

夏季白天中国中东部不同类型云分布特征及其对近地表气温的影响研究

游婷¹, 张华^{1*}, 王海波^{2,3}, 赵敏¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

稿件编号: 2019160C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1909.19160

摘要: 本文利用 2001-2017 年 ERA5 再分析资料以及 CERES 卫星资料, 探究夏季白天中国中东部不同类型云的云量及其光学厚度的时空变化特征, 并利用一维辐射对流模式定量分析不同类型云对近地表气温的影响。观测结果表明: 夏季白天中国中东部总云量及其光学厚度整体呈由南向北逐渐减小的分布特征, 且中高云量占主导地位。总云量整体呈 $-0.3\% \text{ a}^{-1}$ 显著减少趋势, 其中低云的贡献 ($-0.27\% \text{ y}^{-1}$) 最大; 总云光学厚度为 $0 \sim 0.1 \text{ a}^{-1}$ 增加趋势, 其中低云光学厚度 (0.06 y^{-1}) 和中低云光学厚度 (0.03 y^{-1}) 呈增加趋势, 而中高云光学厚度 (-0.08 y^{-1}) 和高云光学厚度 (-0.03 y^{-1}) 呈减少趋势。模式结果表明: 四种不同类型云的温度效应 (Cloud Effect Temperature, CET) 均为负值, 表现为降温效应。低云、中低云、中高云和高云的年均 CET 值分别为 -2.9°C 、 -2.7°C 、 -2.2°C 和 -1.7°C 。其中, 低云在华北平原降温可达 -5°C ; 中低云和高云在四川盆地和云贵高原降温可达 -7.8°C 。不同类型云温度效应与近地表气温的年际变化具有较好的一致性, 具体表现为: 2004 年前 (后) 近地表气温呈现下降 (上升) 趋势, 不同类型云的温度效应在此期间呈下降 (上升) 趋势, 表现为云的降温效应增强 (减弱) 与近地表气温下降 (上升) 相对应, 体现了夏季白天中国中东部 4 种不同类型云温度效应与近地表气温都呈正相关关系。特别地, 夏季白天中国中东部中高云量占主导地位, 其 CET 与近地表气温的相关系数高达 0.63。综上, 夏季白天中国中东部不同类型云温度效应对近地表气温的影响不同, 但均呈正相关关系。定量分析不同类型云对近地表气温的影响可以为定量研究云反馈对区域增暖的作用以及合理预估未来区域增暖情景提供必要的科学参考。

作者简介 游婷, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事云气候效应研究。E-mail: 657133756@qq.com

通讯作者 张华, E-mail: huazhang@cma.gov.cn

基金项目 国家重点研发计划项目 (2017YFA0603502), 国家自然科学基金项目 (91644211&41575002) 和科技部公益性行业 (气象) 科研专项课题 (GYHY201406023)

Funded by National Key R&D Program of China (2017YFA0603502), National Natural Science Foundation of China (91644211&41575002), Public Meteorology Special Foundation of MOST (GYHY201406023)

收稿日期 2019-05-07 **网络预出版日期**

关键字: 不同类型云, 近地表气温, 中国中东部, 云的温度效应

Distribution of Different Cloud Types and their effects on Near-surface Air Temperature during Summer Daytime in Central Eastern China

You Ting¹, Zhang Hua¹, Wang Haibo^{2,3}, and Zhao Min¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstracts The spatial-temporal variation characteristics of the daytime cloud fraction and cloud optical thickness of various cloud types over central and eastern China in summer are explored based on ERA5 reanalysis data and CERES satellite data during the period of 2001-2017. Then, the effects of various cloud types on near-surface air temperature are analyzed quantitatively using a Radiative-Convective Model. The observations show that the annual mean daytime total cloud fraction and its optical thickness decrease gradually from south to north, while upper-middle cloud fraction dominates the total cloud fraction over central and eastern China in summer. For annual mean changing rates, the total cloud fraction shows a significant decrease of $0.3\% \text{ y}^{-1}$ with the largest contribution from low cloud ($-0.27\% \text{ y}^{-1}$). The increasing trend of total cloud optical thickness ranges from 0 to 0.1 y^{-1} , with low and lower-middle cloud optical thickness show an increasing trend of 0.06 y^{-1} and 0.03 y^{-1} , respectively, while the upper-middle and high cloud optical thickness show a decreasing trend of 0.08 a^{-1} and 0.03 a^{-1} , respectively. The model results show that the annual mean CETs of the four different cloud types are negative, with values of 2.9 °C, 2.7 °C, 2.2 °C, and 1.7 °C for low, lower-middle, upper-middle and high cloud, respectively, indicating the cooling effects of various cloud types. The low cloud CET in the North China Plain can be up to -5 °C, while the lower-middle and upper-middle cloud can both come up to -7.8 °C in Sichuan Basin and Yunnan-Guizhou Plateau. The interannual variations of CETs of different cloud types and near-surface air temperature have a good consistency. The near-surface air temperature decreases (increases) before (after) 2004, while the CETs of different cloud types decrease (increase) during this period, which indicates a good correspondence between the strengthening (weakening) of the cloud cooling effect and the decrease (increase) of near-surface temperature. It means, in other words, a positive correlation relationship appearing in four cloud types and near-surface air temperature over central and eastern China during daytime in summer. In particular, the annual mean daytime upper-middle cloud fraction plays an important role in all types of clouds over central and eastern China in summer, and the correlation coefficient between the CET and near-surface air temperature is as high as 0.63. In summary, the effects of different cloud types on near-surface air temperature over central and eastern China in summer are different, but all of them show positive correlations. The quantitative analysis of the influence of different cloud types on near-surface air temperature can provide scientific references for the accurate measurement of global warming, the role of cloud feedback in regional warming, and the accurate prediction of regional warming scenarios, respectively.

Key words Cloud types, Near-surface air temperature, Central Eastern China, Cloud Effect Temperature

1 引言

云是迄今为止影响气候变化和气候预测诸多因子中非常重要却又不确定性最大的因子(Stephens, 2005; IPCC, 2013)。云通过反射太阳辐射、吸收地球长波辐射并以自身温度发射长波辐射对地气系统能量收支平衡产生影响(Ramanathan et al., 1989),从而显著影响地表温度。一方面云通过对太阳短波辐射的散射和反射,对整个地气系统起到冷却的作用;另一方面,云可以吸收地表与云下大气的长波红外辐射,并通过自身较低的温度向外发射长波辐射,使地气系统释放的长波辐射减少,对地气系统形成加热保温的作用。在地气系统中云的这两个过程相互作用(前者被称为“云的反照率效应”,后者被称为“云的温室效应”),体现了云对地气系统辐射收支平衡的重要影响(Mace et al., 2006)。低云每增加 4% 即可抵消二氧化碳浓度加倍引起的 2-3 °C 增温,反之会扩大相应的增温效应(Randall et al, 1984)。因此,研究云对近地表气温的影响,对正确认识全球变暖和未来气候的预估都具有极其重要的科学意义。

前人采用了大量观测资料探究云与近地表气温的关系。Ramanathan 等(1989)与 Duan 和 Wu(2006)利用观测资料发现,中纬度地区白天高、低云分别对地表气温的升高起正、负反馈作用。Warren 等(2007)利用站点资料发现,北半球大陆总云和近地表气温在 7 月存在显著的负相关,1 月在俄罗斯北部存在显著正相关。Tang 和 Leng (2012; 2013)利用站点资料并结合卫星资料分析表明总云量是影响欧亚大陆北部和北美夏季日平均最高近地表气温变化的一个重要因素。在北美,总云量每增加 10%,夏季日最高近地表气温下降 0.3-0.9 °C。Groisman 等(1994; 1996; 2000)提出总云的温度效应(Overall Cloud Effect Temperature, OCET)概念,利用观测资料研究发现总云量与近地表气温的关系表现出强烈的季节和昼夜周期变化特征,并随着不同的地理位置和气候状况有明显的变化。Sun 等(2000)利用北半球五个地区(加拿大、美国、俄罗斯、中国东部和西太平洋的热带岛屿)的站点小时数据,研究云量与近地表气温及其年代际变化之间的关系。结果表明,对于白天,夏季 OCET 为负值,冬季 OCET 为正值(中国东部除外);对于夜晚,OCET 均为正值。在实际大气中,云量和近地表气温都会受到其他物理过程(降水和大气环流等)的影响,上述利用观测资料的研究方法都只能得到云与温度的相关作用。而在一维辐射对流模式中可以避免其他因素的影响,单纯考虑云特性的变化对近地表气温的影响。本文将利用该模式定量分析云变化对近地表气温的影响。由于不同区域受不同环流系统和外部驱动力影响,云及其气候效应有显著的区域特性。云对

