2003 年 7 月西太平洋副热带高压变异及中国南方高温形成机理研究

林 建[1] 毕宝贵[1] 何金海[2]

1 中国气象局国家气象中心，北京 100081
2 南京气象学院，南京 210044

摘 要 运用全型垂直涡度倾向方程理论，研究了空间非绝热加热在垂直方向的变化对 2003 年 7 月副高强度和位置变异的影响。结果表明：副热带地区的非绝热加热对副高的强度和位置的变化有极其重要的影响。与气候平均状况相比较，2003 年 7 月副高北侧、西侧非绝热加热的垂直变化异常偏强，而南侧、东侧较常年异常偏弱。这种异常的非绝热加热状况导致我国江南到副热带西太平洋地区呈现带状的异常反气旋性涡度制造，使得 7 月副高偏强偏西。

关键词 副热带高压 非绝热加热 全型垂直涡度倾向方程

文章编号 1006－9895(2005) 04－0594-06 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

Physical Mechanism Responsible for Western Pacific Subtropical High Variation and Hot Wave in Southern China in July 2003

LIN Jian[1], BI Bao-Gui[1], and HE Jin-Hai[2]

1 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081
2 *Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing* 210044

Abstract The impact of spatially nonuniform heating on the formation and variation in Western Pacific Subtropical High (WPSH) in July 2003 is discussed on the basis of the complete form of vertical vorticity tendency equation by using NCEP/NCAR reanalysis dataset. Results show that vertical diabatic heating plays a dominant role in the variation in intensity and location of WPSH in July 2003. Vertical variations in nonuniform heating in the north and west of WPSH center are anomalously strong, while anomalously weak in the south and east of WPSH center. Such anomalous nonuniform heating generates the powerful anticyclone vorticity over the south of the Yangtze River and the western Pacific, which is greatly favorable for the enhancement and more-westward extension of WPSH.

Key words western pacific subtropical high, diabatic heating, complete form of vertical vorticity tendency equation

1 引言

副热带高压(简称副高)的形成是地球自转和非绝热加热综合作用的结果，它的南北移动和东西进退在很大程度上取决于非绝热加热的空间分布[1]。东亚季风降雨所致的凝结潜热加热是影响东半球夏季副高位置和强度的关键因素[2,3]。刘还珠等[4]利用数值模拟揭示了在中短期过程中降水引起的垂直方向非均匀非绝热加热对西太平洋副高的影响过程。上述最新的理论研究和数值模拟说明无论在季节尺

收稿日期 2004－01－29，2004－05－25 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40135020 和北京市自然基金资助项目 8042021

作者简介 林建，女，1973 年出生，硕士，高级工程师，目前主要从事短期天气变化机理研究。E-mail：linjianchs@yahoo.com

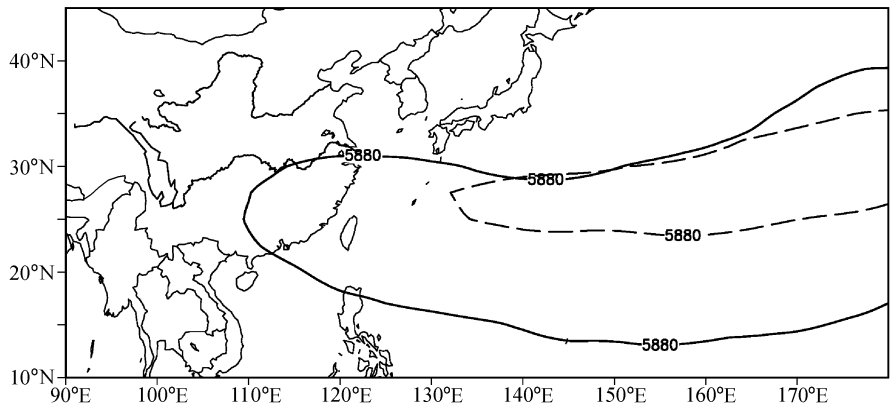

图 1　气候平均(1971～2000 年，虚线)及 2003 年 7 月(实线)500 hPa 副高特征线(5880 gpm 线)分布

Fig. 1　5880 gpm isolines at 500 hPa denoting the location of subtropical high in Jul 2003 (solid line) and for climate mean (1971～2000, dashed line)

