

康志明, 桂海林, 王小光. 2013. 2009 年夏季西太平洋副热带高压北抬原因初探. 气象, 39(1): 46-56.

# 2009 年夏季西太平洋副热带 高压北抬原因初探<sup>\* 1</sup>

康志明<sup>1</sup> 桂海林<sup>1</sup> 王小光<sup>2</sup>

1 国家气象中心, 北京 100081

2 华风气象影视信息集团, 北京 100081

**提 要:** 利用数值模式再分析数据和常规观测资料, 分析研究 2009 年 6—8 月西太平洋副热带高压(以下简称副高)连续 5 次北抬至偏北位置, 且异常稳定维持, 造成江淮流域干旱少雨(空梅)之缘由。通过合成、相关等分析方法探讨西风带、副热带、热带主要大气环流系统之间的相互影响和作用, 并利用全型涡度方程探讨副高北抬和强度维持的主要机制。结果表明: (1) 西风带波动的传播与副高变化关系密切, 西太平洋副高的北抬过程起始于中段副高(140°~160°E)强度加强; (2) 副高北抬之前孟加拉湾东部有明显的对流活动, 对于副高的北抬和加强有一定的指示意义, 而副高南侧的对流活动与副高北抬之间是一种伴随关系; (3) 涡度场变化分析可知, 副高北抬的关键因素是中高纬度槽脊变化引起的东亚沿海负涡度的增加。

**关键词:** 西太平洋副热带高压, 射出长波辐射(OLR), 全型涡度方程, 动力学机制

**中图分类号:** P447

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.006

## The Study of Northward Jump of Subtropical High over the Western Pacific in Summer 2009

KANG Zhiming<sup>1</sup> GUI Hailin<sup>1</sup> WANG Xiaoguang<sup>2</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Huafeng Group of Meteorological Audio and Video Information, Beijing 100081

**Abstract:** Using the reanalysis data derived from numerical model and the routine observation data, the mutual influence and interaction between the significant circulation systems in the westerlies, subtropics and tropical area during the summer of 2009 were studied by composite and correlation analysis. The complete form of vertical vorticity tendency equation was used to explore the dynamic mechanism for the northward jump and strength maintenance of the subtropical high. The study reveals that the variance of the subtropical high is closely related to the propagation of the westerly wave, and the jump of the west Pacific subtropical high starts at the strengthening of the middle part of subtropical high (140°-160°E); Severe convection over the Bay of Bengal occurred previous to the northward jump of the subtropical high, which has indicative significance to the forecast of the jump and strengthening of the subtropical high. Nevertheless, the convective activities south to the subtropical high have accompanying relationships with the northward jump of subtropical high; meanwhile, from the perspective of dynamic mechanism, the key factor of northward jump of the subtropical high is the variance of the vorticity over East Asia coastal areas, which is caused mainly by the movement of the trough and ridge in middle-high latitudes.

**Key words:** west Pacific subtropical high, outgoing long-wave radiation (OLR), the complete form of vertical vorticity tendency equation, dynamic mechanism

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006018)资助

2012 年 3 月 31 日收稿; 2012 年 7 月 19 日收修定稿

第一作者: 康志明, 主要从事中期、延伸期预报业务和研究工作. Email: Kangzm@cma.gov.cn

## 引 言

西太平洋副热带高压(以下简称副高)因所在的特殊地理位置而成为连接中高纬与低纬度大气环流系统的中间纽带。它是影响我国天气气候最重要的大型天气系统之一,其位置和强度直接影响我国雨带分布和降雨强度。尤其在主汛期,副高的南北摆动和东西进退与长江中下游地区的旱涝有密切的关系。副高的强度和范围冬夏季有很大的差别,夏季强盛,位置最北,冬季则相反。副高脊线随季节北进南撤现象是东亚大气环流季节转换的最显著特征。

副高特别是夏季副高及其动力学一直是气象学研究之主题。研究总体上可分为两大类:一类是研究副高的结构、活动规律及其对天气气候的作用;另一类是对副高活动影响因子的研究。早在 20 世纪 60 年代,陶诗言等(1962;1963)研究了副高季节变化,指出 500 hPa 的西太平洋副热带高压和对流层上层青藏高原高压对东亚天气有重要影响。黄世松(1963)详细地分析了副高位置、温湿场、风场、涡散场、垂直运动及经圈环流等诸多因子。后来国内出现许多后续研究,基于副高和非洲、亚洲和西太平洋对流之间的研究表明,副热带高压对亚洲季风区天气和气候异常有着重要作用(汤明敏等,1982;周静亚等,1986;黄荣辉等,1988)。由于以往工作中资料的缺乏和学科发展的限制,对副高的认识非常有限,与纬向平均或局地 Haddly 环流下沉支相关的下沉运动通常被认为是副高形成和变异的原因(杨修群等,1989)。20 世纪 90 年代以来,很多气象学者围绕着“副热带高压形成和变异的机理”的主题,采用不同的研究方法,通过数值模拟和再分析资料诊断分析揭示副高变化的规律和机制,得到了新的认识(钱贞成等,1991;蒲书箴等,1993;刘屹岷等,1999;吴国雄等,1999;刘屹岷等,1999)。

在这诸多方面的研究中,夏季副高进退的研究历来受到高度重视。初夏到盛夏副高脊线位置对我国东部雨带的变化有直接影响。然而迄今,副高北抬机制及其异常的物理成因,副高异常时与东亚中高纬、副热带和热带环流间的联系及其特征并不十分清楚。为了弄清夏季副高异常时东亚大气环流演变过程各系统的变化特征和相互作用及其异常的物理成因,本文根据 NCEP/NCAR 再分析资料、卫星观测的射出长波辐射(Outgoing Logwave Radia-

tion,OLR)资料和常规气象观测资料,分析研究 2009 年 6—8 月副高 5 次北抬至偏北位置,且异常稳定维持,造成江淮流域干旱少雨(空梅)之缘由,以探讨西风带、副热带、热带的主要大气环流系统之间的相互影响和作用的特征以及副高北抬和强度维持的主要机制及预测,为预报业务提供参考依据。

## 1 2009 年夏季(6—8 月)西太平洋副高活动的特征与我国东部降水分析

在文中以 588 dagpm 等高线的变化来描述西太平洋副热带高压的活动状况,同时以 E、W 风的轴线( $u=0$ )配合 588 dagpm 线来确定副高脊线,用 588 dagpm 线的西边界位置表示副高的西伸脊点。据此,分析了 2009 年 6—8 月  $110^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$  内我国东部及东侧海洋上副高活动概况(图 1),由图可见,该年夏季副高共历经了季节内中短期 4 次显著的南北进退变化过程,副高北抬及维持过程的时间分别是 6 月 5—10 日、6 月 16 日至 7 月 1 日、7 月 5—21 日和 7 月 27 日至 8 月 9 日,呈现出半个月左右中期活动和一周左右的短期活动特征,这 4 次北抬过程后的时段是副高向南减退阶段。8 月 13 日之后,副高主体又一次北抬并稳定维持在偏北位置上。