近地表气温的影响也存在明显的区域性变化。东亚地区的气候变化受区域季风系统影响 (Wang, 2006), 青藏高原的热力、动力效应也调节着东亚地区气候(Wu et al., 2012)。东亚地区是全球唯一的陆地层云区(Klein et al., 1993), 具有同纬度最大的光学厚度(Li et al., 2004; Yu et al., 2004)。即使对流旺盛的夏季, 东亚季风区的云特性与其他地区亦存在显著差异(Li et al., 2017)。中国中东部处于东亚季风区的活跃区, 因此, 研究中国中东部云对近地表气温的影响, 特别是云辐射效应对近地表气温的影响, 对更好地认识中国中东部的气候变化有重要意义。

前人的研究多为总云量对近地表气温的影响, 而不同类型云可以表现出不同的气候效应。低云具有高反照率和相对较高的云顶温度, 对地气系统产生降温作用。薄高云反照率小, 云顶温度低, 对地气系统产生增温作用(Liou et al., 2002)。因此, 有必要研究不同类型云的总效应共同影响近地表气温的变化。本文采用欧洲中心再分析资料、卫星观测资料并结合一维辐射对流模式, 探究 2001-2017 年中国中东部(20°-45°N, 102°-122°E)夏季(6、7 和 8 月)白天不同类型云对近地表气温的影响。

本文的第二章为数据和方法, 介绍所采用的欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather, ECMWF)ERA5 再分析资料、云与地球辐射能量系统(Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES)卫星资料、一维辐射对流模式(Radiative-Convective Model, RCM)以及数值试验方法。第三章为结果分析, 具体讨论不同类型云的云量及光学厚度的时空分布特征, 并利用模式定量分析不同类型云对近地表气温的影响。第四章为结果与讨论。

2 数据和方法

2.1 数据

2.1.1 ERA5 再分析资料

本文使用 2001 年 1 月-2017 年 12 月 ERA5 再分析资料的近地表气温数据, 其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 1 h, 选取 UTC (0000, 0100, 0200, 0300, 0400, 0500, 0600, 0700, 0800, 0900, 1000, 2300) 为中国中东部白天时间。ERA5 为 ECMWF 的最新一代再分析资料, ERA5 的水平分辨率(30km)高于其前身 ERA-Interim(79km; Dee et al., 2011), 垂直分为 137 层, 顶层气压至 1hPa, ERA5 进一步修正了数据同化系统, 改进了物理模型, 实现了再分析资料质量的提升 (Dragani et al., 2016)。

2.1.2 CERES

本文还使用 2001 年 1 月-2017 年 12 月 CERES_SYN1deg_Ed4A 资料, 包括不同类型云的云量及其光学厚度。CERES 作为地球观测系统(Earth Observing System ,EOS)的重要组成部分, 其数据在 ISCCP 及地球辐射收支实验 (Earth Radiation Budget Experiment, ERBE)的基础上做了大量改进。CERES 资料来自 TRMM、Terra 和 Aqua 3 颗卫星搭载的云、气溶胶和地球辐射能量系统的探测器, 利用高光谱分辨率和高空间分辨率来处理确定云和地面特征, 提供了可信的云和气溶胶等大气产品信息(Wielicki et al., 1998; Zhang et al., 2016)。本研究使用 CERES_SYN1deg_Ed4A 产品, 其空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 时间分辨率为 1h, 并选取 UTC (0030, 0130, 0230, 0330, 0430, 0530, 0630, 0730, 0830, 0930, 1030, 2330) 为中国中东部白天时间。CERES 资料按照云顶气压将云划分为: 低云 ($>700\text{hPa}$)、中低云 ($500\text{-}700\text{hPa}$)、中高云 ($300\text{-}500\text{hPa}$) 和高云 ($<300\text{hPa}$)。CERES 产品在确定 700 hPa 和 300 hPa 之间的中云时, 已经考虑了冰雪覆盖。因此, CERES 的云数据是可靠的, 并且接近于满足气候研究的准确性要求(Yan et al., 2011)。

2.2 方法

2.2.1 模式介绍

本文采用一维辐射对流模式(石广玉, 1992, 2007)研究不同类型云对近地表气温的影响。该模式体现辐射传输和对流热量垂直输送对大气热平衡状态的综合影响, 对于了解气候形成理论以及气候变化问题具有重要价值。特别是在研究大气气体成分浓度、云等因子对气候变化的影响获得广泛认可(石广玉, 1992; 于秀兰, 2001; 刘玉芝等, 2007)。刘玉芝等(2007)利用一维辐射-对流模式进行敏感性实验, 研究云量、云光学厚度以及云高等要素的变化对长短波辐射的影响。图 1 为模式流程图, 模式中太阳辐射传输采用 Lacis 等(1974)参数化方案, 包括影响太阳辐射传输的 O_3 、 H_2O 、 O_2 和 NO_2 等主要大气气体的吸收、分子 Rayleigh 散射以及云的吸收和散射。模式的长波(热)辐射计算采用相关 k 分布方案(石广玉, 1998), 包括对热辐射有贡献的大气 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 和 N_2O 等主要气体几乎所有的吸收带以及水汽连续吸收。

模式中的云量、云高和云光学厚度可以按照需要设定。云在短波太阳辐射波段的光学特性, 按照 Stephens(2002)给出的水云和冰云的资料, 预先用 Mie 理论计算其单次散射比和不对称因子。为更方便地处理太阳辐射的气体吸收, 单次散射比包括从紫外 ($0.33\text{ }\mu\text{m}$) 到近红外 ($4\text{ }\mu\text{m}$) 的 14 个波段, 而散射相函数则按照太阳天顶角分为 50 个方向。在热辐射波

段，云则被视为黑体。模式中平衡温度廓线的求解，采用时间步进(Time-Stepping)和牛顿雷夫松(Newton-Raphson)联合迭代，以加快收敛速度。

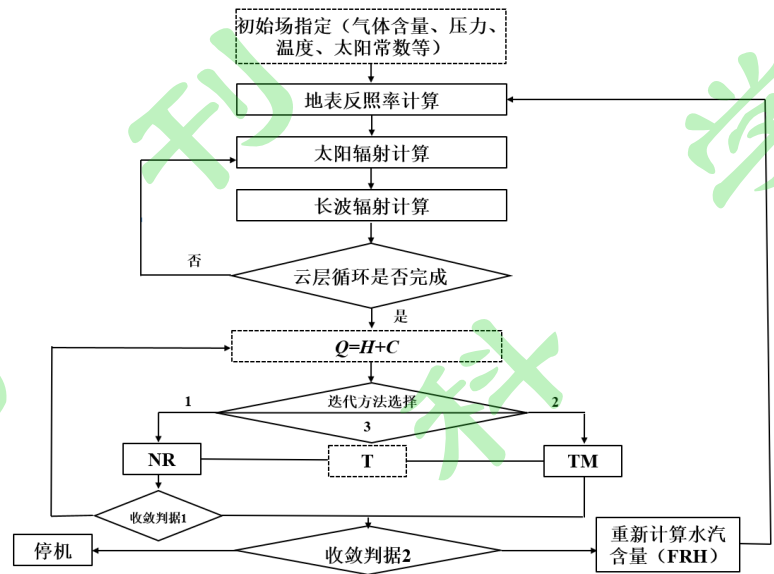


图 1 RCM 模式流程图(石广玉，1992)
Fig.1 Flowchart for RCM

2.2.2 云温度效应定义

Groisman 等（1996; 2000）提出总云效应（Overall Cloud Effect, OCE）的定义，研究总云量与近地表气温、风场和湿度等气象要素的关系。其中总云的温度效应(OCET)定义为有云与晴空条件下近地表气温的差值：

$$OCET=E(T)-E(T|晴空) \tag{1}$$

其中 E(T)指有云条件下的近地表气温，E(T|晴空)指晴空条件下的近地表气温。类似地，本文定义 CET（Cloud Effect Temperature）来研究不同类型云的温度效应：

$$CET=E(T)-E(T|晴空) \tag{2}$$

在实际大气条件下，由于云量和近地表气温还会受到其他物理过程(降水和大气环流等)的影响，该定义不能代表因果关系。而一维辐射对流模式中仅仅考虑不同类型云的变化对近地表气温的影响，该模式适用于研究云对近地表气温的影响，则 CET 表征为不同类型云的辐射效应对近地表气温的影响。因此本文不是夏季白天近地表气温变化的归因研究，而是利用观测数据结合模式模拟来探究云对近地表气温的影响。

2.2.3 试验设计

首先，为了探究不同类型云对近地表气温的影响，表 1 给出试验设计。其中，试验 1 将 RCM 模式设定为单层云模式：采用 CERES 数据，分别将中国中东部每个格点对应的夏