度还是天气尺度上，副高的异常状况均可以通过对非绝热加热的分析来解释，对过去认为副高区就是经向环流下沉运动区的传统观点作出了修正和补充。

2003 年夏季西太平洋副高显著异常，并造成了我国南方酷暑。如图 1 所示，7 月西太平洋副热带高压呈东西带状分布，南北跨度约 15 个纬度，西伸脊点在 110°E 附近。与气候平均相比，副高南北跨度和面积均显著偏大，位置异常偏西，强度偏强。本文拟通过将该年与多年平均状况比较，运用全型垂直涡度倾向方程[5]解释空间非均匀加热对 2003 年 7 月大气环流形态变异的强迫，从而深入理解非绝热加热对西太平洋副高形态位置变异的影响。

2　资料来源及方法

本文所使用的资料为：1971～2003 年 6、7 月 NCEP/NCAR(美国国家环境预报中心/国家大气研究中心)再分析逐日资料及月平均资料，要素包括位势高度、风、温度、湿度，水平分辨率为 2.5°×2.5°，垂直层次为 1000 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、300 hPa、200 hPa、100 hPa。

文中大气热源 Q_1 采用 Yanai 等[6]提出的计算方案。根据吴国雄和刘还珠[5]给出的全型垂直涡度倾向方程，在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，仅考虑大气视热源 Q_1 作用时，尺度分析[2]表明，垂直运动项以及大气视热源的水平非均匀加热项的量级为 $10^{-12}\sim10^{-11}$ s^{-2}，比热源的垂直变化所产生的涡度强迫的量级(10^{-10})小一个量级以上。因此有

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla\xi+\beta v=\frac{f+\xi}{\theta_z}\frac{\partial Q_1}{\partial z}. \qquad (1)$$

在北半球 $f=2\Omega\sin\varphi$ 总是大于零并随纬度增大，一般在大尺度运动中 $f+\xi\geqslant 0$，$\theta_z=\partial\theta/\partial z$ 也总为正值。下文将根据(1)式来诊断分析非绝热加热对副高形态变异的影响。

3　2003 年西太平洋副高形态变异的物理成因

3.1　非绝热加热的空间分布特征与副热带高压位置的关系

西太平洋副高与其南北(东西)两侧的对流加热之间存在复杂的相互作用。图 2 给出了 2003 年大气热源 Q_1 的时间-纬度剖面(110°E～150°E 平均)和时间-经度剖面图(15°N～30°N 平均)。就气候平均状况而言，副高南侧整层的视热源明显强于北侧，副高随季节向北推进(图略)。然而，图 2a 显示，尽管副高在 6 月 24 日～7 月 3 日、7 月 6～16 日和 7 月 18～29 日出现了三次北进，其中尤以第三次最为显著，但基本上稳定维持在 110°E 以东，15°N～30°N 一带，图中副高区为非绝热冷却区。同时还注意到，当副高南北两侧加热基本相当时，其位置也相对稳定；而当南侧的加热明显强于北侧时，会迫使副高北抬。2003 年夏季副高最显著的北抬(如图 2a 中箭头所示)，就是由于热带风暴在副高南侧产生的强对流潜热加热所引起的。图 2b 反映了副高位置的东西摆动。与气候平均情况(图略)相比，2003 年 7 月副高具有非常明显的西伸特