副高第一次北跳时间在 6 月第 2 候,8 日副高脊线第一次北抬过  $20^{\circ}\text{N}$ ,较之多年平均 6 月中旬前后提前近一周;副高脊线从  $18^{\circ}\text{N}$  迅速北抬到  $24^{\circ}\text{N}$ ,北移 6 个纬度,比 6 月多年平均  $20.3^{\circ}\text{N}$  偏北 3.7 个纬度;588 dagpm 线西脊点也从  $154^{\circ}\text{E}$  西伸至  $120^{\circ}\text{E}$  (34 个经度),较之 6 月多年平均  $118^{\circ}\text{E}$  偏东 2 个经度。但紧接着,11 日开始,东北冷涡发展,东亚沿海槽建立,副高东退南落,脊线南撤到  $20^{\circ}\text{N}$  以南西太平洋上空。

6 月 16 日开始,副高脊线再次突然从  $18^{\circ}\text{N}$  北跳至  $26^{\circ}\text{N}$  附近,北进 8 个纬度,比 6 月多年平均偏北 5~7 个纬度。588 dagpm 线西脊点从  $135^{\circ}\text{E}$  西伸至  $108^{\circ}\text{E}$  (27 个经度),比 6 月多年平均偏西 10 个经度,并且副高主体中在西太平洋上出现 592 dagpm 线闭合中心,表明副高较为强盛;因越过  $130^{\circ}\text{E}$  副高体停留时间短暂,故图 1 中 588 dagpm 线区域较小。与此同时,6 月 16—18 日,华南、长江中下游地区出现中到大雨,局地暴雨过程;19—21 日,华北、黄淮、江淮产生大到暴雨,华南南部局地大暴雨过程;22—27 日,长江以南有大到暴雨过程;6

月 28 日至 7 月 2 日,长江中下游地区出现大到暴雨;长江中下游一带共出现 4 次移动性降雨过程(图 2),因其降雨强度不大,持续时间也不长,尽管东亚夏季风推进到江淮流域,因副高位置偏北(16 日,脊线位于  $25^{\circ}\text{N}$  附近),西脊点在  $130^{\circ}\text{E}$  以东,夏季风控制时间短暂,江淮流域未曾入梅。然后,副高

强度大减,呈块状退至日本国南侧洋面上空。

与多年平均 7 月中旬副高第二次季节性北跳相对应的 7 月 5—21 日,副高又一次北跳,比多年平均提前一周左右。7 月 4—10 日,中太平洋有一环副高向西伸展同上述日本国南侧洋面上的块状副高连接打通加强后呈带状分布,副高中心 592 dagpm 闭

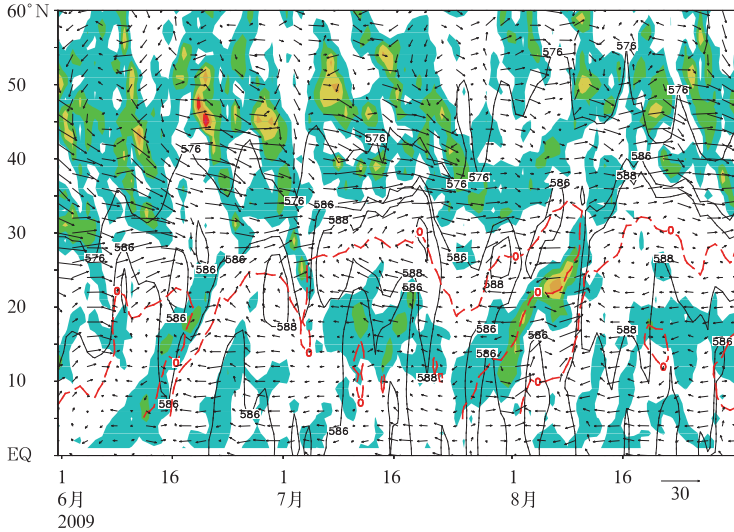


图 1 2009 年 6—8 月 500 hPa 高度场、风场  $110^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$  平均纬度-时间剖面(单位: dagpm)  
(虚线为副高脊线,阴影区为正涡度)

Fig. 1 Time-latitude cross section of averaged geopotential height (solid, unit: dagpm), wind (barb, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and vorticity (shaded area, unit:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) at 500 hPa between  $110^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$  from June to August 2009

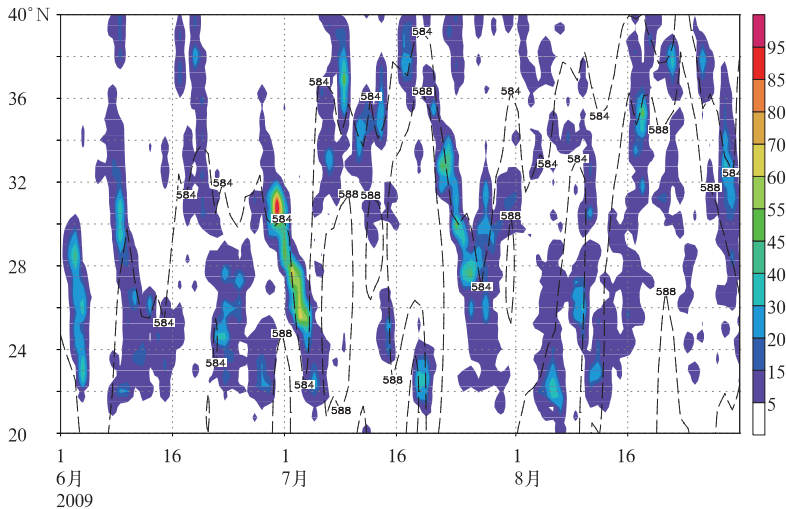


图 2 2009 年 6—8 月我国东部地区  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  平均降水量(阴影)与 500 hPa 平均 584, 588 dagpm 等值线时间-经向剖面

Fig. 2 Time-latitude cross section of average precipitation (shaded, unit: mm) and contours of the 500 hPa 584 dagpm and 588 dagpm between  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  from June to August 2009