季白天不同类型云的年平均云量及其光学厚度输入到模式中。然后通过模式模拟计算得到 4 种不同类型云对应的近地表气温。另一方面，为探究总云对近地表气温的温度效应，RCM 模式设定为多层云模式：将 4 类云的云高，云量和云光学厚度同时输入到模式中，通过模式模拟得到相应的近地表气温，从而获得总云对近地表气温的影响。模式从地面到 70 km 左右高度将大气不等间距地分为 50 层（第 50 层为地面），为了将模式的云层高度与 CERES 定义的云层高度相对应，模式中将低云固定在第 49 层（850.9-1013.0 hPa），中低云在第 47 层（590.1 hPa -710.0 hPa），中高云在第 45 层（398.2-487.0 hPa），高云在第 41 层（165.6-209.0 hPa）。

表 1 云对近地表气温影响试验设计

Table 1 Experiments on the influence of cloud on near-surface air temperature

试验序号	研究内容	模式设置	云高
试验 1	不同类型云对近地表气温的影响	单层云模式	低云（850.9-1013.0hPa）
			中低云（590.1hPa -710.0hPa）
试验 2	总云对近地表气温的影响	多层云模式	中高云（398.2-487.0hPa）
			高云（165.6-209.0hPa）

3 结果分析

3.1 云量与云光学厚度的时空变化特征

3.1.1 空间变化特征

云量是云宏观属性的一个重要参数，云量的变化直接影响地气系统的辐射收支，对局地或全球的增暖或冷却起到决定性作用（刘奇等, 2010）。而中国中东部是典型季风区，夏季白天云分布具有典型区域特征。从 2001- 2017 年夏季白天中国中东部地区云量的空间分布（图 2）可见，总云量的高值区位于四川盆地和云贵地区，极大值为 92.2%；低值区位于西北地区，总云量低于 55%，这与李昀英等（2003）和刘洪利等（2003）的结果一致。中国中东部地区总云量由南到北呈现逐渐减少的趋势。分析不同类型云的云量发现，低云主要集中于长江中下游、华北平原和东北地区。中高、中低云量的高值区均位于川黔地区，其中中高云量达到 40%以上。川黔地区位于青藏高原下游，青藏高原地形摩擦作用造成中层气流辐散和低层气流辐合使得该地区容易形成中云(Yu, et al., 2004; Li et al., 2004)。但由于川黔高原东部区域的地形高度接近 850-700hPa，而 CERES 资料云类型是按照云顶气压划分，因此

该地区 CERES 资料的中高云（300-500hPa）可能接近该地区台站所观测的中低云，这可能导致对该地区中低云量的低估和对中高云量的高估（Li et al., 2006）。高云量高值区主要分布在西南与华南地区，在四川盆地出现极大值为 36.9%。西南与华南地区夏季水汽丰富，对流旺盛，容易促发强对流形成高云。从不同类型云的分布看，中国中东部大部分地区夏季白天中高云量占主导地位，这主要与夏季东亚季风有关。中国中东部处于夏季季风区，季风爆发，由季风带来的对流层的是空气迅速向上发展，不稳定能量释放，对流增加，形成大量的中高云（柳艳菊和丁一汇，2007）。

结合夏季白天中国中东部不同类型云的光学厚度（图 3），进一步分析云的光学特性。总云光学厚度与总云量的分布相似，都呈由南向北的减少趋势。总云光学厚度的高值区位于四川盆地及云贵地区，低值区位于内蒙古地区，这与段皎等（2011）和周喜讯等（2016）的结果一致。从不同类型云的光学厚度可以看出，夏季白天中国中东部高云光学厚度总体偏大，年均值达 11.8；中高云的光学厚度次之，年均值为 8.2；中低云，低云的光学厚度较小，年均值均为 5.7。这反映夏季白天中国中东部的中高云、高云较深厚，而低云则比较浅薄。这主要由于中国中东部地区受夏季风影响，对流活动强，水汽增多，有利于深厚云的发展(Guo et al., 2015)。张华等（2015）研究表明夏季中国的冰水含量垂直在 8km-15km 为大值区，且高于其他季节，这也反映出夏季中国的中高云，高云发展旺盛，光学厚度大。

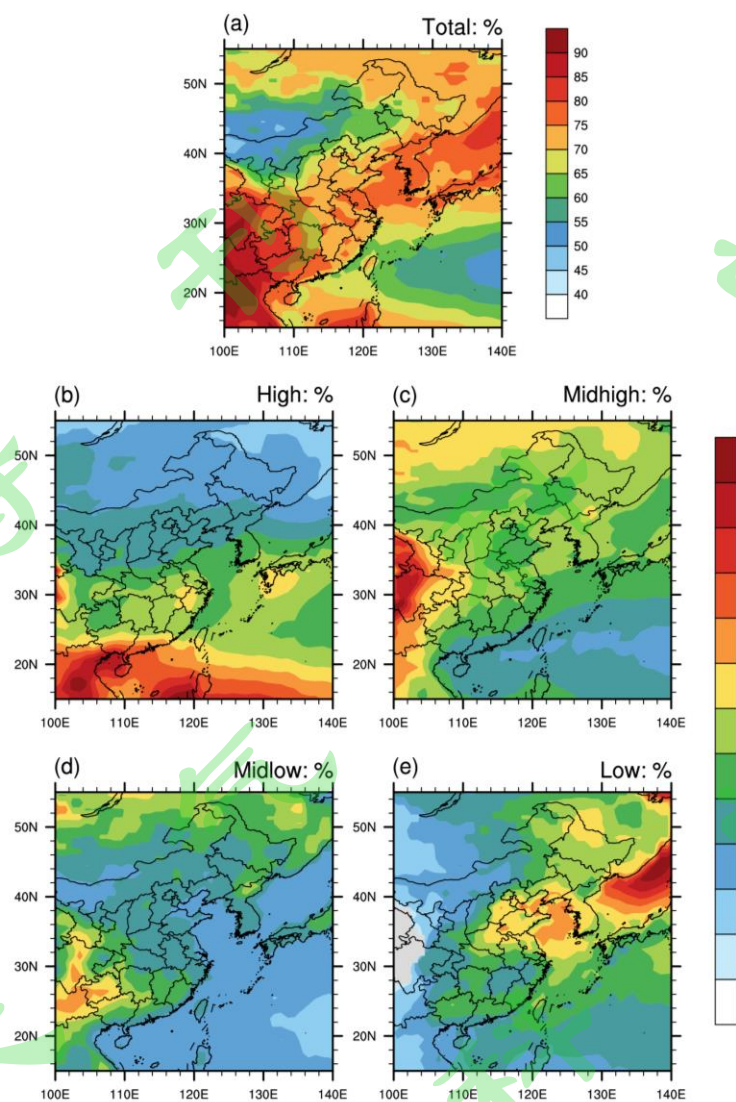


图 2 2001-2017 年中国中东部夏季白天云量分布（单位：%）：(a)总云、(b)高云、(c)中高云、
(d)中低云、(e)低云

Fig.2 Spatial distribution of annual mean daytime cloud fraction in summer over central Eastern China during 2001-2017(unit: %): (a)total cloud, (b) high cloud, (c) upper-middle cloud, (d) lower-middle cloud, (e) low cloud

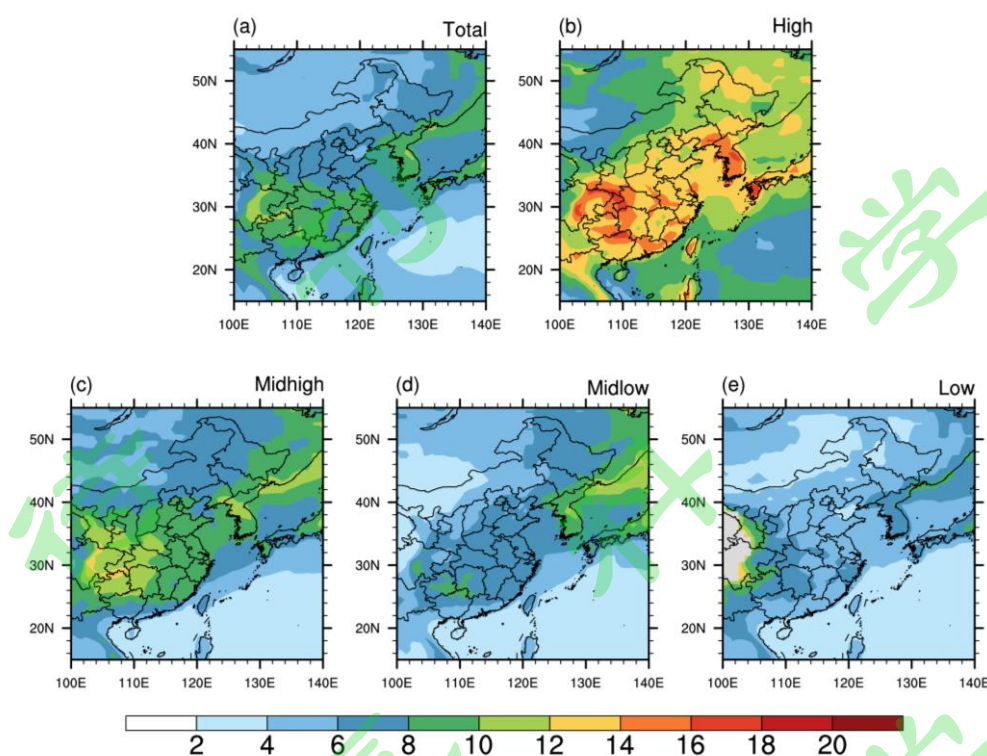


图 3 2001-2017 年中国中东部夏季白天云光学厚度分布：(a)总云、(b)高云、(c)中高云、(d)中低云、(e)低云

Fig.3 Spatial distribution of annual mean daytime cloud optical thickness in summer over central Eastern China during 2001-2017 : (a) high cloud, (b) upper-middle cloud, (c) lower-middle cloud, (d) low cloud