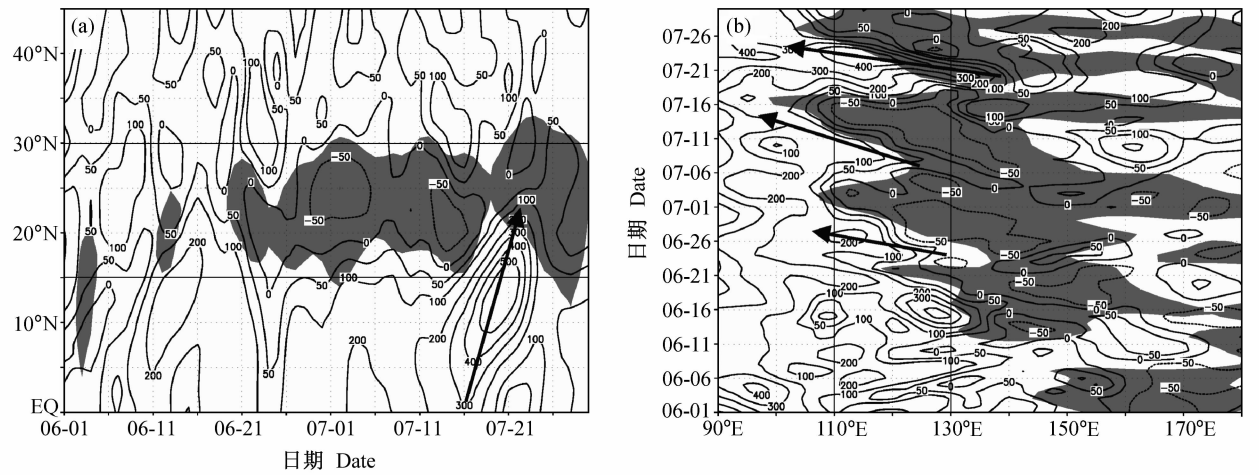

图2 2003年6～7月大气热源〈Q_1〉(单位：W·m^{-2})的时间-纬度剖面(110°E～150°E平均，a)和时间-经度剖面(15°N～30°N平均，b)。阴影区为500 hPa位势高度≥5880 gpm，实线箭头表示大气热源〈Q_1〉的极值轴

Fig. 2 (a) Time-latitude cross section (110°E-150°E average) and (b) time-longitude cross section (15°N-30°N average) of atmospheric heat source 〈Q_1〉(units: W·m^{-2}) from Jun to Jul 2003. The areas with 500-hPa geopotential height≥5880 gpm are shaded, and the solid lines with arrows denote the extreme axis of atmospheric heat source 〈Q_1〉

征。6月份副高西伸脊点还停留在130°E以东，而在7月份则出现了3次显著的西伸过程，分别发生在6月底到7月初、7月中旬和7月下旬(如图2b中箭头所示)。值得注意的是，副高的每一次西伸都伴随着西侧加热的显著增强，而且加热的增强超前于副高的西伸。

3.2 非绝热加热对副高形态变异的强迫作用

3.2.1 副高南北侧加热对其位置南北移动的影响

在副高南(北)侧，盛行东(西)风($v\approx0$)，并且在x方向上涡度的平流很弱，根据式(1)可得

$$\frac{\partial\xi}{\partial t}\propto\frac{f+\xi_z}{\theta_z}\frac{\partial Q_1}{\partial z}. \tag{2}$$

2003年7月副高中心区和南北两侧加热的垂直廓线(图3a)表明，副高中心区除600～700 hPa为弱的加热外，其他层均表现为弱的非绝热冷却。在副高的南北两侧，加热率的峰值高度都位于400～500 hPa之间，具有对流加热的特征，这也说明副高南北两侧的加热是以对流凝结潜热加热为主。南侧加热的最大值(3.5 K·d^{-1})比北侧(1.3 K·d^{-1})大，这与文献[7]对多年平均分析得出的结论是一致的。从图3a中还可以看出，以加热率的峰值高度(450 hPa)为界，副高南北两侧低层$\partial Q_1/\partial z>0$，因而$(\partial\xi/\partial t)_{Q_1}>0$；高层$\partial Q_1/\partial z<0$，则$(\partial\xi/\partial t)_{Q_1}<0$。因此，副高北侧对流降水产生的加热有利于低层气旋型涡度增长，不利于副高北进；高层反气旋涡度增长，有利于副高北进。由此造成副高脊轴随高度向极倾斜。相反，副高南侧的对流加热制造的低层气旋型涡度(高层反气旋型涡度)则有利于低层(高层)副高偏北(偏南)，使脊轴随高度向赤道倾斜。从这个意义上讲，副高的南北进退在相当程度上取决于其南北两侧非绝热加热率垂直变化的相对强弱。

