任素玲，蒋建莹，许健民. 2014. 卫星水汽通道探测所揭示的高空流场在南亚高压东侧强降水分析中的应用. 气象，40(6)：697-705.

卫星水汽通道探测所揭示的高空流场在南亚高压东侧强降水分析中的应用*

任素玲 蒋建莹 许健民
国家卫星气象中心，100081

提 要： 气候平均显示，我国中东部有一类降水和南亚高压脊线的位置有关。逐年资料显示，我国中东部区域平均降水出现在南亚高压脊线的东北侧，在南亚高压东侧脊线北推的过程中呈现两周左右的南北振荡。卫星水汽图可以表征对流层中高层大气运动信息，水汽图像和云导风叠加能够很好描述对流层高层反气旋中心和脊线位置，并且能够追踪对夏季降水非常重要的中高纬度下沉干冷空气活动。中高纬度水汽图上南压的小尺度暗区一般具有正位涡异常，它向雨带的推进可以造成持续降水期间雨量的迅速增强。与南亚高压相关的强降水主要出现在两个区域，一个位于南亚高压的西南侧，另一个位于南亚高压的东北侧，在这两个区域由于气流的发散特征，高层辐散清楚。南亚高压的北侧为副热带西风气流，当西风急流强盛时，高压东北侧的高空为强辐散区，对我国夏季强降水起重要作用。南亚高压的推进和撤退覆盖了我国大部分地区，时间跨度从5月初持续到10月初，因此，针对夏季淮河流域强降水卫星水汽图像特征得出的结论在春秋某些天气过程中也同样具有适用性，并且在比较偏北的西北、华北等地夏季也同样具有某些共同特征。南亚高压位置和形态影响我国降水落区和强度的同时，强降水造成的潜热释放也对南亚高压的非对称不稳定发展起重要作用。

关键词： 南亚高压，水汽图，云导风，暴雨
中图分类号： P412，P458 **文献标志码：** A **doi：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.06.006

Application of Upper Troposphere Circulation Revealed by the Satellite IR3 Channel to Heavy Rainfall Events Analysis in the East Side of South Asia High

REN Suling JIANG Jianying XU Jianmin
National Satellite Meteorological Centre, 100081

Abstract: In eastern China, there is one kind of rainfall that is related to the upper troposphere anticyclone, i.e., the South Asian High (SAH). The average heavy rainfall of central-eastern China in annual cycle happens in the northeastern side of the SAH ridge line and shows a quasi-biweekly oscillation in latitude when the SAH ridge line shifts northward or southward. The satellite water vapor (WV) images reveal the atmosphere movement of upper troposphere. The WV image and the derived wind can describe the location of the anticyclone center of upper troposphere and its ridge line and can also trace the downward dry and cold flow from middle-high latitude, which is important to heavy rainfall in summer. The small scale dark area extending southward on WV images is usually the strong potential vorticity area in mid-high latitude, and it can intensify the rainfall when moving to rainfall belt. There are two severe rainfall areas related to the SAH, one is in the southwest side of the SAH and another is in the northeast side of

* 公益性行业(气象)科研专项(GHYH200906001)和国家自然科学基金项目(41105028)共同资助
2013 年 8 月 21 日收稿； 2014 年 4 月 30 日收修定稿
第一作者：任素玲，主要从事大气动力学以及卫星资料在天气和气候监测分析中的应用研究. Email：rensl@cma.gov.cn

the SAH where the flow is divergent in the upper troposphere. In the north side of the SAH subtropical westerlies exist when the westerlies are strong, the divergence in the northeast side of the SAH in the upper levels is strong, which can induce strong precipitation in China. The SAH can affect most of China when it advances and withdraws from early May to early October. As a result, the concept model of the satellite image characteristics which is got from the cases over Huaihe River region in summer can also be used in other seasons or places such as Northwest China and North China regions. The location and shape of the SAH can affect the region and intensity of heavy rainfalls and meanwhile severe precipitation also has feedback on the SAH, leading the asymmetric instability development of the SAH.

Key words: South Asian high (SAH), water vapor image, atmospheric motion vector, heavy rainfall

引 言

南亚高压作为夏季北半球一个重要的行星尺度系统,关于它的形成和发展演变已经有很多研究,一般认为,南亚高压的形成和青藏高原夏季加热有关。罗四维等(1982)通过多年资料分析了南亚高压位置和形态对我国雨带分布的影响,指出 120°E 处南亚高压位置对划分长江流域入梅和出梅有指示意义。张琼等(1997; 2001)分析指出,南亚高压的位置和强度变化与我国长江流域大范围的降水有密切关系,当 100 hPa 高度场异常偏强时,江淮流域异常多雨,而南北两侧的华南、华北少雨。因此,引起降水年代际异常的主要因素跟南亚高压的异常分布有关。由气候平均可见,南亚高压对我国降水的分布有重要的影响。另外,影响我国夏季的一个重要的行星尺度系统为西北太平洋副热带高压,刘还珠等(2006)研究表明,高层西风带和南亚高压的动力作用会引发西北太平洋副热带高压的短期振荡。罗玲等(2005)和张玲等(2010)也都指出,南亚高压对西北太平洋副热带高压的变异有一定的作用。因而,在分析我国夏季强降水时,除了关注中低层大气环流的特征外,南亚高压也是一个非常重要的系统。

