

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.006

2001—2021年东亚地区CTP时空模态特征分析

孙乐^{1,2}, 唐超礼^{2*}, 魏圆圆³, 黄友锐²

(1 安徽理工大学计算机科学与工程学院, 安徽 淮南 232001;

2 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;

3 安徽大学互联网学院, 安徽 合肥 230039)

摘要: 基于2001年1月至2021年12月期间MODIS和AIRS遥感反演数据, 利用经验正交函数(EOF)、MK趋势分析、最小二乘法等方法研究了东亚地区近21年的云顶气压(CTP)时空模态特征及变化趋势。结果表明: 东亚地区CTP从东北到西南呈逐渐递减趋势; 四季变化差异性较大, 呈现“√”字型变化, 表现为冬季气压值最高、夏季最低; 受地理位置和纬度带影响, CTP的高值区在一年四季均分布在东北地区上空, 低值区始终位于青藏高原地区。在中国的广西、广东和缅甸、印度等地属于热带季风区, 在冬季受干冷气流的影响, 容易形成CTP高值区。东亚地区主要以中云分布为主, 低云区主要集中在中国东北、京津冀、朝鲜半岛和中纬度海洋地区, 在中国中原地区、南方地区(广西、广东和长江中下游各省地区)以及新疆部分地区以中云为主, 高云主要出现在中国青藏高原和塔克拉玛干沙漠。通过趋势分析发现, 在2001年至2021年间, CTP在中国的新疆、印度半岛、缅甸、蒙古和贝加尔湖等区域呈现较高的增长趋势, 而在中国的青藏高原、南部沿海等部分区域以及东部海域均呈较明显的下降趋势。东亚地区部分区域的CTP与地表温度、湿度、水汽和云量均呈现较为显著的相关性, 因此CTP的变化可以在一定程度上反应区域性天气变化情况。

关键词: 云顶气压; 经验正交函数; MK趋势分析; 最小二乘法

中图分类号: P421.31

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-569-016

Spatial-temporal mode analysis of cloud top pressure over East Asia during 2001—2021

SUN Le^{1,2}, TANG Chaoli^{2*}, WEI Yuanyuan³, HUANG Youru²

(1 Department of Computer Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2 Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

3 School of Internet, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: Based on MODIS and AIRS remote sensing data from January 2001 to December 2021, the temporal and spatial modal characteristics and variation trend of cloud top pressure (CTP) over East Asia in recent 21 years were studied using empirical orthogonal function (EOF), MK trend analysis and least square method. The results show that the CTP in east Asia shows a gradually decreasing trend from

基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0103), 国家重点研发计划项目(2017YFD0700501), 国家自然科学基金(61772033)

作者简介: 孙乐(1997-), 硕士研究生, 主要从事大数据分析。E-mail: sunle0605@163.com

导师简介: 黄友锐(1971-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制、智能制造的研究。E-mail: hyr628@163.com

收稿日期: 2022-03-22; **修改日期:** 2022-05-08

*通信作者。E-mail: chltang@mail.ustc.edu.cn

northeast to southwest, and large differences in seasonal changes with a tick font shape, manifested as the highest pressure value in winter and the lowest in summer. Affected by geographical position and latitudes, the high value areas of CTP are distributed in northeast region throughout the four seasons in one year, while the low value area is always located in the Qinghai-Tibet plateau area. Guangxi and Guangdong in China, Myanmar, India and other places belong to the tropical monsoon region, they are affected by cold and dry air in winter and easy to form CTP high value area. The East Asian region is mainly dominated by medium cloud distribution. Specifically, the low cloud areas are mainly concentrated in Northeast China, Beijing-Tianjin-Hebei, the Korean Peninsula, and mid latitude marine areas. The medium cloud areas are mainly distributed in the Central Plains region, southern regions (Guangxi, Guangdong, and various provinces in the middle and lower reaches of the Yangtze River), as well as some regions of Xinjiang in China. And high clouds mainly appear in the Qinghai-Tibet Plateau and Taklamakan Desert of China. The trend analysis shows that CTP in Xinjiang of China, Indian Peninsula, Myanmar, Mongolia and Lake Baikal significantly increases from 2001 to 2021, while that in Qinghai-Tibet Plateau, southern coastal areas and eastern sea of China shows a significant downward trend. Generally, CTP is significantly correlated with surface temperature, humidity, water vapor and cloud cover in some regions of East Asia. Therefore, the change of CTP can reflect regional weather changes to a certain extent.

Key words: cloud top pressure; empirical orthogonal function; MK trend analysis; least square method

0 引言

云覆盖地球表面超过三分之二的地区,它对全球大气收支辐射和气候变化起着重要的作用^[1,2],许多研究报告指出云参数的变化是影响气候变化的重要因素^[3]。云顶气压 (CTP) 是研究云变化的重要参数之一,其主要应用在天气预报、空气质量检测等多个领域^[4,5]。在诸多云参数中,CTP 扮演着很重要的角色,在不同气压环境下,会产生不同的云反馈^[6,7],CTP 不但对一些复杂云 (例如:冰雪上空云、薄云等) 有很好的鉴别作用,而且还可以对不同高度的云有着很好的判断依据。

近年来,国内外许多学者利用遥感探测数据对云的特征变化进行了分析。崔林丽等^[8]通过不同卫星资料对云顶参数的反演研究发现,在深厚云区内不同卫星反演的 CTP 都达到 100~200 hPa,与实际观测一致。乔瑞等^[9]基于高分五号卫星搭载的多角度偏振探测仪 (DPC) 在氧气 A 吸收带设置的 763 nm 和 765 nm 两个波段进行了云顶压强反演方法的研究,分析了气溶胶和大气廓线等因素对 CTP 变化的影响,并且将 DPC 反演压强与数字高程模型 (DEM) 估算压强进行对比验证。杨太平等^[10]通过对比分析大气痕量气体差分吸收光谱仪 (EMI) 与对流层监测仪器 (TROPOMI) 的云量反演结果,发现海上云量偏低而陆地云量偏高。伟乐斯等^[11]通过高分五号卫星搭载的大气多角度偏振探测仪对全球云分布和云辐射反馈进行研究,并利用多波反射率和表观压强等信息开发了一种云检测算法,同时与中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 反演数据进行了对比验证。刘健^[12]利用三种遥感数据对青藏高原地区的云量数据进行研究分析,结果发现在高原的东部和北部地区云量偏多,并且白昼云量大于夜晚的云量。符传博等^[13]利用地面气象台观测站对 1960 年至 2012 年中国地区的总云量、平均气温和相对湿度进行时空特征分析,结果发现,平均气温和相对湿度在时空演变上

均与总云量变化保持较高的同步性。李琦等^[14]利用中国业务布网探空站观测的资料,通过相对湿度阈值法对云垂直结构进行分析,研究发现地形和气候带的差异与不同类型的云分布相关性较高。Menzel等^[15]对MODIS反演的CTP与机载、激光雷达测量值进行了比较分析。Lindstrot等^[16]利用MODIS研究了云的亚尺度空间异质性对反演云顶压力的影响。

东亚地区位于亚洲大陆东部,属于亚洲季风区,在此区域中有大量污染气体的排放,这就造成了该地区云参数变化具有诸多鲜明特征,其中CTP的变化是影响云辐射变化的重要因子,从宏观来看,CTP和云量的变化会影响云的辐射强迫^[17]。以往学者在对云参数的研究中很少对东亚地区CTP时空特征进行分析研究,因此,本研究利用MODIS和大气红外探测仪(AIRS)遥感反演的L3级数据产品,通过经验正交函数、MK(Mann-Kendall)趋势分析、最小二乘法等气象研究方法,全面分析研究了东亚地区CTP的时空模态长期变化特征。

1 数据与方法

1.1 数据来源

采用MODIS和AIRS两种探测仪反演的产品资料对东亚地区2001年1月至2021年12月的CTP进行时空模态分析。

MODIS光谱探测仪共有36个光谱波段、490个探测器,光谱波段为1.405 μm 至热红外14.385 μm ,扫描宽度为2330 km。MODIS通过光谱探测反演的CTP和有效云量与地基探测获取的数据具有较高的拟合性^[18-22]。本研究主要采用MOD03_08_v6.0版的三级数据,其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,使用的是月产品数据,数据来源地址为<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>。

AIRS是搭载在Aqua卫星上的大气红外探测仪,共有2378个热红外通道,具有较高的光谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda = 1200$),主要是对大气温度、气压、水汽、甲烷和臭氧等大气参数进行遥感观测。本研究选取的数据集是AIRS3STM,其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为1个月,数据源获取地址为<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&source=AQUA%20AIRS,AQUA%20AMSU-A,AQUA%20HSB>。

