

梁靖琳, 雒佳丽, 田红瑛, 等. 2019. “05·6”华南持续性暴雨发生前上对流层及平流层异常信号分析 [J]. 气候与环境研究, 24 (2): 237–250. Liang Jinglin, Luo Jiali, Tian Hongying, et al. 2019. Analysis of abnormal signals in the upper troposphere and stratosphere before the persistent heavy rainfall event in South China in June 2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (2): 237–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17164.

“05·6”华南持续性暴雨发生前上对流层及平流层异常信号分析

梁靖琳¹ 雒佳丽¹ 田红瑛¹ 张诗妍¹ 张如华¹ 商林²

¹ 兰州大学大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

² 山东省气候中心, 济南 250031

摘要 利用欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料, 对“05·6”华南持续性暴雨发生前上对流层及平流层信号进行分析。分析结果表明, 暴雨发生前一周, 暴雨区域上空对流层顶高度出现先降低后升高再降低的变化, 这种变化与日本南部的位涡异常存在较好的对应关系, 即我国中纬度沿海一带至日本的高位涡带向华南延伸, 使得华南地区上空的位涡升高, 对流层顶下降。在环流场中, 本次暴雨发生前低纬地区上对流层下平流层 (UTLS) 区域的东风与 1991~2010 年平均值相比偏强偏北, 华南地区上空平流层东风场也偏强, 平流层下层东风在暴雨发生前第 9 天提早向下传播; 位势高度场中, “05·6”华南暴雨发生前中低纬度 100 hPa 上的南亚高压中心位置偏东偏南; 华南地区 UTLS 区域有较强的位势高度场正异常, 在暴雨发生前随时间出现两次明显的加强, 但在暴雨发生后减弱。南亚高压中心位置的偏移、东风信号的提早下传、高位涡空气入侵华南均有利于降水的发生。

关键词 华南暴雨 上对流层 平流层

文章编号 1006-9585 (2019) 02-0237-14

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17164

Analysis of Abnormal Signals in the Upper Troposphere and Stratosphere before the Persistent Heavy Rainfall Event in South China in June 2005

LIANG Jinglin¹, LUO Jiali¹, TIAN Hongying¹, ZHANG Shiyuan¹, ZHANG Ruhua¹,
and SHANG Lin¹

¹ Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² Shandong Provincial Climate Center, Jinan 250031

Abstract Using the ERA-Interim reanalysis data, the upper tropospheric and stratospheric signals before the “05·6” heavy rainfall event in South China are analyzed. The results show that before the heavy rain, the tropopause over the rainfall region exhibited a lower-lift-lower trend that was consistent with the evolution of potential vorticity (PV) anomalies over southern Japan. Specifically, a relatively high PV belt over Japan extended southward and led to higher PV (lower tropopause) over southern China. Compared with the mean values between 1991 and 2010, easterly winds in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) over the subtropical region were stronger and located more

收稿日期 2017-11-17; 网络预出版日期 2018-05-21

作者简介 梁靖琳, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事平流层过程对天气气候影响研究。E-mail: liangjl17@lzu.edu.cn

通讯作者 雒佳丽, E-mail: luojl@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41705021、41575038、41630421

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41705021, 41575038, and 41630421)

northward before the heavy rain. There also existed positive easterly wind anomalies over South China, which propagated downward on the 9th day before the heavy rain. The center of the South Asian High was located more eastward and southward than its mean position before the heavy rainfall. The relatively high geopotential height that enhanced twice with time could be found in the upper troposphere and lower stratosphere over South China. The shift of the center of the South Asia high, the early downward propagation of lower stratospheric easterly winds and the airmass of high PV all were favorable for the onset of the heavy precipitation.

Keywords Heavy rainfall in South China, Upper troposphere, Stratosphere

1 引言

平流层大气与地面相距约 10~50 km, 它的质量仅占地球大气总质量的 15%左右。由于观测事实表明天气现象主要发生在对流层内, 且对流层大气的质量远超平流层大气质量, 传统上人们认为平流层仅被动接受对流层变化的影响。但近年来许多研究表明平流层大气过程及其扰动对于对流层天气有重要影响, 范围更广以及维持时间更长的平流层过程对于季节内尺度的对流层天气预报具有指示意义(胡永云, 2006; 吕达仁等, 2009; Weisheimer and Palmer, 2014)。对流层顶作为对流层与平流层间的过渡区域, 其变化与平流层和对流层之间的动力、物理、输送、化学等多种过程密切相关。深入研究对流层顶及平流层过程对对流层天气过程的影响, 找出对流层天气过程发生前平流层及对流层顶的异常信号, 对于提高天气预报的时效具有重要意义。

降水前期信号的研究多集中于对流层环流背景变化, 研究表明一些对流层的极端降水事件发生前, 存在平流层异常信号向对流层下传的现象, 例如平流层的环流异常可以伴随着北极涛动(AO)信号向下传播, 从而与对流层的极端事件联系在一起(Kodera and kuroda, 2000; Baldwin et al., 2003); 对流层顶以及平流层位势涡度异常可以诱发对流层的位势涡度异常, 从而对对流层天气系统产生重要影响(Black, 2002; 雒佳丽等, 2012); 平流层大气环流的变化可以自上而下的影响到对流层大气环流, 并且这种影响在东亚地区非常显著(魏科等, 2007; 陈文和魏科, 2009)。有学者发现 2008 年我国南方雪灾事件发生前平流层北极涡旋异常加强和变形, 中低纬地区平流层的环流也发生明显变化, 这一持续性降雪冻雨过程很可能有平流层过程的调制作用(刘毅等, 2008; 陈月娟等, 2009; 向纯怡等, 2009)。也有研究表明中国夏季梅雨降

水异常可能会受到平流层大气环流异常的影响, 对流层顶附近的北半球环状模指数对梅雨期降水量的预测有较好的指示意义(李崇银等, 2008; 雒佳丽等, 2012)。李崇银(1992)的研究指出华北地区的汛期降水资料中存在的准两年周期振荡信号可能与热带平流层中准两年振荡(QBO)有关。黄燕燕和钱永甫(2004)利用多年月平均气象场再分析资料和中国月平均降水资料分析了长江流域和华北地区的典型旱涝年降水与夏季处于对流层上部的南亚高压的关系, 研究表明两地区的典型旱涝现象与南亚高压的异常增强或减弱、中心位置的经纬度偏差均有关。

2005 年 6 月 17~25 日, 华南出现了一次范围广、时间长的暴雨, 称为“05·6”华南持续性暴雨。图 1 为这次暴雨过程的降水实况。从图 1 可以看到, 在“05·6”华南暴雨过程中, 广西、广东、福建、湖南、江西等地先后出现连续大暴雨天气, 6 月 17 日主要表现为整个华南地区的分散性降水; 6 月 18 日, 自贵州南部至福建北部形成一条雨带, 之后雨带逐渐向东南移动。在降水集中期(19~23 日), 雨带主要位于广西东部、广东和福建三省。在降水减弱期(24~25 日), 大范围强降水基本结束, 仅在广东沿海和中部地区出现暴雨。这次暴雨过程雨强大, 持续时间长, 给人民的生命财产安全带了巨大损失。由于华南北部环山, 西部与高原接壤, 东部与南部临海, 特殊的地形条件使暴雨发生前系统影响并不明显, 预报信号弱, 从而导致预报失败(何立富, 2006)。尽管研究人员已多次对华南暴雨进行研究, 并组织了几次外场观测实验和研究, 但对于持续性强降水的预报还是十分困难, 研究也集中在对流层环流变化, 忽视了平流层过程的作用。

本文将在过去研究的基础上, 对 2005 年 6 月 17~25 日华南持续性暴雨的对流层顶变化以及平流层信号进行分析, 以期找出对流层顶以及平流层异常信号与降水的联系, 深入分析平流层信号对降