气象卫星水汽图像描述了对流层中上层信息,由水汽图像反演的大气运动矢量场可以很好地描述对流层高层南亚高压的位置和形态。侯青等(2006)利用多年大气运动矢量资料分析了强降水发生时对流层高层环流,指出对流层高层反气旋和我国南方强降水有密切的关系。另外,水汽图像暗区特征对降水也具有重要的指示意义,姚秀萍等(2005)分析了 2003 年梅雨期暴雨过程中干冷空气侵入和演变特征以及干冷空气侵入对暴雨发生、发展和维持的作用,研究认为,梅雨期中高纬度干冷空气的南下,有利于江淮流域暴雨的发展,干冷空气的活跃与暴雨过程相对应。曹丽霞等(2013)分析了 2007 年发生在 7 月 9—10 日的暴雨过程中气象卫星水汽图像特征,指出卫星水汽图像上具有对暴雨发生有指示意义的图像特征。并且,卫星水汽图像上暗区所表征的干侵入可以激发爆发性涡旋的发展(黄彬等,2011)。

本文将通过相关个例阐述和南亚高压相关的我国夏季强降水卫星水汽图像特征以及水汽通道导风分布特征。同时分析这种类型的降水在北方地区以及春秋季节的普遍适用性。

1 资料

本文所用大气环流资料为 NCEP/NCAR 再分析数据集(Kalnay et al,1996),该数据包括气候平均日资料以及逐日 6 h 平均数据,垂直方向上在 1000～10 hPa 之间分为 26 层,水平空间分辨率为 2.5°×2.5°,用到的物理量为风场、高度场以及温度场。气候平均日资料是依据 1968—1996 年数据计算得出。

降水资料有 3 类,包括气候平均 CMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation; Huffman et al, 1997)资料,TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)3B42 数据(Huffman et al,2007)以及我国加密站点 08 时 24 h 累计降水量和 1 h 降水量。CMAP 资料为候平均格点资料,空间分辨率为 2.5°×2.5°,是利用 1979—2011 年的数据得到的候平均资料;TRMM 降水资料的时间分辨率为 3 h 1 次,空间分辨率为 0.25°×0.25°。

气象卫星资料包括 FY-2 系列静止气象卫星水汽图像以及 TBB 和水汽通道云导风反演产品(许健民等,2006)。风云气象卫星数据:1 h 或 30 min 1 次云图;6 h 1 次云导风数据;1 h 1 次 TBB 和 OLR 数据,空间分辨率为 1°×1°。

2　气候平均南亚高压和我国中东部降水演变特征

气候平均而言，北半球对流层高层反气旋中心冬季位于热带西北太平洋上空，随着太阳的北推，海陆热力差异以及潜热加热的影响，4 月底至 5 月初南亚高压中心在中南半岛南部形成，此时，受南亚高压西南侧强高空辐散的影响，孟加拉湾东南部对流活跃，亚洲夏季风首先爆发。从图 1 中可以看出，5 月 1 日，南亚高压中心位于中南半岛南部，高压脊线位于 10°N 附近，孟加拉湾地区位于南亚高压的西南侧，高层辐散增强，有利于孟加拉湾地区对流的发展和夏季风爆发。5月15日，南亚高压中心北移到

