

云南区域夏季风雨季爆发前后大气热源和云量特征

郭珊珊¹ 李剑东² 袁俊鹏³ 冯涛³

1 黑龙江省鹤岗市气象局，鹤岗 154107

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029

3 云南大学地球科学学院大气科学系，昆明 650500

摘要 本研究应用 2001–2020 年 ERA5 再分析的气象场及卫星反演的降水和云量资料，研究了云南区域夏季风雨季爆发前后大气热源和云量的气候特征。研究结果表明：（1）云南区域的大气热源和云量会受夏季风环流的强烈影响，有着明显的逐月变化。6 月受来自孟加拉湾东部的西南气流水汽输送影响，云南季风雨季爆发，大气总热源（特别是潜热）和云量较 4-5 月明显增强，而地表感热和大气辐射冷却作用减小；（2）基于 Wang and LinHo(2002) 方法计算的 2001-2020 年期间云南夏季风雨季的平均爆发时间为第 31 候，区域大气总热源（潜热）和云量均与降水呈现出高度的时间相关性，而且云南区域大气热源和云量随夏季风雨季的时间变化呈现出与相邻的南亚热带季风区相似的单峰年变化特征；（3）云南夏季风雨季爆发时间存在明显的年际变化，雨季爆发偏早（晚）年的合成结果表明：在偏早年雨季爆发时，来自孟加拉湾东南部的低层西南气流可直达云南区域，该区域上空为辐散气流，有利于区域上升运动，云南区域大气总热源（潜热）和云量明显强于偏晚年；偏晚年同时段的孟加拉湾南支槽偏弱，西太平洋副高位置明显偏西，不利于云南区域上升运动和降水。在雨季盛期，偏早和偏晚年的区域降水率接近，偏晚年的区域大气总热源（潜热）和高云量值略高于偏早年。

关键词 云南 夏季风雨季 大气热源 云量

文章编号 2022105B

文献标识码 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2211.22105

收稿日期 2022-06-26；网络预出版日期

作者简介 郭珊珊，女，1999 年出生，云南大学本科，主要从事区域降水和大气辐射收支研究。E-mail: 945060503@qq.com

通讯作者 李剑东，E-mail: lijd@mail.iap.ac.cn

资助项目 科技部重点研发课题 2017YFA0603502、自然基金面上项目 41875109、41975109 和 42275026

Funded by Key Research and Development Project of Ministry of Science and Technology (Grant 2017YFA0603502), Nature Foundation Program (Grant 41875109, 41975109, 42275026)

Characteristics of Atmospheric Heat Source and Cloud Amount over Yunnan before and after Summer Monsoon Rain Onset

GUO Shanshan¹, LI Jiandong², YUAN Junpeng³, FENG Tao³

¹ Hegang Meteorological Bureau, Hegang 154107

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Department of Atmospheric Sciences, School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500

Abstract This study investigates the climatological characteristics of atmospheric heat source and cloud amount over Yunnan before and after summer monsoon rain onset using ERA5 reanalysis and satellite-retrieved precipitation and cloud amount data during 2001-2020. The results show that: (1) atmospheric heat source and cloud amount over Yunnan are strongly affected by the summer monsoon circulation and exhibit significant monthly changes. In June, due to the transport of water vapor by the southwesterly from the eastern Bay of Bengal, Yunnan summer monsoon rain erupts. After the summer monsoon rain onset, regional atmospheric heat source (especially latent heat) and cloud amount increase significantly relative to those in April-May, while surface sensible heat and atmospheric radiative cooling decrease. (2) Based on the method by Wang and LinHo (2002), the average onset time of the summer monsoon rain over Yunnan is approximately pentad 31 during 2001-2020. The regional atmospheric heat source (latent heat) and cloud amount correlate well with the total precipitation rate. The changes in the atmospheric heat source and cloud amount with the summer monsoon rain over Yunnan show similar annual variations as that over the adjacent South tropical monsoon region, with a single peak structure. (3) The onset time of Yunnan summer monsoon rain exhibits obvious interannual variability. The synthetic analysis shows that in early-onset years, low-level southwesterly from the southeastern Bay of Bengal can reach the Yunnan region, where the dominant divergence flow is conducive to the ascending motion and atmospheric heat source (latent heat) and cloud amount are much higher than those in late-onset years. The southern branch trough in the Bay of Bengal is weaker and the position of the Western Pacific subtropical high extends more westward in late-onset years, which is unfavorable to ascent and precipitation over Yunnan. In the peak period of Yunnan summer monsoon rain, the precipitation rate is relatively close in early- and late-onset years, but atmospheric heat source (latent heat) and high cloud amount in late-onset years are slightly higher than those in early-onset years.

Keywords: Yunnan, Summer monsoon rain, Atmospheric heat source, Cloud amount

1 引言

云南地处云贵高原，地形地貌复杂多样，干湿季分明，其中气候平均的5-10月降水量可占全年85%左右(丁一汇和江滢, 1998; 段旭等, 2000; 陈艳等, 2006)。雨季是云南水稻和玉米等农作物以及当地植被生长的关键期，雨量多寡直接影响区域农业经济和生态系统。近年来，云南区域干旱灾害频发，不仅给当地农业生产、生态带来重大损失，而且直接影响区域水资源供给(Wang et al., 2015)。同时，云南位于亚洲季风区，强烈的夏季风环流使得该区域的降水呈现出显著的季节变化(Wang and LinHo, 2002; 陈艳等, 2015)。由于处在南亚季风和东亚季风的过渡区域，云南的雨季气候同时受两个季风子系统的影响，加之复杂的地形特征，使得该区域雨季过程前后的气候特征有一定的独特性(赵尔旭等, 2006; Cao et al., 2017)。例如，来自孟加拉湾的西南向水汽和南海的东南向水汽是云南季风雨季的重要水汽来源；云南雨季的开始主要受南亚季风影响，但也会受青藏高原或中纬度冷空气活动的影响(陈艳等, 2015; Cao et al., 2017; 晏红明等, 2018; 周建琴等, 2022)。此外，地处高原的云南区域降水和云量的年变化特征也不同于邻近的中国东部季风区(Li and Yu, 2014; Zhao et al., 2019)。因此，为深入理解云南区域夏季风雨季的气候过程，极有必要厘清该区域季风雨季爆发前后关键大气变量的变化特征。

伴随着亚洲夏季风雨季爆发，区域内的风场、水汽、降水和云量等大气变量通常会有明显的变化(Webster et al., 1998; Luo et al., 2009)。通过降水等关键大气变量可以有效地揭示季风雨季的爆发和发展过程(Wang and LinHo, 2002; Ding and Chan, 2005)。大气热源是表征大气热力状态的关键变量，是大气环流系统变化的主要热力强迫因子(Yanai et al., 1973; 黄荣辉和严邦良, 1987; Wu and Liu, 2003; 高丽和李建平, 2013)。随着亚洲夏季风雨季爆发，季风区的上升运动和降水明显增强，大气非绝热加热和地表感热的量值也会随之快速变化，全球最强的夏季大气热源即位于亚洲季风区(刘向文等, 2009; 黄青兰等, 2017)。云是影响大气热源、地-气系统辐射收支和地表温度的关键变量，通常高云对大气有辐射暖化作用，而低云有辐射冷却作用(Liou, 2004; Wild et al., 2020; 张华等, 2022)。云对气候系统的作用具有鲜明的区域特征，与上升运动、水汽等区域环流条件有极为紧密的联系(Bony et al., 2015)。亚洲夏季风区域的云量也会随季风雨季爆发出现快速的变化。例如，夏季风雨季爆发之后，南海-西太平洋热带季风区的云量明显增加，高云占比增大(Tanaka, 1992; Huang et al., 2020)；中国东部的云量(特别是对流型云量)与夏季风的推进过程接近(Guo and Zhou, 2015; 李昀英等, 2019)。在亚洲夏季风区，大气热源和云量(特别是潜热和高云)是季风雨季发展的重要指示器(Li and Yanai, 1996; Li et al., 2017)。此外，受夏季风强

烈影响的区域大气热源和云量会通过改变大气加热进而对区域大气条件乃至夏季风环流产生重要反馈作用（吴国雄等, 1999; Guo et al., 2015）。

不少工作探讨了亚洲季风区内的东亚和南亚等地区大气热源和云量随夏季风过程的变化，这些变化过程在中国东部副热带季风区、南亚和南海热带季风区的特征不尽相同（Luo et al., 2009; 胡亮等, 2011; 黄青兰等, 2017; Li et al., 2017; Huang et al., 2020）。就云南这样的亚洲季风子系统过渡区域而言，目前尚不清楚：夏季风雨季爆发前后云南区域大气热源和云量有什么样的变化特征，他们与区域降水有何种可能联系？这些特征又有何种年际变化？解答这些问题不仅有利于更好地揭示云南夏季风雨季的气候特征，还可以加深对亚洲季风交汇区域云辐射和能量收支气候过程的科学认识。针对以上研究问题，本文将依据亚洲夏季风雨季爆发的统一定义，利用卫星反演和再分析资料，考察 2001-2020 年期间云南区域夏季风雨季爆发前后区域降水、大气热源和云量的气候特征(包括月与候)及其年际变化，同时比较这些特征与邻近的南亚和中国东南部夏季风区的差异。论文的安排如下：第 2 部分介绍资料和方法；第 3 部分给出 2001-2020 年气候平均的月与候变化特征；第 4 部分给出这 20 年的年际变化特征；第 5 部分是总结与讨论。

2 资料与方法

2.1 资料

本研究采用欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析的气象场（包括风场、温度和湿度场等）、降水和大气辐射通量数据（Hersbach et al., 2020），取其 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 水平分辨率结果。日平均降水资料取自 2000 年 6 月至今的全球降水观测计划（GPM）（Skofronick-Jackson et al., 2017），水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ；与其他卫星降水产品相比，GPM 降水资料具有更高的精度、更大的覆盖范围和更高的时空分辨率，能够更加精确地捕捉对中高纬度地区和高原地区具有重要意义的微量降水和固态降水（唐国强等, 2015）。云量数据取自 2000 年 3 月至今的 NASA 大气顶云与地球的辐射能量系统（CERES），包括日平均的高云量和总云量资料（Loeb et al., 2018），其中高云定义为 300hPa 以上云量，水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。高云很大程度上反映亚洲夏季风期间的强对流活动（Li et al., 2017）。云南大部属于高原地形，存在相当数量的中低云（李昀英等, 2003）；依据等压面定义的 CERES 中低云（特别是 700hpa 以下低云）资料并不适用于云南大部；因此，本研究只采用其总云量和高云量数据。本研究取上述资料 2001-2020 年作为近 20 年的结果。云南区域范围如图 1 中黑色边界线所示；依据云南省边界的经纬度，我们对上述气象场、降水和云量数据进行双线性插值计算，获得这些变量在云南