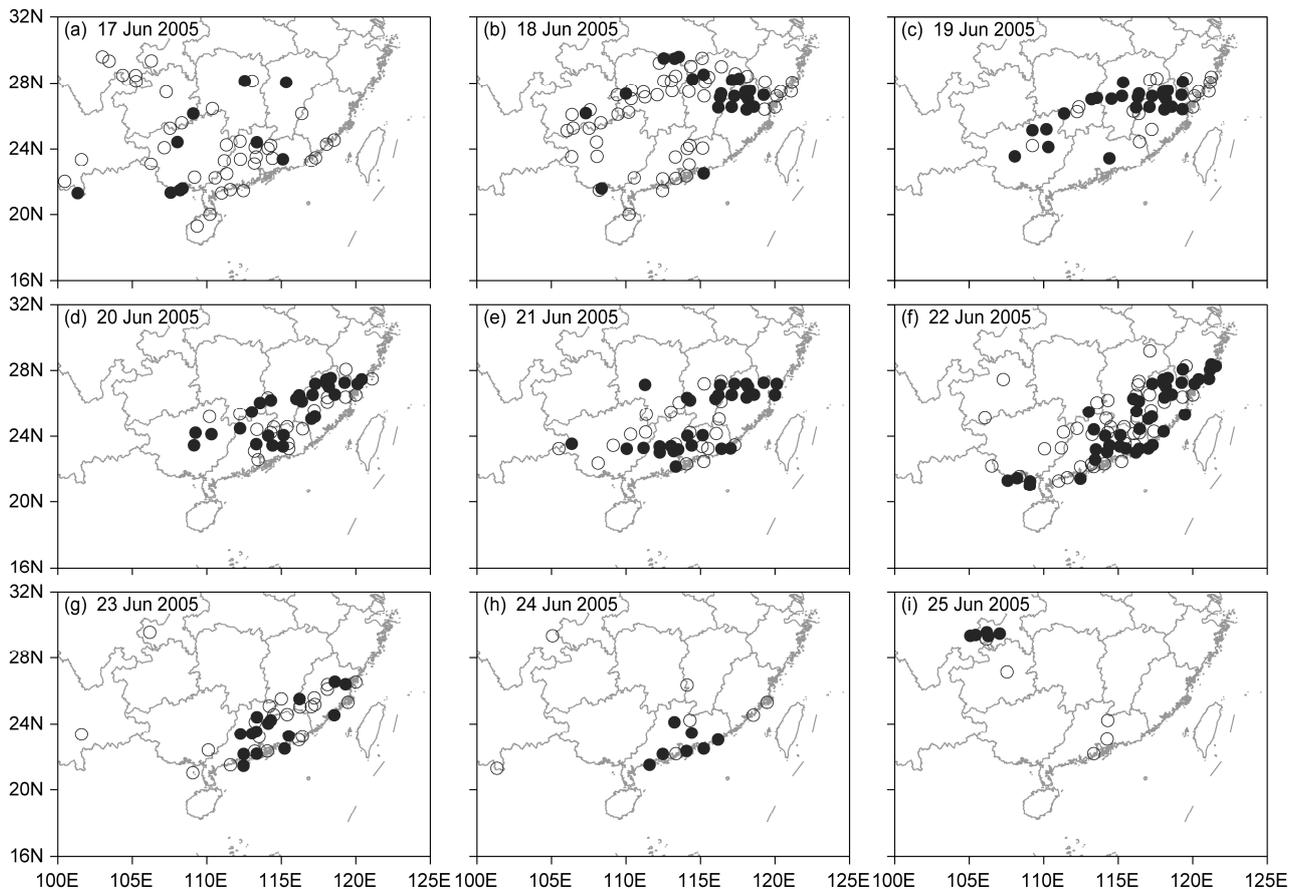


图1 2005年6月17~25日每日20:00(北京时间,下同)至20:00降水量分布。白色圆点代表站点降水量大于25 mm且小于50 mm,黑色圆点代表站点降水量大于或等于50 mm

Fig. 1 Distributions of daily precipitation during 17–25 June 2005. White dots denote stations with precipitation more than 25 mm and less than 50 mm, black dots are for stations with precipitation greater than or equal to 50 mm

水过程的影响,为提高中国夏季降水中长期预报的水平提供参考。

2 资料及方法

2.1 资料

文中所使用的是欧洲中心(ECMWF)提供的ERA-Interim全球再分析资料,水平分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度),垂直方向从1000 hPa至1 hPa共37层,其中在对流层顶附近包含6层资料(70 hPa、100 hPa、125 hPa、150 hPa、175 hPa、200 hPa),较密的分层有利于对上对流层下平流层(UTLS)区域的研究。所使用资料包括1991~2010年共20年的6 h一次的风场、位势高度场、位势涡度场资料。降水数据来自中国气象数据网地面资料日值数据集V3.0版本,其中包含中国824个基准、基本气象站1951年1月以来的降水量数据。

2.2 方法

常见的对流层顶定义主要有热力学对流层顶定义(Hoerling et al., 1991; Highwood et al., 2000)及动力学对流层顶定义(Reiter, 1975; Hoskins et al., 1985)。由于热力对流层顶定义将平流层至对流层的转变认为是静力稳定度的变化,局地可能同时存在多个对流层顶(卞建春, 2009),而定义动力学对流层顶是为找到一个准物质面来确定平流层到对流层的转换面(Holton et al., 1995),保证在大的时间和空间尺度上对流层顶分布的连续性,能够将平流层的高位涡空气和对流层中的低位涡空气分开。因此本文选择动力对流层顶作为主要参照。很多研究和实际观测结论认为对流层顶所在高度会随纬度和季节发生变化,从1~4 PVU不等(Danielsen, 1968; Hoerling et al., 1993; Lamarque and Hess, 1994; Kunz et al., 2011), $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 。本文选取2 PVU来代表动力对流层

顶,它所在的高度即为动力对流层顶高度(Holton et al., 1995; 寿绍文, 2010; 王志强, 2011; Tyrlis et al., 2014; 寿亦萱等, 2014)。2005年6月17~25日华南持续性强降水过程(简称“05·6”华南暴雨过程)区域选定为(18°N~26°N, 105°E~120°E)(强学民和杨修群, 2008)。

3 “05·6”华南暴雨发生前平流层及上对流层异常信号的分析

3.1 “05·6”华南暴雨发生前的动力对流层顶演变

对流层顶定义为对流层的上边界或对流层与平流层之间的转换层。作为不同性质大气的过渡层,对流层顶能够表征对流层与平流层物质及能量的交换,是对流层和平流层相互作用的关键纽带(雒佳丽等, 2012),其变化有时可作为各种天气过程变化的指示器(王卫国等, 2008; 杨双艳和周顺武, 2010);研究认为,与对流层顶下降有关的位涡平流,有利于低层辐合以及地面气旋、垂直上升运动的发展(Hoskins et al., 1985; Hoskins, 1997; Thorpe, 1997; Wernli et al., 2002; Griffiths et al., 2010)。从这方面来看,对流层顶下降有利于暴雨和强对流的产生。有研究指出,江淮地区梅雨发生前对流层顶的下降和折卷现象伴随着来自平流层的高位涡冷空气入侵(雒佳丽等, 2012);也有研究指出暴雨过程中出现的对流层顶折叠引起平流层冷空气向下入侵,有助于暴雨的加强(寿亦萱等, 2014)。我们首先分析暴雨发生前对流层顶的高度变化,再对高层位涡随时间的演变情况进行分析。

利用 ERA-Interim 1991~2010年6h一次位涡资料得到多年平均的6月、2005年6月华南地区区域平均的对流层顶高度逐日变化(图2)以及2 PVU等位涡面上位势高度水平分布(图3)。在图2中可以看到,气候平均的对流层顶高度变化较为平缓,仅在6月8~14日期间出现了对流层顶的缓慢下降和上升。2005年6月的对流层顶高度则有较大的波动,特别是在暴雨发生前,华南地区上空出现了两次较为明显的对流层顶高度下降。第一次是从暴雨发生前第10天到前第6天(6月7日至6月11日),华南地区上空的对流层顶高度逐步下降,6月9日开始回升,其变化早且强于气候态的变化;第二次对流层顶的下降则不同于气候平均的对流层顶高度变化,从暴雨发生前第3天起,华南地区的动力

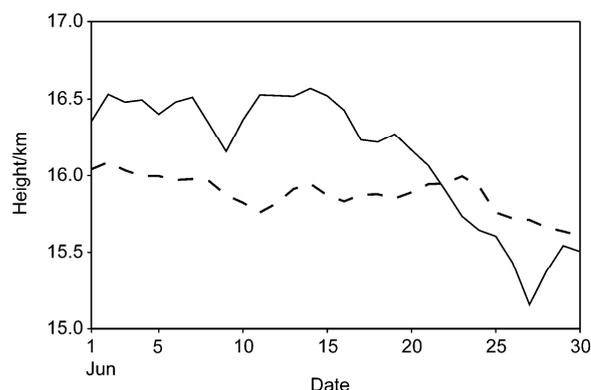


图2 华南地区动力对流层顶高度逐日变化趋势(虚线表示1991~2010年平均的6月逐日对流层高度,实线表示2005年6月逐日对流层顶高度)

Fig. 2 Time series of regional mean dynamical tropopause height over South China in June (solid line is for 2005, dashed line is the mean values during 1991-2010)

对流层顶高度开始下降,下降幅度大且下降的趋势一直持续至暴雨发生后。

为进一步探究华南地区对流层顶高度变化情况,图3给出了“05·6”华南暴雨发生前第10天、前第8天、前第3天、以及暴雨发生当天对流层顶高度水平分布图。从图中可以看出,对流层顶高度整体呈现北低南高的分布形势。在暴雨发生前第10天(图3a),2 PVU等位涡面上30°N~40°N地区开始出现等高线密集带,华南地区上空对流层顶高度较高,达16.5 km;在暴雨发生前第8天(图3b),东海至日本南部(30°N, 130°E)上空对流层顶高度与暴雨发生前第10天相比出现明显下降,形成位涡异常区,华南区域对流层顶高度呈整体性下降,但下降最强的区域出现在华南东北部,西南部相对而言下降较弱;再从暴雨发生前第8天至前第3天(图3c)来看,(30°N, 130°E)位涡异常区消失,华南地区上空的对流层顶又回升至16.5 km;最后在暴雨发生当天,日本南部附近区域上空等高线变疏,对流层顶高度降低,华南地区的对流层顶也再次下降。

图4给出了暴雨发生前100 hPa高度上位涡水平分布随时间的演变,可以看到在30°N以南,120°E以西存在一个较大范围的低值位涡区;在本次暴雨发生前,华南地区100 hPa高度上的低值位涡一直与从中纬度沿海地区伸向华南的高位涡带此消彼长,最后以低值位涡的减弱告终。从图4a、4b、4c,也就是暴雨发生前第10天至前第8天,可以看到