3.1.2 长期变化趋势

图 4 为夏季白天中国中东部总云量以及各类型云的云量变化趋势的空间分布图。总云量整体呈减少趋势，其中华北及东北地区减少趋势最为明显，为 $-1.0\% \text{ y}^{-1}$ 。Norris 等（2016）利用卫星资料及 CMIP5 模式资料也发现 1980s 至 2000s 中纬度地区总云量减少，并分析温室气体的增加和火山爆发引起的辐射冷却是导致该地区总云量减少的主要驱动力。从不同类型云的云量变化趋势可知，低云量、中低云量与总云量的年变率空间分布整体相似。在华北及东北地区，低云量和中低云量均呈减少趋势，分别为 $-0.84\% \text{ y}^{-1}$ 和 $-0.22\% \text{ y}^{-1}$ ，在中国华东及华南部，低云量为 $-0.25\% \text{ y}^{-1}$ 下降趋势，而中低云量在该区域为弱增加趋势。中高云除在华中地区表现为弱减少趋势外，在其他地区为 $0 \sim 0.2\% \text{ y}^{-1}$ 的增加趋势。高云在东北地区呈现 $0 \sim 0.2\% \text{ y}^{-1}$ 的增加趋势，在中国中东部其他地区变化趋势不显著。结合不同类型云量的年际变化（图 6a-e）也可看出，2001-2017 年中国中东部总云量的减少（ $-0.32\% \text{ y}^{-1}$ ）主要

是由于低云量的减少 ($-0.27\% \text{ y}^{-1}$) 造成的, 这与 Chen 等 (2018) 的结果一致。

从夏季白天中国中东部总云光学厚度以及各类型云的光学厚度变化趋势的空间分布图 (图 5) 可以看出, 除四川盆地和华北平原北部外, 中国中东部总云光学厚度大多为 $0 \sim 0.1 \text{ y}^{-1}$ 增加趋势。低云、中低云光学厚度整体分别为 0.06 y^{-1} 、 0.03 y^{-1} 的增加趋势。中高云光学厚度整体为下降趋势, 其中在四川盆地呈 -0.22 y^{-1} 显著下降趋势。高云光学厚度除在西北地区呈 0.24 y^{-1} 显著增加趋势, 在中国中东部其他地区大多为 $-0.1 \sim 0 \text{ y}^{-1}$ 的弱下降趋势。根据总云 and 不同类型云的光学厚度的年际变化 (图 6f-g) 可知, 总云和 4 种不同类型云的光学厚度在 2001-2004 年左右为明显增加趋势, 而 2004-2017 年, 除低云光学厚度无明显变化趋势外, 中低云、中高云、高云和总云的光学厚度分别呈 -0.06 y^{-1} 、 -0.11 y^{-1} 、 -0.15 y^{-1} 和 -0.04 y^{-1} 的下降趋势。

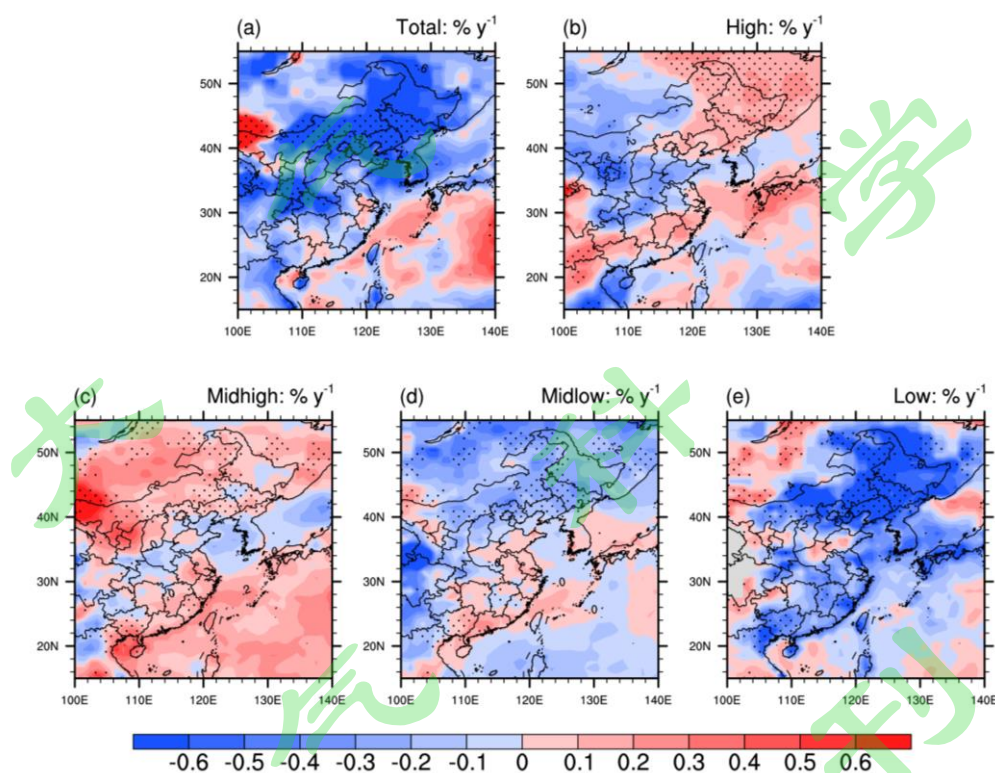


图 4 2001-2017 年中国中东部夏季白天云量年变率分布 (单位: $\% \text{ y}^{-1}$ 年变化率): (a)总云、(b)高云、(c)中高云、(d)中低云、(e)低云 (黑点区域表示通过 95% 的显著性检验, 下同)

Fig.4 Spatial distribution of the linear trends of annual mean daytime cloud fraction in summer over central Eastern China during 2001-2017(unit: $\% \text{ y}^{-1}$):(a)total cloud,(b) high cloud, (c) upper-middle cloud, (d) lower-middle cloud, (e) low cloud(The dot areas in the figures represent confidences greater than 95%, the same as below)

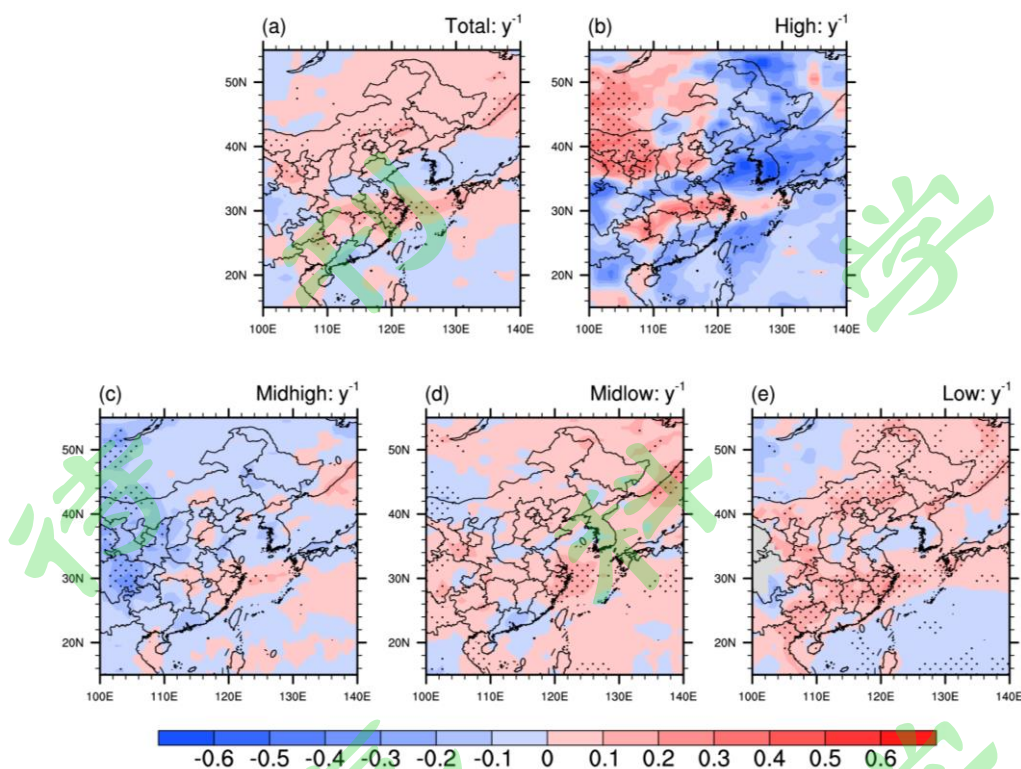


图 5 2001-2017 年中国中东部夏季白天云光学厚度年变率分布（单位： y^{-1} 年变化率）：(a)总云、(b)高云、(c)中高云、(d)中低云、(e)低云