合环流范围不断扩大,呈东北—西南向的脊线从  $22^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$  向北推进到  $28^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ ,北移了 2~6 个纬度,比 7 月多年平均  $25.2^{\circ}\text{N}$  偏北 2.8~6.8 个纬度;同时,副高西脊点逐渐西移到  $102^{\circ}\text{E}$  附近,较之 7 月多年平均  $121^{\circ}\text{E}$  偏西 19 个经度,其中 592 dagpm 线控制了长江下游一带,反映副高极为强大。东亚夏季风推进到华北,江淮流域雨季结束,进入伏早期,华北雨季开始。在此期间,7 月 4 日位于江南南部以南的降雨带伴随着副高北跳加强向北发展,7 日,雨带北抬到长江下游至淮河流域;7—8 日,淮河流域部分地区降下暴雨到大暴雨。9—10 日,雨带北移到黄淮、华北地区,该地区出现大到暴雨、局地大暴雨过程。11—14 日,有两股西路冷空气东移,淮河流域和黄淮再次出现大到暴雨过程。17—18 日和 20—21 日华北和黄淮发生两次大到暴雨、局地大暴雨,总共 5 次降雨过程(图 2)。随即,北跳并稳定维持 17 天的副高仅 3 天即向东南撤退到  $150^{\circ}\text{E}$  以东洋面上空并稳定少变。

7 月 27 日,副高从  $150^{\circ}\text{E}$  附近又开始向西伸展,仅两天,西脊点抵达  $120^{\circ}\text{E}$  附近,约有 12 个经度宽的副高体呈狭长的带状分布,其脊线位于  $28^{\circ}\text{N}$ ,比多年平均偏北 2.8 个纬度;在副高西南侧、菲律宾东部洋面到南海的赤道辐合带(Intertropical Convergence Zone,ITCZ)异常活跃,其中 0907 号热带风暴天鹅和 0908 号台风莫拉克分别于 8 月 3 日 20 时和 4 日 02 时相继生成,其外围环流与东亚槽相连接,导致狭窄西环副高断裂,副高 1—4 日减弱,5 日开始又重新北抬西伸,脊线跃至  $30^{\circ}\text{N}$  以北位置,西脊点亦达  $100^{\circ}\text{E}$  附近,显示出一年中最强时期,尤其是 8 月 13—20 日,副高体积最大,强度强盛、位置最北,与 8 月多年平均  $27.5^{\circ}\text{N}$  相比, $122^{\circ}\text{E}$  脊线偏北 5 个纬度,西脊点偏西 22 个经度。

一般认为,从初夏开始,副高有两次明显的季节性北跳,分别对应江淮流域梅雨和华北雨季。而从以上分析可见,2009 年 6—8 月副高的位置较之多年夏季平均异常偏北、偏西及强度偏强,尤其是 5 次北抬过程,幅度大,是造成雨带异常分布的主要原因。

## 2 2009 年夏季副高北抬机制研究

西太平洋副高北抬和强度增强是其季节变动的最基本特征,副高作为副热带系统,它的北抬及南落受到北侧西风带以及南侧热带系统的共同影响,而且,副高的南北进退与东西振荡之间具有伴随性特

征,即北进和西伸、南退和东撤常相伴出现。从以往的研究来看,有学者(陶诗言等,2006)分析副高与中高纬环流的作用,认为副高的南北进退主要受到中高纬度 Rossby 波列能量传播的影响,有学者(余丹丹等,2008;张庆云等,1999)则研究热带低纬对流活动对副高位置的影响,发现赤道中太平洋地区对流活动在半月左右的时间尺度上显著影响和制约副高的加强和西伸。然而西风带系统与热带系统在副高强度变化不同阶段的具体作用却还没有得到清晰的解答,下文将从这两方面研究其与副高北抬之间的关系。

### 2.1 2009 年夏季中高纬环流特征与副高南北进退的关系

从 500 hPa 逐日高度场的形势演变来分析(图略)副高的南北进退状况,6 月 8 日东亚沿海出现高压脊,副高脊线第一次北抬过  $20^{\circ}\text{N}$ ;6 月 19 日,东亚沿海地区又一次建立高压脊,副高西进北抬;7 月 2 日,沿海槽建立副高南落;7 月 5 日,东亚沿海槽脊替换,副高又开始明显北抬;7 月 21 日,西风带冷空气南下,沿海槽建立,副高回落;7 月 27 日,沿海脊建立,副高又一次加强;8 月 11 日,沿海槽建立,副高出现回落;8 月 13 日,沿海脊再次建立,副高加强北抬。分析结果显示,副高 5 次北抬均伴随着东亚沿海高压脊的建立。

图 3 是 2009 年夏季副高 5 次北抬前 5 天欧亚地区 500 hPa 合成高度和高度距平场,从图 3a 上可看出,欧亚中高纬度为两槽一脊经向环流形势,两个长波槽分别位于乌拉尔山到西西伯利亚平原(以下简称西槽)和俄罗斯滨海省到朝鲜半岛一带(以下简称东槽),长波脊呈东北—西南向在中西西伯利亚到东西伯利亚地区;对应西槽有一 8 dagpm 负距平中心与之相伴,表明该槽较为强盛。西槽都是由新地岛附近的不稳定小槽在冷平流及正的热成风涡度平流作用下发展,往南加深而形成的;槽前较强暖平流的动力加压作用也导致中西伯利亚高压脊经向发展。

此后,在新地岛附近又有一个小槽东移发展,常在喀拉海上空形成一冷性低涡。冷涡中不断分裂冷空气侵袭中西伯利亚强大高压脊的西北部,致使该高压脊北段减弱并缓慢向东移动,高压轴线顺时针旋转呈东北—西南走向,高压北段逐步占据了东西伯利亚地区;在高压东南侧与东槽之间建立一支明显的东北风气流,与高压脊后部的偏南风气流相遇后,导致在东西伯利亚地区出现闭合暖高压中心。与其相配合有 8 dagpm 正距平中心。随后,欧亚中

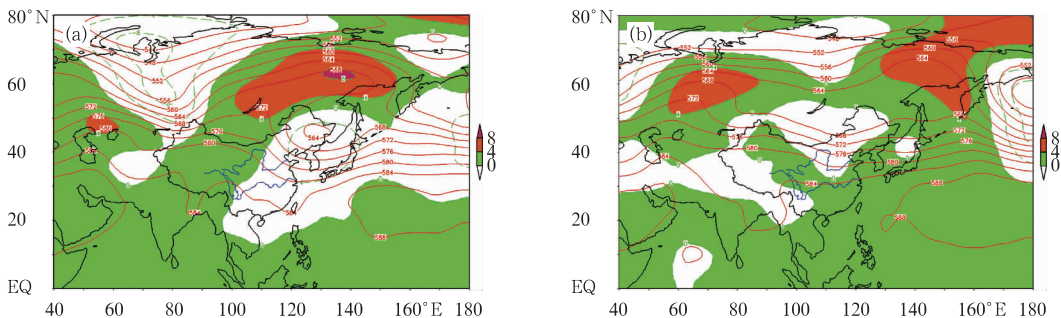


图 3 2009 年夏季副高 5 次北抬前 5 日(a)及北抬当日(b)欧亚地区 500 hPa 合成高度和高度距平场 (阴影区为正距平)