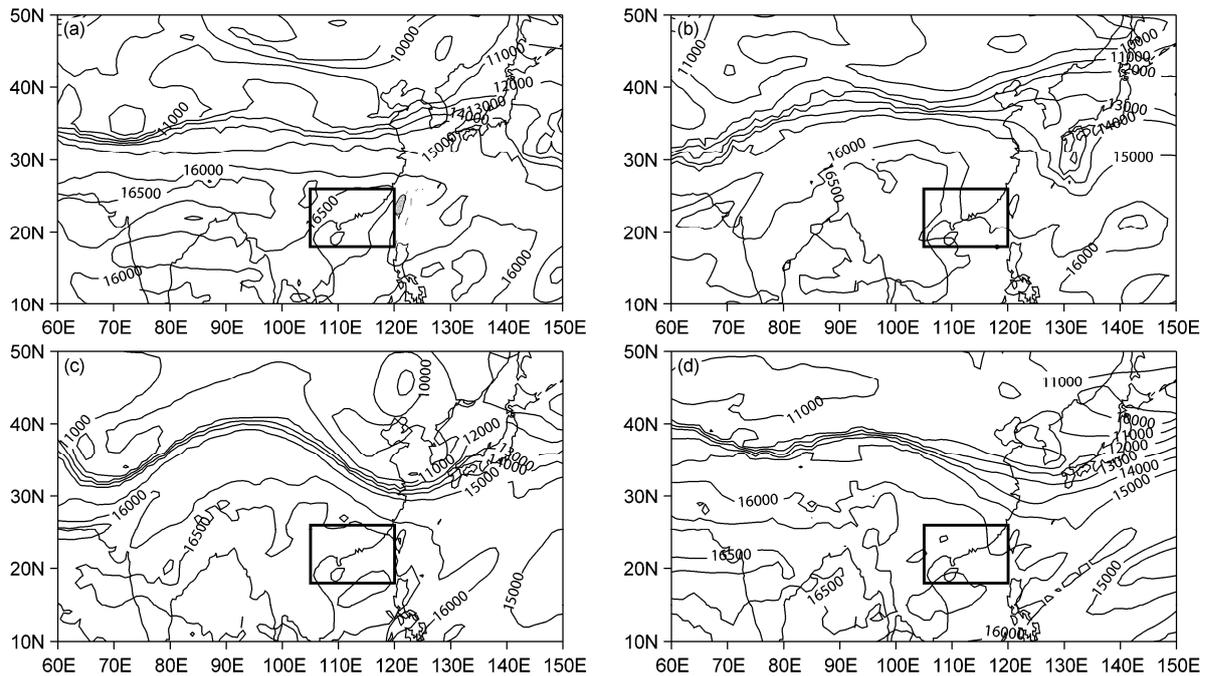


图3 “05·6”华南暴雨发生 (a) 前10天、(b) 前8天、(c) 前3天、(d) 暴雨发生当天动力对流层顶(2 PVU等位涡面)高度水平分布(等值线表示对流层顶高度,单位:gpm;黑框中区域表示华南地区)

Fig. 3 Horizontal distributions of the tropopause height (contours, units: gpm) on (a) the tenth day, (b) the eighth day, (c) the third day before the heavy rain, and (d) the first day after the heavy rain during the “05·6” (June 2005) heavy rainfall event in South China. The region within the black box indicates South China

在20°N以南、100°E附近的低值位涡区正在发展;与此同时,中纬度沿海一带的高位涡带伸向华南,相应华南地区位涡值随时间逐渐增大,这与图2中同时段华南地区对流层顶的下降对应;但随着东南亚地区低值位涡的向北向东发展,高位涡区域于暴雨发生前第7天向北回退(图4d)。而在暴雨发生前第3天(图4e)至暴雨发生前第2天(图4f),我国中纬沿海地区及西太平洋的高位涡带重新开始向华南延伸,华南地区100 hPa层上的位涡也在逐步增强,体现在对流层顶高度上即为对流层顶的持续下降。

上文分析了“05·6”华南暴雨发生前对流层顶高度的分布以及中低纬度对流层顶高度变化情况,发现华南地区上空的对流层顶高度在暴雨发生前有比较明显的变化趋势,且从暴雨发生前3天起持续下降,对流层顶高度随时间的变化与日本南部对流层顶高度的异常有较好的对应关系,当日本南部上空对流层顶降低时,华南地区上空的对流层顶高度也在下降;而当日本南部上空对流层顶升高时,华南地区的对流层顶高度则也有抬升。随后通过对这种变化与平流层高位涡空气的关系进行分析,发

现在暴雨发生前我国中纬沿海地区上的高位涡空气向华南一带延伸,使华南地区对流层顶高度下降。这可能是华南地区对流层顶和日本南部对流层顶高度变化有较好对应关系的原因。

3.2 “05·6”华南暴雨发生前上对流层至平流层的环流场分析

华南地处低纬,大量研究表明其强暴雨过程与低纬地区环流变化,特别是东亚季风活动密切相关。前人研究表明,低空夏季风来临前,平流层风场已经完成了环流突变和季节调整(曾庆存等,2005);“05·6”华南暴雨过程中对流层低层的南海夏季风有明显的北抬和加强(何立富,2006)。那么在暴雨发生前,上对流层下平流层(UTLS)区域的风场是否会先于低层风场进行变化?为了回答这个问题,本文利用ERA-Interim纬向风场资料给出2005年暴雨发生前沿115°E的纬向风经向垂直剖面及其与气候态的差值(图5和图6),1991~2010年平均和2005年华南地区区域平均的纬向风垂直分布随时间的变化以及两者的差值场(图7)。

图5为华南地区2005年6月12~17日的纬向风沿115°E的经向—高度剖面图。从图5可以看到,

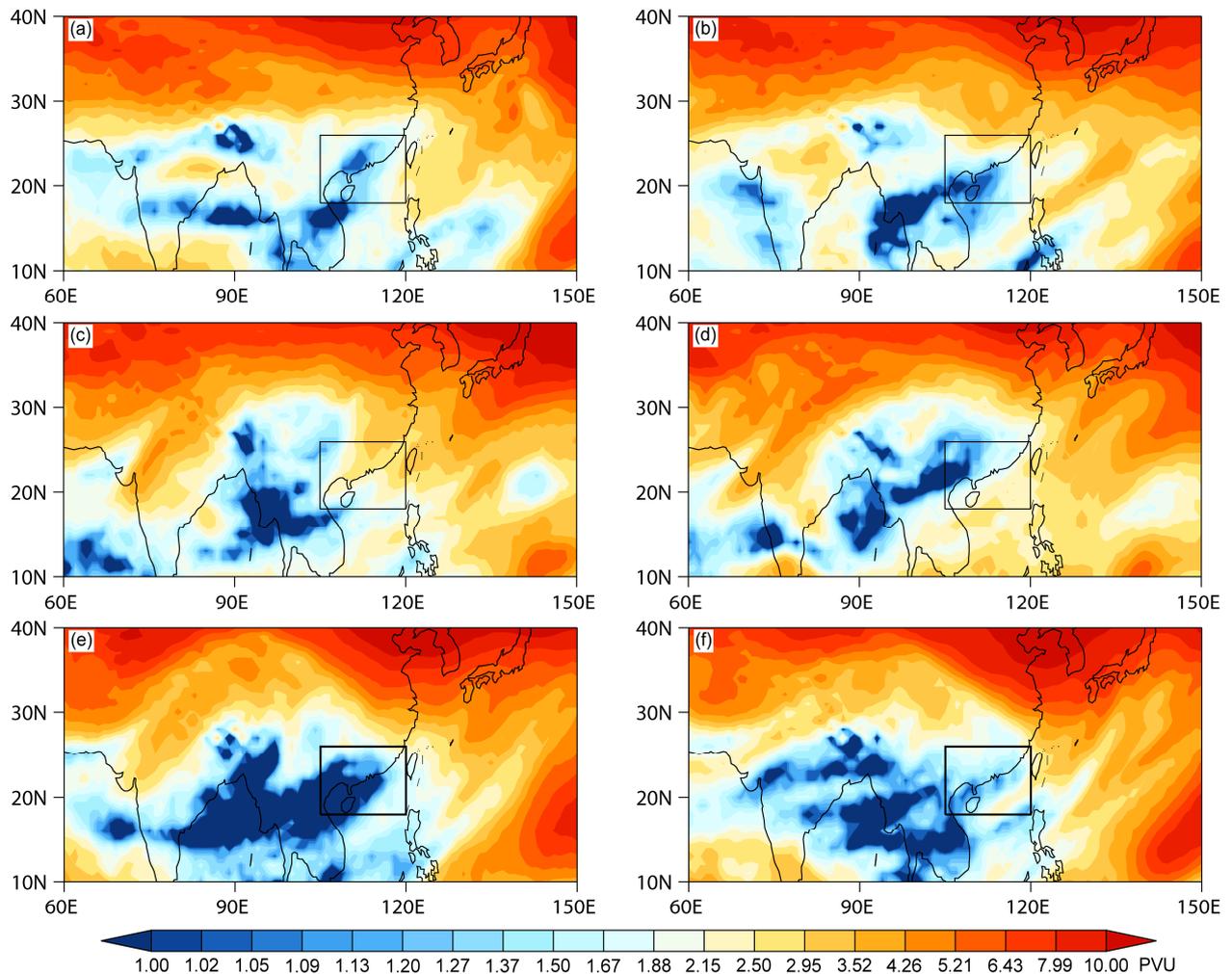


图4 “05-6”华南暴雨发生 (a) 前10天、(b) 前9天、(c) 前8天、(d) 前7天、(e) 前第3天和 (f) 前第2天 100 hPa 的位涡水平分布 (填充色表示位涡值, 单位: PVU; 黑框中区域表示华南地区)