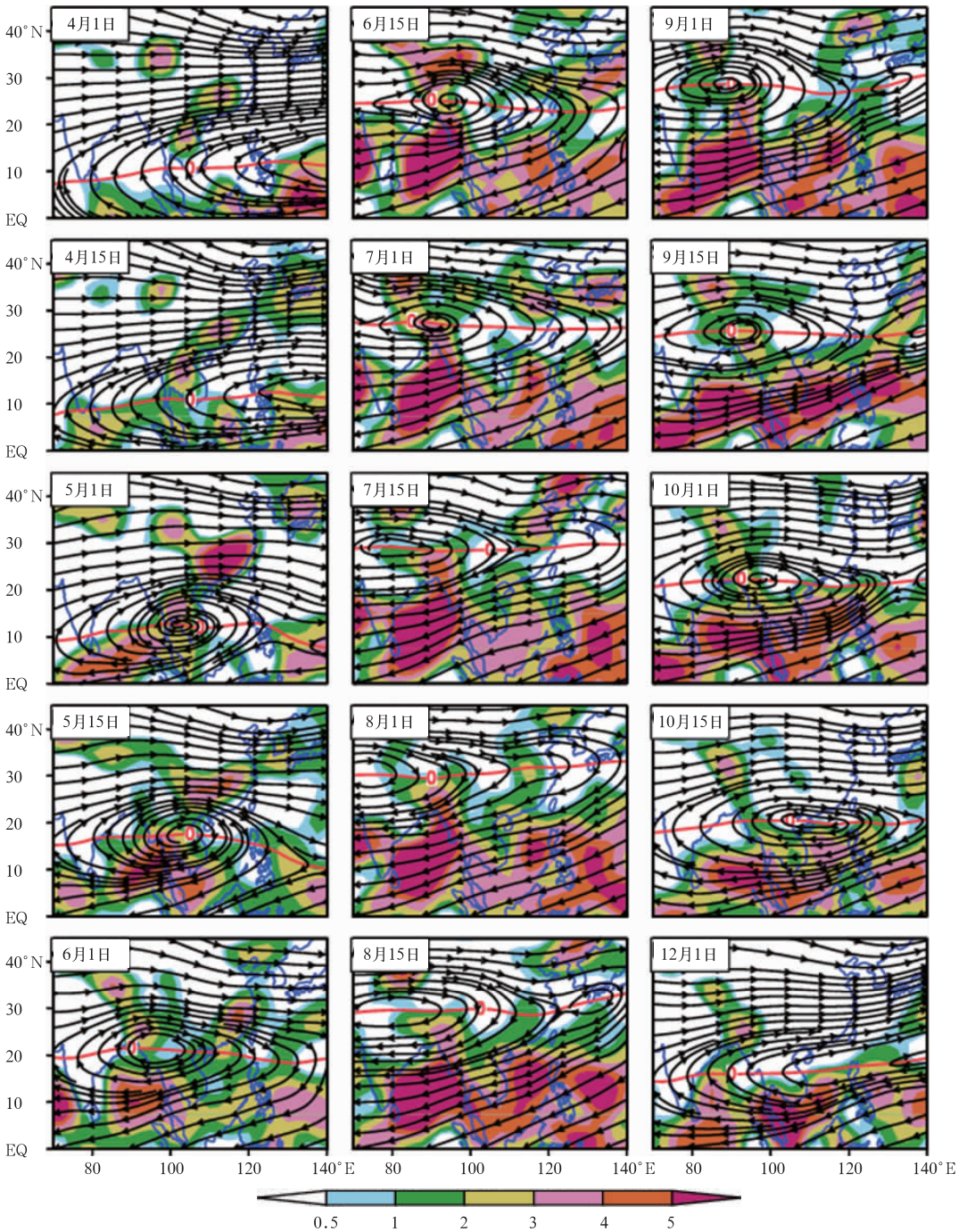


图 1　气候平均 200 hPa 流线（黑色线）、南亚高压脊线位置（红色线）和散度场（阴影）

Fig. 1　Climate average of streamline (black curve), south Asian High ridge (red curve) and divergence (shaded) at 200 hPa

中南半岛北部，此时，南海夏季风开始爆发。6 月 15 日，南亚高压中心向西北方向移动到青藏高原上空，而高层反气旋东侧脊线也北推到华南。7 月上中旬，高压脊线较稳定地维持在长江附近。8 月 15 日左右，南亚高压中心和脊线达到最北端。9 月开始再次南落东退。11 月对流层高层反气旋中心到达 4 月初的状态，位于菲律宾以东的洋面上，完成一个年际循环。

在对流层高层南亚高压年循环过程中，对流层高层辐散中心也发生明显变化，5 月 1 日至 6 月 1 日，随着高压在中南半岛形成，高压的西南侧（孟加拉湾）和东北侧（我国江南和华南地区）有两个较强的辐散中心，随着南亚高压北上，7 月 15 日高压东北侧的辐散中心北推到江淮流域，对应着该地区的梅雨季节。对流层高层辐散有利于上升气流的发展和强降水的产生（图 1）。

图 2a 给出了 110°～120°E 区域平均 200 hPa 纬向风分布，零风速线代表南亚高压脊线。从图 2 中可以看出，5 月初南亚高压脊线迅速北推，对应着大于 4 mm·d^{-1} 的平均降水量迅速扩展到南海大部分区域，而我国华南持续降水也开始向北推进到 30°N 以北区域。7 月底，南亚高压脊线推进到 32°N 附近的最北端，而平均降水大于 6 mm 的降水带也推进到 35°N 附近的最北端，而 2～4 mm·d^{-1} 的降水则推进到华北以及内蒙古等地。8 月底以后，随着南亚高压脊线的缓慢南落，降水也有一个缓慢南落的过程。因此，从气候平均来看，南亚高压东侧脊线位置和我国雨带的年循环有密切的关系。

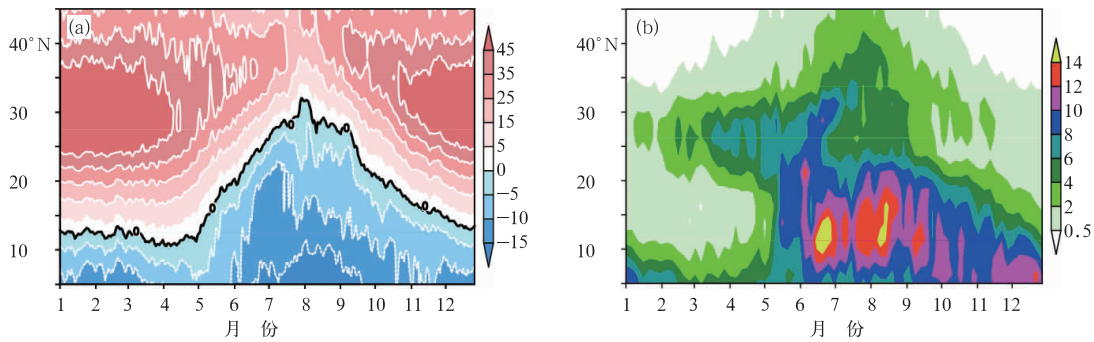


图 2 110°～120°E 区域内气候平均 200 hPa 纬向风（a，黑色实线代表东西风交界，红色为西风，蓝色为东风）和降水量随时间演变（b，CMAP 降水资料）

Fig. 2 Time series of zonal wind at 200 hPa (a, the black solid curve indicates zero zonal wind, red color represents westerlies and the blue is easterlies) and precipitation (b, CMAP precipitation data) in climate average in the regional average of 110°－120°E