Fig. 3 Composite diagrams of 500 hPa geopotential height and the corresponding anomaly 5 days previous to (a) and the same day of (b) the 5 jumps of subtropical high during the summer of 2009 (unit: dagpm) (Positive anomaly area is shaded)

高纬环流发生不连续后退,致使西槽的位置和强度发生变化。一种情况,在巴伦支海有强冷空气向南爆发,在斯堪的纳维亚半岛附近建立一个稳定的低槽。低槽的槽前暖平流使欧洲东部的高压脊发展,促使西槽减弱并东移,造成中西伯利亚长波脊经向度逐渐减小并变成移动系统。另一种情况,在新地岛附近有一小槽在往南加深的过程中替换了原来的西槽,西槽迅速减弱东移,使得中西伯利亚高压脊也不再具有稳定的特征,此脊的中心随之消失,并蜕变为一个弱脊向东移去。与此脊相邻的东槽也因脊的崩溃而发生显著变化,原先东西伯利亚高压与东槽之间的东北气流不断向东槽中输送新的冷空气,槽中的等温线位相落后于等高线,槽前槽后有明显的冷暖平流,有利于槽的发展,伴随有一 4 dagpm 负距平中心,反映该槽也比较强盛。当中西伯利亚高压脊东移并减弱时,高纬的东北气流也迅速减弱并消失,东槽中的冷舌与高度槽快速形成闭合冷低中心,并且槽的范围变窄,表明槽内冷空气与高纬冷空气脱离而孤立起来。而中西伯利亚高压脊继续东移减弱,致使东槽很快向偏东方向移动,低槽中冷空气迅速下沉,水平辐散而下沉增温很快,气旋性涡度减弱促使东槽强度大减并移至千岛群岛到日本海一带。其西部的中西伯利亚高压脊盘踞在东西伯利亚南部到我国北部沿海海区(图 3b)。至此,长波槽脊减弱使得欧亚中高纬环流形势变平,南北冷暖空气的交换较弱,同时,东槽槽后的正变高并入到日本国南部海洋上的副高中,图 3b 显示在东亚沿海到大洋上为一片正距平区,反映西太平洋副高正在向加压区域移动,即北抬和西伸。

图 3a 还显示副高北抬前 5 天,东亚沿海为一深槽,在其下游 150°E 处是一长波脊,此处副高与此高压脊叠加,位置明显偏北,说明太平洋中段副高的加

强和北抬要超前于西段副高。到副高北抬当天,东亚沿海槽脊更替,副高西伸北抬。吴国雄等(2003)揭示“当西风槽在中国沿海和西太平洋地区向南伸展到 30°N 以南后,西太平洋副热带高压有一次加强活动”,而陶诗言等(2006)提出“副热带高压西伸北跳是由于欧亚大陆上空存在静止 Rossby 波列,波的能量沿着高空副热带急流向东传播到我国沿海海岸(115°~130°E)时,在该地区激发出一个长波脊。这个长波脊的建立,使得副热带高压和对流层上部的青藏高压都朝长波脊方向伸展,表现为“相向而行”。两文研究结果看似矛盾,但从以上分析可知,西太平洋副高的北抬过程起始于中段(140°~160°E)副高强度加强,其加强之原因取决于东亚沿海地区建立东亚大槽,槽前暖平流的动力加压作用使副高加强。而西段副高的北抬则与东亚地区槽脊更替,沿海脊建立相对应,随着东亚槽脊变换,东亚大槽东移减弱,槽后高压脊同西伸副高叠置连体,导致西太副高明显西伸北抬。这是东亚地区天气系统相互作用的结果。

为进一步了解副高南北进退与环流场的对应关系,计算了 2009 年夏季 500 hPa 高度距平场和 5 天后 120°E 副高脊线变化的滞后相关以及当日变化的相关,结果如图 4 所示。副高脊线变化与 5 天前 500 hPa 高度距平变化的主要相关区域在中高纬度(图 4a),其中巴尔喀什湖东北侧有正相关,贝加尔湖东侧有负相关,且通过了显著性水平检验( $\alpha = 0.05$ ),说明副高北抬前 5 天,在 80°E 附近中高纬度为一高压脊,而在贝加尔湖东侧为一低压槽区。图上还显示副高的南北变化与热带低纬的高度距平呈负相关,但仅在 160°~180°E 区域通过了显著性水平检验( $\alpha = 0.05$ )。从副高脊线变化与当天高度距



平场的相关计算结果来看(图 4b),120°E 副高脊线与东亚沿海的高度距平场有明显的正相关,而负相关中心位于 150°E 日本海以东洋面上空。伊朗副高与太平洋副高在强度变化上有一致性的特征。以上

分析表明西风带波动与副高变化的关系,在副高北抬前,亚洲中高纬度地区高空呈正负波列分布,随后波列向下游传播,当波列的正距平部分传达到东亚沿海时,副高脊线北抬。

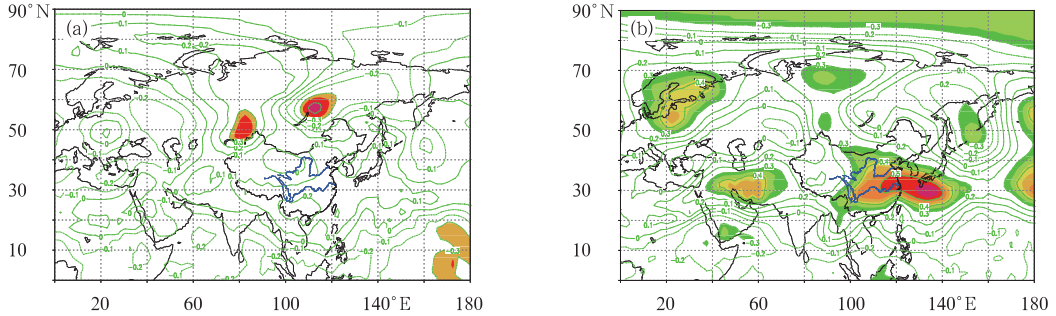


图 4 2009 年夏季 120°E 副高脊线变化与 5 天前(a)以及当天(b)500 hPa 高度距平相关 (阴影区通过  $\alpha=0.05$  显著性水平检验)

Fig. 4 Anomaly correlations of 500 hPa geopotential height of 5 days previous to (a) and the same day of (b) subtropical high ridge changes along 120°E during the summer of 2009 (The area through  $\alpha=0.05$  significance level test is shaded)

## 2.2 2009 年夏季副高北抬与热带对流活动的关系

许多学者的研究认为热带对流在副高北抬的过程中起了主要作用,热带系统的增强对副高的增强和北抬有指示和前兆意义。例如:西太平洋副高北跳与西太平洋地区低层赤道西风爆发和赤道对流加强密切相关(张庆云等,1999),赤道中太平洋地区对流活动在半月左右的时间尺度上显著影响和制约