Fig. 4 Horizontal distributions of potential vorticity (PVU) at 100 hPa on (a) the tenth day, (b) the ninth day, (c) the eighth day, (d) the seventh day, (e) the third day, and (f) the second day before the heavy rain during the “05-6” heavy rainfall event in South China. The region within the black box indicates South China

从暴雨发生前第5天(图5a)起,低纬地区平流层中下层东风持续北推,东风风速高值区前沿一度达到 25°N 附近,之后在暴雨发生的前一天南退; 15°N 附近 UTLS 区域的东风风速高值区随时间扩展至赤道上空,其下部的东风随时间向下向北传播,并逐步影响华南地区中下层对流层风场;在暴雨发生前第5天东风已向北下传至华南地区南部上空500 hPa 高度上,之后持续下传北推,在暴雨发生前第2天(图5d)华南地区北部至 30°N 上空低层对流层风向也已由西风转向东风,持续一天后,在暴雨发生当天(图5f),低纬高层东风的向下向北传播减弱消失。再从图6来看,2005年暴雨发生前,低纬地区存在东风异常大值区,对流层中上层至平流层中基本为东风异常所覆盖,且低纬对流层顶附近

的东风风场随时间增强;从6月12日(图6a)起,中低纬度对流层上层的东风异常向华南地区对流层中下层延伸,对应了图5所给出的东风下传现象;而在中纬度 UTLS 区域存在西风异常,其强度随时间也逐渐加强并向低纬发展,但在暴雨发生当天减弱。

为更好的了解华南地区上空纬向风场的变化情况,图7进一步给出了气候态与2005年的6月1日至6月17日平流层中下层至对流层中层的华南区域平均的风场随时间变化的剖面图(图7a、7b),以及两者的差值(图7c)。在图7a中可以看到气候态的华南地区上空东风风场较为平直,东风随时间下传,但幅度较小。而2005年(图5b)华南地区上空的平流层东风风场偏强,且东风的向下传播较早,从暴雨发生前第9天(6月8日)开始,出现

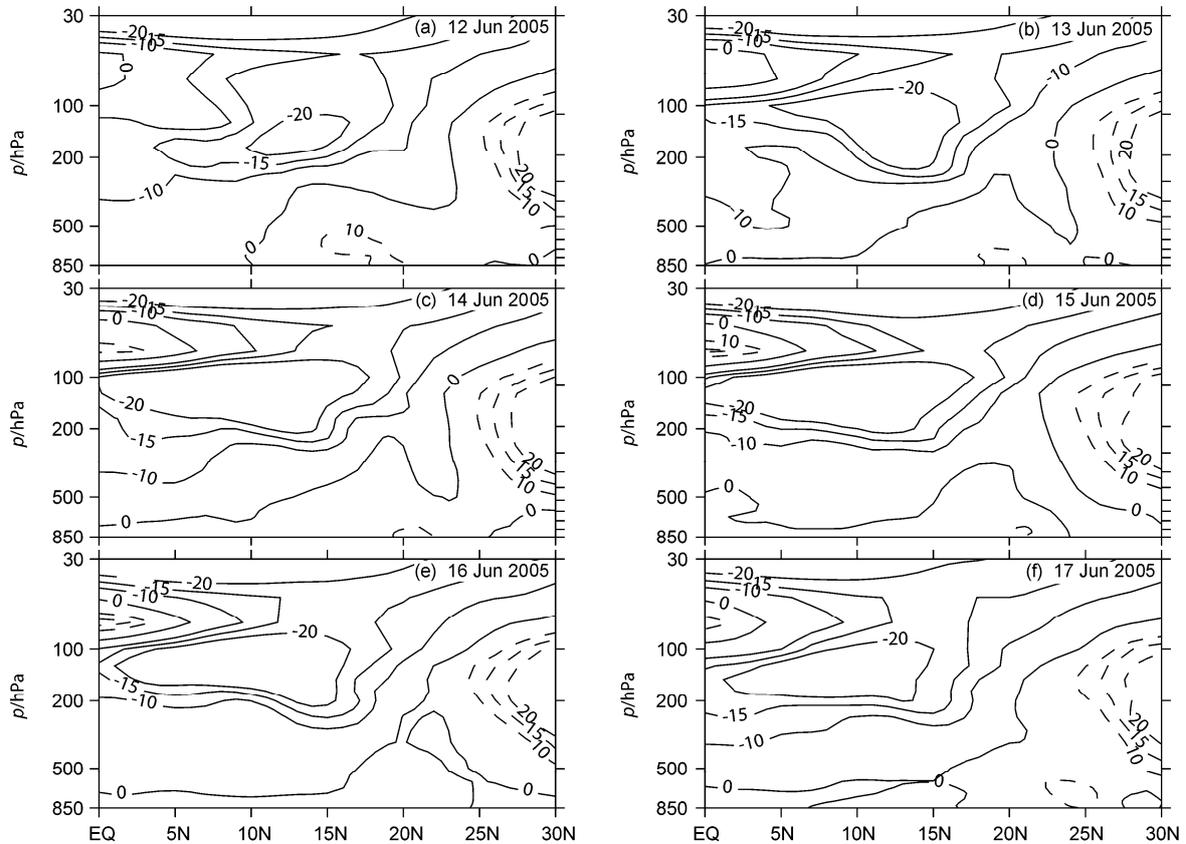


图5 2005年6月12~17日沿115°E的纬向风纬度—高度剖面(虚线表示西风,实线表示东风,单位:m/s)

Fig. 5 Latitude–height cross sections of the zonal wind (m/s) along 115°E from 12 June to 17 June 2005. Dashed lines indicate westerly winds and solid lines are for easterly winds

高层东风向对流层中层传播,在暴雨发生的前1天(6月16日)东风下传至500 hPa高度附近,随后对流层内的东风迅速转为西风,在降水开始后,仅在300 hPa以上存在东风;但在降水结束后,华南地区上空的东风很快下传至500 hPa高度以下,早于气候态的东风风场下传。再看2005年与气候态6月逐日纬向风差值场(图7c),可以看到,纬向风负异常自6月初起即有自70 hPa的向下传播;在降水发生前一周,70 hPa附近的纬向风负异常加强并下传,在降水开始前一天转为正异常。因此在“05·6”华南暴雨过程中,存在平流层低层的东风下传,这与图7b给出的信息也比较相符。

本节分析了气候态以及2005年6月中低纬度纬向风的垂直剖面以及华南地区区域平均的纬向风垂直分布随时间发生的变化,得知2005年6月中低纬度上对流层至平流层中层的东风偏强偏北;暴雨发生前在15°N上空出现上层东风的向下向北传播,对华南地区上空风场产生影响,华南地区中上

对流层的西风早于气候态向东风转变,平流层低层东风在暴雨发生前第9天就开始向对流层中层传播;且在暴雨结束后,华南地区平流层低层东风风场下传至500 hPa高度以下,下传时间早于气候态平均。

3.3 “05·6”华南暴雨发生前上对流层至平流层的位势高度场分析

上文给出“05·6”华南暴雨发生前的风场特征,发现暴雨发生前热带地区平流层中下层东风相较于气候态更早的向华南地区推进,华南地区上对流层的东风在暴雨发生前第9天就开始向对流层中层传递。为进一步验证UTLS区域的环流场变化对本次华南暴雨造成的影响,接下来分析“05·6”华南暴雨发生前上对流层至平流层的位势高度场。

利用ERA-Interim 1991~2010年6h 1次的位势高度场和风场资料分析气候态以及2005年6月7日至15日的中低纬度100 hPa环流形势场,并给出气候态6月10~13日的100 hPa环流形势图以及其与2005年的差值场(图8及图9),以此对比说明