省区域内的平均值。

2.2 方法

本研究的大气热源 (E) 根据如下公式 (王美蓉等, 2019; 姚秀萍等, 2019) 计算:

$$E = SHF + LH + NRF \quad (1)$$

公式 (1) 中, SHF (surface sensible heat flux) 是地表感热通量, LH (latent heat released by precipitation condensation) 是降水凝结释放的潜热, NRF (net radiation flux of air column) 是大气柱的净辐射通量。

$$LH = L\rho P_r \quad (2)$$

公式 (2) 中, L 是凝结潜热系数, 数值为 $2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$; ρ 是水的密度, 取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$; P_r 为降水量率, 单位是 m s^{-1} 。

$$NRF = R_\infty - R_0 = S_\infty - S_0 - F_0 - F_\infty \quad (3)$$

公式 (3) 中, R_∞ 和 R_0 分别为大气层顶和地表的净辐射通量, S 和 F 分别为短波和长波辐射通量, 下标 ∞ 和 0 则为大气层顶和地表。为保证物理量的一致性, 本研究均采用 ERA5 再分析资料计算上述大气热源项。

亚洲夏季雨季爆发可以用区域平均雨量的逐候 (5 日) 变化来有效地表征 (Wang and LinHo, 2002)。本研究是针对云南区域夏季风雨季的气候研究, 基于 GPM 逐日降水资料, 主要依据 Wang and LinHo (2002) 方法来判断云南区域夏季风雨季的爆发时间。该方法定义如下: 先对某年的日平均降水作候平均, 之后用候平均降水量率减去该年 1 月平均降水量率, 若某候降水量率大于 5 mm d^{-1} , 则该候被定义为当年的夏季风雨季爆发候。Wang and LinHo (2002) 方法是基于全球卫星反演的格点降水资料进行的, 被广泛用于亚洲季风区的降水和环流有关的气候分析。考虑到雨季爆发的稳定性和连续性, 本研究结合 Wang et al. (2004) 和陈艳等 (2006) 的方法, 对雨季爆发候作进一步限定: 爆发候及其后的连续 3 候须有 2 候相对该年 1 月份平均降水量率超过 5 mm d^{-1} , 同时这 4 候相对 1 月份的降水量之和要超过 15 mm d^{-1} 。满足上述条件的候即作为云南夏季风雨季爆发候。

3 气候态结果

3.1 4-7 月气候平均分布

就气候平均而言, 亚洲夏季风很多区域的雨季通常在 5-6 月开始 (Wang and LinHo, 2002; Ding and Chan, 2005)。为此, 这里针对近 20 年 (2001-2020) 的 4-7 月, 考察云南及周边地区大气环流、大气热源和云量的气候态空间分布, 分析这些变量随夏季风雨季的变化。

图 1 是 2001-2020 年 4-7 月气候平均的高低空风场和降水分布, 图 2 是对应

的大气总热源和云量。4月，陆地区域（包括云南）高层200hPa受强西风气流控制，印度半岛、北印度洋、南海和云南区域500hPa以下沉运动为主，低层850hPa为弱的偏西气流。4月上述区域降水量不大，其中云南大部降水量不到 2 mm d^{-1} ，仍处于干季；此时云南大部分区域大气热源为弱的正值（ $50\text{-}100 \text{ W m}^{-2}$ ），其中感热的贡献很大，最大感热量超过 100 W m^{-2} ，潜热和辐射冷却的强度相当（图2和附图1）；受下沉气流影响，4月云南区域高云量不到10%（图2）。比较而言，同期中国东南部850hPa则为西南气流，以上升运动为主，处于春雨季（Tian and Yasunari, 1998; Wan and Wu, 2007），其大气总热源和云量明显高于云南、北印度洋和南海区域。

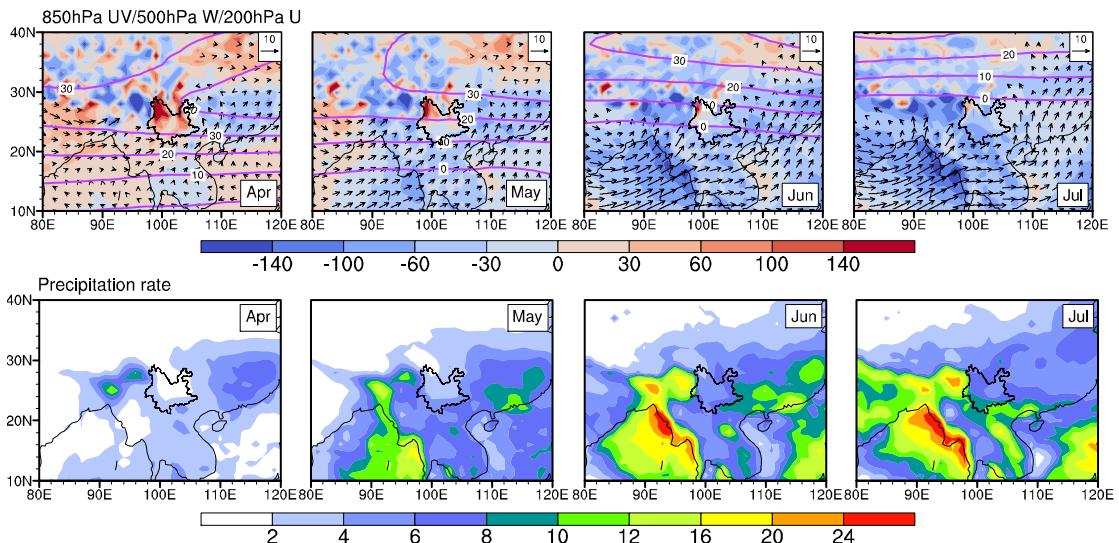


图1 2001–2020年气候平均的4–7月200hPa西风（等值线；单位： m s^{-1} ）、500hPa垂直速度场（填色；单位： hPa d^{-1} ）、850hPa风场（箭头；单位： m s^{-1} ）和总降速率（填色；单位： mm d^{-1} ）。云南省界用黑色实线标出，下文相同；这里地表气压低于850hPa的风场不显示

Fig. 1 Climatological April-July mean 200hPa westerly (contour; units: m s^{-1}), 500hPa vertical velocity field (shading; units: hPa d^{-1}), 850hPa wind (vector; units: m s^{-1}), and total precipitation rate (shading; units: mm d^{-1}) during 2001-2020. The Yunnan domain is marked with solid black line, the same as below. Wind fields with surface pressure below 850hPa are not shown

5月，上述区域高层西风开始减弱，200hPa西风急流中心位置北退和西移，云南区域位于西风急流南侧；同时孟加拉湾南部、中南半岛、南海和中国东南部850hPa西南风和500hPa上升运动明显增强，云南中部和南部由之前的下沉运动转为上升运动。5月亚洲夏季风雨季已在孟加拉湾南部至中南半岛西部之间的安达曼海爆发，降水中心位置强度超过 12 mm d^{-1} ，同时中国华南前汛期降水也已开始。受增强的西南气流水汽输送影响，5月云南降水量较4月增大，大气总热源、潜热（图1-2和附图1）、总云量和高云量（图2）均较之前有所增加，感热减小，其中总云量增至70%左右。5月云南区域的降水、大气总热源和云量的

强度弱于南亚和中国东南部。6月，孟加拉湾夏季风雨季爆发，亚洲季风区高层200hPa西风进一步减弱和北退，500hPa垂直速度在云南大部分地区转为负值，同时孟加拉湾南部至中国东部大气低层850hPa的西南气流持续增强，由此带来更为充沛的水汽。此时云南大部降水率超过 4 mm d^{-1} ，其东部和南部超过 6 mm d^{-1} ，进入夏季风雨季。受此影响，上述区域的高云量增大，大气潜热超过其他热源项，主导了亚洲季风区的大气热源，而区域内（包括云南）的感热明显减弱。至7月，孟加拉湾东部附近的降水量继续增大，成为亚洲季风区的降水中心，自该区域向东北至云南区域的水汽输送维持，云南大部的降水量也较6月进一步增多，这些区域的大气总热源（特别是潜热）和高云量也随之增大。比较而言，7月中国东部降水带北移至华北且降水强度较6月减弱；此时云南区域总云量大于中国东部，高云量两者相近，从空间分布来看主要是受孟加拉湾热带季风区的影响。

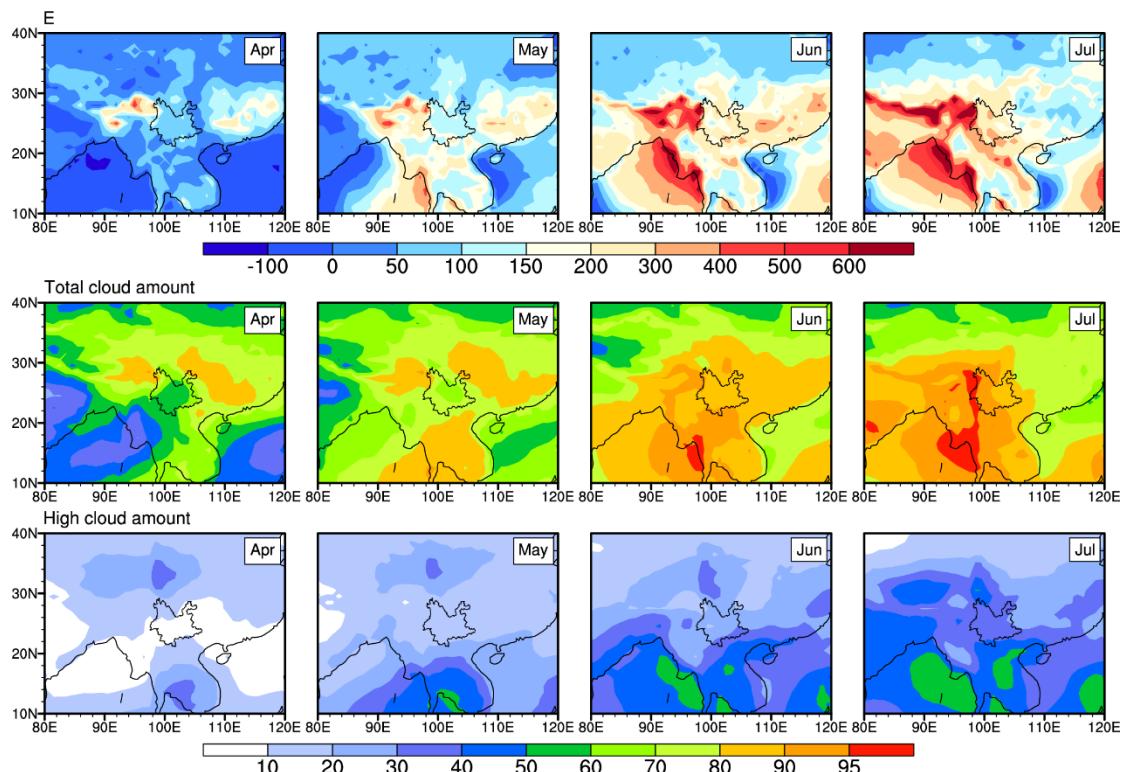


图2 2001-2020年气候平均4-7月大气总热源（单位： W m^{-2} ）、总云量（单位：%）和高云量（单位：%）

Fig. 2 Climatological April-July mean atmospheric heat source (units: W m^{-2}), total cloud amount (units: %), and high cloud amount (units: %) during 2001-2020