为了更好地分析南亚高压脊线和我国东部降水落区的关系，图 3 给出了 2007 年 110°～120°E 区域平均的日降水量和南亚高压脊线对应关系。从图中可以看出，2007 年 5 月 15 日左右，南亚高压脊线迅速北抬到 23°N 附近，在南亚高压脊线的北侧（27°N 附近），16 日开始出现明显的降水过程，降水南移的过程中南亚高压脊线也向南移动，降水过后，南亚高压脊线于 5 月 20 日迅速北推到更偏北的位置（28°N 附近）。整体而言，2007 年 5 月 15 日至 7 月 29 日，110°～120°E 区域内我国东部地区出现 7 次比较清楚的降水过程。在这 7 次降水过程中，降水出现在南亚高压脊线的北侧，并且随着高压脊线南移降水也南移，高压脊线再次北跳的位置一般比上一次的纬度偏高。从整个过程来看，2007 年 6 月 30 日至 7 月 12 日我国东部出现一次强降水过程，且降水持续时间长，现以这次过程来分析南亚高压东部脊线北侧的强降水卫星水汽图像特征。

3 淮河流域强降水卫星水汽图像特征

2007 年 6 月 30 日至 7 月 12 日，在南亚高压东部脊线的北侧出现了一次强降水过程，降水主要出现在 29°～34°N 附近的淮河流域。图 4a 给出了 2007 年 7 月 1—12 日（29°～34°N、113°～122°E）区域内 1 h 总降水量随时间演变。可以看到，在持续降水期间，出现多次异常强降水时间段（1、3、5、8 和 9 日），本文以 7 月 3 日强降水过程分析这类持续降水过程期间造成异常强降水的卫星水汽图像特征。7 月 3 日最强降水出现在 01 时左右，24 h 累计降水量最大值为 155 mm（图 4b）。

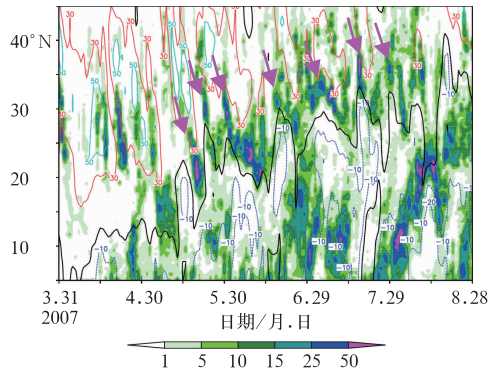


图 3　2007 年 3 月 31 日至 8 月 28 日 110°～120°E 区域内日平均 200 hPa 纬向风和日平均降水量随时间演变

（黑色实线代表东西风交界，实线为西风，虚线为东风；单位：m·s^{-1}。填色图，TRMM 降水，单位：mm·d^{-1}）

Fig. 3　Time serials of daily zonal wind at 200 hPa and daily precipitation in the regional average of 110°－120°E from 31 March to 28 August 2007

(black solid curve indicates zero zonal wind, solid curves indicate westerlies and dashed curves indicate easterlies; shaded, TRMM precipitation, unit: mm·d^{-1})

在强降水出现前，自内蒙古中部、西北地区东部卫星水汽图像上有暗区向东南方向移动（图 5，暗区为图中橙色区域）。随着暗区南压，淮河流域由稳定性降水转变为局地强对流性降水（1 h 降水分布图未给出）。图 5 中可以看到，3 日 12 时，暗区南压到河南中部和山东南部，在暗区前侧，安徽南部和江苏南部形成一条强对流云带。为了分析该暗区对淮河流域持续降水期间异常强降水的影响，图 6 给出了沿图 5c 中蓝色实线方向的位涡和垂直涡度的垂直剖面。2 日 18 时（图 6c）沿着暗区移动方向有高位涡从西北方向下伸展，在 400～600 hPa 左右的高度形成高涡度中心，并且正垂直涡度也从 2 日 12 时的（图 6b）2×10^{-5} s^{-1} 增加到 3×10^{-5} s^{-1}，并且其最大中心也伸展到对流层低层，3 日 06 时（图 6e），西北侧的正垂直涡度向南伸展到江苏南部，对应着该地区强对流云团发展（图 5c）。3 日 12 时（图 6f）后，随着暗区东移，西北侧的位涡和正涡度也迅速减小，正涡度仅出现在较低的对流层下层，降水强度明显减弱。因此，北方小尺度暗区具有正位涡异常，在暗区移动方向的前方，对流层中下层形

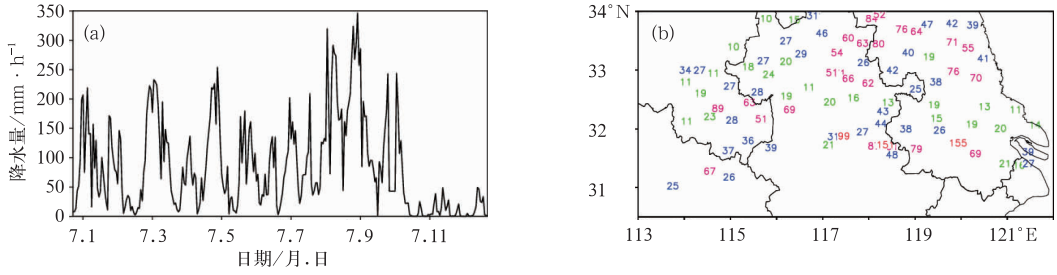


图 4　2007 年 7 月 1—12 日（29°～34°N、113°～122°E）区域 1 h 总降水量随时间演变（a）和 7 月 3 日 00 时至 4 日 00 时 24 h 累计降水量分布（b，UTC）

Fig. 4　Time serials of hourly total precipitation over the range of 29°－34°N, 113°－122°E from 1 to 12 July (a) and 24 h total precipitation distribution from 00:00 UTC 3 July to 00:00 UTC 4 July (b), 2007