副高的加强和西伸,而且前者对后者存在约一个周期的超前影响(余丹丹等,2008;王丽娟等,2010)。

OLR 能很好地揭示热带地区对流发展的强弱和大尺度垂直运动,故被广泛应用于热带海洋地区的大气监测和分析研究(吴晓,2011;鲍媛媛等,2009)。从 2009 年 6—8 月 110°~150°E 逐日平均 OLR 时间纬度剖面(图 5)可以看到,在副高首次北跳前期的 6 月初,在加里曼丹岛附近有一支越赤道

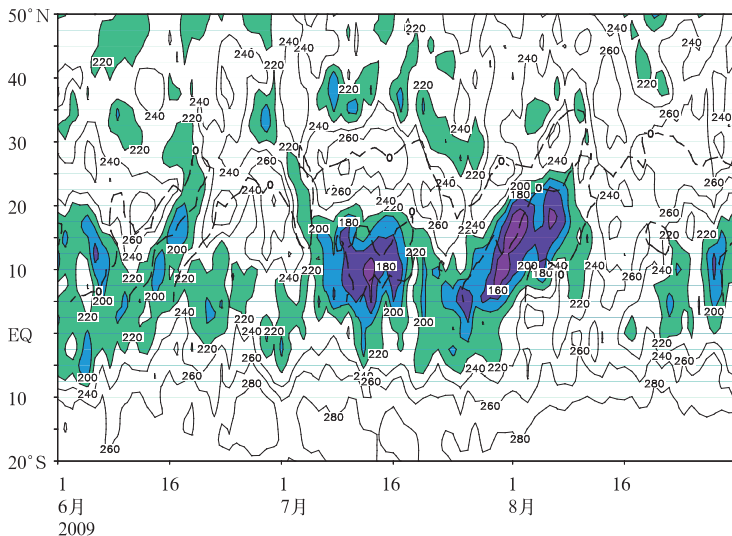


图 5 2009 年 6—8 月 110°~150°E 逐日平均 OLR 时间纬度剖面 (虚线为副高脊线,阴影部分  $OLR \leq 220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Fig. 5 Time-latitude cross section of the daily averaged OLR (solid, unit:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , shaded area  $OLR \leq 220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) between 110°—150°E and the subtropical high ridge (dashed line) from June to August 2009

气流与中太平洋副高南侧的偏东信风在南海南部到菲律宾东南部洋面上空汇合,并向北向东推进,7日在菲律宾附近地区出现一东西长约 1400 km 的风场辐合区,区中有几条狭窄的近于连续的对流云带,并有热带低压生成向东北方向移动;对应第一次副高北跳。10日开始,在  $5^{\circ}\text{N}$  附近建立了东西长约 2000 km 的 ITCZ,相应有一条变化很大的对流云带,其逐渐向北移,14日移到  $15^{\circ}\text{N}$  附近,其上多热带低压活动,与第二次副高北抬相对应。6月18和23日热带风暴莲花及浪卡分别在南海和菲律宾以东洋面上形成,又于6月21和27日分别在福建晋江沿海和广东惠东县沿海登陆。7月3日在  $10^{\circ}\text{N}$  附近又建立了 ITCZ,其逐渐北抬至  $17^{\circ}\text{N}$  附近;副高于7月5日又一次北抬;11、13和16日在南海、台湾东南洋面和菲律宾以东洋面上先后分别生成热带风暴苏迪罗、热带风暴(未给名)及台风莫拉菲,它们于12日05时、14日04时、19日00时分别在海南文昌县、福建莆田、广东深圳沿海登陆。7月23日 ITCZ 在  $10^{\circ}\text{N}$  附近又重新建立,东西长大约 3500 km,表现为一条东西向的稠密云带,其西段向北移变为西北—东南走向;副高第4次北抬;7月27日在 ITCZ 中同时有两个热带低压形成,西段的低压31日在越南沿海登陆后减弱消失;而东段低压西行进南海后,于8月3日20时发展成为该年7号热带风暴天鹅,它于8月5日06时在广东台山市沿海登陆。与此几乎同时,8月4日在台湾以东洋面生成了莫拉克台风,它于8月7日23时在台湾花莲登陆,又于9日16时在福建霞浦县再次登陆。3天之后,副高又一次北抬到偏北位置上。在此后的8月中太平洋上又生成了“艾涛”、“环高”和“科罗旺”3个热带气旋,均转向东北方向移动,对我国近海无大的影响。

综上所述,低纬热带季风加强与偏东信风形成 ITCZ 并向北移动,对应 ITCZ 有一条对流云带,对流活动增强有助于西太平洋副高北抬和西伸。然后,位于  $15^{\circ}\text{N}$  附近的 ITCZ 较为活跃,6—8月共生成8个热带风暴和台风,有利于副高维持在偏北位置上。

图6a是副高5次北跳前5天欧亚地区 OLR 距平图,图中在南半球低纬到北半球低纬( $15^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ )及菲律宾以东洋面( $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 、 $130^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ )存在2个 OLR 负距平区,分别有小于  $-24$  和  $-12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  距平中心,表明低纬地区强对流发展旺盛,并与 ITCZ 对应,辐合区中的对流云带不断

有强对流发生发展,而由上述分析可知,副高的每一次北跳(西伸)都伴随着南侧 ITCZ 的建立并北抬,对流显著增强,而且对流的增强要超前于副高的北抬 2~6 天,这可能在时间尺度上显著影响和制约副高的北抬。对应移至日本国附近的东槽有小于  $-24 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  距平中心的负距平对流发展区。副高北抬当天(图6b),在副高西北侧的江淮流域与暴雨过程相伴有一片 OLR 小于  $-24 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  中心强对流旺盛区域,同时与减弱的东槽或热带低压配合是强负距平区(图略)。5次副高北抬5天之后(图6c), $100^{\circ}\text{E}$  以东大部地区为 OLR 正距平区,揭示副高控制区对流活动较弱,而在南海、菲律宾以东洋面有热

