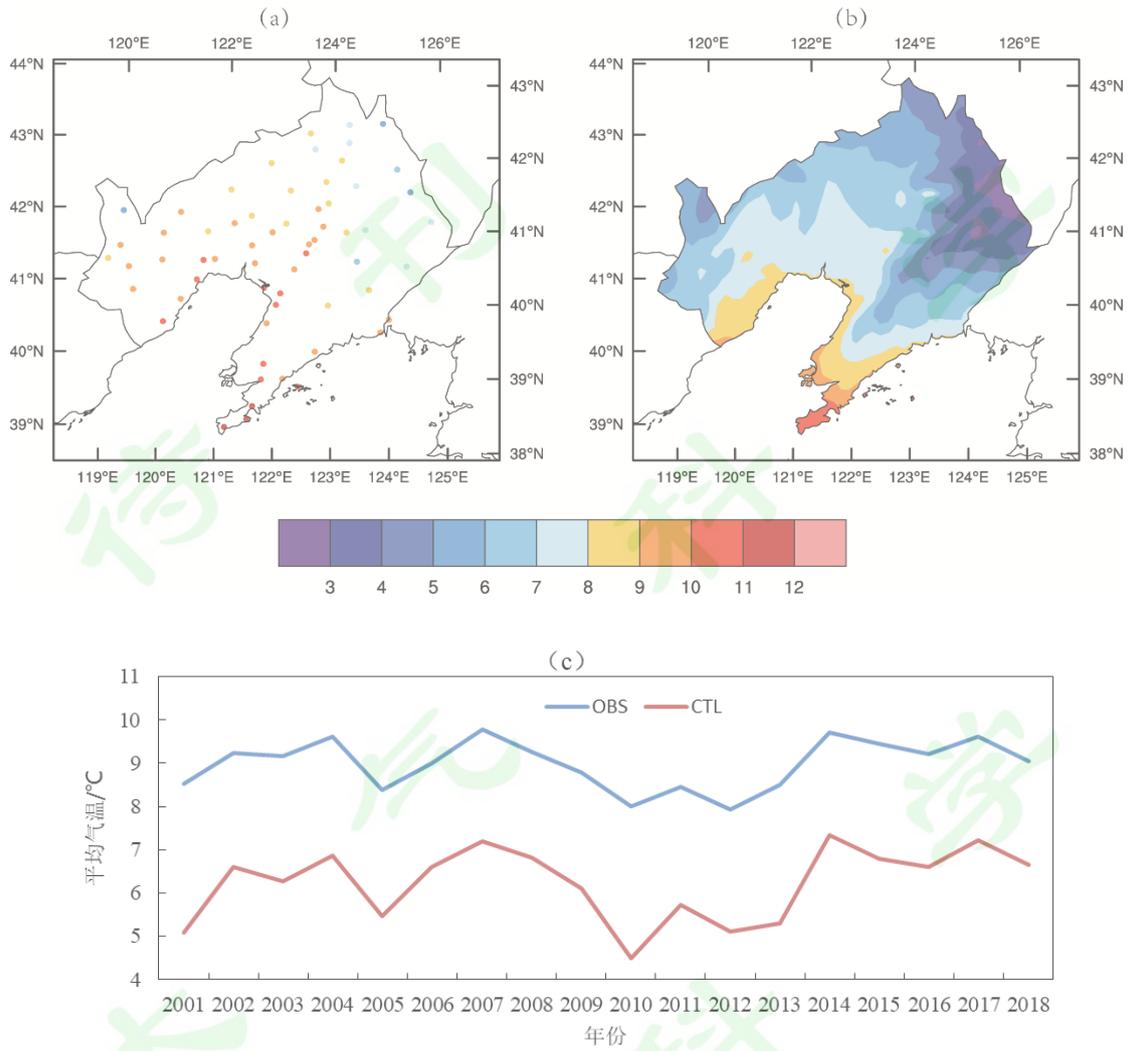


图 3 2001-2018 年观测 (a)、CTL 试验平均气温 (b) 空间分布及 2001-2018 年观测与 CTL 试验平均气温的  
 年际变化图 (c) (单位: °C)

Fig.3 Spatial distribution of annual mean temperatures at 2 m from observations (a) and CTL (b) and annual  
 change of average temperature in Liaoning Province from 2001 to 2018 (c) (unit: °C)

为了给出植被覆盖度增加对辽宁气温的影响,这里给出 VEG 试验和 CTL 试验年和四季植被覆盖度的差值 (VEG-CTL) (图 4a、c、e、g、i) 及平均气温差值 (VEG-CTL) (图 4b、d、f、h、j) 空间分布图。由图 4a 可以看出,年均植被覆盖度全省普遍增加,全省平均增加 0.139 (图 5),其中辽宁东部增加幅度小于其他地区。对应的全省年平均气温均表现为下降 (图 4b),其中辽宁东部降温较小,而辽宁中西部降温幅度较大,全省平均降低了 0.48°C (图 5),年均植被覆盖度增加与气温降温在辽宁地区的空间相关系数为-0.662,通过信度为 0.01 的显著性检验,说明植被覆盖度增加大的地区,对应的降温幅度也较大,反之,增加幅度小

的地区降温幅度也小。四季植被覆盖度也均表现为不同程度的增加，且不同季节平均气温降温幅度也不同。春季植被覆盖度（图 4c）全省平均增加 0.124，增加幅度最大的地区是辽宁东部，考虑辽宁东部主要植被覆盖类型是落叶阔叶林（图 2c），随着辽宁春季气温呈上升趋势（东北区域气候变化评估报告，2020），辽宁东部森林复苏时间提前，而辽宁中部增加幅度较小，这可能是由于辽宁中部地区主要植被类型是农作物，农作物播种时间为 4 月底到 5 月初，且相关研究表明辽宁地区农作物播种期近 30 年未有提前趋势（穆佳等,2014）。对应的春季平均气温全省均表现为降温，平均降温 0.35°C，且降温空间分布与植被覆盖度增加的空间分布一致（图 4d），两者空间相关系数为-0.817，说明春季植被增加对气温影响具有较好的空间一致性；夏季植被覆盖度增加幅度为四季中最大（图 4e），全省平均增加 0.184。对应夏季降温幅度也是最大（图 4f），普遍大于 0.4°C，全省平均降温 0.71°C，两者空间相关系数-0.703，夏季降温对年均温的下降贡献大于其他季节；秋季植被覆盖度增加也较明显，故秋季降温幅度也较大，与植被覆盖度的空间相关系数为-0.628；冬季增加幅度最小 0.066（图 4i），故冬季降温幅度最小 0.2°C，其中由于辽宁东部植被覆盖度比默认植被覆盖度偏低，所以辽宁东部气温高于 CTL 试验，两者空间相关系数-0.751，尽管辽宁冬季为非生长季，植被覆盖度仍表现为增加，考虑是受全球气候变暖影响，辽宁地区近 20 年冬季积雪期呈减少趋势（周晓宇等, 2021），积雪的减少导致地表植被覆盖度的增加，进而引起反照率、发射率、地表蒸散等物理量的变化，所以冬季气温也发生了变化。