MODIS和AIRS两种数据反演产品的异同主要表现在:MODIS产品数据通过 CO_2 薄片技术反演出中高层云的有效云量和CTP,但是对于接近地面的云层($\text{CTP} > 700\text{hPa}$),由于云信息较少,可能造成反演气压数据不精确;AIRS数据产品是利用物理方法通过高级微波探测器反演得到的数据,但AIRS空间分辨率较低,因此反演时需要借助一些微波资料,由于反演仪器有效信息量不足、灵敏度较差,造成反演精度和分辨率可能产生误差^[23-25]。

1.2 MODIS与AIRS数据产品对比讨论分析

本节着重对东亚地区2003—2021年两种不同探测仪获取的数据进行比较分析。图1是MODIS数据与AIRS数据逐月比较及其月均相关性分析。由图1(a)可以看出,AIRS反演的数据值低于MODIS反演的数据值,但是他们的变化趋势一致。由图1(b)可知,2003—2021年MODIS数据与AIRS数据的Pearson相关系数为0.95。综上分析可知,在CTP趋势分析上,MODIS反演数据与AIRS反演数据分析结果具有同等的可靠性。由于MODIS反演云顶参数时不需要借助微波资料,反演精度相对而言较为精确,因此在后期分析CTP时空特征时主要以MODIS反演数据为主。

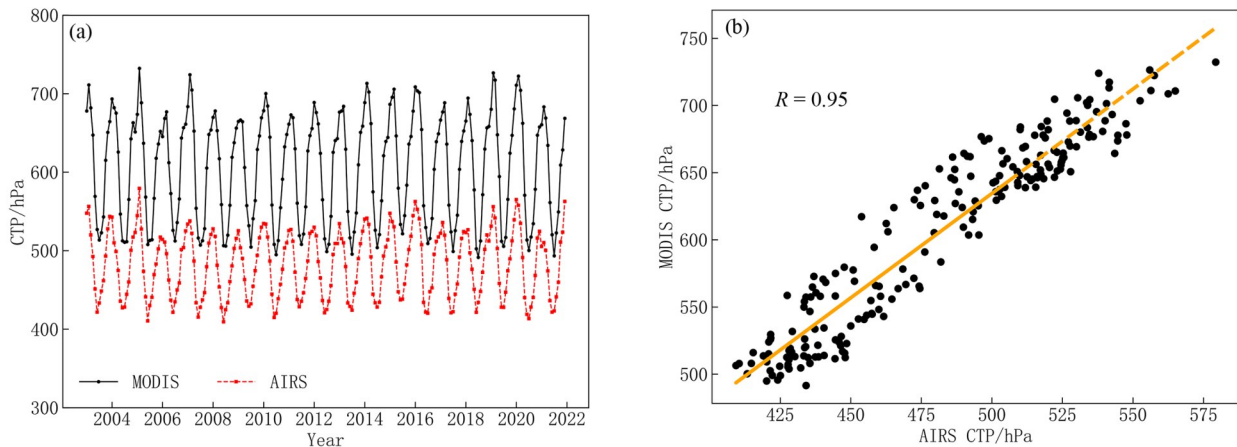


图1 MODIS和AIRS反演数据时间序列比较及相关性分析。(a)时间序列图;(b)相关性分析图

Fig. 1 Comparison and correlation analysis between MODIS and AIRS satellite data. (a) Time series diagram; (b) correlation analysis chart

1.3 研究方法

卫星资料能做到在全球大面积的覆盖、不间断扫描并且受其他因素干扰较少,所以在对云参数研究时,许多学者使用卫星遥感手段进行分析^[25-29]。东亚地区主要包括中国、朝鲜、日本和蒙古等国家,本研究选取东亚地区的范围为 $0^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 。在做四季变化研究时,由于东亚地区位于北半球,研究采用北半球的四季划分,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月—次年2月为冬季;在探究东亚地区的CTP空间分布时,按照10度间隔把纬度从赤道到北半球的 60°N 划分为6个纬度带,每个纬度带的CTP都由该纬度带内的CTP样本信息进行算术平均。

MK趋势检验法是用于时间序列分析的非参数检验法^[30],存在着两种应用方法,分别为趋势分析和突变点分析。该方法不要求变量遵从正态分布,不需要添加参数,算法易实现,比较适合对水文和气象序列参数进行检验。在趋势分析应用中, Z 值代表标准化测试统计, P 值代表趋势变化的显著性水平,当绝对值超过1.645、1.96、2.576时分别表示通过了置信度90%、95%、99%的显著性检验^[31]。在突变检验法分析中,主要依靠UFK和UBK值,当UFK > 0 时,说明持续增长趋势,值在0.05显著性水平线上,说明通过0.05显著性检验;当UFK和UBK曲线的交点在置信水平区间 $[-1.96, 1.96]$ 内,并且确定交点具体年份,说明该年份参数呈现突变性增长状态,如果交点不在检验范围内,说明交点没有通过0.05的检验,所以该年份参数突变性上升不具有突变性。

经验正交函数分析方法(EOF),在气候、气象和地学中得到广泛的应用,该分析方法可以把随时间变化的变量场分解为不随时间变化的空间函数部分和只依赖时间变化的时间部分。空间函数主要代表场的地域分布特征,而时间函数部分主要是由场的空间点的变量线性组合构成。因此在利用EOF分析CTP在东亚区域的时空变化特征时,需要将空间函数部分与时间系数相结合进行趋势变化分析。EOF反应的是年CTP的均值状态,时间系数(PC)代表对应空间分布模态的时间变化特征。将空间EOF模态与时间系数相结合分析CTP趋势变化,决定趋势变化上升或下降主要来自空间模态正负值区域与时间系数正负值之间的同或运算。在空间模态正值区域,当时间系数为负值时,该区域CTP变化呈下降趋势;反之,当时间系数为正值

时,呈上升趋势。在空间模态负值区域,当时间数为负值时,该区域CTP变化呈上升趋势;反之,当时间系数为正值时,呈下降趋势。上述变化趋势中,时间系数绝对值越大,表明这一年此模态越典型。

本研究首先对整个东亚地区CTP进行逐年趋势检验和突变分析;然后利用最小二乘法 and MK趋势检验法对东亚地区进行空间趋势分析;最后再利用EOF分析方法对东亚地区进行时空模态特征分析。