由以上结果可见，4-7月亚洲季风区域内大气热源（特别是潜热）、总云量和高云量不断增大。自5月开始后，随着云南区域降水量增加和大气深对流增多，潜热成为大气热源的主导项，高云量明显增大；降水和云量增多的同时也会引起地表降温，地表感热随之不断减小（Wu et al., 2013）。值得注意的是，4-5月份，

云南区域降水量和云量明显低于中国东部（特别是东南部），而地表感热通量偏高。这种差别的原因在于，中国东南部4-5月有大量中低云量的存在，有持续性的春雨，5月中下旬还有华南前汛期降水影响（Wan and Wu, 2007; Zhao et al., 2007; Li et al., 2019）。6-7月，随着南亚（特别是孟加拉湾附近）季风降水的增强，云南区域大气热源的强度和云量开始与中国东部相近，在7月其大气总热源和总云量已高于中国东部多数地方。就强度和空间分布而言，云南区域降水、大气热源和云量的月变化特征有别于中国东部副热带季风区和南亚热带季风区。

3.2 候变化特征

夏季风雨季的爆发过程具有典型的次季节特征，通常用候（5日）平均结果来描述季风区环流和降水等变化过程（Zhao et al., 2007; LinHo et al., 2008）。为此，本节分析2001-2020气候平均的降水率、环流场、大气热源和云量候变化特征，重点考察云南夏季风雨季爆发前后这些变量的差异。

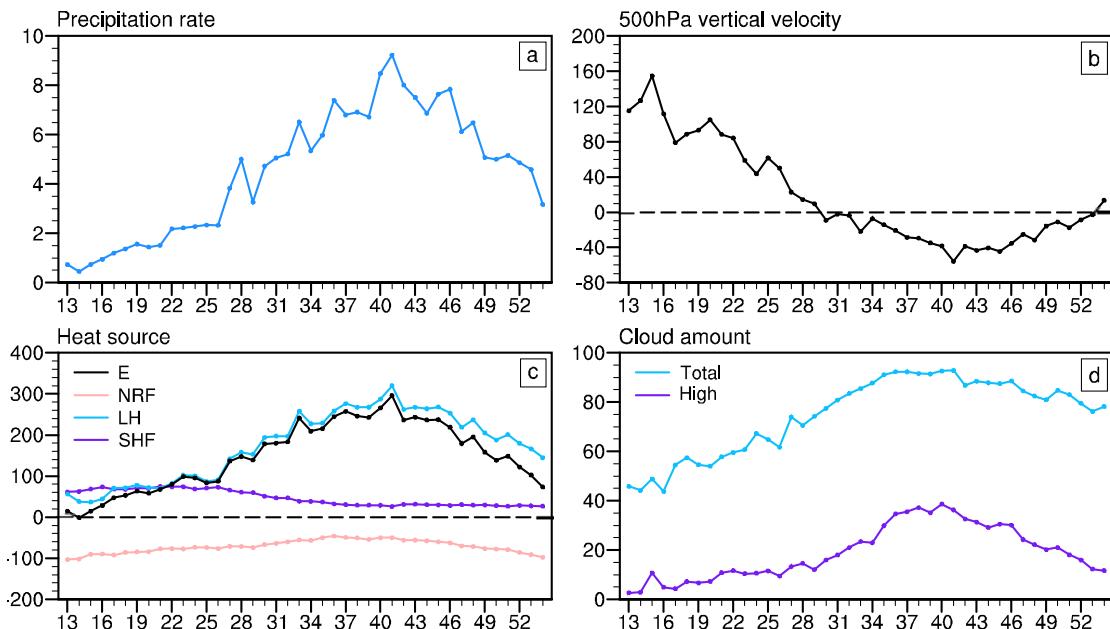


图3 2001-2020年气候平均(a)总降水率(单位: mm d^{-1})、(b)500hPa垂直速度(单位: hPa d^{-1})、(c)大气热源(E)及其分量项(单位: W m^{-2})和(d)高云量和总云量(单位: %)逐候时间序列图。(c)中SHF、LH和NRF分别表示地表感热通量、降水凝结释放的潜热和大气柱的净辐射通量; X轴刻度表示候数

Fig. 3 Climatological pentad mean (a) total precipitation rate (units: mm d^{-1}), (b) 500hPa vertical velocity (units: hPa d^{-1}), (c) atmospheric heat source (E; units: W m^{-2}) and its component terms, (d) total and high cloud amounts (units: %) averaged Yunnan province during 2001-2020. SHF, LH, and NRF denote surface sensible heat flux, latent heat released by precipitation condensation, net radiation flux of air column, respectively; The X-axis scale denotes the pentad number

图3是2001-2020年云南区域气候平均的总降水率、500hPa垂直速度、大气热源和云量的逐候（13-54候）时间序列。这里，500hPa垂直速度常用来表示整

层大气垂直运动，在夏季可以表征季风区的深对流活动。计算所得 2001-2020 年云南区域气候平均的夏季风雨季爆发时间为第 31 候（30.9 候），这与 Wang and LinHo (2002) 的结果接近。由图 3a 可见，云南区域降水率的 13-41 候呈现出振荡增加的变化趋势，第 28 候出现第 1 个降水高值 (5.0 mm d^{-1})；此时孟加拉湾东侧至中国华南有明显的 850hPa 西南气流（图 1），降水主要出现于云南南部。第 29 候降水明显减弱，之后重新增加，至第 31 候达到 5.1 mm d^{-1} ；此后降水率继续增强，在第 41 候到达最高值 (9.2 mm d^{-1})，而后开始呈下降趋势。云南夏季风降水的增加与大气整层上升运动紧密联系；500hPa 垂直速度在 30 候由正转负，开始出现整层上升运动（深对流），第 31 候起上升运动逐渐增强，这与云南夏季风雨季的爆发时间相近。这表明云南夏季风雨季降水的开始及之后的不断增加对应着深对流的明显增强，例如第 33 和 41 候（图 3a-b）。随着降水增加，大气总热源（特别是潜热）及高云量随之增大。从第 27 候开始，潜热超过其他热源成为大气热源的主导项，感热则随着降水和总云量的增加开始减弱（图 3c）。值得注意的是，高云量增大的同时其长波辐射暖化也会增大，从而使得大气净辐射冷却作用减弱（图 3c）。500hPa 垂直速度、大气总热源（潜热）及总云量都是在第 41 候达到最大，其量值分别为 -55.8 hPa d^{-1} 、 $295.7 (319.9) \text{ W m}^{-2}$ 和 92.8%，第 41 候之后这些变量的强度均开始减小，他们和总降水率的时间相关系数分别为 -0.95、0.97 (0.99) 和 0.94，都与区域降水的时间变化高度相关。

为了进一步定量理解大气热源和云量在云南雨季爆发不同时段的差异，依据 2001-2020 年云南区域平均的夏季风雨季过程，选取 3 个阶段，其中 26-27 候作为夏季风雨季爆发前阶段，33-34 候为雨季刚爆发后阶段，41-42 候为雨季盛期阶段。表 1 给出了这 3 个阶段云南区域平均的大气垂直运动、降水、大气热源和云量，附图 2 是对应变量的地理分布。雨季爆发前（26-27 候）云南区域大部仍为明显的下沉运动，来自孟加拉湾的西南向和南海的南向 850hPa 气流分别达到云南的南侧和东侧，由此带来的水汽会引起云南南部和东部边缘地方的降水；云南区域的高云量在 10% 左右，深对流非常弱（附图 2）。此阶段为 5 月上中旬，云南及周边区域的环流、大气热源和云量特征分布与 4 月份相近。相比雨季爆发前，季风雨季刚爆发后（33-34 候）到达云南区域的低层西南气流明显增强，区域大气垂直运动由下沉变为上升（附图 2），500hPa 垂直速度从 36.3 hPa d^{-1} 变为 -14.6 hPa d^{-1} ，降水量从 3.1 增至 5.9 mm d^{-1} ；随着上升运动的明显增强，总云量和高云量在雨季刚爆发后快速增加，其中高云量增大 103.5%（表 1）。雨季刚爆发后的大气热源由 112.0 W m^{-2} 增至 225.0 W m^{-2} ，增量项主要来自同期明显增加的大气潜热（从 116.4 W m^{-2} 增至 242.4 W m^{-2} ）。此外，感热和大气辐射冷却作用的强度相比雨季爆发前是减弱的。至雨季盛期阶段（41-42 候），整层大气

上升运动进一步增至 -47.3 hPa d^{-1} ，深对流加强，降水率、大气热源和高云量也随之相应地增大（表 1 和附图 2）。由附图 2 可见，云南夏季风雨季盛期处于 7 月中下旬，此时南亚季风雨带北退至北印度，而中国东部正值华北雨季，降水区域的大气上升运动、总热源和高云量的强度均弱于云南及南亚区域。

表 1 云南区域 500hPa 垂直速度、总降水率、大气热源和云量等变量在雨季爆发进程 3 个阶段的区域平均值。表中括号内数值是相较于 26-27 候的变化率

Table 1 The mean values of 500hPa vertical velocity, total precipitation rate, atmospheric heat source and cloud amount averaged over Yunnan in three periods of summer monsoon rain onset. The values in brackets are the change rates in pentad 33-34 (41-42) compared with pentad 26-27

	26-27 候	33-34 候	41-42 候
500hPa 垂直速度 (hPa d^{-1})	36.3	-14.6 (-140.2%)	-47.3 (-230.3%)
总降水率 (mm d^{-1})	3.1	5.9 (90.3%)	8.6 (177.4%)
感热 (W m^{-2})	69.3	38.5 (-44.4%)	28.3 (-59.2%)
潜热 (W m^{-2})	116.4	242.4 (108.2%)	290.9 (149.9%)
大气净辐射通量 (W m^{-2})	-73.7	-55.9 (-24.2%)	-53.2 (-27.8%)
大气总热源 (W m^{-2})	112.0	225.0 (100.9%)	266.0 (137.5%)
总云量 (%)	67.8	86.6 (27.7%)	89.8 (32.4%)
高云量 (%)	11.4	23.2 (103.5%)	34.4 (210.8%)