总的来说，植被覆盖度增加可以明显降低平均气温，且植被覆盖度增加幅度不同，降温幅度不同，增加越多，降温效果越明显，且降温幅度与植被覆盖度增加幅度空间分布基本一致。

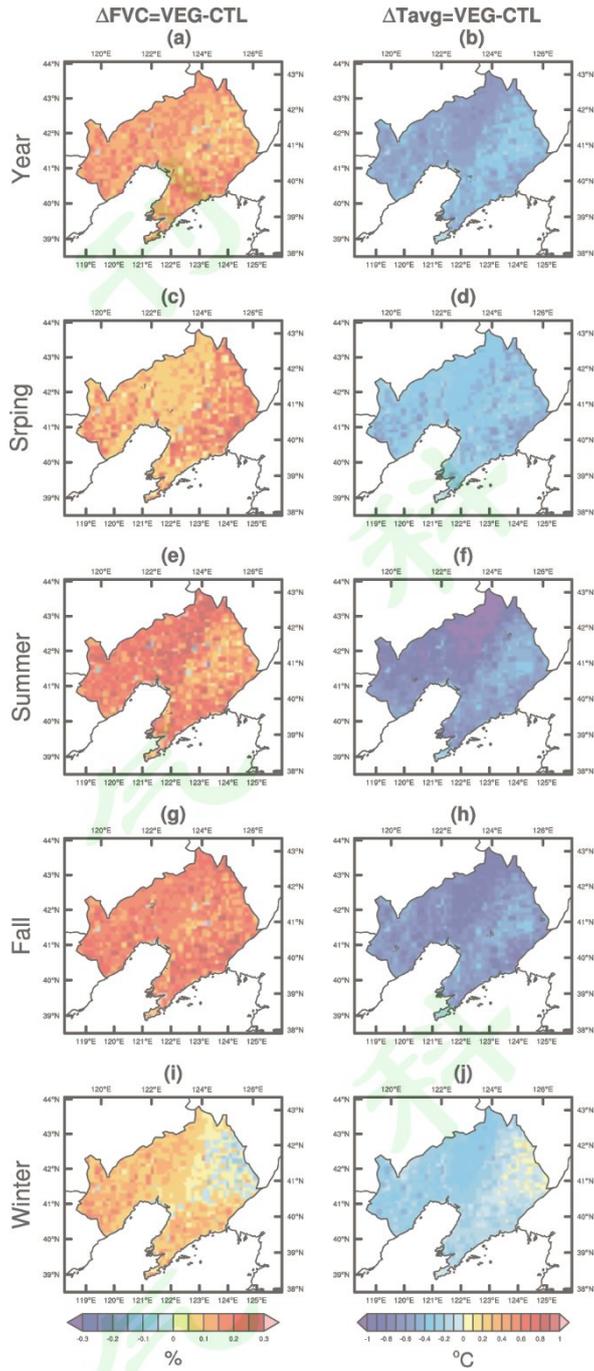


图4 2001-2018年 VEG 试验与 CTL 试验辽宁省年和四季植被覆盖度差异 ( $\Delta FVC=VEG-CTL$ , a、c、e、g、i, 单位: %) 和平均气温差异 ( $\Delta T_{avg}=VEG-CTL$ , b、d、f、h、j, 单位:  $^{\circ}C$ ) 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of annual and seasonal FVC differences ( $\Delta FVC=VEG-CTL$ , a、c、e、g、i, Unit: %) and average temperature differences at 2 m ( $\Delta T_{avg}=VEG-CTL$ , b、d、f、h、j, Unit:  $^{\circ}C$ ) between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

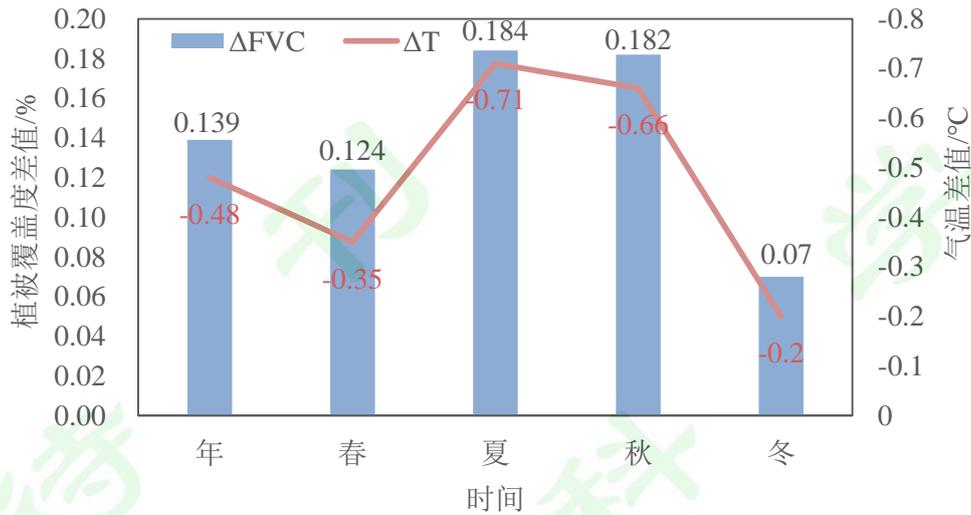


图 5 2001-2018 年 VEG 与 CTL 试验辽宁省年和四季平均植被覆盖度和气温差异

Fig.5 Annual and seasonal FVC differences and temperature at 2 m differences between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

### 3.1.2 植被覆盖度增加对最高、最低气温的影响

植被覆盖度增加对辽宁地区日最高、最低气温也有明显的降温作用（图 6），但对日最高、最低气温影响不同，植被覆盖度增加导致全省模拟得到的日最高气温平均降低了 0.24°C，但空间差异性不明显（图 6a），全省大部分地区普遍降低 0.2-0.3°C。而对于日最低气温，全省平均降低 0.59°C，与植被覆盖度的增加有很好的对应关系（图 6b），即辽宁东部和南部降温幅度较小，而辽宁中西部降温幅度较大，和植被覆盖度变化的空间相关系数达-0.632，通过了 0.01 的显著性检验。表 1 给出了两组试验日最高、最低气温不同季节的极端气温变化及与植被覆盖度变化的空间相关系数，由表 1 可见，日最低气温的降温幅度普遍大于日最高气温的降温幅度，且与植被覆盖度的空间相关系数大于最高气温。受植被覆盖度增加幅度的影响，日最高气温降温最明显的季节是夏季 0.59°C，其次为秋季 0.23°C，春季 0.17°C，冬季的日最高气温甚至略有升高。而日最低气温降温幅度最大的季节是秋季，降温 0.88°C，其次是夏季降温 0.75°C，春季 0.44°C，冬季 0.33°C。这里秋季最低气温的降温幅度大于夏季，考虑可能是由于秋季云量少于夏季（彭杰等, 2013），秋季夜晚大气逆辐射小于夏季，所以秋季夜间最低气温降温幅度受植被覆盖度的影响更大。从空间相关系数来看，四个季节的日最低气温变化和植被覆盖度增加的空间相关系数均大于 0.555，且均通过了 0.01 的显著性检验，而日最高气温变化与植被覆盖度变化的空间相关系数明显与最低气温不同，在春、秋两季较

低，而夏季空间相关系数较高，说明夏季日最高气温与植被增加有较好的空间一致性，最为特殊的是冬季，空间相关系数为正，说明植被增加冬季日最高气温增温，考虑是与冬季积雪覆盖的反照率有关（Yu et al., 2020）。总的来说，植被覆盖度增加可以降低日最高气温和日最低气温，且不同季节的日最低气温对植被覆盖度增加的响应均大于日最高气温。