2 MODIS反演的东亚地区云顶参数时空分布特征

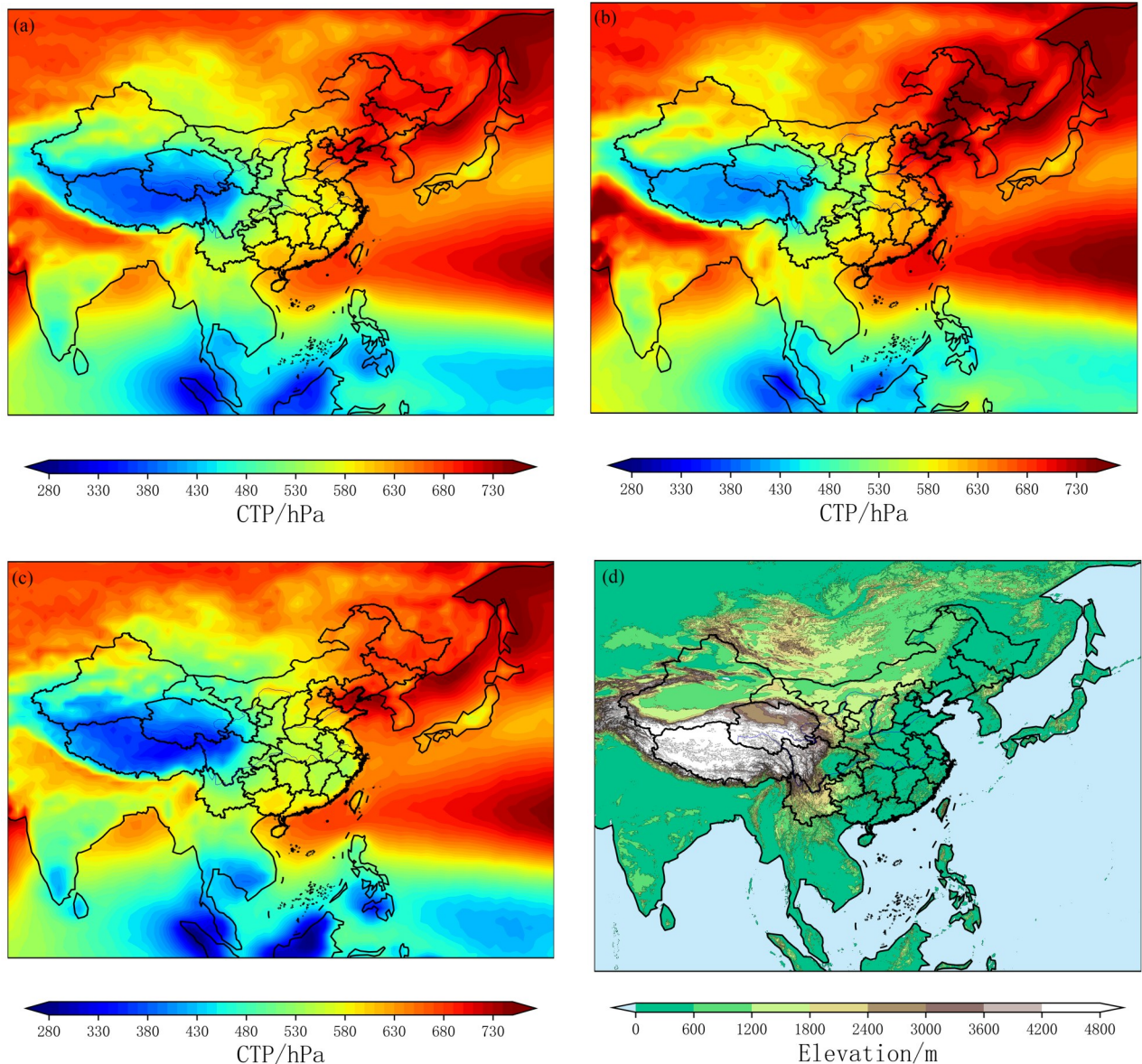
2.1 空间分布

2.1.1 云顶参数多年平均空间分布

东亚地区2001—2021年CTP昼夜多年均值空间分布如图2(a)所示,由21年的数据统计分析图可知东亚地区CTP的年均值在280~800 hPa之间,整体呈现由东北到西南逐渐递减的趋势,这与Zhao等^[32]在对云顶参数分析时发现CTP在中国东北地区偏高而西南地区较低相吻合。本研究根据CTP值大小把不同高度的云划分为三类,即低云(700 hPa以上,约2 km以下)、中云(500~700 hPa,约2 km~6 km)、高云(500 hPa以下,约6 km以上)。结合图2(a)可以发现,东亚地区主要以中云分布为主。其中具体分布范围为,低云区主要集中在东北、京津冀、朝鲜半岛和中纬度海洋地区,在中国中原、南方(广西、广东和长江中下游各省地区)以及新疆部分等地区是中云主要活动范围,高云主要聚集范围在中国青藏高原和塔克拉玛干沙漠。从物理学角度上来说,随着湿度增大,空气中水分增加,而水的分子量比空气的混合分子量小,水气的增加,等于稀释了空气,从而使CTP降低,同时温度升高,空气受热膨胀促进对流云发展,促使云顶高度增加,气压值降低。图2(b)、图2(c)分别显示了东亚白昼和夜晚的CTP 21年均值的空间分布,总体与昼夜空间分布图变化趋势相似。但可能湿度对CTP影响较大,由于夜晚太阳直射到其他地区,东亚地区接受到的热量少,使空气中的水汽更容易凝固,造成夜晚大气湿度相对较大,最终导致夜晚CTP值较低。结合图2(d)东亚地区海拔高度图分析发现,CTP受地形影响较为明显,即在中国西部地区、内蒙、四川、云南、青藏高原等海拔高度较高区域,受海拔高度影响,与同纬度其他地区相比,CTP较低,这与徐演等^[33]分析的近20年我国夏季强对流CTP空间分布特征相吻合。中国东北与东南地区海拔高度水平线相同,但是东北地区CTP明显高于东南地区,可能原因是受纬度影响。由于太阳辐射对各纬度加热不均匀,越靠近赤道受太阳辐射越大,温度越高,进而形成低气压带,并且在中国东南地区靠近海洋,湖泊也较多,造成空气水汽含量较大,湿度也较大,也会导致CTP变低。

2.1.2 CTP四季平均空间分布

图3和图4分别是东亚地区四季变化图和空间分布图。结合两个图分析可知,东亚地区CTP的季节空间变化差异显著,在一年四季中CTP呈现“√”字型变化,即CTP从春季开始逐渐减小,夏季达到最低后又逐渐升高,到秋季CTP值回升到春季水平后继续逐渐增加,冬季达到最高值。原因可能是由于夏季的温度较高,造成对流云经常发生,从而造成夏季的气压较低。由于青藏高原地势较高,平均海拔高度在4~5 km,因此青藏高原地区在四季变换过程中CTP始终处于低值区。统计分析可知,受地理位置和纬度带的影响,CTP的高值区在一年四季均分布在东北地区上空,低值区始终位于青藏高原地区。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1664 号] 绘制, 底图无修改

图2 2001—2021 东亚地区 CTP 昼夜 (a)、白昼 (b)、夜晚 (c) 空间分布图以及海拔高度空间分布图 (d)

Fig. 2 CTP spatial distribution map of day and night (a), day (b), night (c) and altitude spatial distribution map (d) in East Asia from 2001 to 2021

2.2 CTP的时间序列变化趋势分析

2.2.1 CTP的年变化MK趋势和突变检验分析

为了研究东亚地区的CTP长期变化趋势, 本研究选取2001年1月至2021年12月期间的MODIS反演CTP产品, 分别对昼夜、白昼和夜晚监测的数据进行MK趋势和突变检验分析。图5是东亚地区CTP年变化曲线和MK突变检验分析图。表1给出了东亚地区不同时间段的线性拟合和MK趋势检验结果。

结合图5和表1分析可知, 东亚地区在白昼平均气压明显高于昼夜和夜晚, 并且夜晚的气压均值最低。从图5 (a) 可以看出东亚地区的昼夜、白昼和夜晚CTP年际变化呈平稳趋势, 对其进行线性拟合和MK趋势

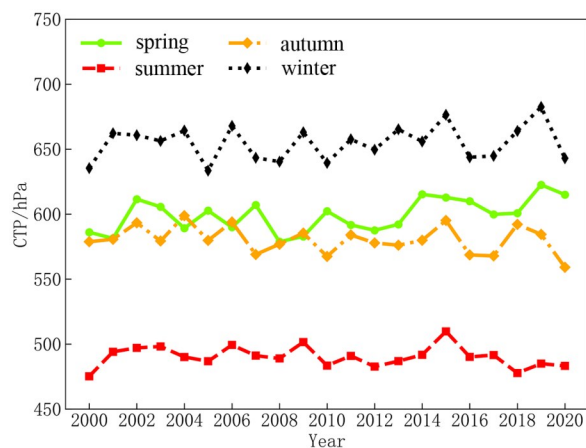
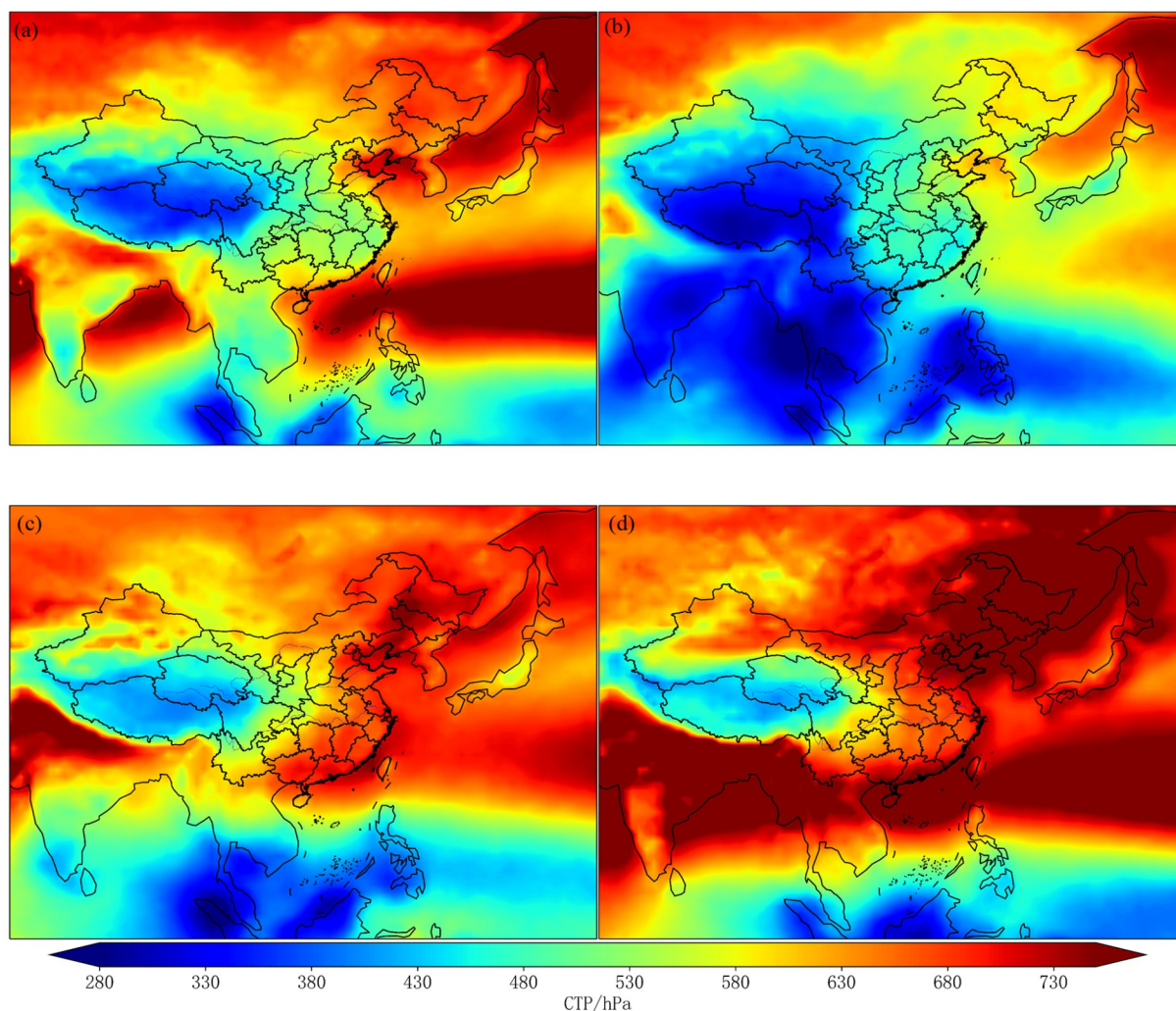