Fig.5 Spatial distribution of the linear trends of annual mean daytime cloud optical thickness in summer over central Eastern China during 2001-2017(unit: a^{-1}): (a)total cloud, (b) high cloud, (c) upper-middle cloud, (d) lower-middle cloud, (e) low cloud

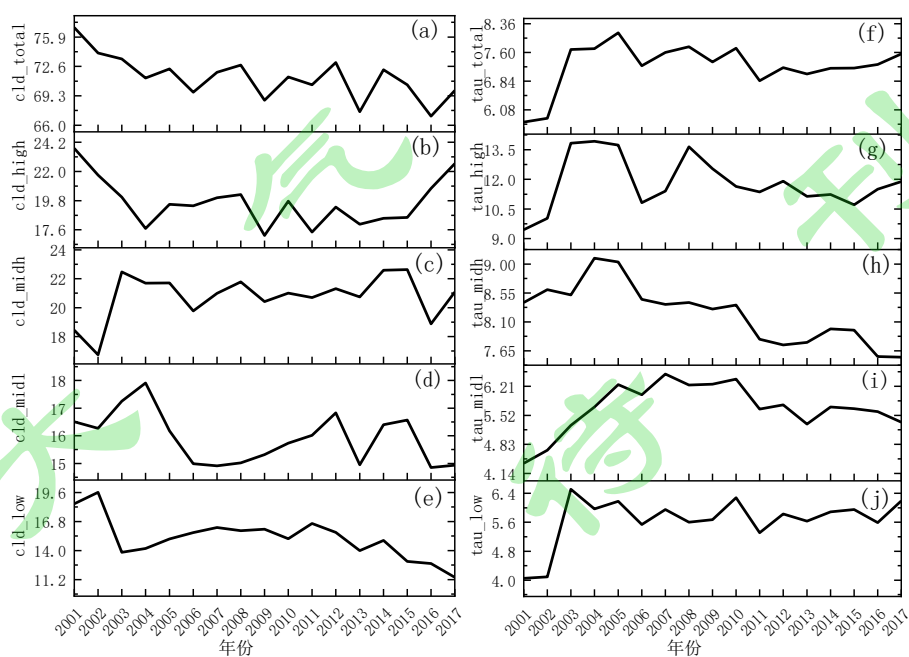


图 6 2001-2017 年中国中东部夏季白天不同类型云的云量和云光学厚度的年际变化: (a) 总云量、 (b)高云量、(c)中高云量、(d)中低云量、(e)低云量、(f)总云光学厚度、 (g)高云光学厚度、(h)中高云光学厚度、(i)中低云光学厚度、(j)低云光学厚度

Fig.6. Time series of cloud fraction and cloud optical thickness in summer daytime over central Eastern China during 2001-2017:(a)total cloud fraction,(b) high cloud fraction, (c) upper-middle cloud fraction, (d) lower-middle cloud fraction, (e) low cloud optical thickness, (f)total cloud optical thickness,(g) high cloud optical thickness, (h) upper-middle cloud optical thickness, (i) lower-middle cloud optical thickness, (j) low cloud optical thickness

3.2 夏季白天总云量和近地表气温的相关性

图 7a 为 2001- 2017 年夏季白天中国中东部地区总云量(CERES_SYN1deg_Ed4A 资料)与近地表气温(ERA5 再分析资料)的相关性分布图。中国中东部总云量与近地表气温整体呈负相关,高值区位于西南及华南地区,极大值达-0.87。图 8 为 CERES_SYN1deg_Ed4A 资料得到的 2001- 2017 年夏季白天平均地表云净辐射强迫的空间分布,云净辐射强迫的空间分布与云量、云光学厚度的分布相似,呈由南向北的减少趋势,西南及华南地区为地表云净辐射强迫的高值区,这与总云量与近地表气温的负相关高值区相对应。这种负相关表明近地表气温与云的辐射效应存在强烈的耦合关系(Yu et al., 2004)。结合图 9 发现,中国中东部总云量每年正(负)距平与近地表气温负(正)距平有较好的对应关系,同样表明夏季白天中国中东部总云量与近地表气温整体呈负相关,这与 Sun 等(2000)和 Warren 等(2007)的研究结论一致。云可以通过改变地气系统辐射收支平衡来影响近地表气温。实际大气中,温度会受到其他因素(大气环流和降水等)的影响。为了排除这些因素的影响,本文将中国中东部夏季白天年平均的云量及其光学厚度,输入到 RCM 模式中,得到由云变化引起的近地表气温。从夏季白天中国中东部地区总云量(CERES_SYN1deg_Ed4A 资料)与 RCM 多层云模式输出的近地表气温的相关性分布(图 7b)可知,中国中东部总云量与近地表气温总体也呈负相关,且与图 7a 的相关性分布具有很好的一致性,而 RCM 得到的近地表气温变化只受云变化的影响,这表明夏季白天中国中东部,实际近地表气温也很大程度受到云的影响。图 10 为 RCM 模式和 CERES_SYN1deg_Ed4A 得到的夏季白天平均地表云短波和净辐射强迫距平的年际变化,RCM 模式输出的地表云短波(净)辐射强迫和 CERES 数据的云短波(净)辐射强迫年际变化有很好的一致性,相关性分别为 0.82, 0.56, 这都表明 RCM 对模拟云辐射变化引起的近地表气温的变化具有一定的可靠性。为进一步探究云对近地表气温的影响,将

利用 RCM 定量分析不同类型云对近地表气温的影响。

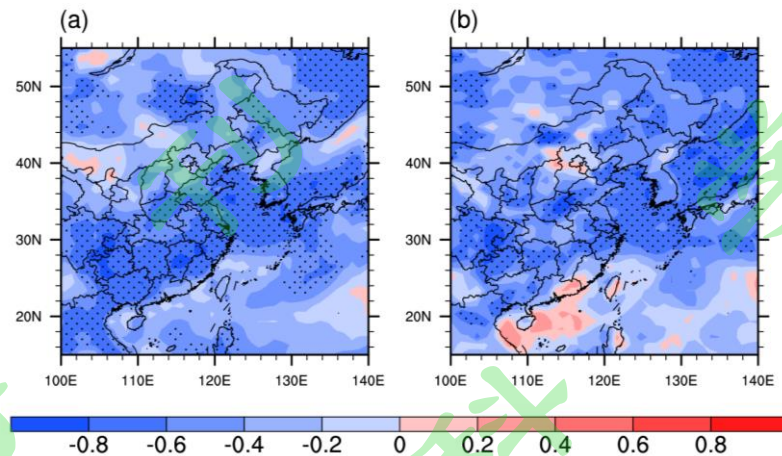


图 7 2001-2017 年中国中东部夏季白天总云量与 (a) 近地表气温(ERA5 再分析资料)、(b) 近地表气温(RCM 多层云模式输出结果)的相关性分布

Fig.7 Correlations of daytime total cloud fraction with the near-surface air temperature (derived from (a): ERA5 reanalysis data, (b): RCM model results) in summer over central Eastern China during 2001-2017