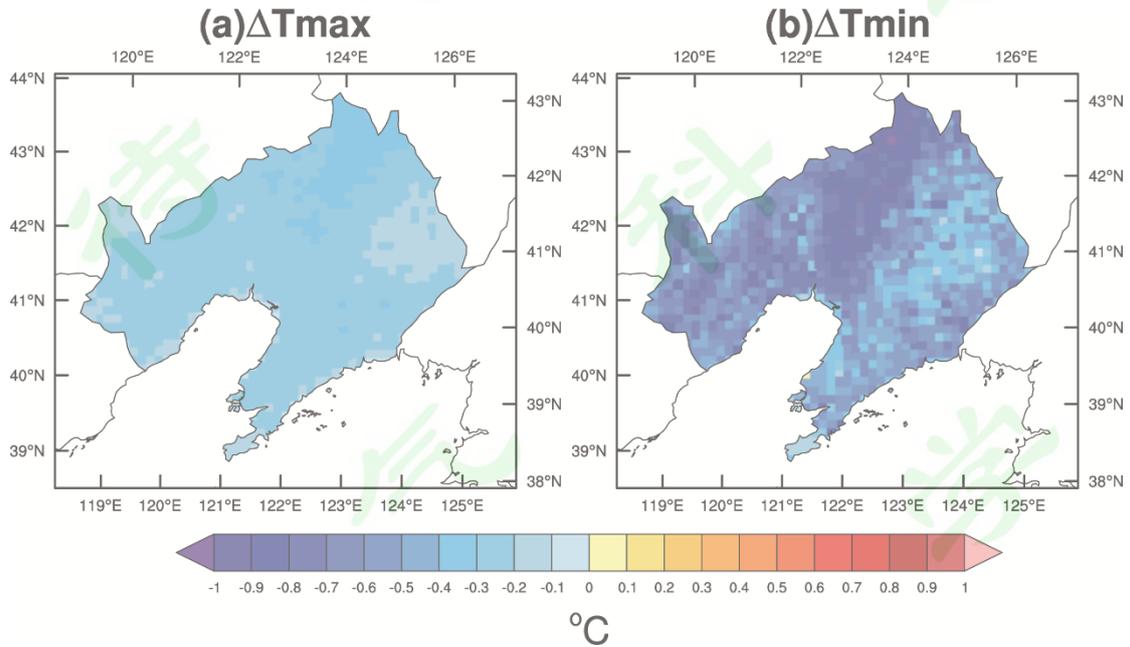


图 6 2001-2018 年 VEG 与 CTL 试验辽宁省日最高气温 (a)、日最低气温 (b) 差异空间分布 (单位: °C)

Fig.6 Spatial distribution of maximum (a), minimum (b) temperature differences between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018(Unit:°C)

表 1 2001-2018 年 VEG 试验与 CTL 试验辽宁省年和四季日最高、最低气温差异和空间相关系数

Tab.1 The annual and seasonal daily maximum、minimum temperature differences and spatial correlation coefficient between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

	年		春		夏		秋		冬	
	最高气温	最低气温	最高气温	最低气温	最高气温	最低气温	最高气温	最低气温	最高气温	最低气温
VEG-CTL (°C)	-0.24	-0.59	-0.17	-0.44	-0.59	-0.75	-0.23	-0.88	0.03	-0.33
空间相关系数	-0.318**	-0.632**	-0.159**	-0.555**	-0.546**	-0.701**	-0.125**	-0.597**	0.656**	-0.748**

\*\*通过 0.01 的显著性检验，\*通过 0.5 的显著性检验

### 3.2 2001-2018 年辽宁省植被覆盖度变化趋势对气温变化趋势的影响

图 7 给出了 2001-2018 年年和四季 VEG 和 CTL 试验辽宁省植被覆盖度差值和平均气温、日最高气温、日最低气温差值的时间变化图。由图 7a 可见, 2001-2018 年年均植被覆盖度增加幅度与气温降温幅度在年际波动变化上一致, 相关系数分别为-0.941、-0.698、-0.926, 均通过 0.01 的显著性检验, 即植被覆盖度增加幅度大的年份, 平均气温、日最高气温、日最低气温降温幅度也较大。近 18 年来辽宁省植被覆盖度有显著增加趋势 (易雪等, 2021), 增加速率为 0.034/10a (表 2), 并通过 0.01 的显著性检验, 与全国植被覆盖度增加趋势一致 (赵倩倩等, 2021)。随着植被覆盖度的显著增加, 平均气温、日最高气温、日最低气温差值 (降温) 的下降趋势明显, 分别为-0.11、-0.061、-0.14°C/10a, 并均通过显著性检验, 可见随着植被覆盖度的显著增加, 降温幅度呈增加趋势, 意味着可以减缓 (增强) 辽宁省气候变暖 (变冷), 尤其是对减缓 (加强) 日最低气温增温 (降温) 效果更明显。对于四季, 四季植被覆盖度均表现为增加趋势, 其中春、夏、秋季通过显著性检验, 对应的平均气温、日最高气温、日最低气温差值也均表现为下降趋势, 其中最低气温差值下降速率最大, 其次平均气温, 最高气温差值下降速率最小。四季中夏季植被覆盖度增加速率最大 (图 7c、表 2), 所以对应的平均气温和极端气温差值下降速率也是四季中最大的。由于辽宁省冬季是非生长季, 植被覆盖度值较小, 故增加幅度不明显, 所以冬季平均气温和极端气温差值下降趋势不明显。综上, 辽宁省年和四季植被覆盖度均呈增加趋势, 受其影响辽宁年和四季平均气温、日最高气温、日最低气温升温趋势减缓或者降温趋势加强。

由于 CTL 试验和 VEG 试验初始场和侧边界条件均相同, 说明在外界条件相同的情况下, 植被覆盖度的增加可以减缓气温的变暖速率, 这与 Zeng et al. (2017) 的地球变绿使地表空气变暖速度减缓结论一致。

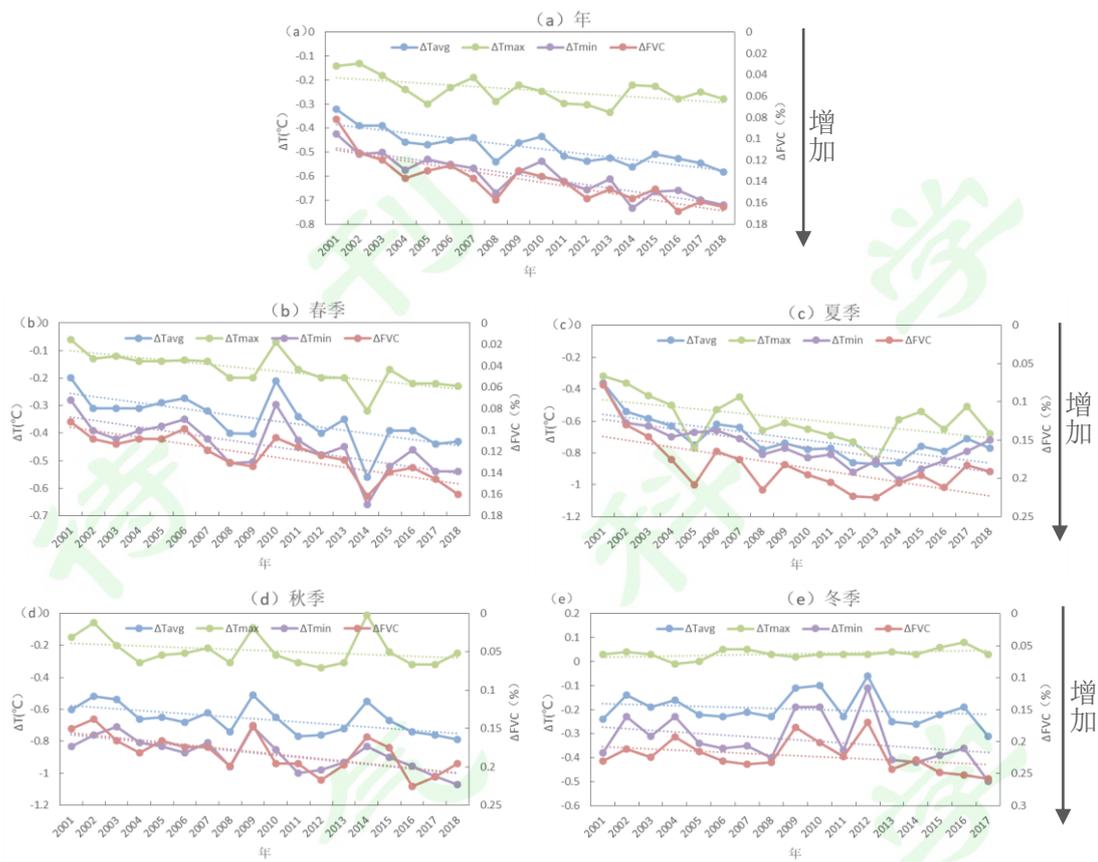


图 7 2001-2018 年年和四季 VEG、CTL 试验植被覆盖度差异和平均气温、日最高气温、日最低气温差异年际变化图

Fig.7 Annual change of FVC difference and average, maximum, minimum temperature differences in year and season between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