图 3 2000—2020 年东亚地区 CTP 的四季变化图

Fig. 3 Seasonal variation of CTP over East Asia from 2000 to 2020



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1664 号] 绘制, 底图无修改

图 4 2000—2020 年东亚地区 CTP 季节变化的空间分布图。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 4 Spatial distribution of CTP seasonal variations over East Asia from 2000 to 2020.

(a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

分析,发现三者均未通过0.05的显著性检验,并且三者的变化速率分别为 -0.008 、 0.172 、 -0.021 hPa/a,说明在未来几年白昼的CTP有上升趋势,但是昼夜和夜晚有下降趋势。为进一步研究三者逐年变化情况,分别对东亚地区的昼夜、白昼和夜晚近21年的CTP进行逐年MK突变检验分析,得到图5(b)–(d)。经分析研究可知昼夜、白昼和夜晚UFK在2004–2018年均处于负值,说明在2004–2018年总体呈下降趋势。夜晚UFK值在2010–2013年超过临界值 $U_{0.05} = -1.96$,说明CTP在2010–2013年减小趋势显著。在2013年以后,置信区间为95%的显著性检验范围内发生多次交点,也印证了东亚地区在2013年以后CTP突变次数较多、变化幅度较大[图5(a)]。通过MK趋势分析发现,在2004年后东亚地区CTP整体呈下降趋势,但在2008年出现谷值,在2015年出现峰值,侧面说明在2003–2021年期间变化幅度较大。

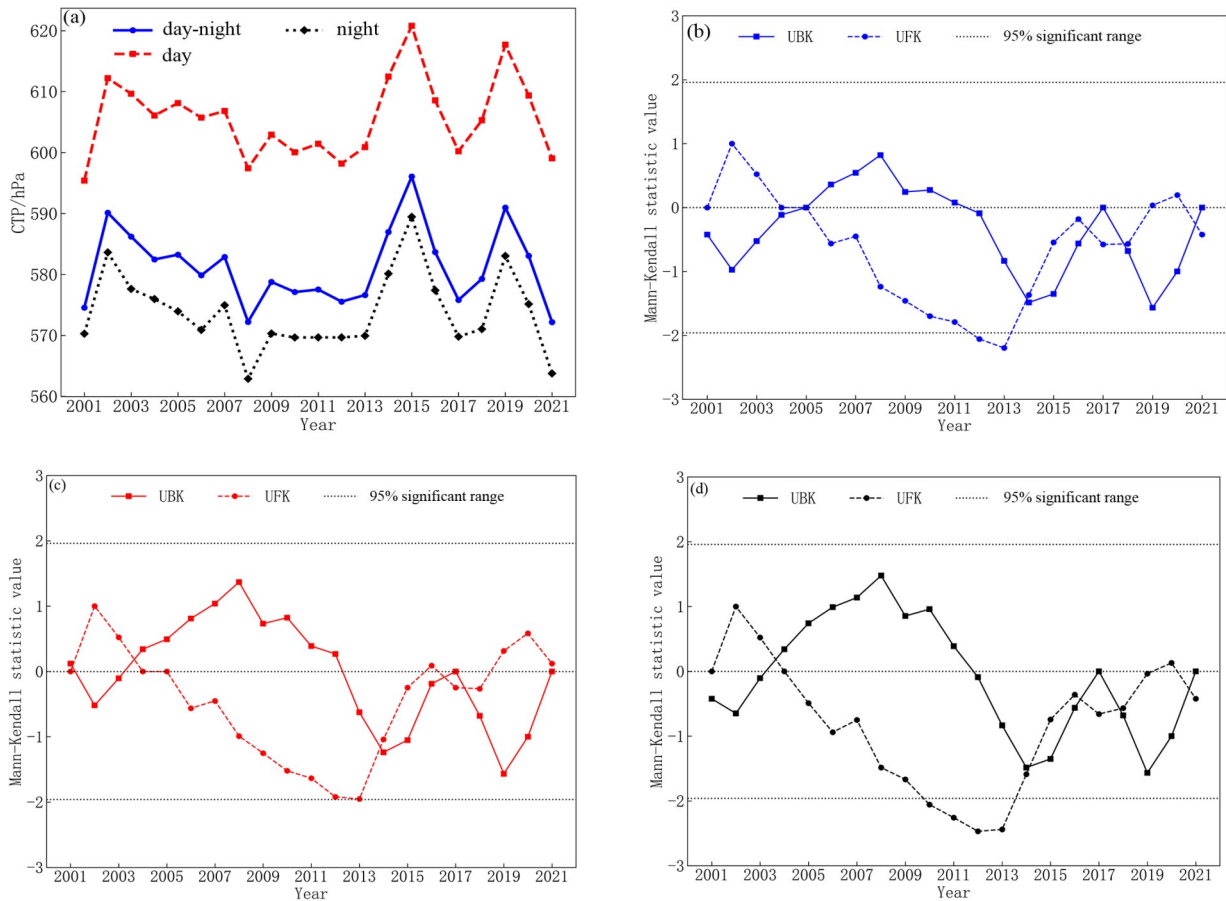


图5 2001—2021年东亚地区CTP MK突变检验结果。(a)年变化曲线;(b)昼夜MK;(c)白昼MK;(d)夜晚MK

Fig. 5 Results of CTP MK mutation testing in East Asia from 2001 to 2021. (a) Annual variation curve; (b) day and night MK; (c) day MK; (d) night MK

表1 2001—2021年东亚地区不同时间段的线性拟合和MK趋势检验

Table 1 Linear fitting and MK trend test for different time periods in East Asia from 2001 to 2021

Time quantum	Rate of change/(hPa·a ⁻¹)	<i>P</i>	<i>Z</i>	Standard deviation
Day-night	-0.008	0.973	-0.393	6.18
Day	0.172	0.490	0.091	6.51
Night	-0.021	0.931	-0.393	6.34

2.2.2 CTP 的多维多角度时间变化分析

图6为2001年1月至2021年12月东亚及其子区域的CTP时间变化特征图。图6(a)、(b)、(c)分别是东亚地区、中国东北地区和青藏高原地区逐月时间序列趋势图。从图中可以看出,三个地区的CTP均呈周期性变化,其中在中国东北地区的CTP始终高于青藏高原地区,并且东北地区气压值始终在500 hPa以上,而青藏高原地区的CTP值在300~550 hPa之间上下波动。从图6(d)东亚及其子区域月均变化图可以看出,东亚地区CTP在2—7月份逐渐下降,在7月份下降到最低值为480.65 hPa,从7月份到次年2月份一直呈上升趋势,其他子区域呈现与整个东亚地区大致相同的变化趋势。