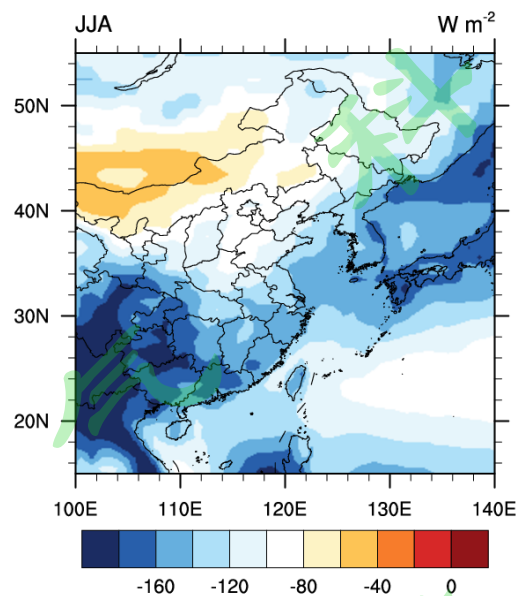


图 8 2001-2017 年中国中东部夏季白天平均地表云净辐射强迫的空间分布 (单位: W m^{-2})

Fig.8 Spatial distribution of annual mean daytime cloud radiative forcing at the surface in summer over central Eastern China during 2001-2017(unit: W m^{-2})

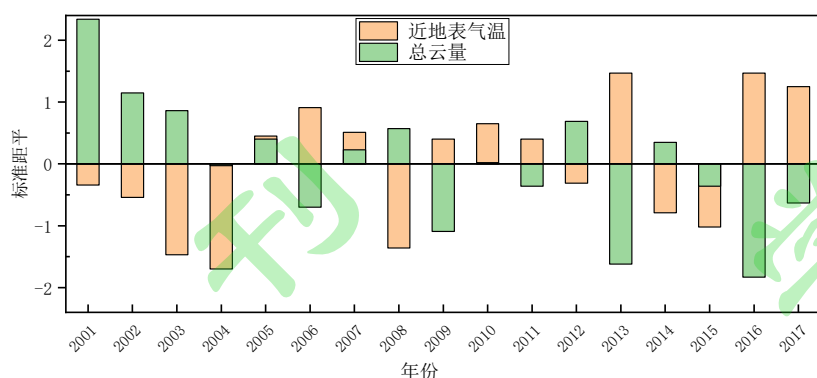


图 9 2001-2017 年中国中东部夏季白天总云量与近地表气温(ERA5 再分析资料)距平的年际变化

Fig.9 Time series of daytime total cloud fraction anomalies and at the near surface air temperature anomalies derived from ERA5 reanalysis data

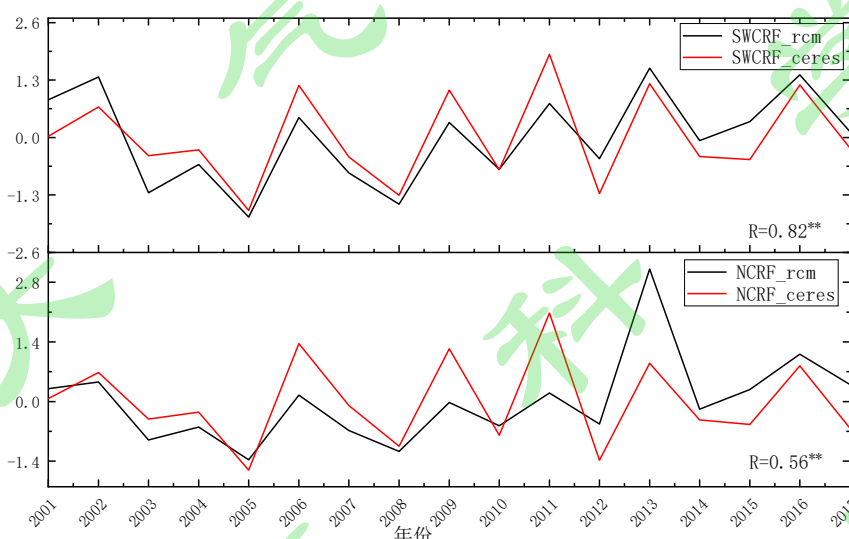


图 10 2001-2017 年中国中东部夏季白天平均地表云短波和净辐射强迫距平的年际变化 (**和*分别表示通过 95%, 90% 的显著性检验, 下同)

Fig.10 Time series of daytime shortwave cloud radiative forcing(SWCRF) anomalies and net cloud radiative forcing(NCRF) anomalies at the surface derived from ERA5 reanalysis data(**and* respectively represent confidences greater than 95%,90%, the same as below)

3.3 云的温度效应 (CET)

图 11 为 2001- 2017 年夏季白天中国中东部云温度效应(CET)的空间分布。对于单层低云, 中国中东部地区 CET 年均值为-2.9 °C, 均为降温效应。这是因为低云一般为温度较高

的水云,反射大量短波辐射,导致地表降温。低云的冷却效应高值区主要位于长江中下游和华北平原,近地表气温降低可达 5°C 以上,这与低云量和低云光学厚度大值区分布相对应(图 2, 3),而在内蒙古地区,低云量少且光学厚度小(图 2, 3),云的降温效应较弱,近地表气温降温为 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。对于单层中低云和中高云也都体现明显降温效应,CET 年均值分别为 -2.7°C 和 -2.2°C 。在内蒙古地区,中云冷却效应弱,该地区 CET 年均值为 -1.4°C ,四川和云贵地区为中云降温效应高值区,CET 极大值可达 -7.8°C 。对于高云,在中国蒙古高原地区,高云为 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 的增温效应,由上文可知,该地区高云的光学厚度小为薄高云,而薄高云具有较高的透过率使得较多的太阳短波辐射可以穿过云层到达地表,同时阻止长波辐射向外空出射使得地气系统增温。除蒙古高原外,中国中东部其余地区高云均为降温效应,且在中国南部由于高云光学厚度较大(图 3),呈 -1.7°C 的年均降温效应,弱于中低云。

总云的温度效应为各类型云的温度效应的综合体现。从总云温度效应(CET)的空间分布(图 11a)可见:中国中东部整体体现为降温效应。总云降温效应分布与光学厚度、总云量的分布具有很好的一致性,由南到北逐渐减弱。总云冷却效应高值区主要在四川盆地和云贵地区,与云地表净辐射强迫高值区(图 8)相吻合。川黔地区中高云占主导作用,中高云量和光学厚度都偏大,云的反照率效应强,导致该地区大幅度降温,平均可使该地区近地表气温降低 16.8°C 。

图 12 为 2001-2017 年夏季白天中国中东部云温度效应(CET)和近地表气温的年际变化,可以看出近地表气温与云温度效应的年际变化具有较好的一致性。以 2004 年为界,2001-2004 年近地表气温呈现下降趋势 ($-0.209^{\circ}\text{C y}^{-1}$),而不同类型云和总云的 CET 在此期间均呈下降趋势,即云降温效应增强。相反地,2004-2017 年,近地表气温为 $0.023^{\circ}\text{C y}^{-1}$ 的上升趋势,中低云、中高云、高云及总云降温效应在该期间减弱,除低云降温效应在 2004-2007 年有所增强外,此后低云降温效应也显著减弱。综上结果表明,夏季白天中国中东部近地表气温与 4 种不同类型云的温度效应都呈正相关关系,在 2001-2004 年近地表降温,4 种不同类型云的降温效应都增强,进一步加大地表降温;2004-2017 年近地表增温,4 种不同类型云的降温效应减弱,进一步加大地表增温。值得注意的是,中高云 CET 与近地表气温的相关系数高达 0.63,表明夏季白天中国中东部近地表气温与中高云的温度效应有更为密切的关系,这可能是由于夏季白天中国中东部中高云量占主导地位(图 2)。考虑到模式结果受云量和云光学厚度的影响,云的温度效应是两者共同作用的结果。接下来以中高云为例,结合中高云量及其光学厚度的变化来解释其温度效应的变化。

结合图 6c, h 可知:从 2001-2004 年,中高云量和高云光学厚度分别为 $1.55\% \text{ y}^{-1}$ 和

0.20 y^{-1} 的显著增加趋势，中高云光学厚度和中高云量的增加使得中高云反射更多短波辐射，中高云降温效应增强（图 12c），近地表气温下降；相反地，在 2004-2017 年，中高云量和中高云光学厚度分别为-0.01% y^{-1} 和-0.11 y^{-1} 的减少趋势，使得中高云降温效应减弱，近地表气温上升。综上，在利用 RCM 模式模拟试验中 CET 的变化是云量和光学厚度共同作用的结果，且与实际近地表气温的变化有良好的对应关系，体现了云对近地表气温变化有重要影响。