图4a、b给出了500 hPa副高北、南两侧气候平均及2003年7月逐日$\partial Q_1/\partial z$演变。从图4a可以看出，2003年7月副高北侧加热率的垂直变化在大多数时间内比气候平均值大，即$(\partial Q_1/\partial z)_{03}>(\partial Q_1/\partial z)_{mean}>0$，在15～22日尤其明显；而南侧加热率的垂直变化(图4b)除15～22日这段时间外，其他时间则小于多年平均。也就是说，除这段时间外，2003年7月副高北(南)侧加热率的垂直变化产生的气旋性涡度较常年略偏大(小)，因此，在南北两侧加热的综合作用下，图2a中2003年7月初到中旬副高北界一直维持在30°N以南，而南界则明显比气候平均状况偏南，大致位于15°N～17°N附近。但是，从7月15日开始，由于热带风暴“天鹅”与“伊布都”的共同影响，副高南侧加热率的垂直变化迅速增强(极值达11×10^{-9}K·m^{-1}·s^{-1})，并远远大于北侧(极值为6×10^{-9}K·m^{-1}·s^{-1})，促使副高位置发生显著北抬。

3.2.2 副高东西侧加热对其东西位置移动的影响

副高主体东西两侧加热率的垂直变化对副高纬向

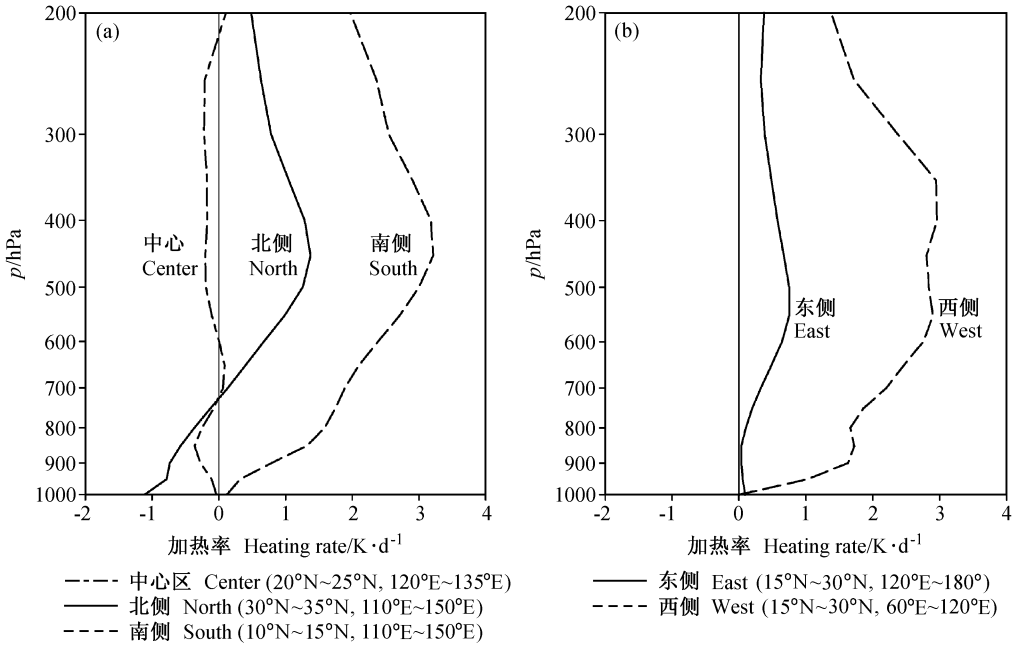

图 3　2003 年 7 月副高中心区、副高主体南北两侧(a)及东西两侧(b)加热率(单位：K·d^{-1})的垂直廓线

Fig. 3　Vertical profiles of heating rate (units: K·d^{-1}) over (a) the center, south, north, and (b) east, west of subtropical high in Jul 2003