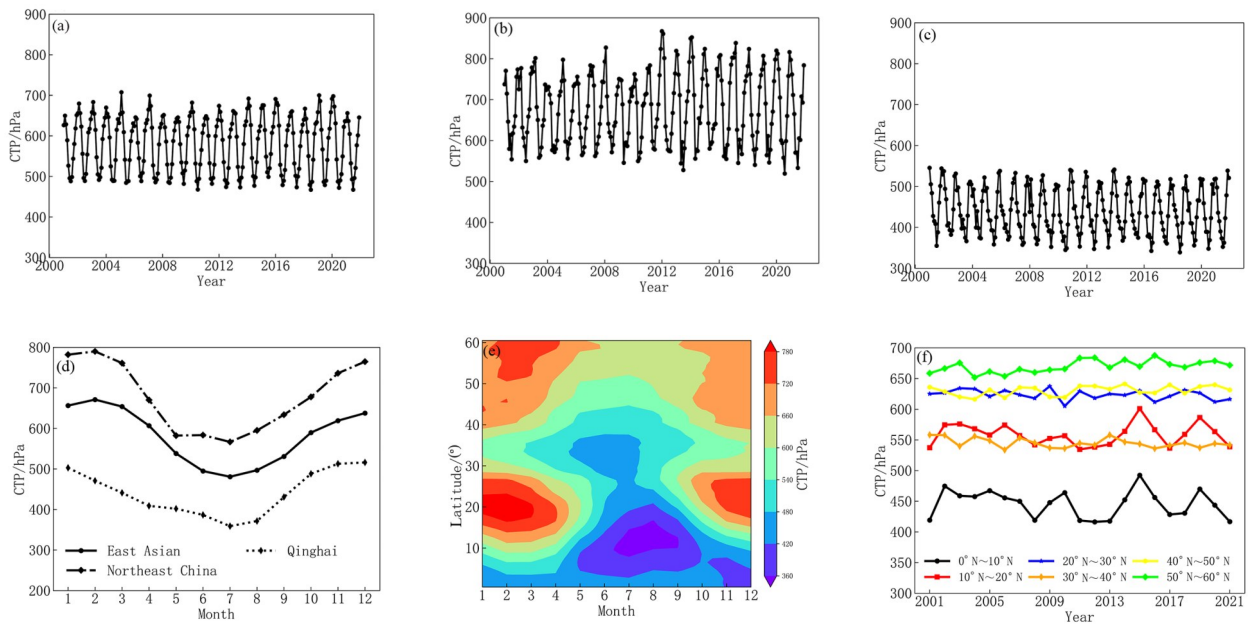


图6 2001—2021年东亚地区CTP变化图。(a) 东亚地区逐月趋势图; (b) 中国东北地区逐月趋势图; (c) 东青藏高原地区逐月趋势图; (d) 东亚及其子区域月均图; (e) 东亚地区纬向月均图; (f) 东亚地区不同纬度段年际变化图

Fig. 6 Variation of CTP in East Asia from 2001 to 2021. (a) Month-on-month trend of East Asia; (b) month-on-month trend of Northeast China; (c) monthly trend of the Eastern Tibetan Plateau region; (d) monthly mean map of East Asia and its sub-regions; (e) monthly zonal mean map of East Asia; (f) interannual variation map of different latitudes in East Asia

图6(e)为2001—2021年期间东亚地区CTP纬向均值随着月份的变化分布图。由图可知,在东亚地区共出现三个CTP高值区(700 hPa以上为高值区),其中两个高值区主要位于中国广西、广东、云南和缅甸、印度等部分地区。这些地区属于热带季风气候,冬季受来自大陆的干冷气流影响,干燥少雨,气候具有大陆性,对对流云活动将会受到强烈抑制,限制云高的上升,进而形成CTP高值区。由于在东亚地区20°N以南气候,主要以海洋和季风区大陆为主,在夏季高温潮湿多雨,空气中水分含量较多,会造成季风区CTP显著性降低,因此在5—10月份,CTP在20°N以南会很容易形成低值区(420 hPa以下为低值区)。在6—9月份各个纬度段的气压值大部分都低于其他几个月份,与前文得到的CTP在夏季较低的结论基本一致。

图6(f)为2001—2021年东亚地区不同纬度段的CTP年际变化图。为便于观察每个纬度段的年际变化趋势,将东亚区域每10个纬度段在经度70°E~150°E范围内做均值分析,共得到6个纬度段的年际变化。从图中可以看出,0°N~10°N纬度带靠近赤道附近并且多为海洋区域,海拔较低,辐射热量较大,对流云

发展旺盛,造成此纬度段CTP较低;50°N~60°N纬度带主要位于地区为中国的东北部、内蒙古、大兴安岭和蒙古国等地,这些区域由于山林环绕、沙漠面积较多、气温较低并且远离海洋,空气水分较少,云的发展很缓慢,因此在该纬度带的CTP较高。

2.2.3 四季对全年CTP纬向均值影响

图7是东亚地区21年CTP在各个纬度的全年和四季变化曲线图。从图中可以看出,春夏秋冬四季CTP均值随纬度分布有诸多差异性,但冬季CTP始终处于较高值,夏季始终处于较低值,与前文的结论一致。春季CTP随纬度增加先增加后减小再增加,大约在18°N左右出现高值,在35°N出现低值;夏季CTP随纬度增加先减小至最低值,再增加到第一次高值,然后略微减小到第二次低值,最后呈微波动式增加;秋季CTP随纬度变化与夏季相似,但是相比较而言,秋季的CTP随纬度增加而变化的梯度大于夏季随纬度增加而变化的梯度,在10°N~25°N左右的梯度增加值近300 hPa;冬季的CTP值随纬度增加先急速增加到最大值,然后再大幅度减小,之后再缓慢增加,在纬度增加至40°N以后,CTP值变化范围很小,一直在大约710 hPa左右波动(波动值不超过10 hPa);全年的CTP随纬度增加先增加,后减小,最后再增加。

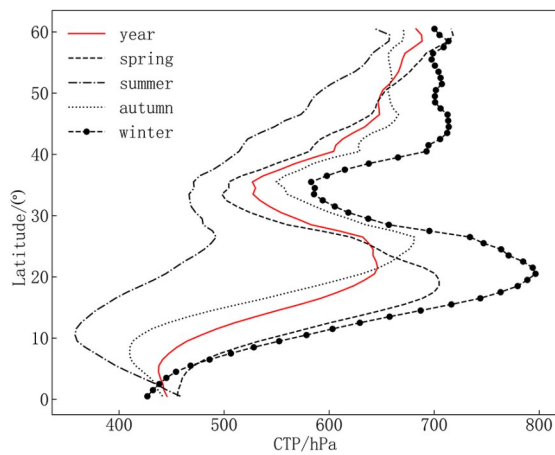


图7 2001—2021年东亚地区CTP纬向均值分布图

Fig. 7 Zonal mean distribution of CTP over East Asia from 2001 to 2021

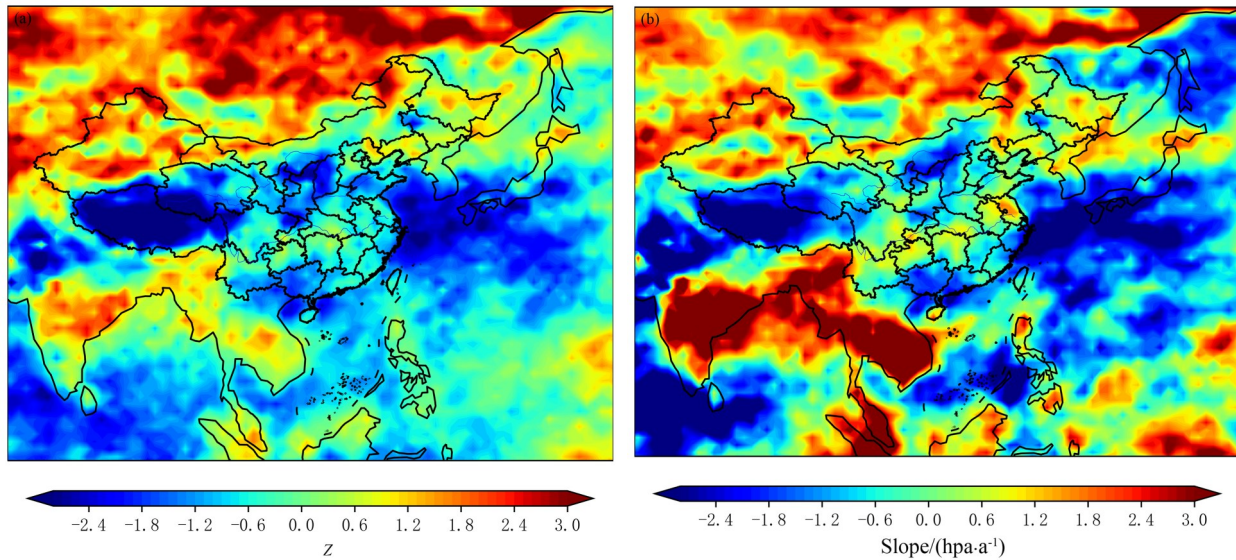
综上所述可知,在东亚地区,无论从哪个纬度段上看,冬季对全年CTP均值影响最大,对全年CTP平均值而言是正贡献;夏季影响最小,对CTP全年平均值而言是负贡献;春秋季对全年CTP均值的影响随着纬度变化而有所不同。在20°N以南,春季影响明显大于秋季;但是在20°N以北,秋季对全年CTP均值的影响高于春季。