表 2 2001-2018 年 VEG、CTL 试验植被覆盖度差异变化趋势（单位：%/10a）和平均气温、日最高气温、日最低气温差异变化趋势（单位：°C/10a）

Tab.2 The change trend of FVC differences (Unit: %/10a) and average, maximum, minimum temperature differences (Unit: °C/10a) between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

	年	春	夏	秋	冬
<b>FVC</b>	0.034**	0.031**	0.046**	0.031**	0.017
<b>Tavg</b>	-0.11**	-0.11**	-0.18**	-0.10**	-0.027
<b>Tmax</b>	-0.061*	-0.083**	-0.14*	-0.055	-0.018
<b>Tmin</b>	-0.14**	-0.12**	-0.20**	-0.14**	-0.065

\*\*通过 0.01 的显著性检验，\*通过 0.05 的显著性检验

2001-2018 年年及四季 FVC 变化趋势及 VEG、CTL 试验平均气温、日最高气温、日最低气温差值的变化趋势的空间分布如图 8 所示。辽宁省年平均气温、日最高气温、日最低气温的差值受植被覆盖度增加（图 8a）的驱使下均表现为下降趋势（图 8b、c、d），其中日最低气温下降趋势最大，日最高气温下降趋势最小，且 FVC 的变化趋势空间分布与最低气温差异的变化趋势的空间分布基本一致。此外，从不同季节的气温差异变化趋势来看，夏季受植被覆盖度增加趋势最大的影响其降温趋势也最大，尤其是辽西和辽北下降趋势最明显，其次为春秋季节，气温差异的下降趋势也较大，但秋季辽宁中部由于植被覆盖度呈减少趋势，对应的气温差异存在增加趋势，冬季气温变化趋势最小，冬季辽宁北部植被覆盖度呈不显著减少趋势，对应的该地区平均气温和极端气温降温幅度也有所减缓。从不同季节平均气温、最高和最低气温变化趋势的对比来看，均是最低气温下降趋势最大，且与平均温度的趋势空间分布基本一致，说明最低气温对平均气温下降起到主要的影响，从与植被覆盖度空间分布来看，四个季节的最低气温变化趋势空间分布与植被覆盖度空间分布也存在很好的对应关系。

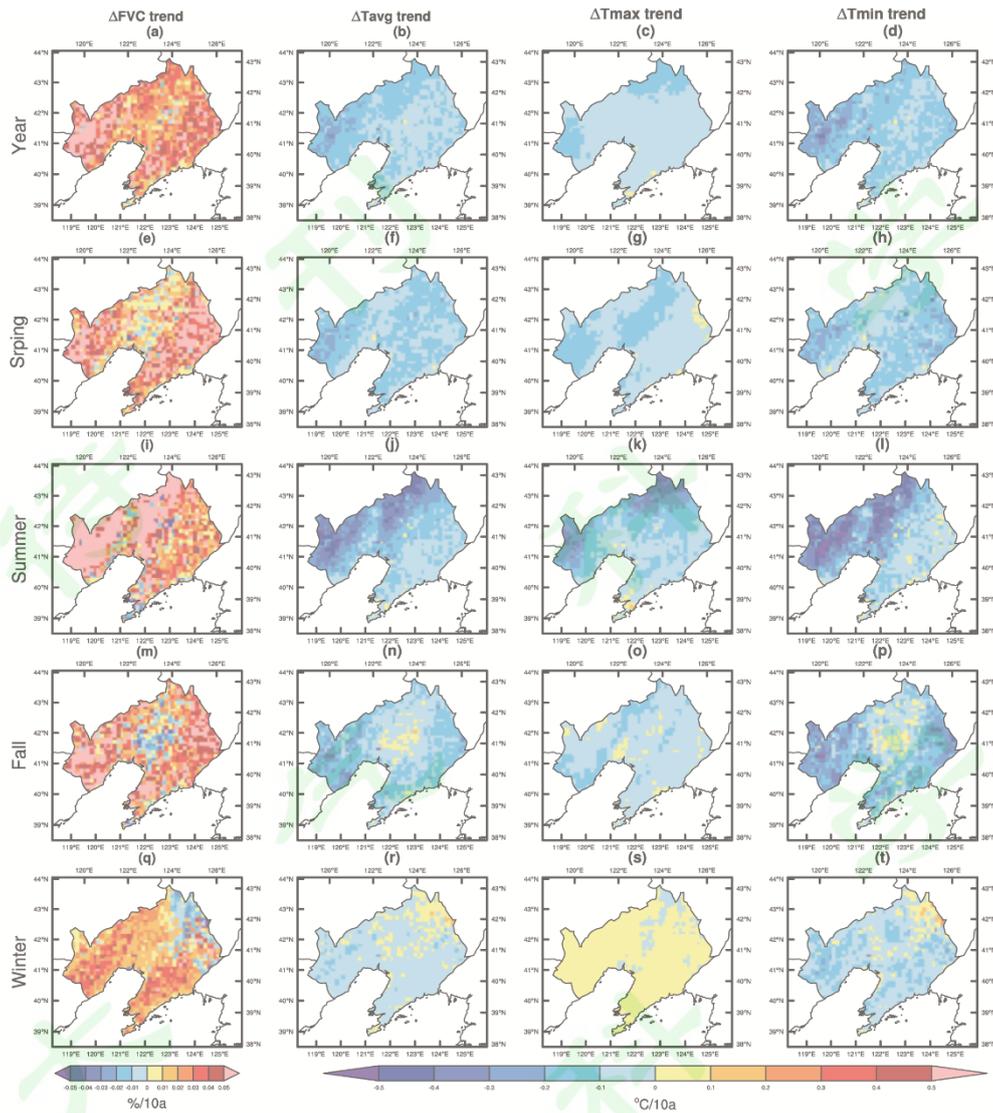


图 8 2001-2018 年 VEG 和 CTL 试验辽宁省年和四季植被覆盖度差异变化趋势（单位： $\%/10a$ ）及平均气温、日最高气温、日最低气温差异变化趋势（单位： $^{\circ}C/10a$ ）空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of change trend of FVC differences (Unit:  $\%/10a$ ) and average, daily maximum, minimum temperature differences (Unit:  $^{\circ}C/10a$ ) in year and season between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