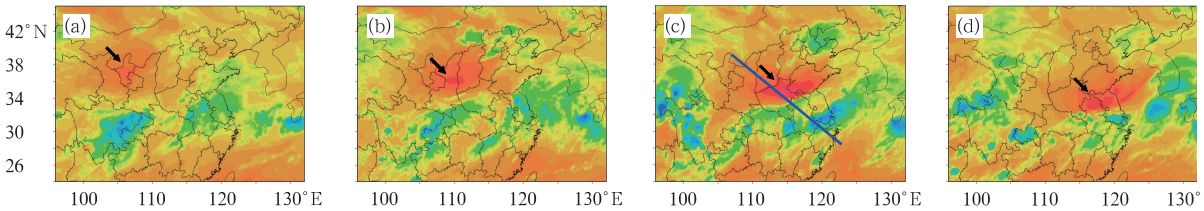


图 5　2007 年 7 月 3 日强降水期间卫星水汽增强图像

（a）00 时，（b）06 时，（c）12 时，（d）18 时

（红色为水汽图像上暗区，绿色和蓝色为云系；黑色箭头为水汽图像上暗区；图 c 中蓝色线为图 6 中垂直剖面的方向）

Fig. 5　IR3 satellite image during the heavy rainfall on 3 July 2007

(a) 00:00 UTC, (b) 06:00 UTC, (c) 12:00 UTC, (d) 18:00 UTC

(red colour indicates dark areas, green and blue ones indicate clouds; Dark arrow indicates the dark area on IR3 image, blue line in c is the direction of vertical section of Fig. 6)

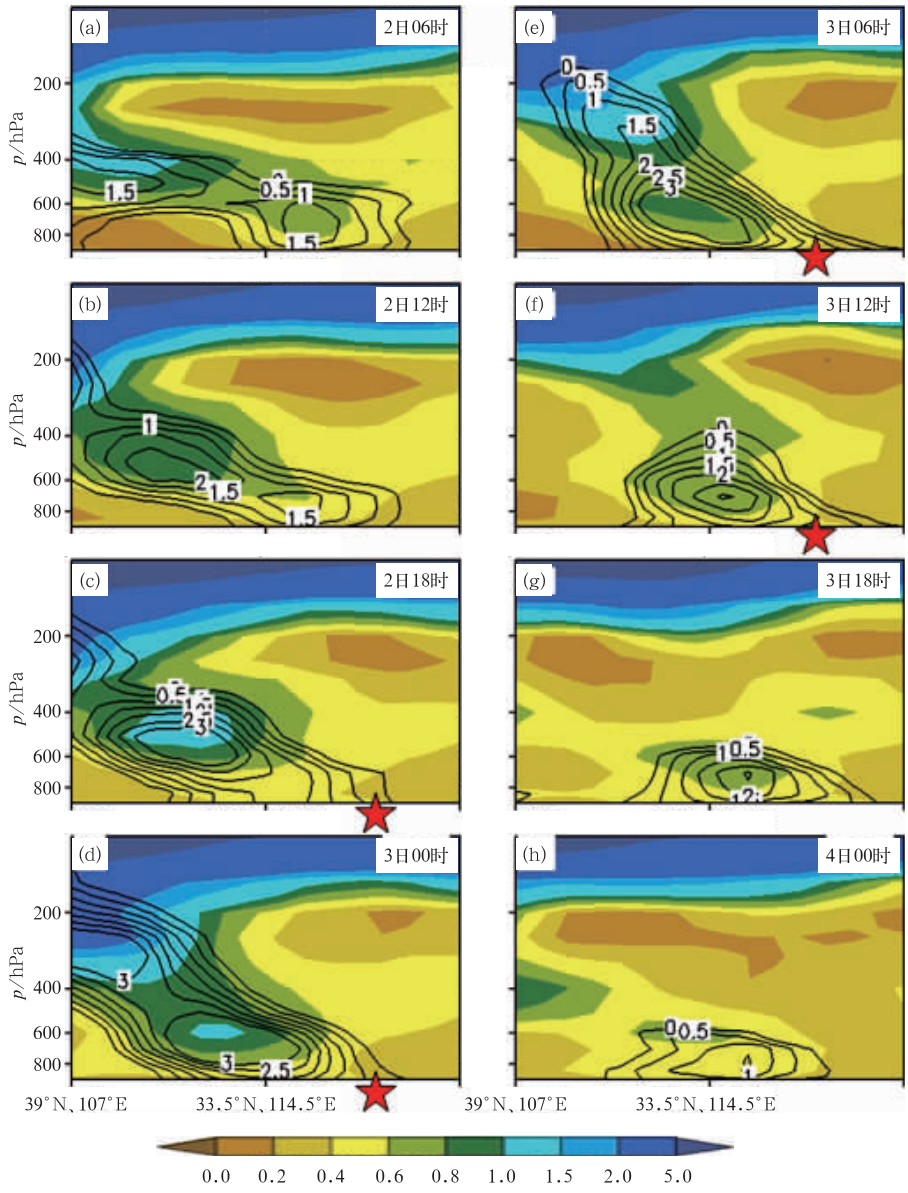


图 6 2007 年 7 月 2—4 日强降水期间位涡(填色,单位:10^{-6} m^2 · s^{-1} · K · kg^{-1})和垂直涡度(黑色等值线,单位:10^{-5} s^{-1})沿着图 5c 中蓝线的垂直剖面(世界时)

(图中红色五角星标记为图 5c 中强对流云团发生位置)

Fig. 6 Vertical cross-section of potential vorticity (shaded, unit: 10^{-6} m^2 · s^{-1} · K · kg^{-1}) and vertical vorticity (black isoline, unit: 10^{-5} s^{-1}) along the direction of blue line in Fig. 5c during the heavy rainfall from 2 to 4 July 2007