为了考察云南与周边季风区的差异，这里我们选取与云南区域相邻的孟加拉湾附近 ($15\text{-}25^\circ\text{N}$, $80\text{-}96^\circ\text{E}$) 及中国东南部区域 ($22\text{-}32^\circ\text{N}$, $108\text{-}122^\circ\text{E}$)，分别作为南亚热带和中国东部副热带季风子区域，考察三个区域降水、大气热源和云量的候变化特征及区域之间的差异。由图 4 可见，在三个区域中，南亚的降水和大气热源具有最大的年变化幅度，其峰值强度也最大（图 4a-b）。5 月中旬之前是云南和南亚区域的干季，降水凝结释放潜热不大，云南区域的地表感热强于南亚和中国东南部；此时段，南亚区域的大气辐射冷却强于其他 2 个地区，对应的大气总热源 5 月（第 25 候）前为负值，而云南和中国东南部的大气总热源为正值（图 4a, b, d, e, f）。6-8 月是南亚降水和大气热源高值期，云南区域在 7 月中下旬达到峰值（图 4a-b）。与前 2 个区域不同的是，中国东南部 3-5 月中旬有春季降水，降水率和大气潜热高于同期的云南和南亚区域，至 6 月中旬达到降水峰值，之后降水开始减弱（图 4a,d）。云南区域的降水与南亚及中国东南部的时间相关系数分别为 0.95 和 0.59，对应的大气热源相关系数分别为 0.92 和 0.67。这显示出云南区域降水及大气总热源与临近的南亚区域更为接近。就总云量而言，中国东南部 3-5 月总云量大于云南和南亚，6 月夏季风雨季峰值后开始减小；云南和南亚的总云量变化区域更为接近，3-7 月呈不断增加趋势，两者的时间相关系数高达 0.97（图 4c）。三个区域高云量的逐候变化特征相近，3-7 月下旬均呈

增加趋势，这与同期大气温度升高有关。

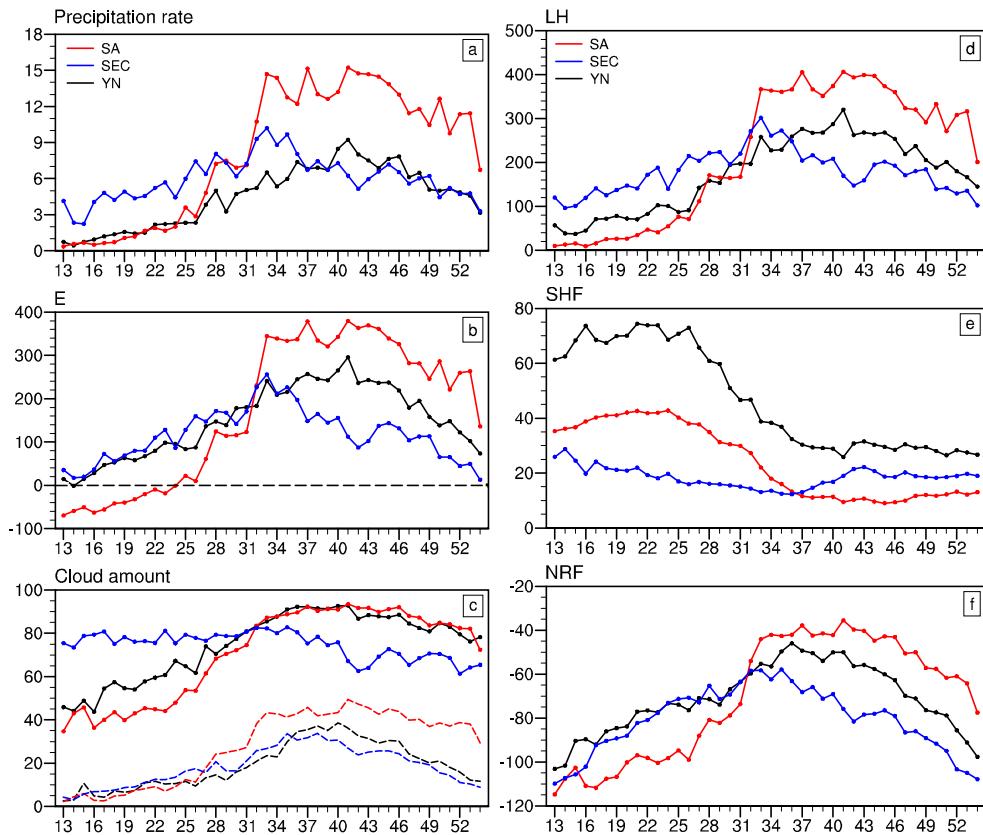


图 4 2001-2020 年的区域气候平均 (a) 总降水量 (mm d^{-1})、(b) 大气总热源 (E; 单位: W m^{-2})、(c) 总和高云量 (%)、(d) 潜热 (LH; 单位: W m^{-2})、(e) 感热 (SHF; 单位: W m^{-2}) 和 (f) 大气净辐射通量 (NRF; 单位: W m^{-2}) 的逐候时间变化。SA、SEC 和 YN 分别表示南亚 (15-25°N, 80-96°E)、中国东南部 (22-32°N, 108-122°E) 和云南区域; (c) 中实线和虚线分别表示总云量和高云量; X 轴刻度表示候数

Fig. 4 Climatological pentad mean (a) total precipitation rate (units: mm d^{-1}), (b) atmospheric heat source (E; units: W m^{-2}), (c) high and total cloud amounts (units: %), (d) latent heat released by precipitation condensation (LH; units: W m^{-2}), (e) surface sensible heat flux (SHF; units: W m^{-2}), and (f) net radiation flux of air column (NRF; units: W m^{-2}) averaged over three regions during 2001-2020. SA, SEC, and YN denote South Asia (15-25°N, 80-96°E), Southeast China (22-32°N, 108-122°E), and Yunnan Province, (c) The solid and dashed lines indicate total cloud amount and high cloud amount, respectively. The X-axis scale denotes the pentad number

上述结果表明，尽管峰值时间和强度有所差异，就年变化时间特征而言，云南区域降水、大气热源和云量变化特征更接近南亚季风区，全年呈现出单峰结构。3个区域的差异主要源于他们不同的地理位置、地形和海陆分布等。中国东南部位于青藏高原下游，邻接太平洋，高原大地形的热动力强迫及海陆纬向热力对比使其存在大量中低云和相当强度的春季降水，使其年变化特征明显不同于南亚和云南区域 (Yu et al., 2001; Li et al., 2017, 2019)。在 5-8 月，云南在地理位置上更易受南亚季风区季风环流（特别是低层西南风和水汽输送）的影响，不过其高海拔和复杂地形削弱了夏季强对流的北进，降水和云量强度弱于南亚，但在 7-8

月要高于中国东南部。

4 年际变化

已有研究表明亚洲夏季风雨季（包括云南季风雨季）的爆发时间具有明显的年际变化（Wang et al., 2004; 陈艳等, 2006），云南区域的大气热源和云量也可能呈现出明显的年际变化。这里将通过对比分析云南区域雨季爆发偏早年和偏晚年的大气热源和云量候变化来分析其年际变化特征。

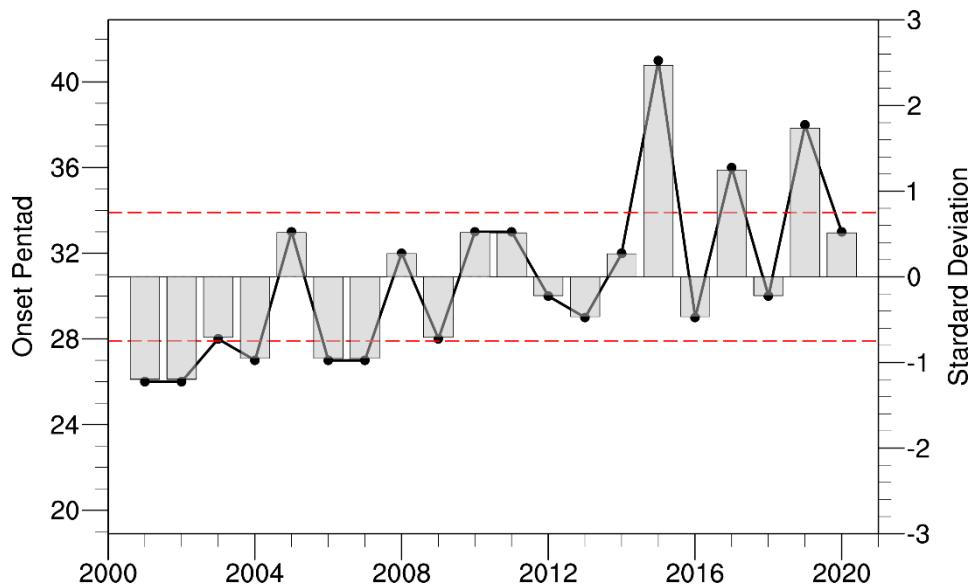


图 5 2001-2020 年云南夏季风雨季的爆发候（黑色实心点线）及其标准差（灰色柱状图）。这里 Y 轴左侧坐标是爆发候；Y 轴右侧坐标是相对于 2001-2020 年平均爆发候的标准差（即用每年的爆发候减去这 20 年平均爆发候之后再除以这 20 年爆发候序列的标准方差）。红色虚线是 0.75 个标准差

Fig. 5 The onset pentad (black solid line) of summer monsoon rain in Yunnan and its standard deviation (gray bar) during 2001-2020. The left and right sides at Y axis are the onset pentad and its standardized deviation, respectively. Here, the standard deviation is the bias between the onset pentad in each year minus 2001-2020 mean onset pentad divided by the standard variance of 2001-2020 onset pentads. the red dotted line is 0.75 standard deviation

图 5 是 2001-2020 年云南季风雨季爆发时间(候)的年际变化。这 20 年期间，云南夏季风雨季最早在第 26 候（2001 和 2002 年），最晚在第 41 候（2015 年），平均爆发时间是在 30.9 候。2009 年以前雨季的爆发时间均偏早，之后有推迟趋势。上述雨季爆发候年际变化标准化后得到的一元线性回归方程为 $y=0.11x-219.14$ ，相当于每 10 年滞后 1.1 候（通过 99% 的显著性检验）。这与近年来云南区域干旱频发的气候特征相符（Wang et al., 2022）。如图 5 所示，对 2001-2020 云南夏季风雨季爆发候进行标准差计算，取 0.75 标准差时，云南雨季偏早年为 2001、2002、2004、2006 和 2007 年，平均的夏季风雨季爆发候为 26.6

候；偏晚年为 2015、2017 和 2019 年，平均的雨季爆发候是 38.3 候。本文取上述偏早和偏晚年求算数平均，通过合成分析考察云南夏季风雨季早晚年大气热源和云量的区域特征。