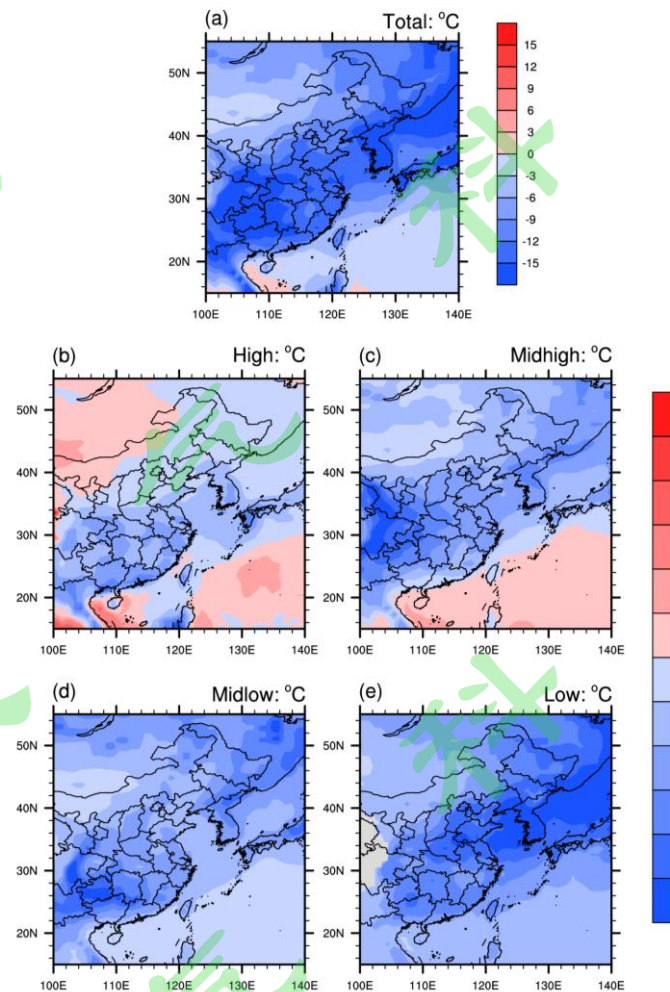


图 11 中国中东部夏季白天云温度效应(CET)的空间分布（单位：°C）：(a)总云、(b)高云、(c)中高云、(d)中低云、(e)低云

Fig.11. Spatial distribution of annual mean CET in summer daytime over central Eastern China during 2001-2017(unit: °C): (a) total cloud, (b) high cloud, (c) upper-middle cloud, (d) lower-middle cloud, (e) low cloud

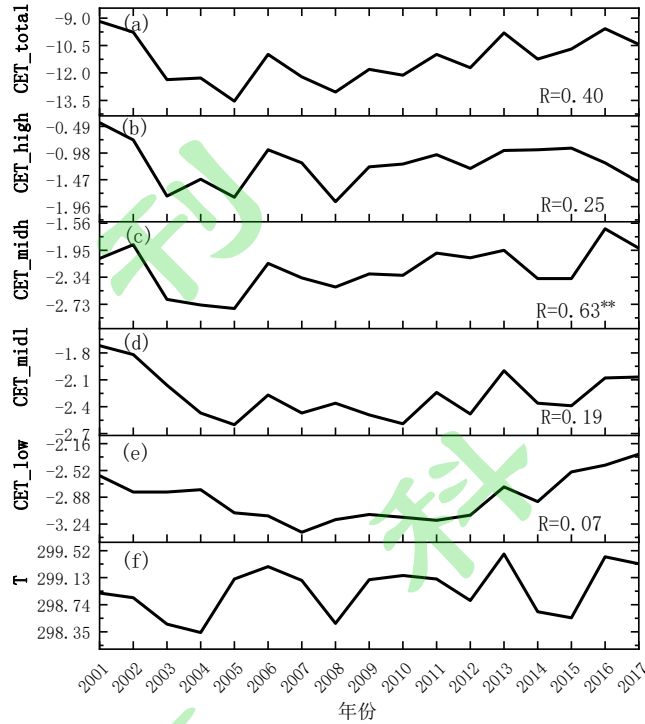


图 12 中国中东部夏季白天云温度效应(CET)和近地表气温(ERA5 再分析资料)的年际变化
(单位: $^{\circ}\text{C y}^{-1}$): (a)总云、(b)高云、(c)中高云、(d)中低云、(e)低云、(f)近地表气温

Fig.12 Time series of CET and the near surface air temperature derived from ERA5 reanalysis data(unit: $^{\circ}\text{C y}^{-1}$): (a) CET of total cloud , (b) CET of high cloud, (c) CET of upper-middle cloud, (d) CET of lower-middle cloud, (e) CET of low cloud,(f) near-surface air temperature

4 结果与讨论

本文利用 2001-2017 年 ERA5 再分析资料以及 CERES 卫星资料, 探究夏季白天中国中东部不同类型云量和云光学厚度的时空分布特征, 并利用一维辐射对流模式定量模拟了不同类型云对近地表气温的影响。得到以下结论:

夏季白天中国中东部总云量及其光学厚度整体呈由南向北递减的分布特征。总云量及其光学厚度的高值区均位于四川盆地及云贵地区, 分别为 81.71%和 7.24; 低值区则位于内蒙古地区。2001-2017 年夏季白天中国中东部总云量整体呈 $-0.3\% \text{ y}^{-1}$ 显著减少趋势, 其中低云的贡献 ($-0.27\% \text{ y}^{-1}$) 最大。2001-2017 年夏季白天中国中东部大部分地区总云光学厚度与总云量变化趋势相反, 为 $0\sim 0.1 \text{ y}^{-1}$ 增加趋势。低云和中低云光学厚度分别为 0.05 y^{-1} 和 0.03 y^{-1} 的增加趋势, 而中高云和高云光学厚度分别为 -0.08 y^{-1} 和 -0.03 y^{-1} 的减少趋势。

从云的温度效应可知, 四种不同类型云的 CET 在中国中东部地区均为负值, 为降温效应。低云在华北平原降温可达 -5°C ; 中低云和中高云在四川盆地和云贵高原降温可达 -7.8°C 。

不同类型云温度效应与近地表气温的年际变化具有较好的一致性。近地表气温下降, 4 种不同类型云的降温效应都增强, 进一步加大近地表降温; 近地表气温上升, 4 种不同类型云的降温效应减弱, 进一步加大近地表增温, 体现了夏季白天中国中东部近地表气温与 4 种不同类型云的温度效应都呈正相关关系。特别地, 夏季白天中国中东部中高云量占主导地位, 其 CET 与近地表气温的相关系数高达 0.63, 表明夏季白天中国中东部近地表气温与中高云的温度效应有更为密切的关系。

需要说明的是, 当前气候系统模式对未来气候变化的情景预估存在很大的不确定性, 而气候模拟的偏差和不确定性在很大程度上与云辐射过程及其反馈有关(Curry et al., 2011)。本文定量分析了夏季白天中国中东部不同类型云辐射效应对近地表气温的影响, 有助于深入理解云在地气系统的作用、改进云参数化方案, 减小其不确定性。但云还可通过影响大气环流和降水(水循环)等过程来间接影响近地表气温。反过来, 近地表气温的变化也会导致云的变化, 二者之间的反馈机制很复杂, 它们如何通过大气环流、降水和云辐射等过程相互作用是目前科学界的重大挑战(Bony et al., 2015; 张华等, 2018), 有待未来给予进一步更深入的研究。

参考文献 (References)

- Bony S, Stevens B, Frierson D M W, et al. 2015. Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 8(4):261-268.
- Chen W, Dong B. 2018. Anthropogenic impacts on recent decadal change in temperature extremes over China: relative roles of greenhouse gases and anthropogenic aerosols. *Climate Dynamics*, 52:3643–3660.
- Curry J A, Webster P J. 2011. Climate Science and the Uncertainty Monster. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12):1667-1682.
- Dee D P, Uppala S. 2009. Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 135(644):1830-1841.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137:553-597.
- Dragani R, Hersbach H, Simmons A, et al. Status of the ERA5 reanalysis production. *Dragani_S-RIP2016-19.pdf* <https://events.oma.be/indico/event/12/material/slides/19.pdf>
- Duan A, Wu G. 2006. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 33(22):217-234.
- 段皎, 刘煜, 2011. 中国地区云光学厚度和云滴有效半径变化趋势. *气象科技*, 39(4):408-416.
- Duan Jiao, Liu Yu, 2011. Trends of cloud optical thickness and cloud effective radius variation in China. *Meteor Sci Technol (in Chinese)*, 39(4):408-416.