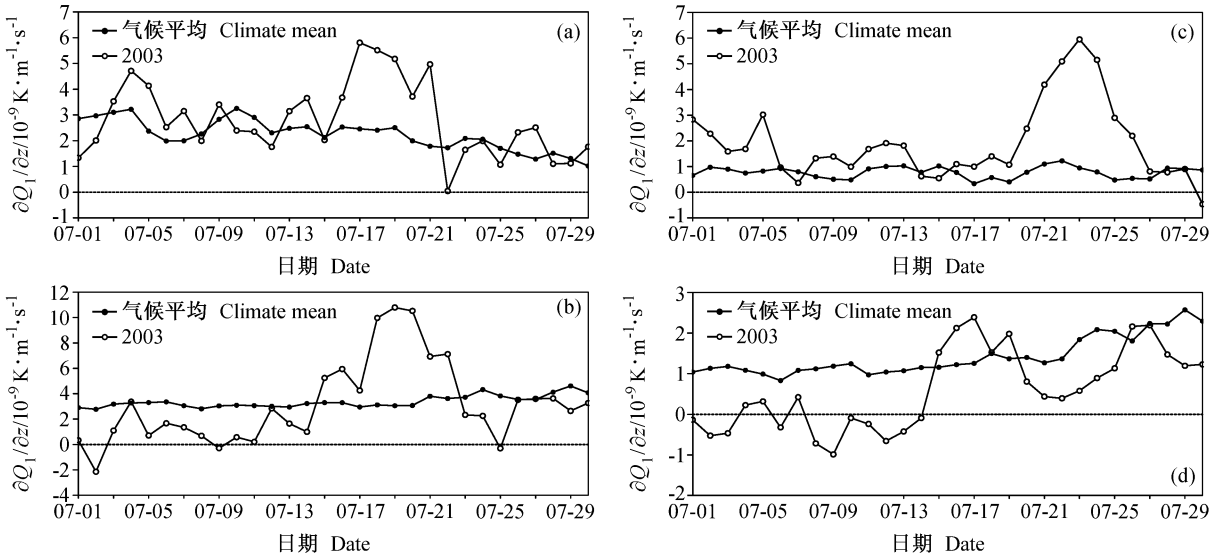

图 4　500 hPa 副高各侧区域平均的 1971～2000 年气候平均以及 2003 年 7 月逐日$\partial Q_1/\partial z$ 演变：(a) 北侧 (30°N～35°N, 110°E～150°E)；(b) 南侧(10°N～15°N, 110°E～150°E)；(c) 西侧(15°N～30°N, 60 °E～110°E)；(d) 东侧(15°N～30°N, 120°E～180°)

Fig. 4　Daily variations of area-averaged $\partial Q_1/\partial z$ in the (a) north (30°N－35°N, 110°E－150°E), (b) south (10°N－15°N, 110°E－150°E), (c) west (15°N－30°N, 60°E－110°E) and (d) east (15°N－30°N, 120°E－180°) of subtropical high at 500 hPa during Jul of 2003 and climate mean

移动有显著影响。如果考虑脊线附近 $u\approx 0$，平流作用很小，并且在时间尺度较长时，局地变化项($\partial\xi/\partial t$)可略，大气可取为准定常态[2]。由式(1)可得到：

$$\beta v \propto \frac{f+\xi_z}{\theta_z}\frac{\partial Q_1}{\partial z}. \qquad (3)$$