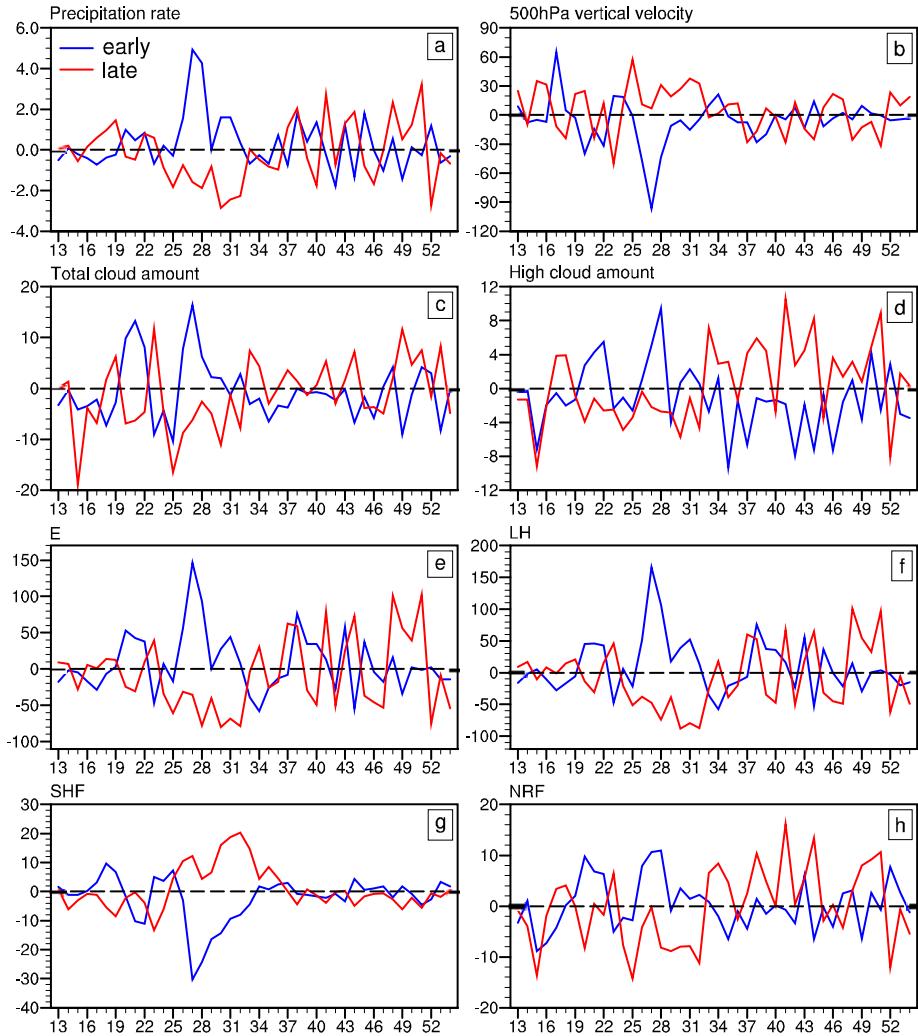


图 6 2001-2020 年云南夏季风雨季爆发偏早年和偏晚年的 (a) 总降水量 (单位: mm d^{-1})、(b) 500hPa 垂直速度 (单位: hPa d^{-1})、(c) 总云量 (单位: %)、(d) 高云量 (单位: %)、(e) 大气总热源 (单位: W m^{-2})、(f) 潜热 (单位: W m^{-2})、(g) 感热 (单位: W m^{-2}) 和 (h) 大气净辐射通量 (单位: W m^{-2}) 相对于这 20 年平均结果偏差值的逐候变化。X 轴刻度表示候数

Fig. 6 Climatological pentad mean (a) total precipitation rate (units: mm d^{-1}), (b) 500hPa vertical velocity (units: hPa d^{-1}), (c) total cloud amount (units: %), (d) high cloud amount (units: %), (e) atmospheric heat source (E; units: W m^{-2}), (f) latent heat released by precipitation condensation (LH; units: W m^{-2}), (g) surface sensible heat flux (SHF; units: W m^{-2}), and (h) net radiation flux of air column (NRF; units: W m^{-2}) averaged over three regions in the early and late years during 2001-2020 relative to 2001-2020 mean counterparts. The X-axis scale denotes the pentad

图 6 给出了 2001-2020 年云南夏季风雨季爆发偏早和偏晚年的降水量、500hPa 垂直速度、云量和大气热源相对于这 20 年平均结果偏差值的逐候变化。由图 6 可见，与偏晚年相比，在雨季爆发偏早年 5 月和 6 月上旬的区域平均降水量、上

升运动、云量、大气总热源和潜热明显偏强；其中 26-31 候，偏早年的降水和上升运动也高于气候平均结果，所对应的大气潜热和云量也更大。由 3 个阶段的空间分布结果可见，在 26-27 候，偏早年的夏季风雨季已经在中南半岛西部（安达曼海）附近海域爆发，孟加拉湾区域出现一个低层气旋型环流，850hPa 低层西南风气流由此向北输送至云南西南侧，这意味着云南区域更早地受到南亚夏季风的影响（图 7a）。相较于偏早年，偏晚年在 26-27 候的西太平洋副高位置偏西，200hPa 西风急流中心也偏南和偏西，低层气流沿着副高西南侧伸至中国东南部，此时孟加拉湾附近的南支槽明显弱于偏早年，不利于水汽向东北方向输送，云南大部 200hPa 高空为辐合气流，以下沉气流为主，仍处于干季，大气总热源和云量都弱于偏早年（图 7a-c, 8a-c；表 2）。云南夏季风雨季爆发偏早年的环流形势对应着偏强的中国东南部降水，这与陈艳等人（2006）的结果类似。在第 31 候之后，偏早和偏晚年的降水率均为不断增强趋势，两者差异不大（图 6a；表 2）。偏早年第 40 候达到降水峰值，偏晚年峰值时间偏后，为第 41 候，但其降水峰值强于偏早年（附图 3）。在 41-42 候，云南夏季风雨季爆发偏晚年孟加拉湾东部的深对流活动和向云南西南侧输送的低层西南气流明显强于偏早年，西太平洋副高偏西，中国东南部陆地区域高空为辐散气流（图 7d-f, 8d-f）；相较于偏早年，偏晚年同期云南区域的上升运动偏强，降水、潜热和高云量均大于偏早年（表 2）。此外，极端偏早（2002）和偏晚年（2015）亚洲季风环流分布型与上述合成分析的结果相近。由此可见，云南夏季风雨季爆发偏早（晚）年均对应着更强的南亚（特别是安达曼海及孟加拉湾附近区域）夏季风，该区域大气热源和云量的年际差异也主要出现在夏季风雨季爆发期间，而在随后的雨季盛期差别较小。上述结果说明云南区域大气热源和云量的年际变化很大程度上受其夏季风雨季爆发时间年际变化的影响。2001-2020 年云南区域夏季风雨季爆发时间的推迟趋势，主要与孟加拉湾附近的南支槽趋弱和由此向云南区域输送的水汽减少有关。这种年际变化趋势与印度洋海温的年代际变化有关（Moon and Ha, 2019; Ding and Gao, 2020），全球变暖也可能有一定贡献（Wang et al., 2022）。

表 2 云南夏季风雨季偏早和偏晚年的 500hPa 垂直速度、总降水率、大气热源和云量等变量在雨季三个阶段的区域平均值

Table 2 The mean value of 500hPa vertical velocity, total precipitation rate, atmospheric heat source and cloud amount in early and late years rains stage in Yunnan

	26-27 候		33-34 候		41-42 候	
	偏早年	偏晚年	偏早年	偏晚年	偏早年	偏晚年
500hPa 垂直速度 (hPa d^{-1})	-35.4	45.1	1.0	-15.0	-46.0	-54.8
总降水率 (mm d^{-1})	6.3	1.9	5.5	5.7	7.6	9.6
感热 (W m^{-2})	52.6	80.8	37.3	48.0	26.8	26.3
潜热 (W m^{-2})	225.4	73.8	195.9	238.6	287.5	299.0

大气净辐射通量 (W m^{-2})	-64.4	-75.9	-56.5	-48.5	-55.2	-45.0
总大气热源 (W m^{-2})	213.6	78.6	176.6	238.1	259.0	280.3
总云量 (%)	80.0	60.3	84.0	92.5	88.1	91.0
高云量 (%)	14.4	10.1	22.4	28.2	29.5	41.0

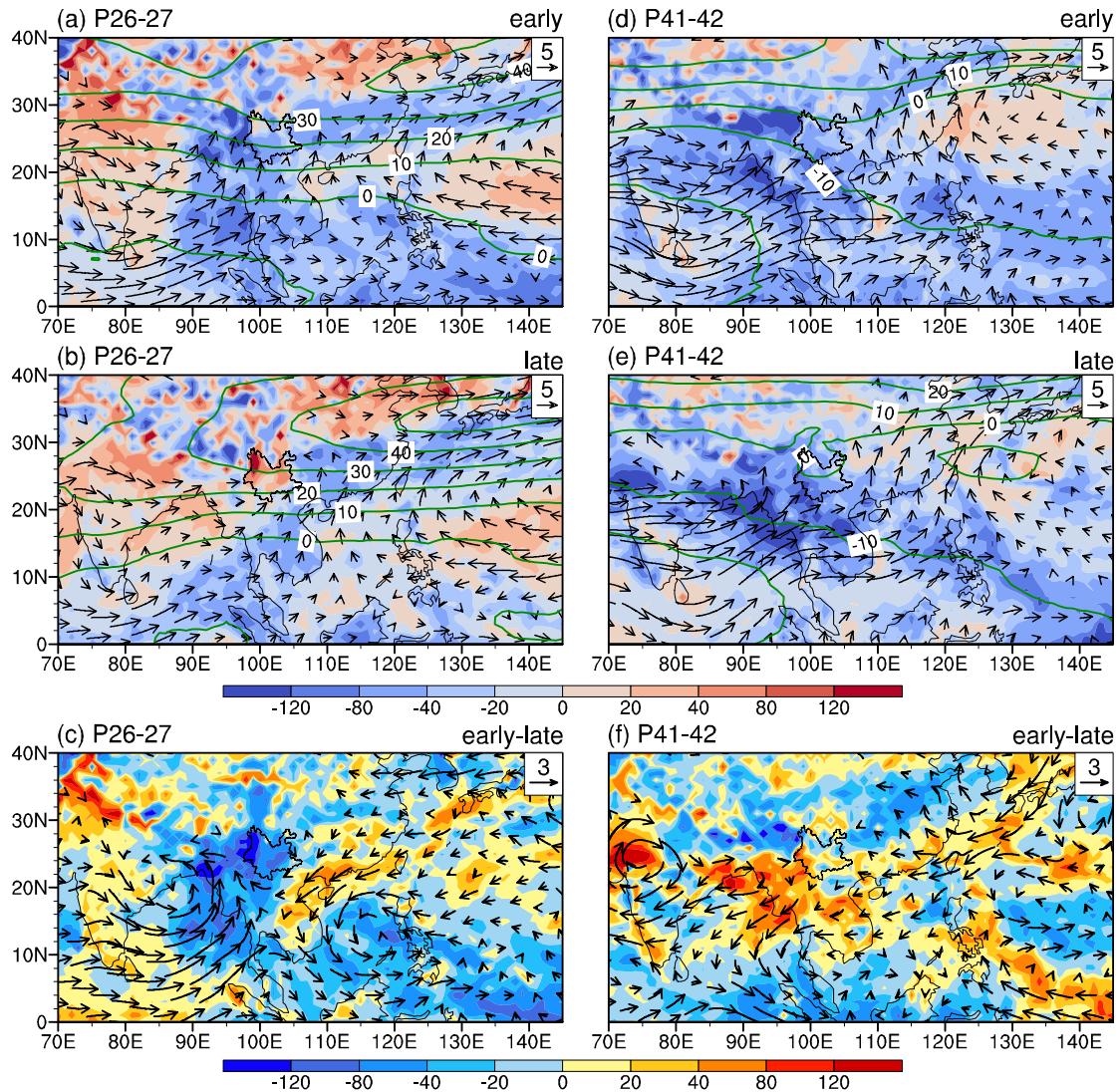


图 7 2001-2020 年云南夏季风雨季爆发 (a) 偏早年 26-27 候 200hPa 西风 (等值线; 单位: m s^{-1})、500hPa 垂直速度场 (填色; 单位: hPa d^{-1}) 和 850hPa 风场 (箭头; 单位: m s^{-1}) ; (b) 是雨季爆发偏晚年 26-27 候的结果; (c) 是 26-27 候偏早年和偏晚年之差。 (d) 、 (e) 和 (f) 分别是 41-42 候偏早年、偏晚年及两者之差的对应结果。 (c) 和 (f) 中填色和箭头分别为 500hPa 垂直速度和 850hPa 箭头