- Groisman P Y, Karl T R, Knight R W. 1994. Observed Impact of Snow Cover on the Heat Balance and the Rise of Continental Spring Temperatures[J]. *Science*, 263(5144):198-200.
- Groisman P V, Genikhovich E L, Zhai P M. 1996. “Overall” Cloud and Snow Cover Effects on Internal Climate Variables: The Use of Clear Sky Climatology[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(9):2055-2066.
- Groisman P Y, Bradley R S. 2000. The Relationship of Cloud Cover to Near-Surface Temperature and Humidity: Comparison of GCM Simulations with Empirical Data[J]. *Journal of Climate*, 13(11):1858-1878.
- 郭艳君,张思齐,颜京辉,等.2016.中国探空观测与多套再分析资料气温序列的对比研究[J].*气象学报*,74(2):271-284. Guo Yanjun, Zhang Siqi, Yan Jinghui, et al., 2016. A comparison of atmospheric temperature over China between radiosonde observations and multiple reanalysis datasets. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 74(2):271-284.
- Guo Z , Zhou T . 2015. Seasonal variation and physical properties of the cloud system over southeastern China derived from CloudSat products[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(5):659-670.
- IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 571-657.
- Klein S A, Hartmann D L. (1993). The seasonal cycle of low stratiform clouds[J]. *Journal of Climate*, 6:1587-1606.
- Lacis A A , Hansen J . 1974. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(1):118-133.
- Li, J. D., W.-C. Wang, X. Q. Dong, and J. Y. Mao, 2017: Cloud-radiation-precipitation associations over the Asian monsoon region: an observational analysis. *Climate Dyn.*, 49(9): 3237–3255.
- 李昀英,宇如聪,徐幼平,等.2003.中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析[J].*气象学报*, 61(6):733-743. Li Yunying, Yu Rucong, Xu Youping, et al., 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in Southern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(6):733-743.
- Li, Y., Liu, X., & Chen, B. (2006). Cloud type climatology over the Tibetan Plateau: A comparison of ISCCP and MODIS/TERRA measurements with surface observations. *Geophysical research letters*, 33(17):L17716.
- LI, Y., YU, R., XU, Y., & ZHANG, X. (2004). Spatial Distribution and Seasonal Variation of Cloud over China Based on ISCCP Data and Surface Observations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 82(2):761-773.
- Liou K , Ou S . 2010. Theory of equilibrium temperatures in radiative-turbulent atmospheres[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(1):214-229.
- 刘洪利,朱文琴,宜树华,等.2003.中国地区云的气候特征分析[J].*气象学报*, 61(4):466-473+517-518. Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al., 2003. Climate analysis of the cloud over china. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(4):466-473+517-518.
- 刘奇,傅云飞,冯沙.2010.基于 ISCCP 观测的云量全球分布及其在 NCEP 再分析场中的指示[J].*气象学报*,68(5):689-704. Liu Qi, Fu Yunfei, Feng Sha. 2010. Geographical patterns of the cloud amount derived from the ISCCP and their correlation with the NCEP reanalysis

- datasets. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68(5):689-704.
- 柳艳菊,丁一汇. 2007.亚洲夏季风爆发的基本气候特征分析[J].气象学报,65(04):511-526. Liu Yanju, Ding Yihui. 2007. Analysis of the basic features of the onset of Asian summer monsoon[J]. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65(04):511-526.
- 刘玉芝,石广玉,赵剑琦, 2007. 一维辐射对流模式对云辐射强迫的数值模拟研究[J].大气科学, 31(3):486-494. Liu Yuzi, Shi Guangyu, Zhao Jianqi, 2007. A study of the radiative forcing of clouds by using a One-Dimensional Radiative-Convective Model. *Chinese J. Atmos Sci* (in Chinese), 31(3):486-494.
- Pezza A B , Rashid H A , Simmonds I . 2012. Climate links and recent extremes in antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO[J]. *Climate Dynamics*, 38(1-2):57-73.
- Rajeevan M , Srinivasan J. 2000. Net Cloud Radiative Forcing at the Top of the Atmosphere in the Asian Monsoon Region[J]. *Journal of Climate*, 13(3), 650-657.
- Ramanathan V , Cess R D , Harrison E F , et al. 1989. Cloud-Radiative Forcing and Climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment[J]. *Science*, 243(4887):57-63.
- Schneider T , Teixeira J , Bretherton C S , et al. 2017. Climate goals and computing the future of clouds[J]. *Nature Climate Change*, 7(1):3-5.
- 石广玉.1991.大气微量气体的辐射强迫与温室气候效应[J].中国科学(B辑 化学 生命科学 地学),34(7):776-784. Shi Guangyu. 1991. Radiative forcing and greenhouse effect due to the atmospheric trace gases. *Science in China (Series B)*(in Chinese), 34(7): 776-784.
- 石广玉.1992.CFCs 及其代用品的全球增温潜能[J].大气科学,16(3):345-352. Shi Guangyu. 1992. Global warming potential due to CFCs and their substitutes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 16(3):345-352.
- 石广玉. 1998.大气辐射计算的吸收系数分布模式[J].大气科学,22(4):277-294. Shi Guangyu. 1998. On correlated k distribution model in radiative calculation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 22(4): 277-294.
- 石广玉. 2007. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 239-248. Shi Guangyu. 2007. *Atmospheric Radiation* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 239-248.
- Simmons A J , Poli P , Dee D P , et al. 2014. Estimating low-frequency variability and trends in atmospheric temperature using ERA-Interim[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(679):329-353.
- Stephens G L. 2002. Radiation Profiles in Extended Water Clouds. I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78(35): 2111-2122.
- Stephens, Graeme L . 2005. Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review[J]. *Journal of Climate*, 18(2):237-273.
- Sun B , Groisman P Y , Bradley R S , et al. 2000. Temporal Changes in the Observed Relationship between Cloud Cover and Surface Air Temperature[J]. *Journal of Climate*, 13(24):4341--4357.
- Tang Q , Leng G . 2012. Damped summer warming accompanied with cloud cover increase over Eurasia from 1982 to 2009[J]. *Environmental Research Letters*, 7(1):014004.
- Warren S G, Eastman R M, Hahn C J. 2007. A survey of changes in cloud cover and cloud types over land from surface observations, 1971-96[J]. *Journal of Climate*, 20(20): 717.
- 吴春强, 周天军. 2011. CFMIP 大气环流模式模拟的东亚云辐射强迫特征[J]. 气象学报, 69(3) : 381-399. Wu Chunqiang, Zhou Tianjun. 2011. Characteristics of cloud radiative

- forcings over East Asia as simulated by the AGCMs in the CFMIP. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 69(3): 381-399.
- Wu G, Liu Y, He B, Bao Q, et al. 2012. Thermal controls on the asian summer monsoon[J]. *Scientific Reports*, 2: 404.
- Yan H, Huang J, Minnis P, et al. 2011. Comparison of ceres surface radiation fluxes with surface observations over loess plateau[J]. *Remote Seneing Of Environment*, 115(6): 1489-1500.
- Yu R, Wang B, Zhou T. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 17(13): 2702-2713.
- 于秀兰,石广玉.2001.平流层温度调整后的辐射强迫的简化计算[J].*高原气象*,20(3):271-274.
- Yu Xiulan, Shi Guangyu. 2001. Simplified calculation of radiative forcing with adjusted stratosphere temperature. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 20(3):271-274.
- 张华,荆现文.2016.气候模式中云的垂直重叠及其辐射传输问题研究进展[J].*气象学报*,74(01):103-113. Zhang Hua, Jing Xianwen. 2016. Advances in studies of cloud overlap and its radiative transfer issues in the climate models. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 74(01): 103-113.
- 张华,谢冰,刘煜,等. 2017.东亚地区云对地球辐射收支和降水变化的影响研究[J].*中国基础科学*, 19(05):18-22+28. Zhang Hua, Xie Bing, Liu Yu, et al., 2017. Study on the influence of clouds on the earth radiation budget and precipitation changes in East Asia Region. *China Basic Science (in Chinese)*, 19(05):18-22+28.
- 张华,杨冰韵,彭杰,等. 2015.东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究[J].*大气科学*,39(02):235-248. Zhang Hua, Yang Bingyun, Peng Jie, et al. 2015. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat dataset [J].*Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (2): 235–248.
- Zhang X, Liang S, Wang G, et al. 2016. Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations[J]. *Remote Sensing*, 8(3): 225.
- 赵天保, 李春香, 左志燕. 2016.基于CMIP5多模式评估人为和自然因素外强迫在中国区域气候变化中的相对贡献[J]. *中国科学:地球科学*, 46(2): 237–252. Zhao Tianbao, Li Chunxiang, Zuo Zhiyan. 2016. Contributions of anthropogenic and external natural forcings to climate changes over China based on CMIP5 model simulations. *Sci China Earth Sci(in Chinese)*, 59: 503–517.
- 周喜讯,张华,荆现文. 2016.中国地区云量和云光学厚度的分布与变化趋势[J].*大气与环境光学学报*,11(01):1-13. Zhou Xixun, Zhang Hua, Jing Xianwen, 2016. Distribution and variation trends of cloud amount and optical thickness over China. *J Atmos Environ Opt (in Chinese)*, 11(1):1-13.