(The red star indicates the location of server convective cloud in Fig. 5c)

成高位涡舌以及正涡度舌,随着正涡度由对流层中层伸展到淮河流域近地面时,有效增强了对流发展和降水产生。

从 3 日 12 时探空观测可以看出,在水汽图像上暗区的地方,500 hPa 高度上为冷中心(图 7a),并且暗区的地方 500 hPa 为西北气流,风速较大,暗区中心附近水汽混合比为零,2 g · kg^{-1}的等比湿线基本位于暗区的南缘,北侧为干区,南侧为湿度较大的地方。因此,水汽图像上自北方南下的该类型的暗区具有干冷的特征。在夏季降水中冷空气起重要作用,特别是中小尺度冷空气活动对稳定降水过程中强降水的触发很重要。夏季气象卫星水汽图像和动画能够很清楚地监测到对流层中上层各种尺度的冷空气活动以及冷空气移动方向,因此水汽图像在天

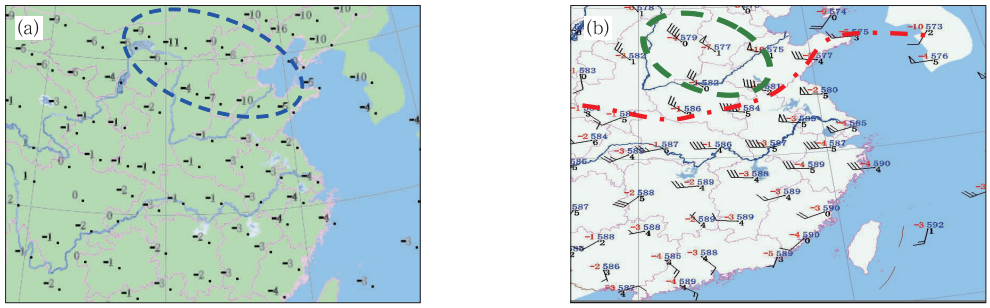


图 7　2007 年 7 月 3 日 12 时 500 hPa 天气图
(a) 温度，(b) 风场和混合比湿（红色虚线为 2 g·kg^{-1}等比湿线）
Fig. 7　500 hPa synoptic chart at 12:00 UTC 3 July 2007
(a) temperature, (b) wind and specific humidity
(Red dashed curve is 2 g·kg^{-1} specific humidity)

气预报分析中能发挥重要作用。

利用水汽图像反演的导风能够描述对流层中上层大气的移动状况，图 8 给出 7 月 3 日 05:30 和 11:30 的水汽图像导风和对流层高层散度。在这次强降水过程中，对流层高层反气旋（南亚高压）中心位于四川中部，江汉、江淮等地位于高压东部脊线北侧的高空辐散区域。7 月 3 日 05:30 对流层高层的辐散中心位于江苏中北部，随着辐散区南推到安徽南部和江苏南部，降水也相应的南压（1 h 降水量分布未给出）。从图 8 中对流层高层风场可以看出，在南亚高压的北侧为强的副热带西风急流，西风急流和南亚高压南侧的偏东风形成强的高空辐散，对该地区的对流发展提供了有力的高层抽吸环境。

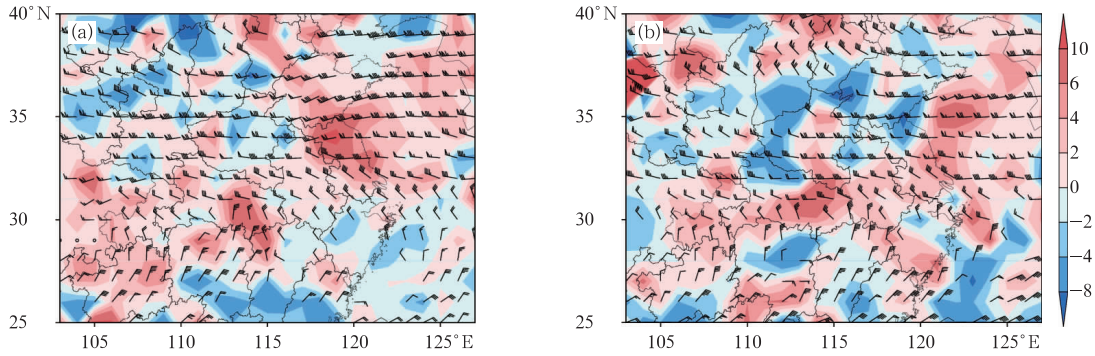


图 8　2007 年 7 月 3 日 05:30(a)和 11:30(b)水汽导风和散度叠加图（世界时）
Fig. 8　Atmospheric motion vector and its derived divergence at 05:30 UTC (a), and 11:30 UTC (b) 3 July 2007

4　该类降水卫星水汽图像特征在其他地区和季节的适用性

在南亚高压东部脊线北侧发生的强降水卫星图像特征在其他地区和季节也有一定的适用性。从本文第二节的分析可知，随着季节的北推，气候平均而言，7 月底和 8 月初，南亚高压脊线北推到 35°N 附近，但是就某一年而言，该高压脊线可以北推到更偏北的地方，西北地区东部、华北等地经常有一类降水和南亚高压活动有关。本部分将以 2010 年 8 月 7 日夜至 8 日凌晨发生在甘肃甘南藏族自治州的短时强降水为例进行说明。