### 3.3 植被覆盖度增加对地表能量平衡的影响和气温的关系

地表能量平衡控制着陆—气相互作用，地面 2 m 气温的变化主要有 2 个影响因素：一是太阳短波辐射、地表长波辐射，以及地表感热和潜热的作用；二是大气环流的变化（例如冷暖气团的平流）对地面气温的作用更为直接（Zeng et al., 2017）。植被覆盖度的增加会影响陆面的能量平衡和分配，为确定气温对植被覆盖度变化的响应机制，这里进一步分析植被覆盖度变化对净辐射、潜热通量、感热通量等物理量的影响（图 9、10）。由图 9a 可知，植被覆盖度增加引起地表接收到的向下短波辐射减少，其中辽宁省东部和北部减少较多，而其他地

区相对减少，2001-2018 年全省平均减少  $2 \text{ W/m}^2$ ，考虑是因为植被覆盖度增加影响云量和大气水汽含量的变化间接影响大气短波透射率，进一步影响地表接收到的太阳短波辐射（Zeng et al.,2017）；地表向上短波辐射（图 9b）因植被覆盖度增加全省普遍减少，其中中东部减少较多，全省平均减少  $1.07 \text{ W/m}^2$ ，考虑是因为向上短波辐射由向下短波辐射和反照率共同影响，由公式（2）可知，植被覆盖度增加直接引起反照率降低，但反照率受植被覆盖度增加影响较小（图 10a），除城市所在区域的反照率增加外，全省其他地区普遍减少 0-0.8%，所以向上短波辐射减少量小于向下短波辐射减少量；由公式（3）可知植被覆盖度增加导致发射率增加（图 10b），以及向下短波辐射减少引起的地表温度的降低（图 10c），所以地表向上长波辐射减少（图 9c），全省向上长波辐射减少  $2.89 \text{ W/m}^2$ ，辽宁东部的向上长波辐射减少量小于辽宁中西部，与辽宁平均气温差异的空间分布一致（图 4b）；由于向上长波辐射减少量大于短波净辐射减少量，所以全省净辐射增加（图 9d）。

由于植被覆盖度增加，冠层截留水分蒸发增加、裸土减少导致土壤直接蒸发减少，植被覆盖度增加叶面积指数增加，导致植被蒸腾增加，故潜热增加（武利阳等,2018），全省潜热通量增加  $1\sim 6 \text{ W/m}^2$ （图 9e），且潜热通量增加大于净辐射增加。此外，植被覆盖度增加使地表温度降低（图 10c），地表空气稳定度加强，减弱了地表与大气之间的湍流交换，所以感热通量减少了  $1\sim 4 \text{ W/m}^2$ （图 9f）。综上，植被覆盖度增加引起地表净辐射、潜热通量的增加，而感热通量减少，所以造成地面 2m 气温的降低。

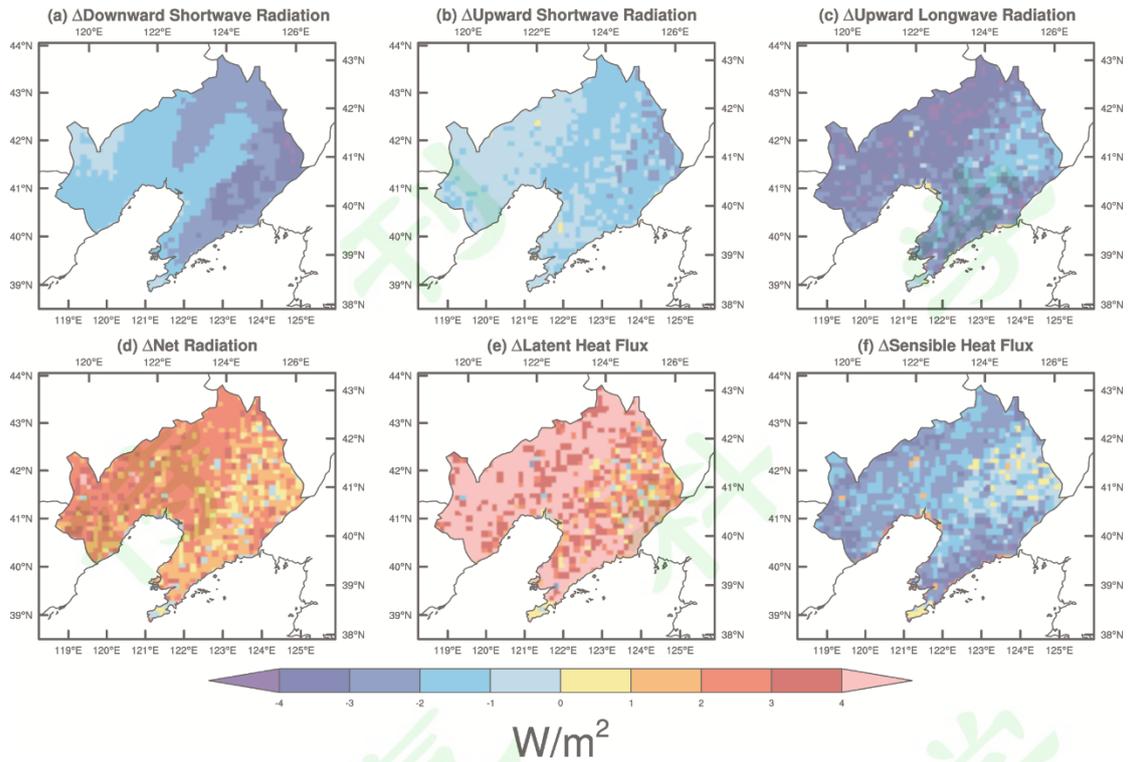


图 9 2001-2018 年辽宁省 VEG 试验与 CTL 试验向下短波辐射 (a, 单位:  $W/m^2$ )、向上短波辐射 (b, 单位:  $W/m^2$ )、向上长波辐射 (c, 单位:  $W/m^2$ )、净辐射 (d, 单位:  $W/m^2$ )、潜热通量 (e, 单位:  $W/m^2$ ) 和感热通量 (f, 单位:  $W/m^2$ ) 差异空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of downward shortwave radiation (a, Unit: $W/m^2$ ), upward shortwave radiation (b, Unit: $W/m^2$ ), upward longwave radiation (c, Unit: $W/m^2$ ), net radiation (d, Unit: $W/m^2$ ), latent heat flux (e, Unit: $W/m^2$ ) and sensible heat flux (f, Unit: $W/m^2$ ) differences between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

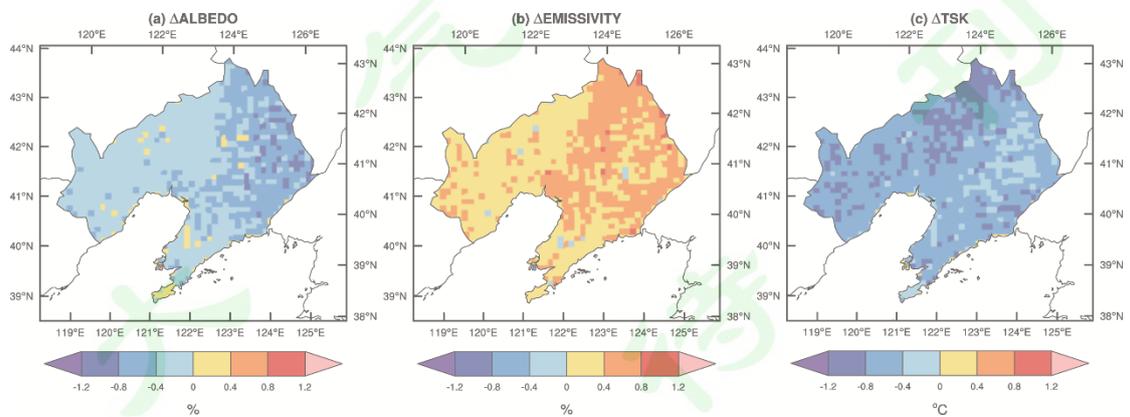


图 10 2001-2018 年辽宁省 VEG 试验与 CTL 试验反照率 (a, 单位: %)、发射率 (b, 单位: %) 和地表温度 (c, 单位:  $^{\circ}C$ ) 差异空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of albedo (a, Unit:%)、emissivity (b,Unit:%) surface temperature (c, Unit:°C) differences between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