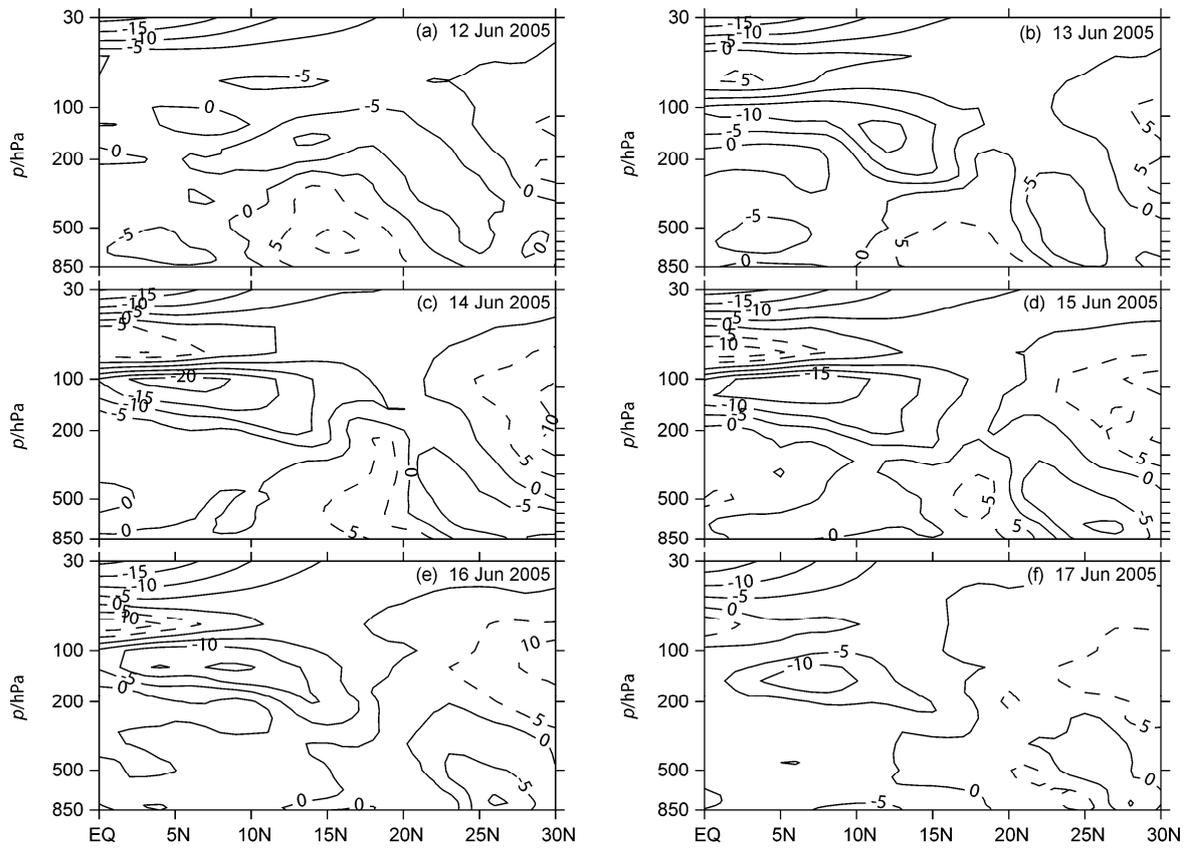


图6 2005年6月12~17日沿115°E的纬向风与气候态(1991~2010年平均)差值场的纬度—高度剖面

Fig. 6 Latitude–height cross sections of the differences of zonal wind along 115°E between 2005 and climatology (1991–2010) from 12 June to 17 June

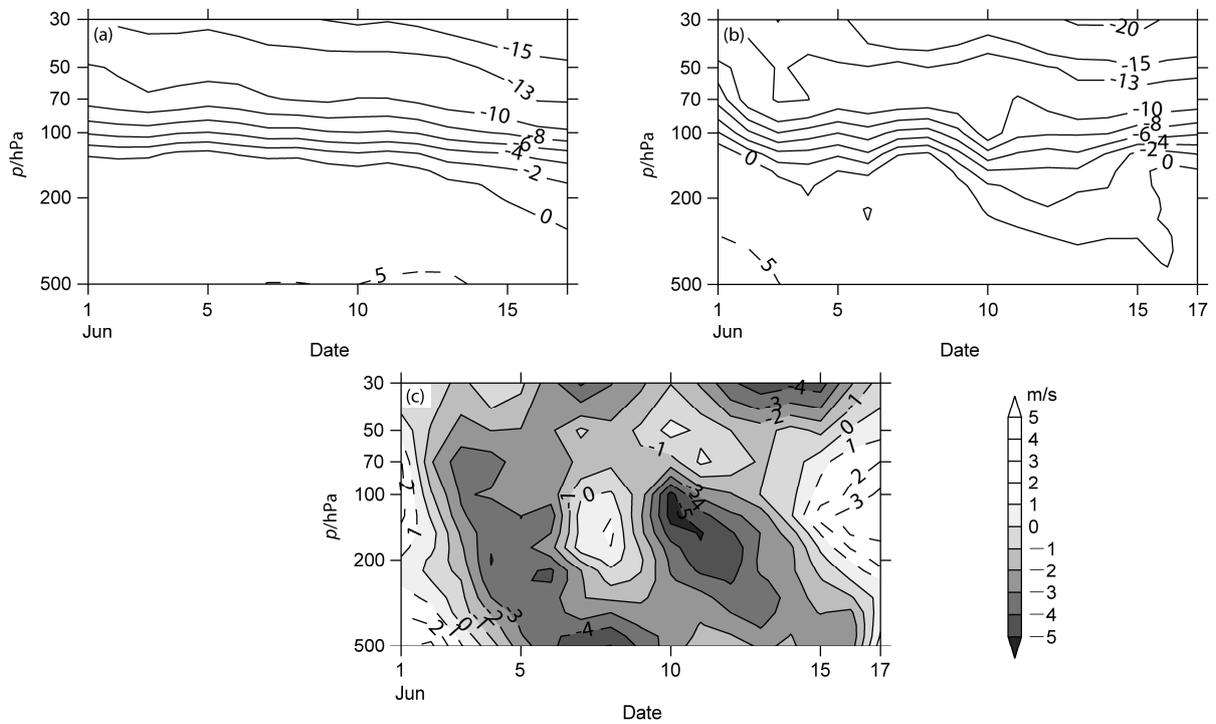


图7 (a) 1991~2010年气候平均、(b) 2005年6月的华南地区区域平均纬向风垂直分布随时间的变化以及(c) 二者的差值场(填充部分代表负值,即东风异常区)。实线代表负值,虚线代表正值,单位: m/s

Fig. 7 Time series of (a) climatological (1991–2010) and (b) 2005 zonal winds and (c) their differences over South China from 1 June to 17 June. Dashed and solid lines represent positive and negative values, respectively, units: m/s. Shadings in (c) indicate areas with positive easterly wind anomalies

环流场的变化为“05·6”华南暴雨创造的有利条件。从气候态位势高度场的演变情况（图 8）来看，南亚高压呈东西向位于亚洲南部 100 hPa 上空，其中心稳定在（30°N，90°E）附近，并随时间增强，其北部为西风带，南部为东风急流区。而在 2005 年中低纬度 100 hPa 高度上的环流形势场中，高压中心集中在（20°N~30°N，90°E~100°E）附近，相比气候态的分布，南亚高压中心位置偏东偏南，且其南北两侧的风速偏强；对比同时段位涡分布图（图略）来看，在高压反气旋中心区域（即位势高度大于 16420 gpm 的区域）以北为高位涡区，中心及其以南区域则为位涡低值区。自 2005 年 6 月 7 日起（图略），南亚高压中心区域向东移动接近华南地区，并在高压东部出现了位势高度正异常区，同时由于高压中心的偏移以及槽的移入，在（30°N~40°N，60°E~80°E）区域和（40°N~50°N，90°E~120°E）区域以及（30°N~50°N，160°E~180°E）区域都出现了较强的位势高度负异常（为

方便阅读，接下来将这 3 个区域由西向东依次记为位势高度负异常区域 1、区域 2 和区域 3）。至 11 日（图 9），高压东部的位势高度正异常区随时间增强并向东北方向发展，使区域 2 和区域 3 的位势高度负异常减弱；受此位势高度正异常影响，华南地区上空风场有一定增强，此时虽然有东北风带来的高值位涡，但华南地区受高压中心控制，其上空处于较强的低值位涡区域之中；与此同时，伴随着高压和脊区的发展，区域 1 的位势高度负异常也逐渐减弱。6 月 14 日后（图略），南亚高压中心位置持续向西移动，华南地区处于南亚中心东南一侧，高压东部的东北风为华南地区带来了平流层的高值位涡空气，华南上空位涡值逐渐升高。

为进一步了解华南地区上空位势高度场的变化情况，将 2005 年 6 月华南地区上空逐日位势高度场与气候平均的逐日位势高度场相减得到位势高度距平时间—高度变化图（图 10）。从图 10 中可以看出，华南地区 UTLS 区域的位势高度场从 6 月

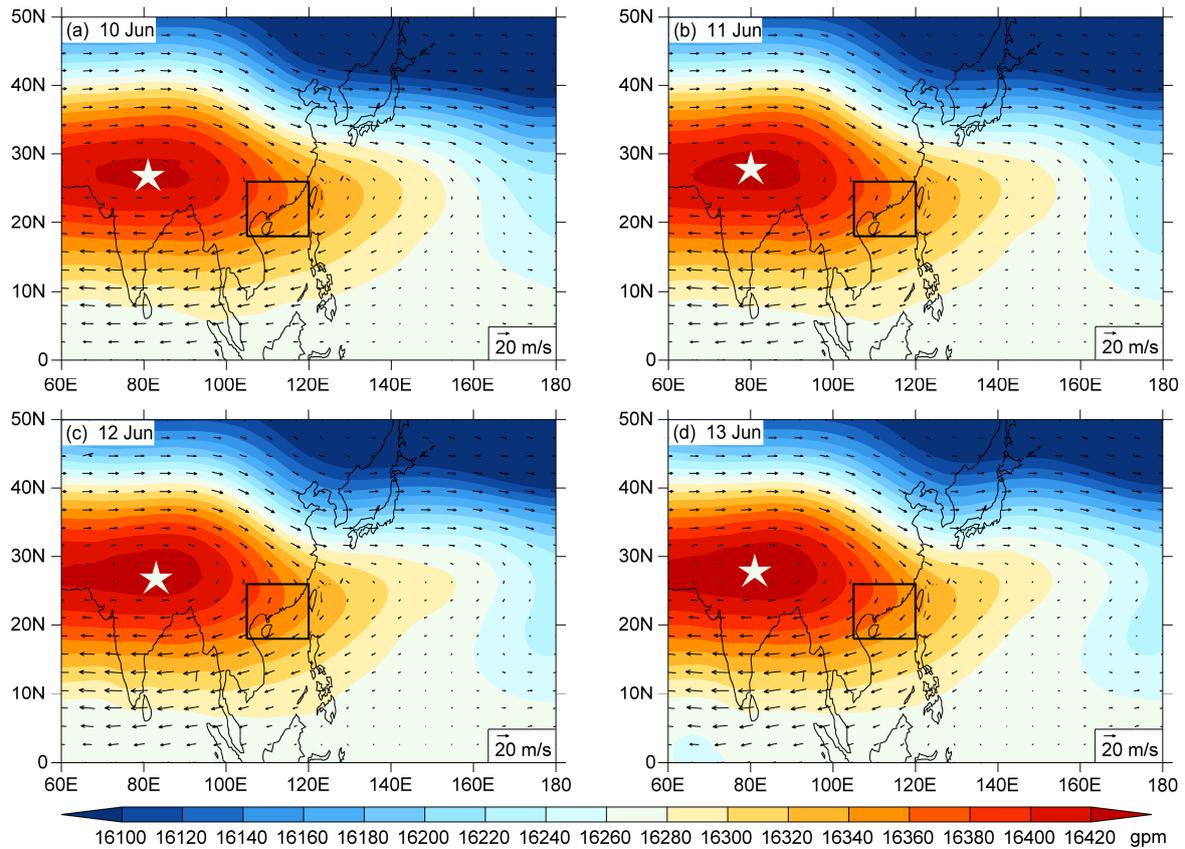


图 8 1991~2010 年气候平均的 6 月 10~13 日 0°~50°N 100 hPa 环流形势场（填充色表示位势高度，单位：gpm；黑色箭头代表水平风场；五角星点代表高压反气旋中心，即位势高度最大值所在点）