2010 年 8 月 7 日夜至 8 日凌晨，甘肃南部出现对流性强降水，造成严重的自然灾害。FY-2E 气象卫星 TBB 监测显示（图 9），低于－62℃的亮温首先出现在青海的东部，然后系统向东南方向发展，夜间一条云带向偏东方向移动，另一个强对流云团继续向东南方向移动，造成了此次灾害性天气。从 1 h 降水量来看（图 10），最强降水出现 7 日 13 时以后，位于舟曲上游的代古寺站 13 和 14 时 1 h 降水量分别为 55.4 和 28.4 mm，而位于舟曲附近的东山站

16 时 1 h 降水强达 77.3 mm。短时强降水引发泥石流，造成严重的自然灾害。

在这次降水过程中，从增强水汽图像和200 hPa风场叠加可以看出(图 11)，2010 年 8 月 7 日 12 时，在强降水的北侧内蒙古中西部水汽图像上有一条暗带(橙色区域)，从水汽图像动画可以看出该暗区在强降水发生前是东移南压并加强的过程(动画未给出)，同时在 200 hPa 等压面上，甘肃南部位于对流层反气旋的东北侧，风向呈明显的辐散。因此，这次强对流天气过程同样发生在南亚高压东北侧高空辐

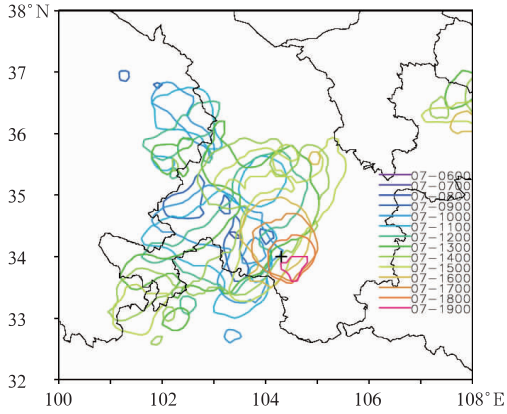


图 9 2008 年 8 月 7 日 06—19 时 TBB 低于－62℃的区域随时间演变
(十字形标记处为舟曲的位置)

Fig. 9 Evolution of TBB low than －62℃ from 06:00 to 19:00 UTC 7 August 2008
(Cross mark indicates Zhouqu County)

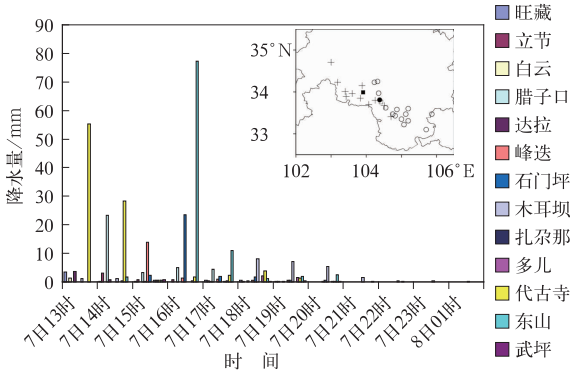


图 10 甘肃陇南地区自动站 1 h 降水量实况图
(单位：0.1 mm)和站点分布
(空心圆标记的站点属于陇南地区，黑色实心圆为舟曲县城位置，空心方框为东山站)

Fig. 10 Time serials of 1 h precipitation of automatic stations in Longnan Area (unit: 0.1 mm) and distribution of the stations
(Hollow circles indicate the stations within Longnan Area, black solid circle indicates Zhouqu County and square indicates Dongshan Station)

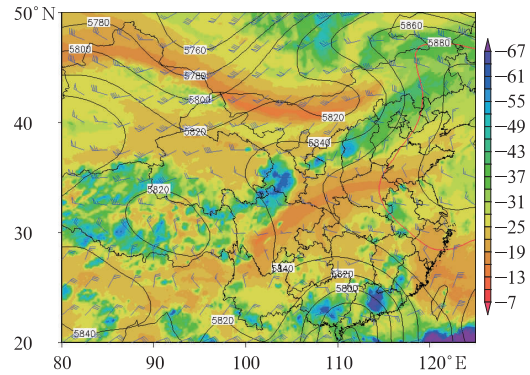


图 11 2010 年 8 月 7 日 12 时 FY-2E 水汽增强图像(填色)、200 hPa 风场以及 500 hPa 高度场叠加
(红色等值线为 5880 线，代表副热带高压位置)

Fig. 11 FY-2E IR3 image (shaded), wind at 200 hPa and geo-height at 500 hPa at 12:00 UTC 7 August 2010
(Red curve is 5880 gpm, indicating the location of subtropical high)

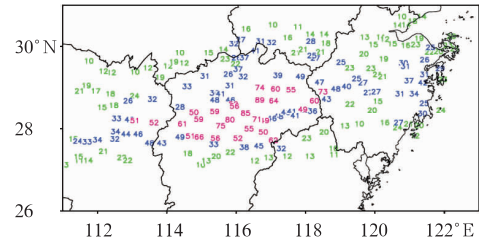


图 12 2012 年 9 月 21 日 00 时至 22 日 00 时 24 h 累计降水量

Fig. 12 The 24 h total precipitation from 00:00 UTC 21 September to 00:00 UTC 22 September 2012

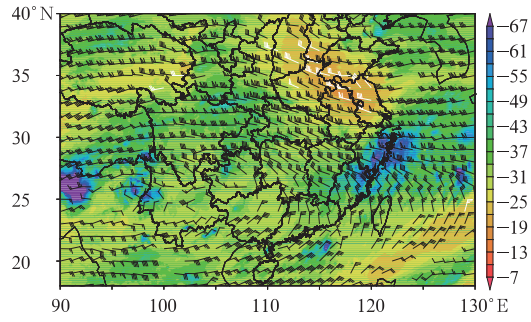


图 13 2012 年 9 月 21 日 23:30 水汽增强图像和导风叠加
(黑色风向杆：150～399 hPa，白色风向杆：400～699 hPa)