3 MODIS反演的东亚地区CTP空间变化趋势分析

3.1 CTP的空间长期变化趋势分析

为更好地了解东亚地区CTP的空间长期变化趋势,利用MK趋势检验和最小二乘法对2001—2021年东亚地区每个经纬度栅栏格点进行年变化速率分析。图8(a)是CTP MK趋势检验空间分布图。从图中可以看出,在中国的新疆、印度半岛、缅甸、蒙古和贝加尔湖等区域呈现较高的增长趋势,在中国的青藏高原、南部沿海等部分区域以及东部海域均呈较明显的下降趋势。图8(b)是通过最小二乘法计算出的东亚地区年

变化速率空间变化图。从图中可以看出, CTP 的空间变化趋势与图 8 (a) 通过 MK 检验的变化速率相似, CTP 在青藏高原地区随时间逐渐增加而下降, 其中变化速率大约在 -2.4 hPa/a 左右, 而与之对应的是, 在贝加尔湖、印度半岛地区、缅甸、泰国、柬埔寨和马来西亚变化速率约在 3 hPa/a 左右。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1664 号] 绘制, 底图无修改

图 8 2001—2021 年东亚地区 CTP 变化趋势空间分布图。(a) MK 趋势检验变化图; (b) 年变化速率

Fig. 8 Spatial distribution of CTP trends over East Asia from 2001 to 2021. (a) MK trend test variation chart; (b) annual rate of change

3.2 东亚地区 CTP 空间分布的 EOF 模态分析

利用 2001—2021 年东亚地区 CTP 逐月数据进行 EOF 模态分析。EOF 分析获取的 CTP 前六个模态的方差贡献率和累加贡献率如表 2 所示, 其中方差贡献率越大, 越能展现 21 年 CTP 的空间分布特征。由表可以

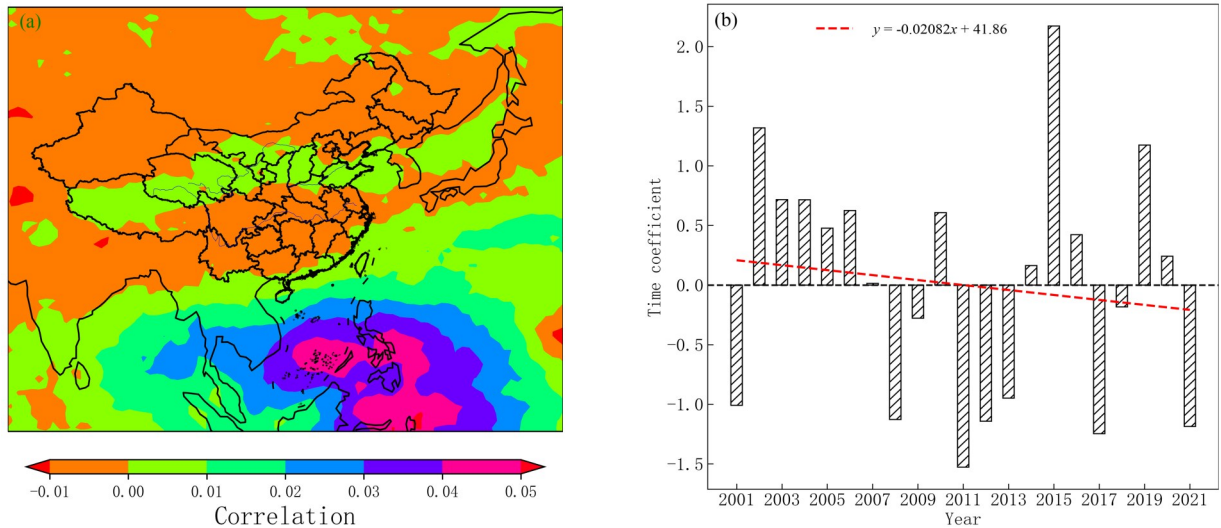
表 2 东亚地区 CTP EOF 分析前 6 个模态方差贡献率

Table 2 Variance contribution rate of the first six modes in EOF analysis of CTP over East Asia

Mode	Variance contribution rate/%	Cumulative variance contribution rate/%
EOF1	44.33	44.33
EOF2	13.75	58.08
EOF3	7.37	65.45
EOF4	5.20	70.65
EOF5	3.75	74.40
EOF6	3.36	77.76

看出, 前六个模态 EOF1、EOF2、EOF3、EOF4、EOF5 以及 EOF6 对应的方差贡献率分别为 44.33%、13.75%、7.37%、5.2%、3.75% 和 3.36%, 累计方差贡献率为 77.76%, 其中 EOF1 占比最大, 因此主要分析研究第一模态空间分布。图 9 为 EOF1 的空间分布图和时间系数图。由图 9 (a) 可以看出, 负值区主要出现在中国东北、中国南部、新疆、蒙古、印度半岛和日本等区域, 正值区主要出现在青藏高原、甘肃、陕西部分地区, 其中正值

中心主要集中在南沙群岛、菲律宾半岛等地区,说明这些地区CTP变化更剧烈。结合图9(b)可以看出,2002—2007年期间EOF时间系数为正值,但是在2008年以后时间系数以负值居多,这表明在2008年以后CTP在中国东北、中国南部、新疆、印度半岛以及日本等地区呈上升趋势,在青藏高原、甘肃、陕西部分地区和菲律宾半岛等区域呈下降趋势。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图

[审图号: GS (2016) 1664号] 绘制, 底图无修改

图9 2001—2021年东亚地区CTP EOF1空间分布图(a)和时间系数图(b)

Fig. 9 EOF1 spatial distribution map (a) and time coefficient map (b) of CTP in East Asia from 2001 to 2021