Fig. 8 Horizontal distributions of climatological mean (1991–2010) geopotential height (coloured, units: gpm) and wind field (vectors) at 100 hPa from 10 June to 13 June. The pentagrams represent anticyclonic high centers defined by the maximum geopotential height

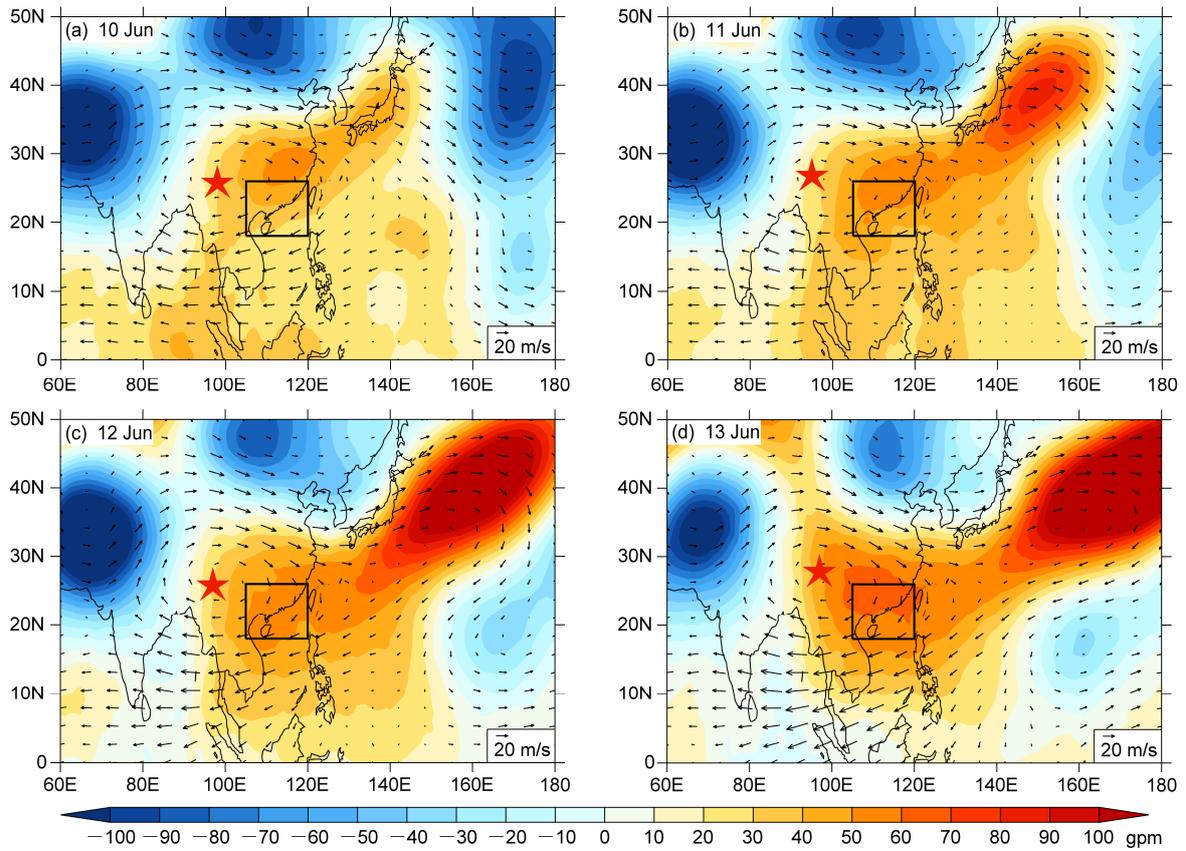


图9 2005年与1991~2010气候平均的0~50°N 100 hPa位势高度差值场(填色,单位:gpm)叠加2005年同时段的风场(矢量箭头),图a-d依次表示6月10日至6月13日(五角星点分别代表2005年6月10日至13日的高压反气旋中心,即位势高度最大值所在点)

Fig. 9 Differences between 2005 and climatological average (1991-2010) geopotential height fields at 100 hPa from 10 June to 13 June and the horizontal distributions of wind field (vectors) at 100 hPa in 2005 of the same period. The pentagrams represent anticyclonic high centers from 10 June to 13 June 2005

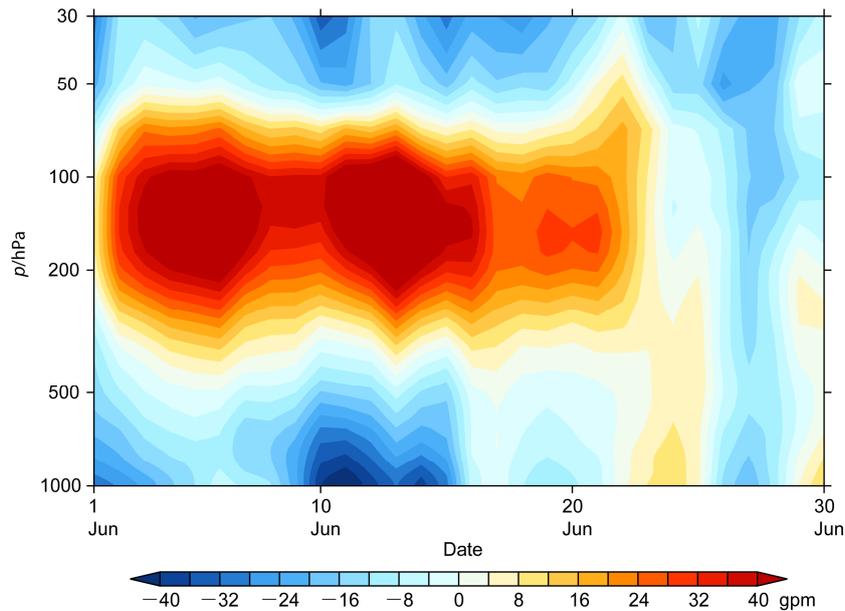


图10 2005年6月华南地区位势高度距平时间-高度变化,距平值根据2005年6月华南地区位势高度减去其气候态(1991~2001年平均)所得
Fig. 10 Time-height cross sections of geopotential anomaly (gpm) in June 2005 over South China. The anomaly is defined as the difference in geopotential height over South China in June between 2005 and the climatological mean (1991-2010) (the former minus the latter)

初起一直存在强的正异常，对流层中下层则为负异常；位势高度场中的正异常一直持续至暴雨结束，且随时间在 UTLS 区域出现两次明显的正异常加强过程；第一次正异常增强出现在月初，第二次正异常增强则从暴雨发生前一周（6 月 10 日）起，并且一直持续至暴雨发生当天（6 月 17 日）；在暴雨开始后，UTLS 区域的正异常随时间减弱消失。

从上述分析可知，在“05·6”华南暴雨发生前，中低纬度 100 hPa 高度上的南亚中心位置相较气候态来说偏东偏南，在暴雨发生前第 6 天开始南亚高压中心位置向西移动，且有高压舌区向东北方向延伸，为华南地区带来较强的东北风，华南地区受其影响，100 hPa 上的位涡值逐渐升高，位势高度较气候态异常偏高，UTLS 区域存在较强的位势高度正异常，随时间出现两次明显的增强过程，并在暴雨开始后减弱。

综合上述分析，“05·6”华南暴雨发生前，华南地区 UTLS 区域存在异常信号。从暴雨发生前第 9 天起，平流层低层东风开始向对流层中层传播，并在暴雨发生的前 1 天（6 月 16 日）下传至 500 hPa 高度附近，平流层低层东风的下传增强了华南地区上空的风切变，较强的风切变有利于垂直运动的发生发展，形成有利于降水的背景环境。在暴雨发生前第 8 天（6 月 9 日），由于南亚高压中心位置移动到华南地区附近，华南地区上空处于南亚高压控制下，存在一个随时间发展的低值位涡区，因此华南地区 100 hPa 上的位涡开始随时间减少。接下来，从暴雨发生前第 6 天（6 月 11 日）起，南亚高压开始向其东北方向伸展，虽然此时华南地区仍受发展的高压中心控制，其上空处于较强的低值位涡区域之中，但高压东部的东北风为华南地区带来平流层的高位涡空气，因此华南地区上空位涡略有回升；在暴雨发生前第 3 天（6 月 14 日）以后，南亚高压向西移动，使得华南地区上空低值位涡区移出的同时存在高值位涡区的移入，在两者的共同作用下，华南上空位涡值迅速升高，与此同时，华南区域的对流层顶开始下降，且下降幅度较大。根据 Hoskins (Hoskins et al., 1985; Hoskins, 1997) 的位涡理论，当有来自高层稳定的高位涡空气下传到达下层不稳定环境后，根据位涡守恒原理，其涡度增大，会促进气旋的发生和发展，有利于引起暴雨的形成；在绝热无摩擦的条件下，当高空有正位涡异常区（与对流层顶下降相对应），正位涡异常区下方