Fig. 7 (a) Pentad 26-27 mean 200hPa westerly (contour; units: m s^{-1}), 500hPa vertical velocity field (shading; units: hPa d^{-1}), 850hPa wind (vector; units: m s^{-1}) for summer monsoon early onset years during 2001-2020 in Yunnan province. (b) is Pentad 26-27 mean results for summer monsoon rain late onset year. (c) is the difference between (a) and (b). (d)-(f) are counterparts for Pentad 41-42. In (c) and (f), the shading and contour denote 500hPa vertical velocity and 850hPa vector, respectively

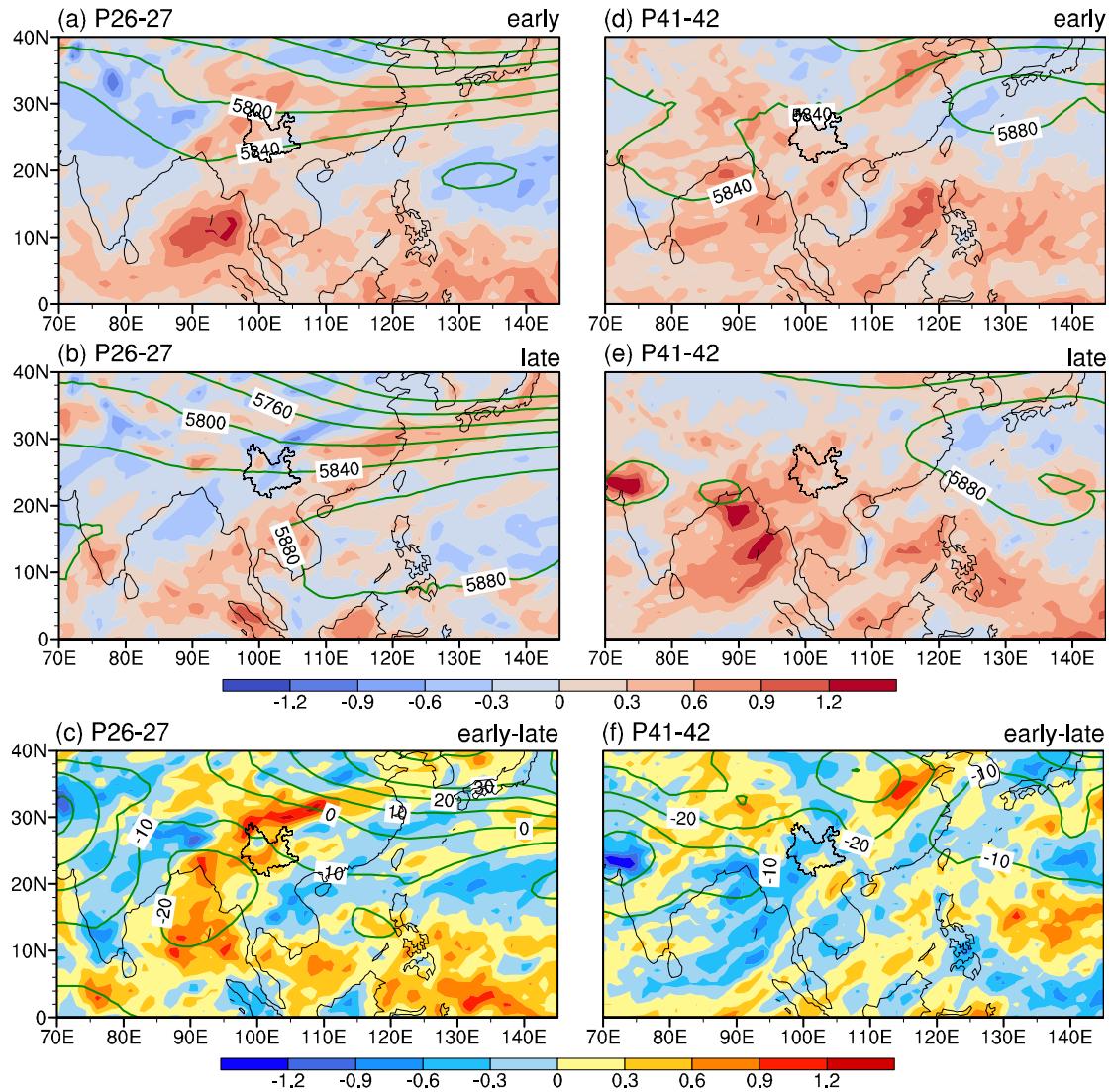


图 8 同图 7, 但为 200hPa 辐散场 (填色; 单位: 10^5 s^{-1}) 和 500hPa 位势高度 (等值线; 单位: m)

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for 200hPa divergence (shading; units: 10^5 s^{-1}) and 500hPa geopotential height (contour; units: m)

5 结论与讨论

本研究利用 2001-2020 年 ERA5 再分析气象场、GMP 降水和 CERES 卫星反演的云量资料, 研究了云南区域夏季风雨季爆发前后大气热源和云量的气候特征, 所得主要结果如下:

(1) 云南区域的大气热源和云量随夏季风雨季进程有着明显的逐月变化。在雨季爆发前的 4 月, 云南区域以下沉运动为主, 感热对大气热源贡献大, 与深对流有关的高云量仅为 10%; 5 月起, 来自安达曼海的低层西南气流开始影响云南南部, 上升运动、降水、大气热源和云量开始增大。6 月受来自孟加拉湾东部的西南气流水汽输送影响, 云南大部降水明显增大, 该区域季风雨季爆发; 与 5

月相比，6月大气热源（特别是潜热）和高云明显增强，而地表感热和大气辐射冷却作用明显减小。7月云南区域的大气热源和高云量继续较之前增强，其中高云量大于30%，潜热和高云量均超过同期中国东南部。

(2) 基于 Wang and LinHo (2002) 的方法所得 2001-2020 年期间云南区域季风雨季的平均爆发时间为第 31 候，之后该区域的上升运动、降水、大气总热源（潜热）和总云量不断增加，至第 41 候达到峰值；自 5 月中旬（约第 27 候）开始，潜热成为大气热源的主导项，而感热和大气净辐射冷却由于降水和云量的增多呈减小趋势。云南区域的大气总热源（潜热）及云量与总降水量呈现高度的时间相关，相关系数分别为 0.97 (0.99) 和 0.94。就年变化趋势而言，云南区域大气热源和云量随夏季风雨季的时间变化呈现出与南亚热带季风区相似的特征，均和降水高度相关，且年变化呈现为单峰值结构，但和中国东南部季风区的年变化特征有明显差异。

(3) 云南夏季风雨季的爆发时间存在显著的年际变化，2001-2020 年表现为弱的推迟趋势。基于 0.75 个标准差的判据，选取云南雨季爆发 5 个偏早年和 3 个偏晚年的合成分析结果表明：在偏早年云南雨季爆发时（26-27 候）来自孟加拉湾东南部的低层西南气流可直达云南区域，云南区域上空为明显的辐散气流，有利于区域上升运动和水汽汇聚，大气总热源（潜热）和云量明显强于偏晚年；同时段偏晚年的孟加拉湾南支槽偏弱，西太平洋副高位置明显偏西，不利于云南区域降水。在雨季盛期（41-42 候），偏早和偏晚年的区域降水量接近，偏晚年的区域大气总热源（潜热）和高云量值略高于偏早年。

本研究的气候平均及年际变化结果均表明云南区域的大气热源和云量受夏季风雨季的强烈影响，在雨季爆发前后有明显差异。作为亚洲季风区内的过渡地带，就年变化趋势和位相而言，云南区域的大气热源和云量的年变化特征更接近于邻近的南亚季风区，也更易受后者影响。需要注意的是，在云南这样的高原和地形复杂区，本文采用 Wang and LinHo (2002) 夏季风雨季爆发定义以及 GPM 和 CERES 卫星观测资料可能存在一些偏差，这会影响本文的部分定量结果，需要后续研究对比和完善。限于研究目标和篇幅，本文侧重利用观测资料从云辐射和能量收支角度探讨了目标区域的气候特征，在后续研究中有必要进一步借助数值模式来诊断分析云南区域大气热源和云量的季节变化及其对区域雨季进程可能的反馈作用。

参考文献 (References)

- 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响 [J].
大气科学, 30(1): 25-37. Chen Yan, Ding Yihui, Xiao Ziniu, et al. 2006. The impact of
water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan

- province in May [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(1): 25-37. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.01.03
- 陈艳, 丁一汇, 陶云, 等. 2015. 云南雨季开始期东亚副热带西风急流变化和冷空气活动 [J]. 热带气象学报, 31(5): 577-587. Chen Yan, Ding Yihui, Tao Yun, et al. 2015. The variation of East Asian subtropical westerly jet and cold air activities during Yunnan rainy season onset [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 31(5): 577-587. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2015.05.001
- Bony S, Stevens B, Frierson D, et al. 2015. Clouds, circulation and climate sensitivity [J]. Nature Geoscience, 8(4): 261-268. doi: 10.1038/ngeo2398
- Cao J, Zhang W K, Tao Y. 2017. Thermal configuration of the bay of Bengal-Tibetan Plateau region and the May precipitation anomaly in Yunnan [J]. Journal of Climate, 30(22): 9303-9319. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0802.1
- Ding Y, Chan J C L. 2005. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 89(1-4): 117-142. doi: 10.1007/s00703-005-0125-z
- Ding T, Gao H. 2020. The record-breaking extreme drought in Yunnan Province, Southwest China during spring-early summer of 2019 and possible causes [J]. Journal of Meteorological Research, 34(5): 997-1012. doi: 10.1007/s13351-020-0032-8
- 丁一汇, 江滢. 1998. 亚洲季风活动及其与中国大陆降水关系 [J]. 应用气象学报, (S1): 85-90.
- Ding Yihui, Jiang Ying. 1998. Relationship between Asian monsoon activities and the precipitation over China mainland [J]. Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese), (S1): 85-90. doi: CNKI:SUN:YYQX.0.1998-S1-010
- 段旭, 尤卫红, 郑建萌. 2000. 云南旱涝特征 [J]. 高原气象, 19 (1): 84-90. Duan Xu, You Weihong, Zheng Jianmeng. 2000. The drought and flood feature in Yunnan [J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 19 (1): 84-90. doi: <http://www.gyqx.ac.cn/CN/Y2000/V19/I1/84>
- 高丽, 李建平. 2013. 非绝热加热对大气局地扰动位能的影响和机理 [J]. 地球物理学报, 56(10): 3255-3269. Gao Li, Li Jianping. 2013. Impacts and mechanism of diabatic heating on atmospheric perturbation potential energy [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(10): 3255-3269. doi: 10.6038/cjg20131004
- Guo Z, Zhou T J. 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. doi: 10.1007/s00376-014-4070-y
- Guo Z, Zhou T J, Wang M H, et al. 2015. Impact of cloud radiative heating on East Asian summer monsoon circulation [J]. Environmental Research Letters, 10(7): 074014. doi: 10.1088/1748-9326/10/7/074014

- 胡亮, 李耀东, 杨松, 等. 2011. 东亚热带与副热带季风区对流降水和层云降水季节变化特征对比分析研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1182-1191. Hu L, Li Y D, Song Y, et al. 2011. Seasonal variability in tropical and subtropical convective and stratiform precipitation of the East Asian monsoon [J]. Science China Earth Sciences, 54, 1595. doi: 10.1007/s11430-011-4225-y
- 黄青兰, 刘伯奇, 李菲. 2017. 由冬至夏北半球副热带地区大气热源的季节转换特征及其可能机制 [J]. 大气科学, 41(5): 1010-1026. Huang Qinglan, Liu Boqi, Li Fei. 2017. Seasonal transition of atmospheric heating source in the northern hemisphere from winter to summer and its possible mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(5): 1010-1026. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16245
- 黄荣辉, 严邦良. 1987. 地形与热源强迫在亚洲夏季风形成与维持中的物理作用 [J]. 气象学报, (4): 394-407. Huang Ronghui, Yan Bangliang. 1987. The effects of topographical and thermal forcing on formation and maintenance of the summer monsoon over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (4): 394-407. doi: 10.11676/qxxb1987.052
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146 (730): 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803
- Huang M, Li J D, Zeng G, et al. 2020. Regional characteristics of cloud radiative effects before and after the South China Sea summer monsoon onset [J]. Journal of Meteorological Research, 34(6): 1167-1182. doi: 10.1007/s13351-020-0018-6
- 李昀英, 寇雄伟, 孙国荣. 2019. 对比云和降水表征的东亚夏季风活动 [J]. 大气科学, 43(2): 339-349. Li Yunying, Kou Xiongwei, Sun Guorong. 2019. Comparison of the East Asian summer monsoon activities represented by clouds and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(2): 339-349. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17285
- Li C F, Yanai M, 1996. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land sea thermal contrast [J]. Journal of Climate, 9(2): 358-375. doi: 10.1175/1520-0442(1996)0092.0.CO;2
- Li J D, Wang W-C, Dong X Q, et al. 2017. Cloud-radiation-precipitation associations over the Asian monsoon region: an observational analysis [J]. Climate Dynamics, 49(9): 3237-3255. doi: 10.1007/s00382-016-3509-5
- Li J D, Wang W-C, Mao J Y, et al. 2019. Persistent spring shortwave cloud radiative effect and the associated circulations over southeastern China [J]. Journal of Climate, 32(11): 3069-3087. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0385.1>
- Li J, Yu R, 2014. Characteristics of cold season rainfall over the Yungui Plateau [J]. Journal of

Applied Meteorology and Climatology, 53(7): 1750-1759. doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0285.1>

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, (6): 733-743. Li Yunying, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (6): 733-743. doi: 10.11676/qxxb2003.074

LinHo, Huang X, Lau N-C, 2008. Winter-to-spring transition in East Asia: A planetary-scale perspective of the south China spring rain onset [J]. Journal of Climate, 21(13): 3081-3096. doi: 10.1175/2007JCLI1611.1

Liou K N. 2004. 大气辐射导论(第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 612p. Liou K N. 2004. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 612p.

刘向文, 孙照渤, 顾伟宗, 等. 2009. 我国东部季风区夏季持续非绝热加热的特征分析和数值试验 [J]. 大气科学, 33(1): 71-80. Liu Xiangwen, Sun Zhaobo, Gu Weizong, et al. 2009. Feature analysis and numerical experiments of the persistent diabatic heating in the summer monsoon regions in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(1): 71-80. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.06

Loeb N G, Doelling D R, Wang H, et al. 2018. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) Top-of-Atmosphere (TOA) Edition-4.0 data product [J]. Journal of Climate, 31(2): 895-918. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0208.1

Luo Y, Zhang R, Wang H. 2009. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO data [J]. Journal of Climate, 22(4): 1052-1064. doi: 10.1175/2008JCLI2606.1

Moon S, Ha K-J. 2019. Early Indian summer monsoon onset driven by low soil moisture in the Iranian desert [J]. Geophysical Research Letters, 46(17-18): 10568-10577. doi: 10.1029/2019GL084520

Skofronick-Jackson G, Petersen A W, Berg W, et al. 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(8): 1679-1695. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00306.1

Tanaka M. 1992. Intraseasonal oscillation and onset and retreat dates of the summer monsoon over East, Southeast Asia and the western Pacific region using GMS high cloud amount data [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 70(1B): 613-629. doi: 10.1175/1520-0469(1992)049<0256:PAPIAP>2.0.CO;2

唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 2015. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述 [J]. 遥感技

- 术与应用, 30(4): 607-615. Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, et al. 2015. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and its latest development [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 30(4): 607-615. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0607
- Tian S F, Yasunari T. 1998. Climatological aspects and mechanism of spring persistent rains over central China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 76(1): 57-71. doi: 10.1175/1520-0469(1998)055<0465:AAARTS>2.0.CO;2
- Wan R J, Wu G X, 2007. Mechanism of the spring persistent rains over southeastern China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(1): 130-144. doi: 10.1007/s11430-007-2069-2
- 王美蓉, 郭栋, 钟珊珊. 2019. 多源资料在青藏高原大气热源计算中的适用性分析 [J]. 气象, 45(12): 1718-1726. Wang Meirong, Guo Dong, Zhong Shanshan. 2019. Comparision of the Multi-Source datasets in calculation of the atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(12): 1718-1726. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.009
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2015. Drought in southwest China: a review [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 8(6): 339-344. doi: 10.3878/AOSL20150043
- Wang L, Huang G, Chen W, et al. 2022. Decadal background for active extreme drought episode in the decade of 2010–19 over southeastern mainland Asia [J]. Journal of Climate, 35(9): 2785-2803. doi: 10.1175/JCLI-D-21-0561.1
- Wang B, LinHo. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon [J]. Journal of Climate, 15(4): 386-398.
- Wang B, LinHo, Zhang Y S, et al. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon [J]. Journal of Climate, 17(4): 699-710. doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0699:doscm>2.0.co;2
- Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 103(C7): 14451-14510. doi: 10.1029/97JC02719
- Wild M, 2020. The global energy balance as represented in CMIP6 climate models [J]. Climate Dynamics, 55(3): 553-577. doi: 10.1007/s00382-020-05282-7
- Wu R G, Chen J P, Wen Z P. 2013. Precipitation-surface temperature relationship in the IPCC CMIP5 models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30(3): 766-778. doi: 10.1007/s00376-012-2130-8
- Wu G, Liu Y. 2003. Summertime quadruplet heating pattern in the subtropics and the associated atmospheric circulation [J]. Geophysical Research Letters, 30(5): 1201. doi: 10.1029/

2002GL016209

- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 I: 尺度分析 [J]. 气象学报. 57(3): 257-263. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Ping. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of sub tropical high I. scale analysis [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57(3): 257-263. doi: 10.11676/qxb1999.025
- Yanai M, Esbensen S, Chu J-H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 30(4): 611-627. doi:10.1175/1520-0469(1973)030<0611:DOBPOT>2.0.CO;2
- 晏红明, 李清泉, 王东阡. 2018. 云南雨季的时空特征及与大气环流变化的关系 [J]. 热带气象学报, 34(1): 12-22. Yan Hongming, Li Qingquan, Wang Dongqian. 2018. Studies on Spatial-Temporal characteristics of Yunnan rainy season and its relationship with atmospheric circulation [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 34(1): 12-22. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2018.01.002
- 姚秀萍, 闫丽朱, 张硕. 2019. 大气非绝热加热作用的研究进展与展望 [J]. 气象, 45(1): 1-16. Yao Xiuping, Yan Lizhu, Zhang Shuo. 2019. Research progresses and prospects of atmospheric diabatic heating [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(1): 1-16. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.001
- Yu R C, Yu Y Q, Zhang M H, 2001. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18(6): 1090-1102. doi: 10.1007/s00376-001-0025-1
- 张华, 王菲, 汪方, 等. 2022. 全球气候变化中的云辐射反馈作用研究进展 [J], 中国科学: 地球科学, 52(3): 400-417. Zhang Hua, Wang Fei, Wang Fang, et al. 2022. Advances in cloud radiative feedbacks in global climate change [J]. Scientia Sinica Terra (in Chinese), 52(3): 400-417. doi: 10.1360/SSTe-2021-0052
- Zhao C, Chen Y, Li J, et al. 2019. Fifteen-year statistical analysis of cloud characteristics over China using Terra and Aqua moderate resolution imaging spectroradiometer observations [J]. International Journal of Climatology, 39(5): 2612-2629. doi: 10.1002/joc.5975
- 赵尔旭, 吕俊梅, 瑝建华. 2006. 东南亚地区夏季风爆发对云南雨季开始的影响 [J]. 热带气象学报, 22(3): 209-216. Zhao Erxu, Lv Junmei, Ju Jianhua. 2006. Impacts of onset of summer monsoon over Southeast Asia on the rainy season in Yunnan [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22(3): 209-216. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2006.03.001
- Zhao P, Zhang R, Liu J, et al. 2007. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall [J]. Climate Dynamics, 28(7-8): 797-811. doi:

10.1007/s00382-006-0212-y

周建琴, 黄玮, 李蒙, 等. 2022. 云南初夏干湿演变特征和基于 CMIP6 模式模拟的预估分析

[J]. 气候变化研究进展, 18(4): 482-491. Zhou Jianqin, Huang Wei, Li Meng, et al. 2022.