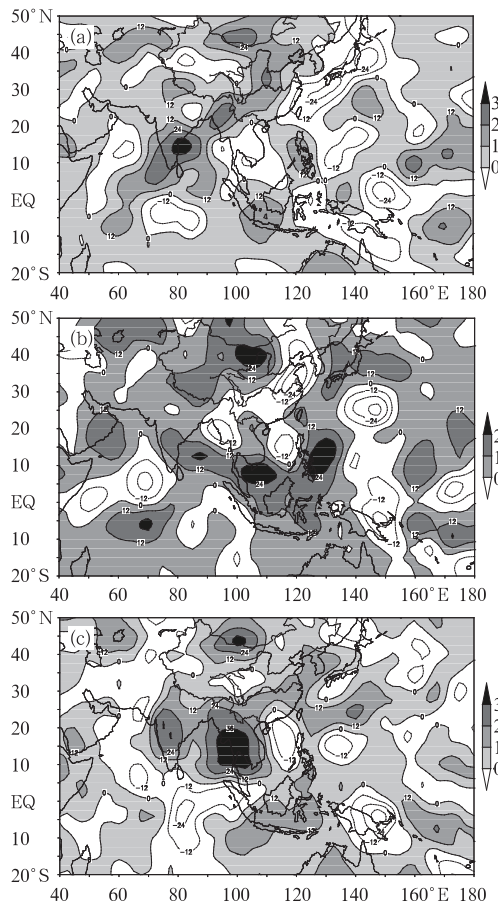


图6 副高5次北抬前5天(a)、当天(b)以及后5天(c)平均 OLR 距平 (阴影区为正距平)

Fig. 6 Composite diagrams of mean OLR anomaly 5 days previous to (a), the same day of (b) and 5 days after (c) 5 jumps of subtropical high during the summer of 2009 (unit:  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Positive anomaly area is shaded)

带气旋活动,出现两片 OLR 中心小于  $-12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  负距平区,在印度洋北部及伊里安岛附近也出现两片 OLR 中心小于  $-24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  负距平区,表明这些地区对流十分活跃,将爆发西南季风涌及越赤道气流,对副高的增强产生影响,促使副高维持在偏北位置上。

而从 5 次副高北抬前后的 OLR 与 850 hPa 流场合成分析可发现,在副高北抬 5 天之前(图 7a),对流中心在孟加拉湾及中南半岛,热力作用产生的

垂直环流有利副高西伸。副高西北侧和沿海低槽对应的对流明显强于副高南侧的对流,因此,副高南侧的对流与副高北抬没有直接的关系。在太平洋中部  $150^\circ\text{E}$  赤道北侧有一个对流中心,但从低层流场来看,并未对应明显辐合,此时,西南季风与副高南侧的东风之间没有建立风切变形势,西南季风的前沿至  $140^\circ\text{E}$ ,而在太平洋中部从  $25^\circ\text{N}$  至赤道的广大区域低层被东风所控制,东西风在  $140^\circ\text{E}$  附近汇合向北,但未形成两股气流辐合的形势。随着副高北抬,副高南侧的东风带也随之北移,同时,西南季风向东扩展到了  $150^\circ\text{E}$ ,与东风在  $140^\circ\text{E}$  附近形成了明显的辐合区(图 7b),这一带地区的对流加强。在副高北抬 5 天之后(图 7c), $20^\circ\text{N}$  的东风向西到达  $110^\circ\text{E}$ ,南海中东部至菲律宾以东的 ITCZ 有明显发展,而孟加拉湾的对流活动减弱。

可见,副高北抬之前在孟加拉湾东部有明显的对流,并通过垂直环流对副高加强西伸有利,这对副高的加强和北抬有一定指示意义。而副高南侧的对流活动与副高北抬之间是一种伴随关系,副高北抬给了低纬西南季风东传空间,季风东传与副高南侧东风之间的辐合引发了强的对流活动。ITCZ 活跃并没有超前于副高北抬,是副高北抬促进了 ITCZ 的发展,但 ITCZ 发展反过来又有利于副高强度的维持。

### 3 2009 年夏季副高北抬、南落及强度维持的动力机制研究

副高的形成和变异本质上是负涡度中心的形成和变异,西太平洋副高的西伸和北抬必然对应着东亚沿海负涡度的增长,为此,6—7 月定义关键区域为  $20^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 、 $120^\circ\sim 140^\circ\text{E}$ ,8 月进入盛夏,由于副高在偏北位置上活动,因此,将关键区域定义在  $25^\circ\sim 35^\circ\text{N}$ 、 $120^\circ\sim 140^\circ\text{E}$  范围,计算分析该区域平均的涡度变化,来探讨与副高变化相对应的涡度场变化机制。从计算结果(图 8)可见,该关键区域负涡度的增长与副高几次北抬之间均有较好的对应关系,说明可通过涡度方程讨论该区域涡度变化来探讨影响副高变化的动力机制。

根据吴国雄等(1999)给出的全型垂直涡度倾向方程,不考虑大气内部热力结构的变化、热源本身及摩擦耗散的影响,而仅考虑外热源作用的全型涡度方程简化式:

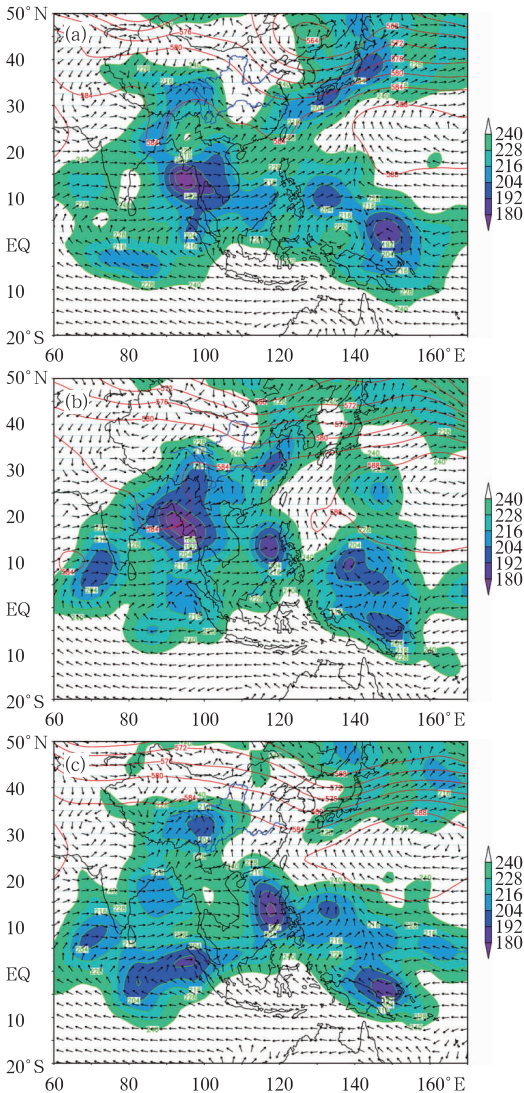


图 7 副高 5 次北跳前 5 天(a)、当天(b)以及后 5 天(c)平均 OLR(阴影区  $\leq 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、500 hPa 高度和 850 hPa 风场

Fig. 7 Composite diagrams of mean OLR (unit:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , shaded area  $\text{OLR} \leq 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 500 hPa geopotential height (unit: dagpm) and 850 hPa wind 5 days previous to (a), the same day of (b) and 5 days after (c) 5 jumps of subtropical high during the summer of 2009