大气静力稳定度减小，同时由于位涡守恒性的作用，正位涡异常区下方大气的气旋性涡度增大，会出现围绕异常区的气旋性环流；又及，移动的正位涡异常区会使移动方向前方的空气产生上升运动；因此，在暴雨发生前华南地区上对流层存在的平流层高位涡空气的移入、对流层顶的下降均有利于暴雨或强对流天气的形成。为了验证这一猜想，接下来给出暴雨发生前一周至前第 2 天沿 18°N~26°N 平均的华南地区中上对流层纬向垂直速度场（图 11）。在图 11 中可以看到，从暴雨发生前一周起，华南地区中上对流层的垂直速度随时间逐渐增强，说明华南地区的上升运动逐渐增强，这与猜想所得结论一致。综上所述，“05·6”华南暴雨发生前 UTLS 区域的异常信号及其相互作用对“05·6”华南暴雨的影响在图 12 中给出。

4 结果与讨论

本文利用欧洲中心提供的 ERA-Interim 再分析资料，分析了“05·6”华南暴雨发生前上对流层至平流层的异常信号，得到以下结论：

(1) 通过对暴雨发生前华南地区上空对流层顶高度分析发现，“05·6”华南暴雨发生前，华南地区对流层顶高度存在比较明显的变化，且从暴雨发生前第 3 天起持续下降；华南地区上空出现的对流层顶的升降变化与日本南部上空对流层顶的高度异常有较好的对应关系，当日本南部上空对流层顶高度降低时，华南地区的对流层顶高度也在下降；而当日本南部上空对流层顶高度回升，华南地区对流层顶高度则也有上升。通过对这种变化与平流层高位涡冷空气的关系进行分析发现，由于我国中纬度沿海至日本一带的高位涡带向华南延伸，使得华南地区上空的位涡升高，对流层顶下降。

(2) 从暴雨发生前中低纬度环流场上看，2005 年 6 月中低纬度上对流层至平流层中层的东风偏强偏北；暴雨发生前在 15°N 附近出现上层东风的向下向北传播，对华南地区上空风场产生影响，华南地区中上对流层的西风早于气候态向东风转变，平流层低层东风在暴雨发生前第 9 天就开始向对流层中层传播；且华南地区上空的东风风场下传至 500 hPa 高度以下的时间早于气候态平均。

(3) 在位势高度场中，2005 年 6 月华南暴雨发生前 100 hPa 上的南亚中心相较其气候平均的位置

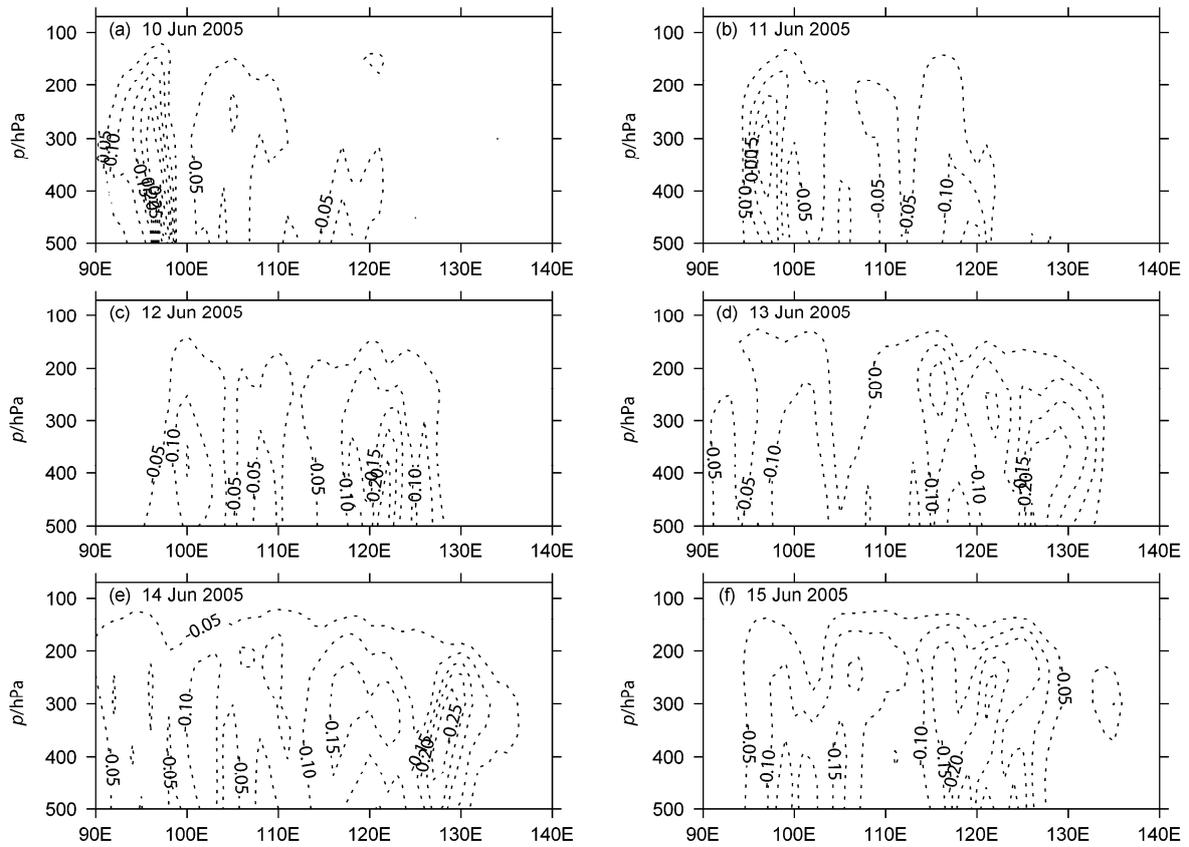


图 11 2005 年 6 月 10 日至 15 日沿 18°N~26°N 平均的垂直速度 (单位: m/s) 经度—高度剖面 (虚线表示上升运动)
Fig. 11 Longitude–height cross section of vertical velocity (m/s) averaged over 18°N–26°N. Dashed lines represent ascending motion

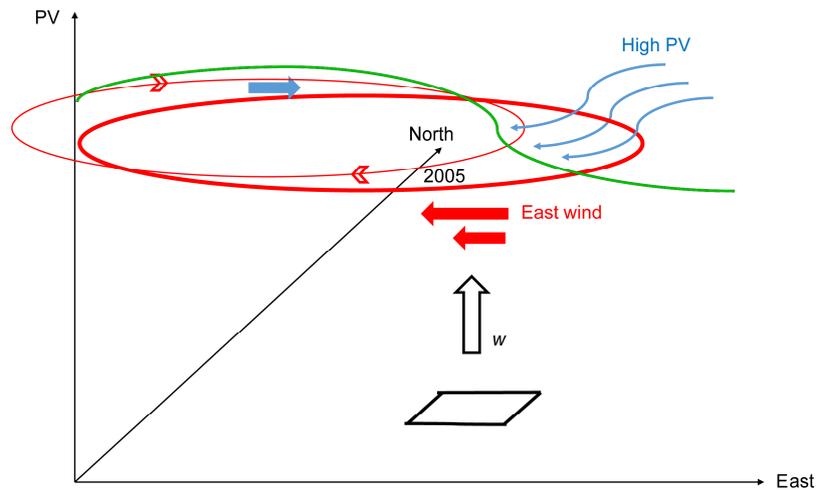


图 12 “05-6”华南暴雨发生前 UTLS 区域异常信号及其影响示意图 (红色细实线和粗实线分别表示气候态和 2005 年 6 月的南亚高压位置, 绿色实线代表等位涡线)

Fig. 12 The diagram of the anomaly signal and its influence in the UTLS (Upper Troposphere and Lower Stratosphere) over South China before the “05-6” heavy rainfall event. Red thin and thick lines denote climatological and 2005 South Asia high, respectively. Black line shows potential vortex (PV) contour

偏东偏南,在暴雨发生前第6天有向东北方向伸出的高压舌区,使华南地区的东风风场加强;在暴雨发生前,华南地区上空存在的持续性的正异常随时间出现两次增强,暴雨开始后,这种正异常随时间逐渐减弱。

(4) 南亚高压中心位置的偏移有利于华南地区平流层低层东风信号的提前下传,在对流层高层形成较强的风切变;此外,高压随时间向海上伸展,高压东部的东北风为华南上空带来平流层高位涡空气。这两种情况均有助于华南地区降水的发生。

参考文献 (References)

- Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F, et al. 2003. Weather from the stratosphere? [J]. *Science*, 301 (5631): 317–319, doi:10.1126/science.1085688.
- 卞建春. 2009. 上对流层/下平流层大气垂直结构研究进展 [J]. *地球科学进展*, 24 (3): 262–271. Bian Jianchun. 2009. Recent advances in the study of atmospheric vertical structures in upper troposphere and lower stratosphere [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (3): 262–271, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.03.005.
- Black R X. 2002. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation [J]. *J. Climate*, 15 (3): 268–277, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0268:SFOSCI>2.0.CO;2.
- 陈文, 魏科. 2009. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用 [J]. *地球科学进展*, 24 (3): 272–285. Chen Wen, Wei Ke. 2009. Anomalous propagation of the quasi-stationary planetary waves in the atmosphere and its roles in the impact of the stratosphere on the East Asian winter climate [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (3): 272–285, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.03.006.
- 陈月娟, 周任君, 邓淑梅, 等. 2009. 2008年雪灾同平流层环流异常的关系 [J]. *中国科学技术大学学报*, 39 (1): 15–22. Chen Yuejuan, Zhou Renjun, Deng Shumei, et al. 2009. Relationship between stratospheric circulation anomalies and extended snow storm [J]. *Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese)*, 39 (1): 15–22.
- Danielsen E F. 1968. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity [J]. *J. Atmos. Sci.*, 25 (3): 502–518, doi:10.1175/1520-0469(1968)025<0502:STEBOR>2.0.CO;2.
- Griffiths M, Thorpe A J, Browning K A. 2010. Convective destabilization by a tropopause fold diagnosed using potential vorticity inversion [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (562): 125–144, doi:10.1002/qj.49712656207.
- 何立富. 2006. “05·6”华南暴雨形成机理与中尺度对流系统研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. He Lifu. 2006. Study on the Physical Mechanisms and MCSs of the Sustained Heavy Rainfall Event in South China in June 2005 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- Highwood E J, Hoskins B J, Berrisford P. 2000. Properties of the arctic tropopause [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (565): 1515–1532, doi:10.1002/qj.49712656515.
- Hoerling M P, Schaack T K, Lenzen A J. 1991. Global objective tropopause analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (8): 1816–1831, doi:10.1175/1520-0493(1991)119<1816:GOTA>2.0.CO;2.
- Hoerling M P, Schaack T K, Lenzen A J. 1993. A global analysis of stratospheric tropospheric exchange during northern winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (1): 162–172, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<0162:AGA0SE>2.0.CO;2.
- Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. 1995. Stratosphere-troposphere exchange [J]. *Rev. Geophys.*, 33 (4): 403–439, doi:10.1029/95RG02097.
- Hoskins B. 1997. A potential vorticity view of synoptic development [J]. *Meteorological Applications*, 4 (4): 325–334, doi:10.1017/S1350482797000716.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111 (470): 877–946, doi:10.1002/qj.49711147002.
- 胡永云. 2006. 关于平流层异常影响对流层天气系统的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 21 (7): 713–720. Hu Yongyun. 2006. On the influence of stratospheric anomalies on tropospheric weather systems [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21 (7): 713–720, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2006.07.009.
- 黄燕燕, 钱永甫. 2004. 长江流域、华北降水特征与南亚高压的关系分析 [J]. *高原气象*, 23 (1): 68–74. HUANG Yanyan, QIAN Yongfu. 2004. Relationship between South Asian High and characteristic of precipitation in mid-and lower-reaches of Yangtze River and North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (1): 68–74, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.01.010.
- Kodera K, Kuroda Y. 2000. Tropospheric and stratospheric aspects of the Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (20): 3349–3352, doi:10.1029/2000GL012017.
- Kunz A, Konopka P, Müller R, et al. 2011. Dynamical tropopause based on isentropic potential vorticity gradients [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D1): D01110, doi:10.1029/2010JD014343.
- Lamarque J F, Hess P G. 1994. Cross-tropopause mass exchange and potential vorticity budget in a simulated tropopause folding [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51 (15): 2246–2269, doi:10.1175/1520-0469(1994)051<2246:CTMEAP>2.0.CO;2.
- 李崇银. 1992. 华北地区汛期降水的一个分析研究 [J]. *气象学报*, 50 (1): 41–49. Li Chongyin. 1992. An analytical study on the precipitation in the flood period over Huabei area [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 50 (1): 41–49, doi:10.11676/qxxb1992.005.
- 李崇银, 顾薇, 潘静. 2008. 梅雨与北极涛动及平流层环流异常的关联 [J]. *地球物理学报*, 51 (6): 1632–1641. Li Chongyin, Gu Wei, Pan Jing. 2008. Meiyu, Arctic Oscillation and stratospheric circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 51 (6): 1127–1135, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2008.06.002.
- 刘毅, 赵燕华, 管兆勇. 2008. 平流层环流异常对2008年1月雪灾过程的影响 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 548–555. Liu Yi, Zhao Yanhua, Guan Zhaoyong. 2008. Influences of stratospheric circulation anomalies on tropospheric weather of the heavy snowfall in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 548–555, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.19.

- 吕达仁, 卞建春, 陈洪滨, 等. 2009. 平流层大气过程研究的前沿与重要性 [J]. 地球科学进展, 24 (3): 221–228. Lü Daren, Bian Jianchun, Chen Hongbin, et al. 2009. Frontiers and significance of research on stratospheric processes [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (3): 221–228, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.03.001.
- Weisheimer, A, Palmer, T. N. 2014. On the reliability of seasonal climate forecasts [J]. Journal of The Royal Society Interface, 11(96), 20131162–20131162. doi:10.1098/rsif.2013.1162.
- 强学民, 杨修群. 2008. 华南前汛期开始和结束日期的划分 [J]. 地球物理学报, 51 (5): 1333–1345. Qiang Xuemin, Yang Xiuqun. 2008. Onset and end of the first rainy season in South China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (5): 1333–1345, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2008.05.007.
- Reiter E R. 1975. Stratospheric–tropospheric exchange processes [J]. Rev. Geophys., 13 (4): 459–474, doi:10.1029/RG013i004p00459.
- 寿绍文. 2010. 位涡理论及其应用 [J]. 气象, 36 (3): 9–18. Shou Shaowen. 2010. Theory and application of potential vorticity [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (3): 9–18.
- 寿亦萱, 陆风, 寿绍文, 等. 2014. 对流层顶折叠检测新方法及其在中纬度灾害性天气预报中的应用 [J]. 大气科学, 38 (6): 1109–1123. Shou Yixuan, Lu Feng, Shou Shaowen, et al. 2014. A new method for tropopause folding detection and its application in middle-latitude disastrous weather forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1109–1123, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13258.
- Thorpe A J. 1997. Attribution and its application to mesoscale structure associated with tropopause folds [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 123 (544): 2377–2399, doi:10.1002/qj.49712354411.
- Tyrlis E, Škerlak B, Sprenger M, et al. 2014. On the linkage between the Asian summer monsoon and tropopause fold activity over the eastern Mediterranean and the Middle East [J]. J. Geophys. Res., 119 (6): 3202–3221, doi:10.1002/2013JD021113.
- 王卫国, 孙绩华, 吴润, 等. 2008. 青藏高原及东亚邻近区域对流层顶气压场的时空演变结构分析 [J]. 热带气象学报, 24 (3): 294–302. Wang Weiguang, Sun Jihua, Wu Jian, et al. 2008. Structure analysis of the spatial–temporal feature of tropopause pressure field over the Tibetan Plateau and adjacent areas of East Asia [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (3): 294–302, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.03.013.
- 王志强. 2013. 北半球位涡分布特征及其与降水的关系研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文. Wang Zhiqiang. 2013. Research on the northern hemisphere potential vorticity distribution characteristics and its relationship with precipitation processes [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.
- 魏科, 陈文, 黄荣辉. 2007. 北半球平流层极涡崩溃过程的动力诊断分析 [J]. 中国科学, 37 (8): 1110–1119. Wei Ke, Chen Wen, Huang Ronghui. 2007. Dynamical diagnosis of the breakup of the stratospheric polar vortex in the Northern Hemisphere [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (9): 1369–1379, doi:10.1007/s11430-007-0100-2.
- Wernli H, Dirren S, Liniger M A, et al. 2002. Dynamical aspects of the life cycle of the winter storm ‘Lothar’ (24–26 December 1999) [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 128 (580): 405–429, doi:10.1256/003590002321042036.
- 向纯怡, 何金海, 任荣彩. 2009. 2007/2008 年冬季平流层环流异常及平流层—对流层耦合特征 [J]. 地球科学进展, 24 (3): 338–348. Xiang Chunyi, He Jinhai, Ren Rongcai. 2009. Stratospheric oscillation and stratosphere–troposphere coupling in 2007/2008 Winter [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (3): 338–348, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2009.03.0338.
- 杨双艳, 周顺武. 2010. 对流层顶研究回顾 [J]. 气象科技, 38 (2): 145–151. Yang Shuangyan, Zhou Shunwu. 2010. Review of researches on tropopause in recent 30 years [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 38 (2): 145–151, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2010.02.001.
- 曾庆存, 张东凌, 张铭, 等. 2005. 大气环流的季节突变与季风的建立 I. 基本理论方法和气候场分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 285–302. Zeng Qingcun, Zhang Dongling, Zhang Ming, et al. 2005. The abrupt seasonal transitions in the atmospheric general circulation and the onset of monsoons Part I: Basic theoretical method and its application to the analysis of climatological mean observations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 285–302, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.03.003.
- 雒佳丽, 田文寿, 张培群, 等. 2012. 梅雨发生前对流层顶及平流层异常信号的分析 [J]. 气象学报, 70 (4): 655–669. Luo Jiali, Tian Wenshou, Zhang Peiqun, et al. 2012. Analysis of the anomalous signals around the tropopause and in the stratosphere before the Meiyu onset [J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(4): 655–669, doi:10.11676/qxxb2012.053.