图 11 给出了 2001-2018 年 VEG 和 CTL 试验各辐射通量差异以及感热通量、潜热通量差异年际变化曲线。由图 11 可见，植被覆盖度的年际变化与各辐射通量以及潜热通量、感热通量差异的年际变化基本一致，植被覆盖度增加大的年份，净辐射和潜热通量增加也较多，相关系数分别为 0.599 和 0.830（表 3），而对应的向下短波辐射、向上短波辐射和向上长波辐射和感热通量减少的也较多，相关系数分别为-0.758、-0.586、-0.96 和-0.770，反之亦然。受植被覆盖度增加趋势的影响，向下短波辐射、向上短波辐射、向上长波辐射以及感热通量减少量呈下降趋势，变化趋势分别为-0.66、-0.3、-0.69（W/m<sup>2</sup>）/10a，意味着这几个物理量下降（上升）趋势增加（减缓），而净辐射和潜热通量的增加量呈增加趋势，变化趋势分别为 0.27 和 0.94（W/m<sup>2</sup>）/10a，意味着净辐射和潜热通量上升（下降）趋势增加（减缓）。此外，表 3 给出了平均气温年际变化与各辐射通量、潜热通量和感热通量的相关系数，发现向上长波辐射差异与平均气温变化相关系数最大 0.976，故考虑植被覆盖度增加主要通过影响向上长波辐射变化进而引起平均气温的变化，其次与潜热通量差异的相关系数为-0.85，考虑潜热通量的增加是引起平均气温变化的次要原因。

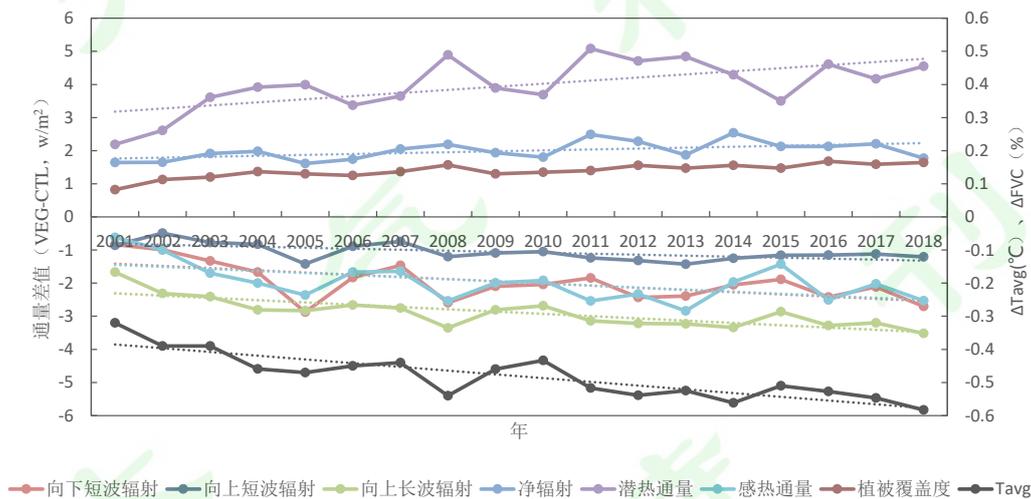


图 11 2001-2018 年 VEG 和 CTL 试验向下短波辐射、向上短波辐射、向上长波辐射、净辐射、潜热通量、感热通量差异（单位：W/m<sup>2</sup>）以及植被覆盖度（单位：%）、平均气温（单位：°C）差异的年际变化图

Fig.11 Annual change of downward shortwave radiation, upward shortwave radiation, upward longwave radiation,

net radiation, latent heat flux, sensible heat flux differences (Unit:  $W/m^2$ ) and FVC (Unit:  $^{\circ}C$ ), average temperature (Unit:  $^{\circ}C$ ) differences between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018

表 3 2001-2018 年向下短波辐射、向上短波辐射、向上长波辐射、净辐射、潜热通量、感热通量差异变化趋势 ( $(W/m^2)/10a$ ) 及与 FVC、平均气温变化的相关系数

Tab.3 The trend of downward shortwave radiation, upward shortwave radiation, upward longwave radiation, net radiation, latent heat flux, sensible heat flux (Unit:  $W/m^2$ ) and average temperature (Unit:  $^{\circ}C$ ) differences between the VEG and CTL in Liaoning Province from 2001 to 2018 and correlation coefficient with FVC, average temperature differences

	向下短波 辐射	向上短波 辐射	向上长波 辐射	净辐射	潜热通量	感热通量
变化趋势 ( $(W/m^2)/10a$ )	-0.66**	-0.30**	-0.69**	0.27*	0.94**	-0.62*
与 FVC 的相关系数	-0.758**	-0.586*	-0.96**	0.599**	0.830**	-0.770**
与平均气温的相关系数	0.795**	0.721**	0.976**	-0.613**	-0.850**	0.781**

\*\*通过 0.01 的显著性检验, \*通过 0.05 的显著性检验

为了进一步分析植被覆盖度增加对最高、最低气温的影响机制,考虑到一般情况下日最高气温出现在午后 14 时,而日最低气温出现在日出前后 4 时左右,故表 4 给出了 14 时和 4 时(地方时) CTL 和 VEG 试验净短波辐射、净长波辐射、净辐射、感热通量、潜热通量、地表温度值,由表 4 可见,14 时最高温度的降低是由于 VEG 试验比 CTL 试验潜热通量增加,感热通量减少,故引起最高气温的下降;而对于凌晨 4 时的最低温度,净短波辐射为 0,净长波辐射由于植被覆盖度的增加地表温度降低所以向上发射的长波辐射减少,而感热通量和潜热通量夜间相差不大,所以夜间最低温主要是由于净长波辐射的减少引起的地面 2m 气温的降低。而对于植被覆盖度增加对最低气温的影响大于最高气温的影响,考虑是白天近地面气温受边界层湍流混合和陆面过程共同影响,夜间湍流混合减弱,近地面气温受陆面过程影响更加显著(何建军等,2014)。

表 4 14 时和 4 时(UTC 时)的 CTL 和 VEG 试验净短波辐射、净长波辐射、净辐射、感热通量、潜热通量(单位:  $W/m^2$ ; 负号代表向上,正号代表向下)和地表温度(单位:  $^{\circ}C$ )

Tab.4 Net shortwave radiation, net longwave radiation, net radiation, sensible heat flux, latent heat flux (unit:  $W/m^2$ ; Minus sign for up, plus sign for down) and surface temperature (unit:  $^{\circ}C$ ) in CTL and VEG tests at 14:00 and 4:00 UTC

	14 时		4 时	
	CTL	VEG	CTL	VEG
净短波辐射	418.08	417.76	0	0
净长波辐射	-111.28	-108.59	-52.45	-49.54
净辐射	306.8	309.18	-52.45	-49.54
感热通量	119.13	112.63	-16.02	-16.46
潜热通量	125.28	140.29	1.39	0.55
地表温度	15.6	15.11	0.79	0.16

## 4 结论与讨论

本文利用 MODIS-NDVI 遥感数据制作 2001-2018 年植被覆盖度来表征近 18 年来辽宁地区植被的变化，并应用陆-气耦合区域气候模式（WRF）来评估植被覆盖度增加对中国辽宁地区气温变化的影响。得到结论如下：