$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \xi + \beta v = (1 - K)(f + \xi) \frac{\omega}{p} + \frac{f + \xi}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z} - \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial Q}{\partial y} \quad (1)$$

根据尺度分析,全型垂直位涡方程可进一步简化为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \xi + \beta v = \frac{f + \xi}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (2)$$

式中,  $Q$  为非绝热加热率,  $\frac{f + \xi}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z}$  为非绝热加热作用项(记为  $Q_z$ ),  $\beta v$  为  $\beta$  效应项,  $\mathbf{V} \cdot \nabla \xi$  为涡度平流项。

图 9 分别给出 5 次副高北跳过程中 500 hPa 关键区域平均  $Q_z$ 、 $-\beta v$  和  $-\mathbf{V} \cdot \nabla \xi$  3 项的值。结果显示,  $Q_z$  在大部分时段对该区域的作用为正涡度的增长,说明加热作用在中层激发出涡旋运动,  $-\beta v$  项则变化平稳,大部时段对于区域负涡度的增长有正贡献,对应于副高增强北抬的负涡度增长,平流项  $-\mathbf{V} \cdot \nabla \xi$  贡献最大。计算 2009 年 6—8 月 3 项与区域平均涡度变化之间的相关系数分别为 0.48、0.35 和 0.76,从相关结果也反映出该关键区域的涡

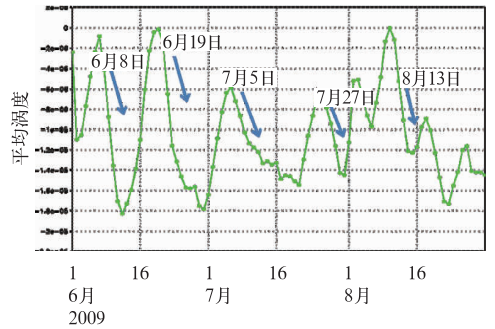


图 8 2009 年 6—8 月 (20°~30°N, 120°~140°E, 其中 8 月 1—31 日为 25°~35°N, 120°~140°E) 区域平均涡度时间演变 (单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (途中箭头分别对应 5 次副高北抬的起始日期)  
Fig. 8 Time evolution of regional average (20°—30°N, 120°—140°E for June to July, 25°—35°N, 120°—140°E for August) vorticity (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 500 hPa during the summer of 2009

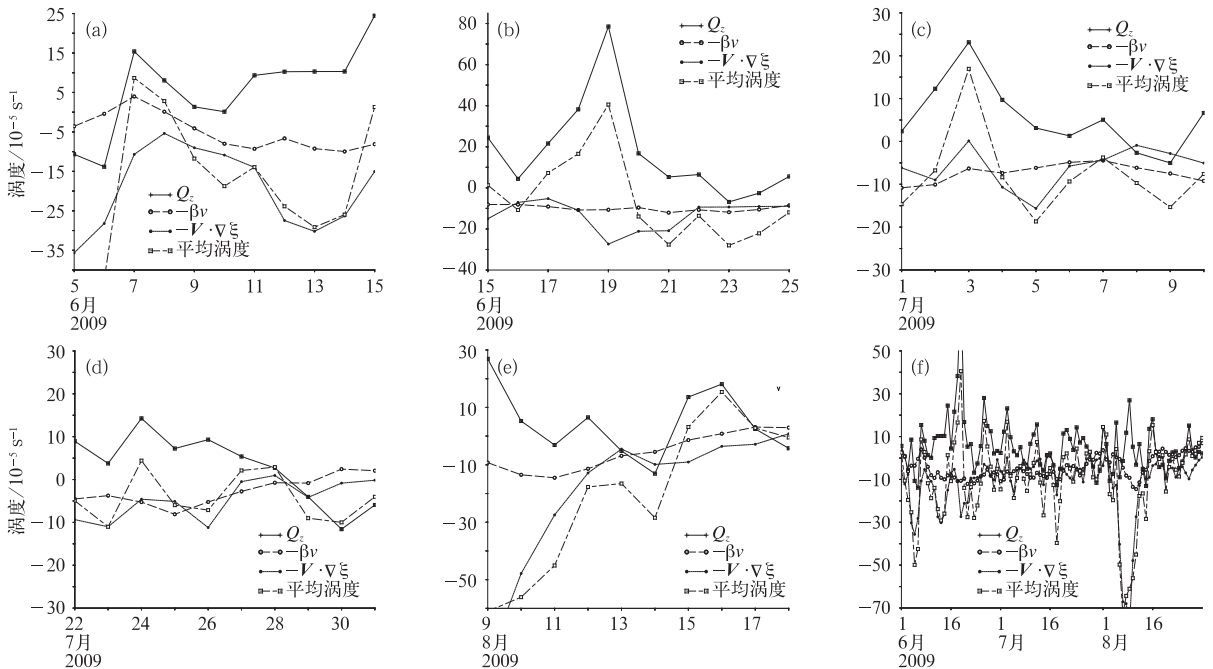


图 9 2009 年 6—8 月 (f) 和 5 次副高北抬过程(a~e)中 500 hPa 关键区域平均涡度、 $Q_z$ 、 $-\beta v$  和  $-\mathbf{V} \cdot \nabla \xi$   
Fig. 9 Time evolution of regional vorticity (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) average at 500 hPa during 5 northward jumps (a—e) of subtropical high and June—August 2009 (f)

度变化与涡度平流关系最为密切。

以 2009 年 6 月两次副高北抬过程为例,分析其负涡度平流的来源。图 10 给出 2009 年 6 月 500 hPa 120°~140°E 平均涡度平流的时间演变剖面,由图可见,小于  $-3 \times 10^{-10}$  负涡度平流大都出现

在 30°N 以北, 20°N 以南的负涡度平流明显偏小,其中 6 月 19 日前后, 15°N 附近出现较为明显的负涡度平流,实际上是一个热带气旋的北上,由于气旋本身涡度的不对称性形成了这样的负涡度平流。6 月 5 日和 15 日前后分别有两次明显的负涡度平流向

南侵入的过程,分别对应两次副高的增强和北抬。从图中还可看到,两次负涡度平流的加强和向南侵入是与中高纬度槽脊活动密切相关,负涡度平流是随着脊前的偏北气流向南侵袭。从以上的分析可