Dry-wet climate evolution feature and projection of future changes based on CMIP6 models

in early summer over Yunnan province, China [J]. Climate Change Research (in Chinese),

18(4): 482-491. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2022.016

附加材料

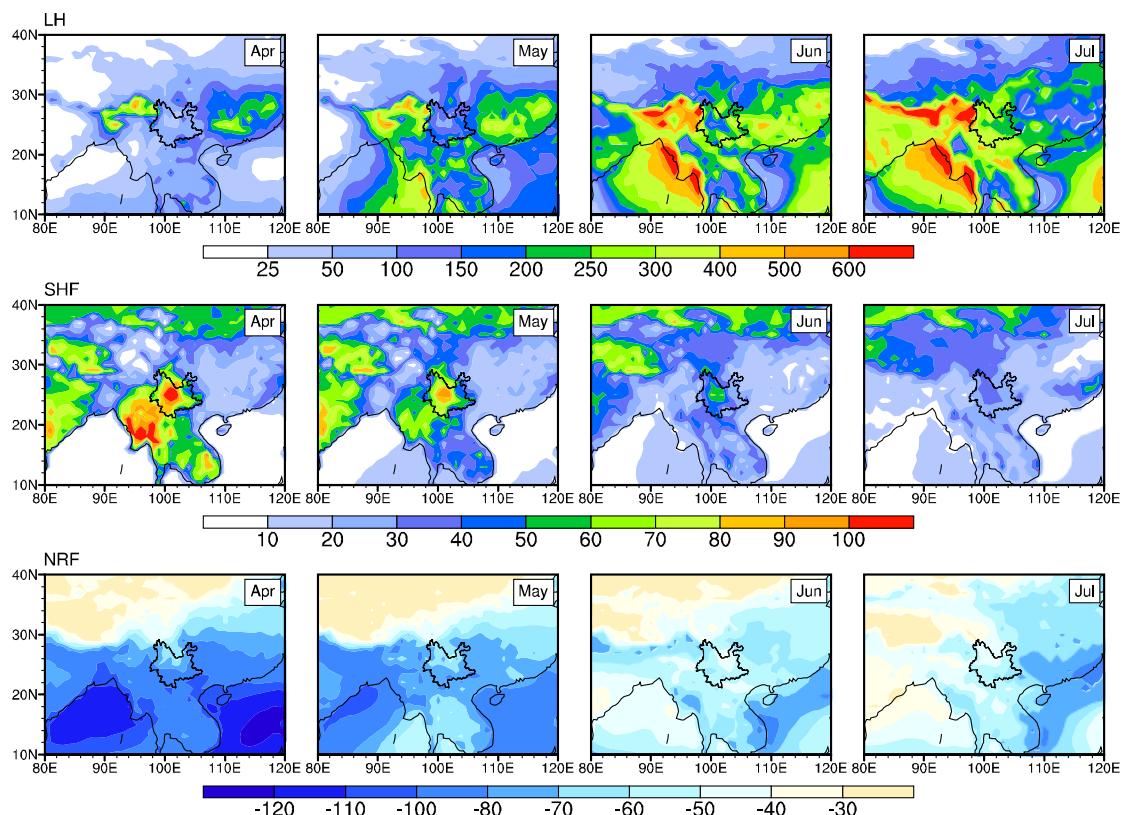
云南区域夏季风雨季爆发前后大气热源和云量特征

郭珊瑚¹ 李剑东² 袁俊鹏³ 冯涛³

1 黑龙江省鹤岗市气象局, 鹤岗 154107

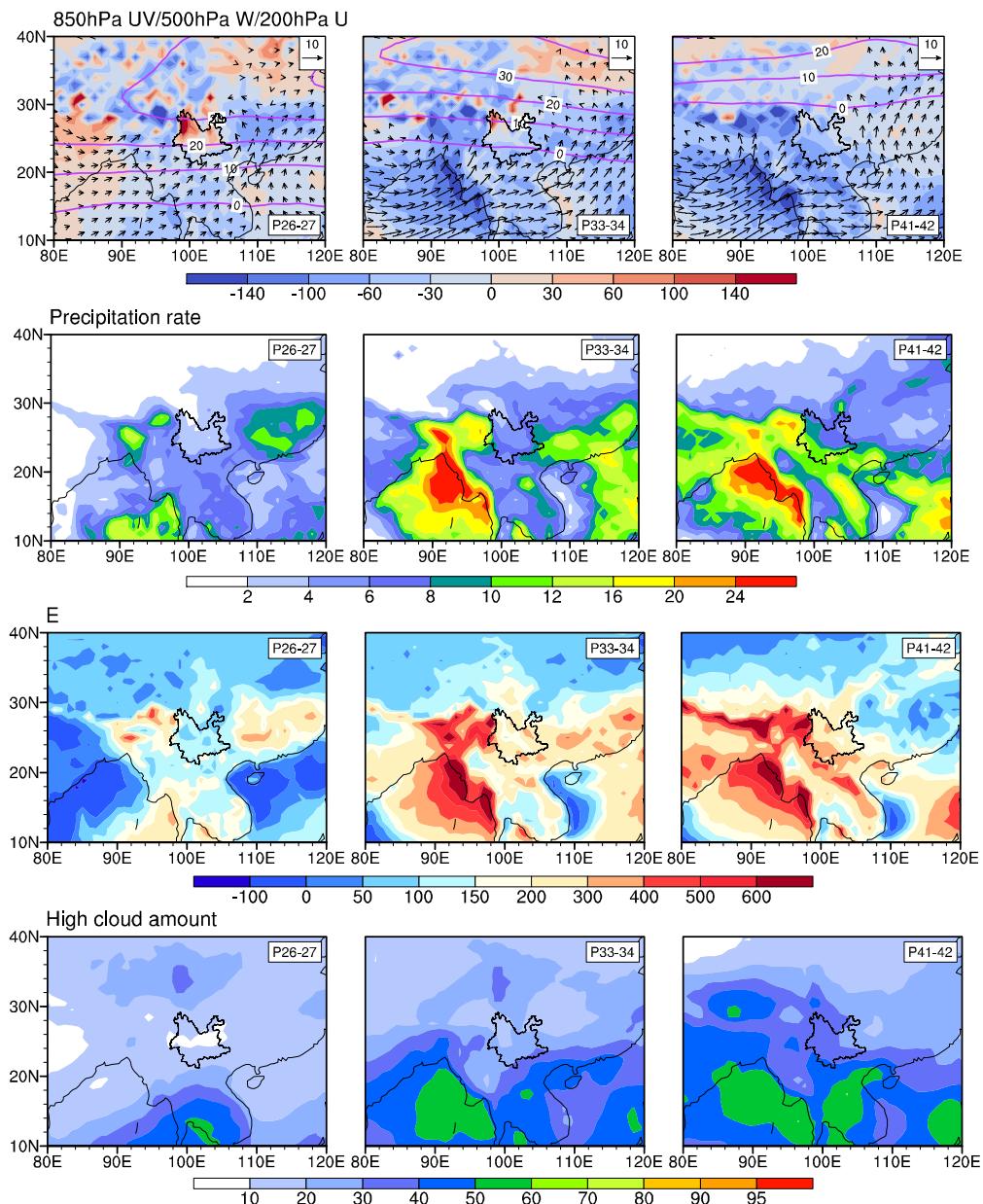
2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 云南大学地球科学学院大气科学系, 昆明 650500



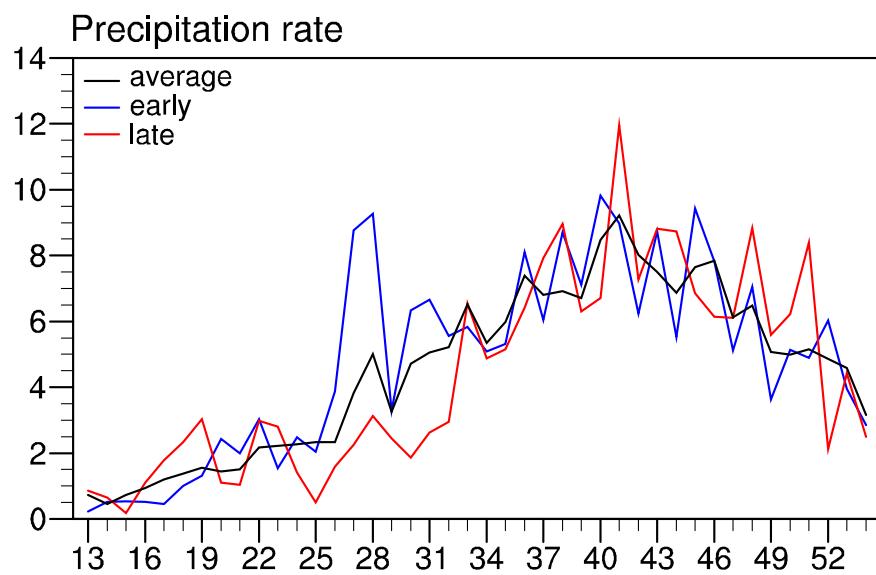
附图 1 2001–2020 年气候平均的 4-7 月降水凝结释放的潜热、地表感热通量和大气柱的净辐射通量 (单位: W m^{-2})。云南省界用黑实线标出, 下文相同

Fig. S1 Climatological April-July mean latent heat released by precipitation condensation (LH), surface sensible heat flux (SHF), net radiation flux of air column heat (NRF) (units: W m^{-2}) during 2001-2020. The Yunan domain is marked with solid black line, the same as below



附图 2 2001–2020 年气候平均的 4–7 月 200hPa 西风（等值线；单位： m s^{-1} ）、500hPa 垂直速度场（填色；单位： hPa d^{-1} ）、850hPa 风场（箭头；单位： m s^{-1} ）、总降水量（填色；单位： mm d^{-1} ）、大气总热源（单位： W m^{-2} ）和高云量（单位：%）。这里地表气压低于 850hPa 的风场不显示

Fig. S2 Climatological mean 200hPa westerly (contour; units: m s^{-1}), 500hPa vertical velocity field (shading; units: hPa d^{-1}), 850hPa wind (vector; units: m s^{-1}), total precipitation rate (units: mm d^{-1}), atmospheric heat source (E; units: W m^{-2}), and high cloud amount (units: %) in pentad 26-27, 33-34, and 41-42 of 2001-2020. Wind fields with surface pressure below 850hPa are not shown



附图 3 2001-2020 年的偏早年和偏晚年气候平均总降水率的逐候变化（单位： mm d^{-1} ）。
图中黑色实线为 2001-2020 年平均的总降水率；X 轴刻度表示候数

Fig. S3 Climatological pentad mean total precipitation rate in early and late years during 2001-2020 (units: mm d^{-1}). The black line is 2001-2020 mean total precipitation. The X-axis scale denotes the pentad