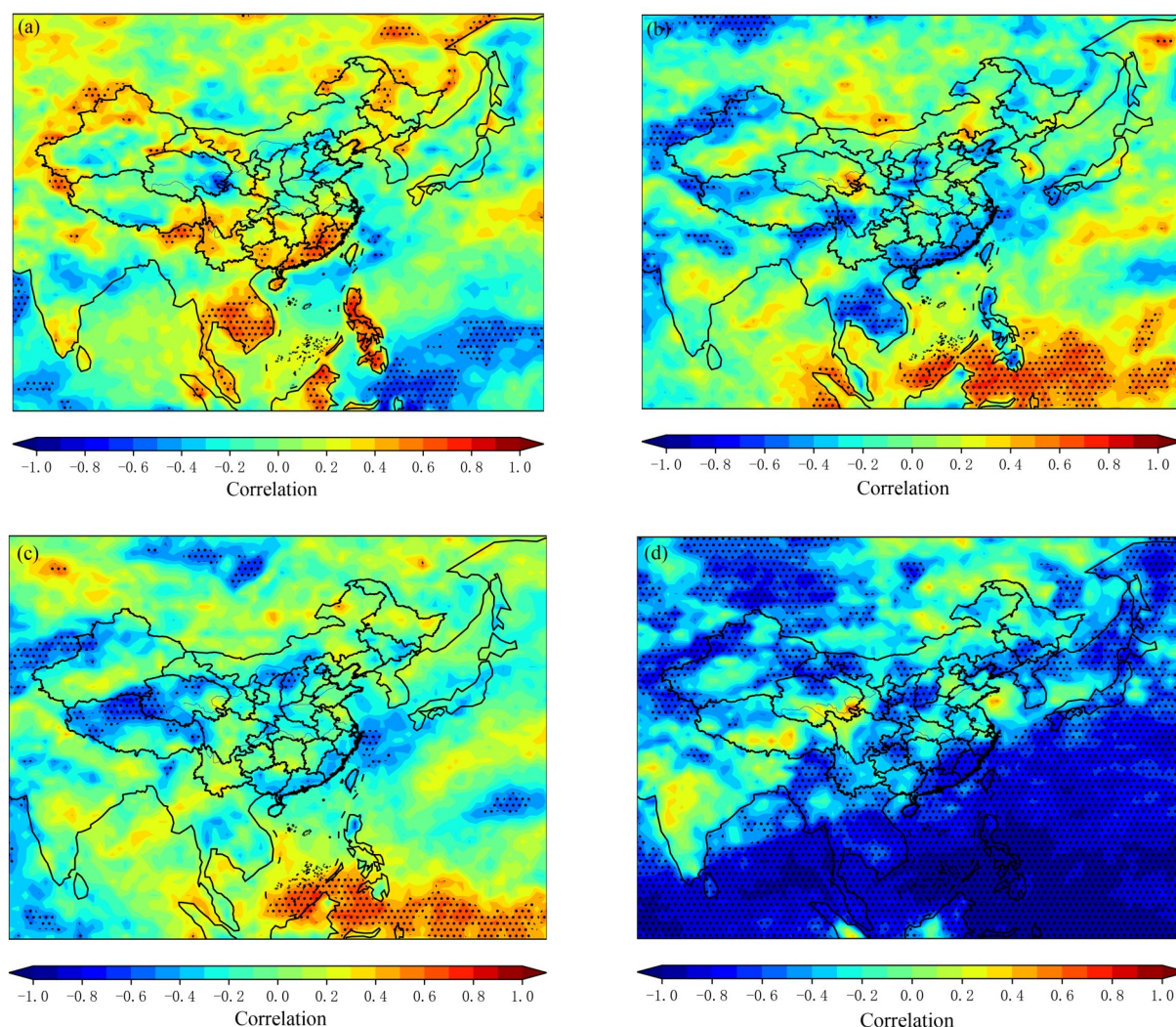
4 东亚地区CTP影响因素讨论分析

为分析东亚地区CTP影响因素情况,利用2003—2021年AIRS的地表温度、湿度、水汽月均数据与MODIS反演的CTP月均数据,分别分析白昼地表温度、湿度、水汽与CTP之间的相关性,图10(a)–(c)分别为CTP与三种气象参数相关系数的空间分布特征图。由图可以更加直观看出CTP与相关大气参数之间的经纬度分布关系。从图中可以看出,CTP与地表温度在中国南部沿海(广西、广东、福建)、泰国、柬埔寨和菲律宾半岛等地区呈现较为显著的正相关,在加罗林群岛等区域呈现显著的负相关,而其他地方相关性较弱;CTP与湿度水汽的相关性空间分布图也呈现出较大的相似性,在新疆部分地区、南部沿海、泰国、缅甸及菲律宾半岛都呈显著性负相关,但是在加罗林群岛、南沙群岛呈显著性正相关,由此可以推测出,不同地区的气温和湿度对促进对流云的发展产生的作用不同。

已有的研究表明,云量对CTP的影响很大,其影响方式主要是通过高低云类型转变,因此进一步利用MODIS月均数据对东亚地区的云量和CTP做相关性分析,分析结果如图10(d)所示。从图中可以看出,在东亚大部分区域,云量和CTP呈显著的负相关。综上分析可知,在中国的东南沿海、东部海域和京津冀地区CTP呈下降趋势,因为高云发生率的增加会导致CTP呈下降趋势,因此可以推测在这些地区高云发生率偏高。

国内外也有关于云顶参数时空分布及影响因素的相关研究。徐寅等^[33]利用ISCCP云气候资料,分析了中国1988—2007年期间夏季(6—8月)强对流CTP时空分布并讨论了变化因素,研究发现中国夏季CTP较

低区域大致分布在青藏高原、东南沿海、四川中西部、新疆天山地区、内蒙古中部和甘肃等区域, 这与本研究在分析 CTP 四季空间分布时所得结论一致。Huang 等^[34]对气溶胶和 CTP、云量等相关因素进行了分析, 研究发现 CTP 与气溶胶和云量均呈相反趋势, 这与本研究的 CTP 与云量呈显著负相关的结论有较高的一致性。Chedzey 等^[35]利用 CTP 等参数对不同类型云进行了分析, 发现云量变化与 CTP 变化有较高的契合性。以往学者对 CTP 的研究大多都是对某季节进行分析或通过研究某些大气参数的影响因素时引入 CTP, 而本研究是从多维多角度对卫星长期观测的 CTP 数据进行时空模态特征研究及相关影响因素分析, 并且引用各种算法 (MK、线性回归、EOF 模态分析等) 对 CTP 变化趋势进行了研究, 相比较而言本研究较系统全面。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1664 号] 绘制, 底图无修改; 黑点代表该区通过了 95% 的显著性检验

图 10 2003—2021 年东亚地区 CTP 与地表温度 (a)、湿度 (b)、大气水汽 (c) 以及云量 (d) 气象因素相关系数空间分布

Fig. 10 Spatial distribution map of the correlation coefficients between CTP and meteorological factors in East Asia from 2003 to 2021. (a) Surface temperature; (b) humidity; (c) atmospheric water vapor; (d) cloud cover

5 结 论

通过对 MODIS 和 AIRS 反演的长期数据产品的综合分析, 主要研究了东亚地区 CTP 的时空模态变化特

征及影响因素,主要结论如下:

1) 利用MODIS和AIRS在东亚地区的CTP数据进行趋势变化和相关性分析,AIRS反演的数据值低于MODIS反演数据值,但是他们的趋势变化一致,Pearson相关系数达到0.95,因此在CTP趋势分析上,两探测仪反演的数据分析结果具有同等的可靠性。

2) 东亚地区的CTP年均值在280~800 hPa,呈现由东北到西南逐渐递减的趋势,在中国东北地区CTP最大,明显高于西南地区。东亚地区主要以中云分布为主,其中低云区主要集中在中国东北、京津冀、朝鲜半岛和中纬度海洋地区,在中国中原、南方(广西、广东和长江中下游各省地区)以及新疆部分等地区以中云为主,高云主要出现在中国青藏高原和塔克拉玛干沙漠。受海拔高度的影响,在中国西部地区、内蒙、四川和云南等区域与同纬度下的其他地区相比CTP较低。由于夜晚大气层的湿度相对较大,造成空气中水汽较多,稀释了空气,从而使夜晚气压值偏低。由于不同纬度带对太阳辐射不均匀和地理位置影响,促使中国东北地区CTP明显高于东南沿海地区。东亚地区CTP的季节空间变化差异显著,在一年四季中CTP呈现“√”字型变化,CTP随着季节变化从春季到冬季先减小后增大,在冬季最高,夏季最低。受地理位置和纬度带的影响,CTP的高值区在一年四季均分布在东北地区上空,低值区始终位于青藏高原地区。东亚地区的昼夜、白昼和夜晚CTP呈平稳性变化趋势,三者的变化速率分别为-0.008、0.172、-0.021 hPa/a;东亚地区CTP在2—7月份逐渐下降,在7月份降至最低值为480.65 hPa,从7月份到次年2月份一直呈上升趋势;冬季CTP值最高,对全年CTP均值呈正贡献,夏季CTP最低,对CTP均值呈负贡献。在中国的广西、广东、云南和缅甸、印度等地属于热带季风区,冬季受来自大陆的干冷气流影响,干燥少雨,气候具有大陆性,对流云活动将会受到强烈抑制,限制云高的上升,容易形成CTP高值区。

3) 通过MK趋势分析和最小二乘法分析CTP在东亚地区年变化趋势的空间分布特征,在中国的新疆、印度半岛、缅甸、蒙古和贝加尔湖等区域呈现较高的增长趋势,在中国的青藏高原、南部沿海等部分区域以及东部海域均呈较明显的下降趋势。青藏高原地区变化速率在-2.4 hPa/a左右,贝加尔湖、印度半岛地区、缅甸、泰国、柬埔寨和马来西亚变化速率约在3 hPa/a左右。

4) 利用EOF模态分析方法对东亚地区CTP进行空间分析,前六个模态累计方差贡献率为77.76%,其中EOF1所占比重最大,可以更好地反应近些年CTP空间变化趋势,近14年CTP在中国东北、中国南部、新疆、印度半岛以及日本等地区呈上升趋势,在青藏高原、甘肃、陕西部分地区和菲律宾半岛等区域呈下降趋势。