（1）2001-2018 年平均植被覆盖度较 WRF 模式默认植被覆盖度在辽宁地区均有不同程度的增加，年均植被覆盖度全省普遍增加 0.05-0.25。四季植被覆盖度也均表现为增加，但不同季节植被覆盖度增加幅度不同，其中夏季植被覆盖度增加最多，冬季增加最少。不同时间段植被覆盖度增加具有明显的空间差异性，春季辽宁东部增加较多，中部增加较少，考虑和植被覆盖类型有关，夏季辽宁中西部增加较多，东部增加较少。

（2）2001-2018 年辽宁地区因植被覆盖度增加全省年平均气温降低了 0.48℃，不同季节平均气温也因植被覆盖度增加幅度不同而降温幅度不同，其中夏季降温幅度最大，全省平均降温 0.71℃，春、秋两季平均降温 0.35 和 0.66℃，冬季降温幅度最小 0.2℃，且植被覆盖度增加与平均气温降温具有较好的空间一致性，说明植被覆盖度增加越多，降温幅度越大。植被覆盖度增加对最高、最低气温也有明显的降温作用，其中对最低气温的影响大于对最高气温的影响，且最低气温与植被覆盖度的空间相关性好于最高气温。

（3）2001-2018 年年和四季植被覆盖度均有显著增加趋势，随着植被覆盖度的显著增加，年和四季平均气温、最高气温、最低气温的降温趋势明显，尤其是对最低气温降温作用更明显，可见植被覆盖度的增加可以减缓辽宁省平均气温和极端气温变暖，尤其是对减缓最低气温升温效果最明显。

（4）植被覆盖度增加导致气温降低的主要原因是由于蒸散发的增加导致潜热通量增加，

进而感热通量减少；而对于最低气温，主要是由于植被覆盖度增加导致的地表气温降低夜间向上长波辐射减少引起的，且对最高气温的降温效果小于最低气温考虑是白天近地面气温受边界层湍流混合和陆面过程共同影响。

尽管借助于数值模式分析了植被覆盖度增加对区域气候的影响，但很难将植被覆盖度对区域气候的影响从全球变暖的大背景下剥离，如何清楚辨析全球变暖和植被效应对区域气候的影响，依然不确定；另外植被本身的生理生化过程也会导致地-气之间的水分交换路径发生变化，进而对温度产生影响（Li et al., 2021），这也是本文未考虑到的地方。本文考虑了植被覆盖度的增加对各地表能量通量的影响，但仅简单分析了各地表能量通量和气温变化的关系，而实际气温的变化还受环流的影响，植被覆盖度对环流的影响将是下一步工作。本文植被覆盖度对气温的反馈作用可能还受由 MODIS 数据制作的植被覆盖度的代表性（程红芳等, 2008; 于丽娟等, 2015）、陆面过程参数化方案中的地表参数，如热交换系数（Chen and Zhang, 2009），模式中叶面积指数和反照率等计算方法的不确定性（武利阳等, 2018）以及土地利用数据代表性的影响。另外对于本文在进行长时间模拟时没有考虑同化大尺度的再分析资料用以减少模式漂移可能造成的模拟偏差，也可能对本研究的结论有影响，需要在下一步工作中开展此方面的工作，并使用实际叶面积指数、反照率、植被覆盖度和土地覆盖类型等尽量减少模式的不确定性。此外尽管植被增加可以减缓区域气候变暖，但是与全球变暖的速度和强度相比，这种效应仍很小。

#### 参考文献 (References)

- Betts R A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo [J]. *Nature*, 408:187-190.
- Bounoua L, DeFries R, Collatz G J, et al. 2002. Effects of land cover conversion on surface climate [J]. *Climatic Change*, 52(1-2): 29-64.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 320(5882):1444.
- 白慧敏, 龚志强, 孙桂全, 等. 2022. 气象要素对华北地区夏季植被覆盖度的影响[J]. *大气科学*, 46(1):27-39.
- BAI Huimin, GONG Zhiqiang, SUN Guiquan, et al. 2022. Influence of Meteorological Elements on Summer Vegetation Coverage in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(1): 27-39. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20233

- 曹茜, 于德永, 孙云, 等. 2015. 土地利用/覆盖变化与气候变化定量关系研究进展[J]. 自然资源学报, 30(05):880-890. Cao Qian, Yu Deyong, Sun Yun, et al. 2015. Research Progress on the Quantitative Relationship between Land-Use/Land-Cover Change and Climate Change [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 30(05):880-890.
- 程红芳, 章文波, 陈锋. 2008. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J]. 国土资源遥感, (01): 13—18. Cheng Hongfang, Zhang Wenbo, Chen Feng. 2008. Advances in Researches on Application of Remote Sensing Method to Estimating Vegetation Coverage [J]. Remote Sensing for Land & Resources(in Chinese), (01): 13—18.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation [J]. Mon. Wea. Rev., 129:569-585.
- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations [J]. J. Geophys. Res.: Atmospheres, 101(D3):7251–7268.
- Chen F, Zhang Y. 2009. On the coupling strength between the land surface and the atmosphere: From viewpoint of surface exchange coefficients. Geophys. Res. Lett., 36: L10404. DOI: 10.1029/2009GL037980
- 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2016. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社. Compilation Committee for the Third National Assessment Report on Climate Change. 2016. The Third National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press.
- 《东北区域气候变化评估报告》编写委员会. 2020. 东北区域气候变化评估报告:2020-决策者摘要[M].北京:气象出版社. Compilation Committee of northeast Regional Climate Change Assessment Report. 2020. Northeast Regional Climate Change Assessment Report :2020- Summary for policy makers [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 丁明军, 张懿铨, 刘林山, 等. 2010. 1982-2009年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J]. 自然资源学报, 25(12):2114-2122. Ding Mingjun, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. 2010. Temporal and spatial Distribution of Grassland Coverage Change in Tibetan Plateau since 1982[J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 25(12):2114-2122.
- Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, et al. 2017. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth [J]. Science, 356: 1140–1144.
- Forzieri G, Miralles D G, Ciais P, et al. 2020. Increased control of vegetation on global terrestrial energy fluxes [J]. Nature Clim. Change, 10:356–362.
- Ge Quansheng, Zhang Xuezheng, and Zheng Jingyun. 2014. Simulated effects of vegetation increase/decrease on

- temperature changes from 1982 to 2000 across the eastern china. *Int J Climatol*, 34:187-196.
- Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R et al. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sens. Environ.*, 80(1):76-87.
- Giorgi F, Mearns L O. 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: A review [J]. *Rev. Geophys.*, 9(2):191-216.
- Gutman G, Ignatov A. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 19(8):1533-1543.
- 高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 2007. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟[J]. *中国科学(D 辑:地球科学)*, 03:397-404. Gao Xuejie, Zhang DongFeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. Numerical simulation of contemporary land use impacts on regional climate in China [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 03:397-404. doi:10.1360/zd2007-37-3-397
- 苟娇娇. 2018. 基于 RegCM-CLM 模式的植被覆盖变化对中国区域气候的影响[D]. 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心) 硕士学位论文. Gou Jiaojiao. 2018. The impact of vegetation cover change on regional climate over China based on RegCM-CLM model [D]. M.S. thesis (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education).
- 何建军, 余晔, 陈晋北, 等. 2012. 植被覆盖度对兰州地区气象场影响的模拟研究[J]. *高原气象*, 31(06):1611-1621. He Jianjun, Yu Ye, Chen Jinbei, et al. 2012. Simulation Study of the Influence of Vegetation Fraction on Meteorological Condition in Lanzhou Using WRF Model [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31(06):1611-1621.
- 何建军, 余晔, 刘娜, 等. 2014. 复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响[J]. *大气科学*, 38(03):484-498. He Jianjun, Yu Ye, Liu Na, et al. 2014. Impact of land surface information on WRF's performance in complex terrain area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (3): 484-498. doi:10.3878/j.ssn.1009-2013.13186.
- Huang L, Zhai J, Liu J Y, et al. 2018. The moderating or amplifying biophysical effects of afforestation on CO<sub>2</sub>-induced cooling depend on the local background climate regimes in China [J]. *Agric For Meteorol*, 260-261, 193-203.
- Leung L R, Kuo Y-H and Tribbia J. 2006. Research needs and directions of regional climate modeling using WRF and CCSM. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 87(12): 1747-1751.
- Li M X, Wu P L, Ma Z G, et al. 2021. The increasing role of vegetation transpiration in soil moisture loss across