Fig. 13 IR3 image (shaded) and atmospheric motion vector at 23:30 UTC 21 September 2012
(black: 150－399 hPa, white: 400－699 hPa)

散区，降水区的北侧有代表冷空气的暗区活动，与夏季江淮区域的强降水有一些共性。

另外，在春秋季节，南亚高压东侧脊线北推或南压的过程中，江南、华南等地也会出现类似的降水过程。2012 年 9 月 21 日，江南中部出现暴雨天气（图 12），暴雨出现在江西北部。从水汽图像和水汽导风叠加图可以看到，这时南亚高压中心位于云南附近，东侧的高压脊线位于广西和广东北部（图 13）。西北地区东部至江淮一带水汽图上有暗区（图 13 中橙色区域），从水汽动画可以清楚看到该暗区的南压的过程（动画未给出）。

5　结论和讨论

由前面分析可知，南亚高压系统是影响我国夏季天气的重要行星尺度系统，有一类强降水出现在南亚高压东北侧高层辐散区，该区域位于南亚高压东侧脊线的北侧。并且在持续降水期间，如果水汽图像上北方有暗区向降水区靠近，会造成对流和降水的异常增强。这类水汽图像上的暗区一般为对流层中高层干冷空气，在暗区移动路径的前方，对流层中下层具有高位涡以及正涡度异常，并且超前于水汽图像暗区向下伸展到移动路径上更靠前的位置。这类降水不仅出现在夏季我国淮河流域，还可能出现在我国的北方地区以及春秋季节的南方地区。

（1）卫星水汽导风图像能够很好地描述大气对流层中上层流场信息，而水汽图像上暗区的移动变化能够为天气预报服务人员提供对夏季降水非常重要的冷空气活动信息。因此，对卫星水汽图像以及导风数据的有效利用能够提高对天气系统发展演变的把握。

（2）虽然在天气分析中，对流层低层水汽输送、垂直运动、低层风速和风切变是非常重要的因素，但是大气对流层上层的环流结构也非常重要，对流层高层的环流对中低层环流也有一定的调节作用。只要当高低层有利条件很好地耦合在一起的时候，才是最有利于强天气发生的形势。

（3）这类与南亚高压的位置和形态有关的强降水潜热释放能在短期内显著改变南亚高压中心位置和形态。从逐年降水观测来看，降水过后，南亚高压东侧脊线有突然北跳的过程，新的降水在更偏北的位置产生（图 3），而南亚高压中心和脊线出现南北的振荡。以往关于南亚高压的振荡主要关注它在东西方向上的准两周振荡。对于南北振荡的研究较少，一般认为，南亚高压的南北振荡跟西风带槽脊的活动有关。但是，研究也表明，热带或副热带强降水潜热释放对中纬度槽脊的发展有重要影响，可以引导一次冷空气活动（Wu et al，2013）。因此，研究南亚高压脊线北侧强降水对南亚高压后期发展演变的影响机制可以更好地为气象预报服务。

参考文献

曹丽霞，赵亮，徐怀刚，等. 2013. 2007 年 7 月 9—10 日江淮大暴雨的水汽图像解译研究. 气象，39(5)：608-615.

侯青，许健民. 2006. 卫星导风资料所揭示的对流层上部环流形势与我国夏季主要雨带之间的关系. 应用气象学报，17(2)：138-144.

黄彬，钱传海，聂高臻，等. 2011. 干侵入在黄河气旋爆发性发展中的作用. 气象，37(12)：1534-1543.

刘还珠，赵申蓉，赵翠光. 2006. 2003 年夏季异常天气与西太副高和南亚高压演变特征的分析. 高原气象，25(2)：169-178.

罗玲，何金海，谭言科. 2005. 西太平洋副热带高压西伸过程的合成特征及其可能机理. 气象科学，25(5)：465-473.

罗四维，钱正安，王谦谦. 1982. 夏季 100 hPa 南亚高压与我国东部旱涝关系的天气气候研究. 高原气象，1(2)：1-10.

许健民，张其松. 2006. 卫星风推导和应用综述. 应用气象学报，17(5)：574-582.

姚秀萍，于玉斌. 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用. 大气科学，29(6)：973-985.

张玲，智协飞. 2010. 南亚高压和西太副高位置与中国盛夏降水异常. 气象科学，30(4)：438-444.

张琼，钱正安，陈敏连. 1997. 关于南亚高压的进一步研究Ⅰ. 与我国西北地区降水的关系的统计分析. 高原气象，16(1)：52-62.

张琼，吴国雄. 2001. 长江流域大范围的旱涝与南亚高压的关系. 气象学报，59(5)：569-577.

Huffman G J，Adler R F，Arkin P，et al. 1997. The Global Precipitation Climatology Project（GPCP）combined data set. Bull Amer Meteor Soc，78(1)：5-20.

Huffman G J，Adler R F，Bolvin D T，et al. 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis：Quasi-global，multi-year，combined-sensor precipitation estimates at fine scale，J Hydrometeor，8(1)：38-55.

Kalnay E，Kanamitsu M，Kistler R，et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc，77(3)：437-471.

Wu G X，REN S L，et al. 2013. Impact of tropical cyclone development on the instability of South Asian High and the summer monsoon onset over Bay of Bengal，Climate Dynamics，41(9－10)：2603-2616. doi：10.1007/s00382-013-1766-0.