5) 在东亚地区部分区域CTP与地表温度、湿度、水汽和云量均呈现较为显著的相关性,因此CTP的变化可以在一定程度上反应区域性天气变化情况。

参考文献:

- [1] Liou K N, Davies R. Radiation and cloud processes in the atmosphere [J]. *Physics Today*, 1993, 46(9): 66-67.
- [2] Yang T P. *Research and Application of Atmospheric Optical Characteristic Parameter Inversion Algorithm Based on Multi-Platform DOAS Technology* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
杨太平. 基于多平台DOAS技术大气光学特性参数反演算法研究及应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [3] Zhang H, Peng J, Jing X W, et al. Vertical overlapping characteristics of clouds in East Asia and their effects on cloud radiative

- forcing [J]. *China Science: Earth Science*, 2013, (4): 523-535.
张华, 彭杰, 荆现文, 等. 东亚地区云的垂直重叠特性及其对云辐射强迫的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, (4): 523-535.
- [4] Zhou H M, Ge W Q, Bai H, *et al.* Research on automatic fog identification technology by meteorological satellite remote sensing [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(2): 152-160.
周红妹, 葛伟强, 柏桦, 等. 气象卫星大雾遥感自动识别技术研究 [J]. *热带气象学报*, 2011, 27(2): 152-160.
- [5] Li X W, Dong H P, Guo W D, *et al.* Data assimilation experiments in typhoon numerical prediction using different ATOVS radiance [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(2): 157-166.
李兴武, 董海萍, 郭卫东, 等. ATOVS 不同卫星资料在台风模拟中的同化试验研究 [J]. *热带气象学报*, 2012, 28(2): 157-166.
- [6] Wang W C, Rossow W B, Yao M S, *et al.* Climate sensitivity of a one-dimensional radiative-convective model with cloud feedback [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, 38(6): 1167-1178.
- [7] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, *et al.* Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment [J]. *Science*, 1989, 243(4887): 57-63.
- [8] Cui L L, Guo W, Ge W Q, *et al.* Comparisons of cloud top parameter of FY-4A satellite and its typhoon application research [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(1): 196-203.
崔林丽, 郭巍, 葛伟强, 等. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究 [J]. *高原气象*, 2020, 39(1): 196-203.
- [9] Qiao R, Qie L L, Xu H, *et al.* Retrieval of cloud top pressure in oxygen A-band based on data from DPC onboard GF-5 satellite [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 256-268.
乔瑞, 伽丽丽, 许华, 等. 基于高分五号 DPC 氧气 A 吸收波段的云顶压强反演 [J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(3): 256-268.
- [10] Yang T P, Si F Q, Zhou H J, *et al.* Cloud fraction retrieval of EMI and comparison with TROPOMI [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 223-230.
杨太平, 司福祺, 周海金, 等. EMI 云量反演及与 TROPOMI 的对比研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(3): 223-230.
- [11] Wei L S, Shang H Z, Husi L T, *et al.* Cloud detection algorithm based on GF-5 DPC data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(10): 2053-2066.
伟乐斯, 尚华哲, 胡斯勒图, 等. GF-5 DPC 数据的云检测方法研究 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(10): 2053-2066.
- [12] Liu J. Performance of cloud fraction of three satellite cloud climate data records over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(7): 1445-1459.
刘健. 三种卫星云量数据在青藏高原地区的比对分析 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(7): 1445-1459.
- [13] Fu C B, Dan L, Feng J M, *et al.* Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(1): 87-98.
符传博, 丹利, 冯锦明, 等. 1960—2012 年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系 [J]. *大气科学*, 2019, 43(1): 87-98.
- [14] Li Q, Cai M, Zhou Y Q, *et al.* Characteristics of cloud vertical distribution based on cloud identification by radiosonde [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(6): 1161-1172.
李琦, 蔡淼, 周毓荃, 等. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征 [J]. *大气科学*, 2021, 45(6): 1161-1172.
- [15] Menzel W P, Frey R A, Zhang H, *et al.* MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: Algorithm description and results [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(4): 1175-1198.
- [16] Lindstrot R, Bennartz R, Preusker R, *et al.* The impact of subscale inhomogeneity on oxygen A band cloud-top pressure estimates: Using ESA's MERIS as a proxy for DSCOVR-EPIC [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(7): 1963-1973.
- [17] Wang G, Shao L Y, Ding W D, *et al.* Optimal selection of medium-wave channels in hyperspectral GIIRS and its influence on cloud detection [J]. *Infrared*, 2021, 42(7): 36-42.
王根, 邵立琪, 丁卫东, 等. 高光谱 GIIRS 中波通道的最优选择及其对云检测的影响 [J]. *红外*, 2021, 42(7): 36-42.
- [18] Toller G N, Xiong X X, Chiang K F, *et al.* Status of earth observing system Terra and Aqua moderate-resolution imaging

- spectroradiometer level 1B algorithm [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2(1): 023505.
- [19] Frey R A, Baum B A, Menzel W P, *et al.* A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using CO₂ slicing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D20): 24547-24555.
- [20] Zhang Y L, Cui X M. Spatial and temporal characteristics of AOD and Angström exponent in the Yangtze River Delta based on MODIS_C061 [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2617-2624.
张颖蕾, 崔希民. 基于 MODIS_C061 的长三角地区 AOD 与 Angström 指数时空变化分析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2617-2624.
- [21] Chang Y Y, Sun B, Huang C, *et al.* Cloud detection and parameter inversion using multi-directional polarimetric observations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 11-21.
常钰阳, 孙斌, 黄禅, 等. 多角度偏振云检测及云参数反演 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 11-21.
- [22] Liu R X, Chen H B, Zheng Z J, *et al.* Analysis and validation of total cloud amount data in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 571-578.
刘瑞霞, 陈洪滨, 郑照军, 等. 总云量产品在中国区域的分析检验 [J]. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 571-578.
- [23] Susskind J, Blaisdell J M, Iredell L. Improved methodology for surface and atmospheric soundings, error estimates, and quality control procedures: The atmospheric infrared sounder science team version-6 retrieval algorithm [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 084994.
- [24] Wang R F, Ma X D, Zhao T L, *et al.* Evaluation of MACC reanalysis ozone data over China using ground-based and AIRS satellite observations [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4412-4422.
王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 等. 利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 [J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4412-4422.
- [25] Susskind J, Barnett C D, Blaisdell J M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 390-409.
- [26] Ding S G, Zhao C S, Shi G Y, *et al.* Analysis of global total cloud amount variation over the past 20 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(5): 670-677.
丁守国, 赵春生, 石广玉, 等. 近 20 年全球总云量变化趋势分析 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(5): 670-677.
- [27] Wu W, Wang S G. Tendency change of cloud over northern China and its relation with regional climate [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(3): 651-658.
吴伟, 王式功. 中国北方云量变化趋势及其与区域气候的关系 [J]. *高原气象*, 2011, 30(3): 651-658.
- [28] Liu B X, Li D L. Spatio-temporal variation features of cloud cover in China and its correlation to north boundary belt of subtropical summer monsoon [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(3): 382-395.
刘柏鑫, 李栋梁. 我国云量时空变化特征及其与副热带夏季风北边缘带关系研究 [J]. *气象*, 2018, 44(3): 382-395.
- [29] Zhong L, Ma Y M, Su Z B, *et al.* Estimation of land surface temperature over the Tibetan Plateau using AVHRR and MODIS data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(5): 1110-1118.
- [30] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245.
- [31] Kendall M G. Rank correlation methods [J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [32] Zhao C F, Chen Y Y, Li J M, *et al.* Fifteen-year statistical analysis of cloud characteristics over China using Terra and Aqua moderate resolution imaging spectroradiometer observations [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(5): 2612-2629.
- [33] Xu Y, Jin L J, Xu X F. Spatial distribution and variation tendency of summer convection cloud-top pressure over China in recent 20 years [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2011, 32(2): 1-4.
徐寅, 金莲姬, 许潇锋. 近 20 年来我国夏季强对流 CTP 的空间分布及变化趋势 [J]. *气象研究与应用*, 2011, 32(2): 1-4.
- [34] Huang J, Bu L, Kumar K R, *et al.* Investigating the relationship between aerosol and cloud optical properties inferred from the MODIS sensor in recent decades over East China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 239: 117812.
- [35] Chedzey H, Menzel W P, Lynch M. Changes in HIRS detection of cloud over Australia from 1985 to 2001 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 917.