- China under global warming [J]. *J Hydrometeorol*, 253-274. DOI: 10.1175/jhm-d-21-0132.1.
- 李得勤, 文小航, 段云霞, 等. 2015. MODIS 产品反演与 WRF 模式默认植被覆盖度对比研究[J]. *气象与环境学报*, 31(4):26-34. Li Deqin, Wen Xiaohang, Duan Yunxia, et al. 2015. A comparison study of fraction of green vegetation coverage estimated using MODIS products and default data used in WRF model[J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 31(4):26-34.
- Lo C F, Yang Z L, Sr R A P, 2008. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D9): D09112.
- Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, et al. 2013. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate [J]. *Int J Climatol*, 34(4):929-953.
- 毛慧琴, 延晓冬, 熊喆. 2011. 土地利用变化对气候影响的研究进展[J]. *气候与环境研究*, 16(4):513-524. Mao Huiqin, Yan Xiaodong, Xiong Zhe. 2011. An overview of impacts of land use change on climate [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16(4):513-524.
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2012. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. *地理学报*, 09:105-118. Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao et al. 2012. Spatial Differences of Variations of Vegetation Coverage in Inner Mongolia during 2001-2010[J]. *Acta Geographica Sinica(in Chinese)*, 09:105-118.
- 穆佳, 赵俊芳, 郭建平. 2014. 近 30 年东北春玉米发育期对气候变化的响应[J]. *应用气象学报*, 25(6):680-689. Mu Jia, Zhao Junfang, Guo Jianping. 2014. Response of Spring Maize Growth Stage to Climate Change in Northeast China over the Past 30 Years[J]. *Journal of applied meteorological science (in Chinese)*, 25(6):680-689.
- Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. 2015. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. *Glob Chang Biol*, 21:1601-1609.
- Piao S L, Wang X H, Park T, et al. 2020. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, (1):14-27.
- Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, et al. 2014. Afforestation in China cools local land surface temperature [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(8): 2915-2919.
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 37 (1): 91-100. Peng Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 91-100. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*,

91: 1015–1058.

- Saha S, Coauthors, et al. 2011. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products (updated daily). NCAR Computational and Information Systems Laboratory Research Data Archive, accessed 26 February 2016,
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research. Boulder.
- 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 2001. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J]. 地理学报, 56(6):667-672. Sun Rui, Liu Changming, Zhu Qijiang. 2001. Relationship Between the Fractional Vegetation Cover Change and Rainfall in the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56(6):667-672.
- Wang H J, Pitman A J, Zhao M, et al. 2003. The impact of landcover modification on the June meteorology of China since 1700, Simulated using a regional climate model [J]. Int J Climatol, 23:511-527.
- 武利阳, 左洪超, 冯锦明, 等. 2018. 中国土地利用和植被覆盖度变化对区域气候影响的数值模拟[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 54(3):334-344. Wu Liyang, Zuo Hongchao, Feng Jinming, et al. 2018. Numerical simulation of the impact of land use and green vegetation fraction changes on regional climate in China [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences (in Chinese), 54(3):334-344.
- Yan Y, Tang J P, Liu G, et al. 2019. Effects of vegetation fraction variation on regional climate simulation over eastern china. Global and Planetary Change, 175(3-4): 173-189.
- Yi X, Li D Q, Zhao C Y, et al. 2020. Impact of a Dense Surface Network on High-Resolution Dynamical Downscaling via Observation Nudging[J]. J Appl Meteorol Climatol, 59:1655-1670.
- 易雪, 李得勤, 赵春雨, 等. 2018a. 基于 WRF 张弛方法的辽宁地区动力降尺度研究[J]. 气象与环境学报, 34(2):01-10. Yi Xue, Li Deqin, Zhao Chunyu, et al. 2018a. Dynamical climate downscaling over Liaoning area using nudging methods based on WRF model[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 34(2):01-10. Doi: 10.3969/j.issn.1673503X.2018.02.001.
- 易雪, 李得勤, 赵春雨, 等. 2018b. 分析 Nudging 对辽宁地区降尺度的影响[J]. 地球科学进展, 33(5):33-47. Yi Xue, Li Deqin, Zhao Chunyu, et al. 2018b. Assessment of dynamical climate downscaling methods using analysis nudging for Liaoning area[J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 33, 517–531. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.05.0517.
- 易雪, 杨森, 刘鸣彦, 等. 2021. 辽宁省植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 39(2):252-261. Yi Xue, Yang Sen, Liu Mingyan, et al. 2021. Spatio-temporal Variation Characteristics of Vegetation Coverage and Its Response to Climate Change in Liaoning Province[J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 39(2):252-261. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2021)-02-0252

- 于丽娟,尹承美,何建军,等. 2015.植被覆盖度算法对中国区域 WRF 模拟的影响[J]. 高原气象, 34(3):714-721.  
Impact of Vegetation Fraction Algorithms on WRF Simulation over China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(3): 714-721.
- Yu L X, Liu Y, Liu T, et al. 2020. Impact of recent vegetation greening on temperature and precipitation over China [J]. Agric For Meteorol, 295:108197.
- Zeng Z, Piao S, Li L, et al. 2017. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades [J]. Nature Climate Change, 7:432-436.
- Zhang X Z, Tang Q H, Zheng J Y, et al. 2013. Warming/cooling effects of cropland greenness changes during 1982-2006 in the North China Plain [J]. Environ. Res. Lett., 8(2): 024038.
- 赵鑫,王萍.2018. 基于 MODIS 的 2008-2017 年青岛市植被覆盖度动态变化分析[J].北京测绘, 32(10):1133-1137. Zhao Xin, Wang Ping. 2018. Dynamic Change Analysis of Vegetation Coverage in Qingdao City Based on MODIS during 2008-2017[J]. Beijing Surveying and Mapping (in Chinese), 32(10):1133-1137. Doi:10.19580/j.cnki.1007-3000.2018.10.005
- 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2021. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应[J]. 高原气象, 40(2):292-301. Zhao Qianqian, Zhang Jingpeng, Zhao Tianbao, et al. 2021. Vegetation Changes and Its Response to Climate Change in China Since 2000[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 40(2):292-301. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00025.
- 周晓宇,赵春雨,李娜,等.2021. 东北地区积雪变化及对气候变化的响应[J]. 高原气象, 40(4):875-886. Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Li Na, et al. 2021. Spatiotemporal Variation of Snow and its Response to Climate Change in Northeast China [J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 40(4):875-886. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00055.
- Zhu Z, Piao S, Myneni R, et al. 2016. Greening of the Earth and its drivers[J]. Nature Climate Change, (6):791-795.
- Zhu Z, Bi J, Pan Y, et al. 2013. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI) 3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) 3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011[J]. Remote Sensing, (5):927-948.