知,中高纬的槽脊活动是东亚沿海涡度场发生变化的主要原因。就涡度场变化而言,副高北抬的关键因素是中高纬度槽脊的变化。

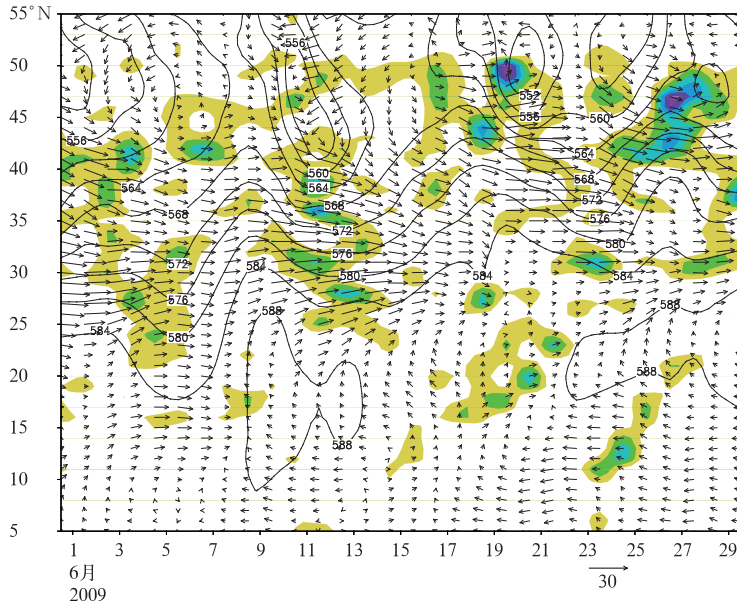


图 10 2009 年 6 月  $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$  平均 500 hPa 位势高度、风场和涡度平流(阴影区涡度平流 $\leq -3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ )时间经向剖面

Fig. 10 Time-latitude cross section of averaged 500 hPa geopotential height (unit: dagpm), wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and vorticity advection (unit:  $10^{-10} \text{ s}^{-2}$ , shaded area  $\leq -3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ ) between  $110^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$  during June, 2009

2009 年 6—8 月副高还经历了 4 次南退东撤过程,副高南撤均发生在欧洲东部高压脊经向发展,中西伯利亚到贝加尔湖的低槽或亚洲北部不稳定小槽向南加深并东移控制东西伯利亚南部至我国北部沿海海区之时(图 4)。西风带低槽的活动通常对应西风急流的南压,当中纬度西风急流中心侵入副高主体,急流北侧强正涡度平流致使副高快速南退东撤而减弱;有时低槽与北上的热带气旋环流连接,加速副高减弱的进程。

但并不是每次西风带有低槽活动,副高必然南落。7 月 5—21 日,中高纬度有低槽活动,带动西风急流南压,由于西风急流轴南侧与副高脊线北侧之间的负涡度(切变涡度)和北风加强,对应负涡度平流增加,使得在西风带南压从北抬受到抑制的副高只能加强或西伸。与此同时,副高南侧的热带低纬地区对流非常活跃(图 5),从全型垂直涡度方程可知,在  $\beta$  效应的作用下,对流凝结加热中心下方出现

偏南风,而在其上方激发出北风,于是在北侧造成低空辐合,高空辐散以及上升运动,而上升运动对应着负涡度的制造[式(1)],在热源北侧激发出附加的负涡度源。说明热带对流活动对其北侧副高的强度维持有正的作用。副高作为副热带系统,起到了热带与中高纬度系统相互作用的链接作用,当南侧对流活动加强时,有利于副高强度维持或向北推进,也可能影响到中纬度系统的南压或向北收缩减弱。

## 4 小 结

(1)西太平洋副高的北跳过程起始于中段副高( $140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ )强度加强,此阶段与东亚沿海深槽建立相对应,而最终西段副高的北跳则是与东亚槽脊更替,沿海脊建立相对应。西风带波动的传播与副高变化关系密切,在副高北跳前,亚洲中高纬度地区高空呈正负波列分布,随后波列向下游传播,当波列

的正距平部分传到东亚沿海时,副高北抬。

(2)副高北跳之前孟加拉湾东部有明显的对流活动,该区域的对流活动通过垂直环流对副高的加强和西伸起作用,对于副高的北跳和加强有一定的指示意义。而副高南侧的对流活动与副高北跳之间是一种伴随关系,副高北跳给了低纬西南季风东传的空间,季风的东传与副高南侧的东风之间的辐合激发了强的对流活动。从 2009 年的分析来看,ITCZ 活跃并没有超前于副高北跳,反而是副高北跳促进了 ITCZ 的发展。发展的 ITCZ 反过来又有利于副高的强度维持。

(3)与副高变异相对应的涡度场变化分析表明:中高纬的槽脊活动是东亚沿海涡度场发生变化的主要原因,副高北抬增强的关键因素是中高纬度槽脊变化引起的涡度场变化。

## 参考文献

- 鲍媛媛,金荣花,赵瑞霞,等. 2009. 2008 年东亚夏季风异常及其对江淮梅雨的影响. 气象, 35(4):34-42.
- 黄荣辉,李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. 大气科学(特刊), 107-116.
- 黄土松. 1963. 副热带高压东西向移动及其预报的研究. 气象学报, 33(3):320-332.
- 刘屹岷,刘辉,刘平,等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响. II: 陆面感热加热与东太平洋北美副高. 气象学报, 57(4):385-396.
- 刘屹岷,吴国雄,刘辉,等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响. III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高. 气象学报, 57(5):525-538.
- 蒲书箴,于惠琴. 1993. 热带西太平洋上层热结构和海流异常及其对副高的影响. 海洋学报, 15(1):31-43.
- 钱贞成,喻世华. 1991. 东亚地区凝结加热的中期变化与西太平洋副高准双周振荡的关系. 热带气象, 7(3):259-267.
- 汤明敏,陆森娥,黄土松. 1982. 西太平洋副热带高压位置强度变化特点. 热带环流和系统学术论文集. 北京:海洋出版社, 81-104.
- 陶诗言,徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征. 气象学报, 30(1):1-10.
- 陶诗言. 1963. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究. 北京:科学出版社, 106-123.
- 陶诗言,卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳. 应用气象学报, 17(5):513-525.
- 王丽娟,邓方俊. 2010. 2007 年 6—7 月西太平洋副热带高压的异常特征及其成因分析. 气象, 36(9):36-41.
- 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. 气象学报, 57(3):257-263.
- 吴国雄,丑纪范,刘屹岷,等. 2003. 副热带高压研究进展及展望. 大气科学, 27(4):503-514.
- 吴晓. 2011. 用卫星 OLR 资料估算中国大陆月降水量. 气象, 37(1):99-102.
- 杨修群,黄土松. 1989. 马斯克林高压的强度变化对大气环流影响的数值试验. 气象科学, 9(2):125-138.
- 余丹丹,张韧,洪梅,等. 2008. 赤道中太平洋对流活动与西太平洋副高西伸的时延相关分析. 海洋科学进展, 26(3):292-304.
- 张庆云,陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究. 气象学报, 57(5):539-547.
- 周静亚,杨大升. 1986. 夏季副热带环流系统周期振荡与中国降水的功率谱分析. 热带气象, 2(3):195-203.