在 15°N～30°N 纬带上，副高东西两侧区域平均的加热率垂直廓线(图 3b)表明，东西两侧加热有明显的差别。西侧加热率的最大值位于 350～600 hPa，而东侧则出现在 500～600 hPa 之间，说明副高东西侧非绝热加热也主要集中在对流层中

层，以对流降水产生的凝结潜热加热为主。西侧峰值为 2.9 K·d^{-1}，远大于东侧(0.6 K·d^{-1})。从图 3b 还可以看出，西侧 400 hPa 以下，$\partial Q_1/\partial z>0$，使热源附近下方偏南风增加，诱导出的 500 hPa 反气旋式环流出现在热源东侧，有助于副高在热源东侧的稳定和加强西伸。值得注意的是，副高东侧加热率峰值位于 500～600 hPa 附近，在 500 hPa 有 $\partial Q_1/\partial z<0$，因而在此热源上方偏北风增强，也有利于副高的加强西伸。

图 4c、d 给出了 500 hPa 副高西、东两侧 2003 年 7 月及气候平均状况下 $\partial Q_1/\partial z$ 的逐日演变。2003 年 7 月副高西侧非绝热加热率的垂直变化几乎全都高于气候平均状况，即 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}>(\partial Q_1/\partial z)_{mean}>0$，并以 19～27 日尤为突出。这种加热率的垂直变化有利于加热区东侧(副高西侧)反气旋涡度的增加，从而诱使副高西伸。相反，在 2003 年 7 月大多数时间副高东侧加热的垂直变化远低于气候平均，并且在 7 月 14 日前 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}<0$，这将有利于加热区西侧反气旋涡度的生成，同样也会促使副高主体加强西移。

更具体地说，2003 年 7 月份副高发生两次西伸与东西两侧的加热率垂直变化极其吻合。图 2b 显示，在 6～16 日及 18～26 日副高发生了两次明显的西伸，而在图 4c 中都伴有 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}>(\partial Q_1/\partial z)_{mean}$，图 4d 中 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}<(\partial Q_1/\partial z)_{mean}$。对比这前后两次西伸过程可以发现，前一次副高西侧 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}>0$，而且东侧符号相反，东西两侧的加热状况均有利于副高西伸；后一次则有所不同：副高西侧 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}>0$ 且强度极强，极其有利于副高西伸，但由于东侧 $(\partial Q_1/\partial z)_{03}>0$，它本身是不利于副高西伸的，只是其强度低于气候值，对于副高西伸的阻碍也弱于气候状况。因此，东西两侧综合作用的结果使得两次西伸过程并没有表现出显著差别。

3.2.3 非绝热加热对副高的综合影响

刘屹岷等[3]和刘还珠等[4]的研究都证明凝结潜热加热是决定副高位置和强度的重要因素，但强调的是副高西侧降水产生的凝结潜热加热对副高西伸和北进的作用。然而，副高东西侧与南北侧的加热对副高的西伸和北进的作用是相互影响的。这从 2003 年 7 月副高的西伸、北抬过程可以得到证实。事实上，2003 年 6～7 月副高的 3 次显著西伸过程均伴随有副高的北抬。如图 2b 所示，每次副高西伸前其西侧均有强降水产生的非绝热加热，而非绝热加热在垂直方向上的不均匀，通过热力作用转化为动力作用，加强了副高西侧雨区上空的南风；南风右侧反气旋涡度发展，引起副高北进，反过来又增强了副高西北侧冷暖空气辐合作用产生降水，并沿着副高西北边缘北进[4]，二者形成正反馈。但同时副高北侧降水潜热释放有利于降水区低层气旋性涡度增长，不利于副高北进。因此，副高西伸过程中偏南气流的加强对于副高南北进退的贡献并不十分显著。相比之下，副高南侧非绝热加热异常偏强

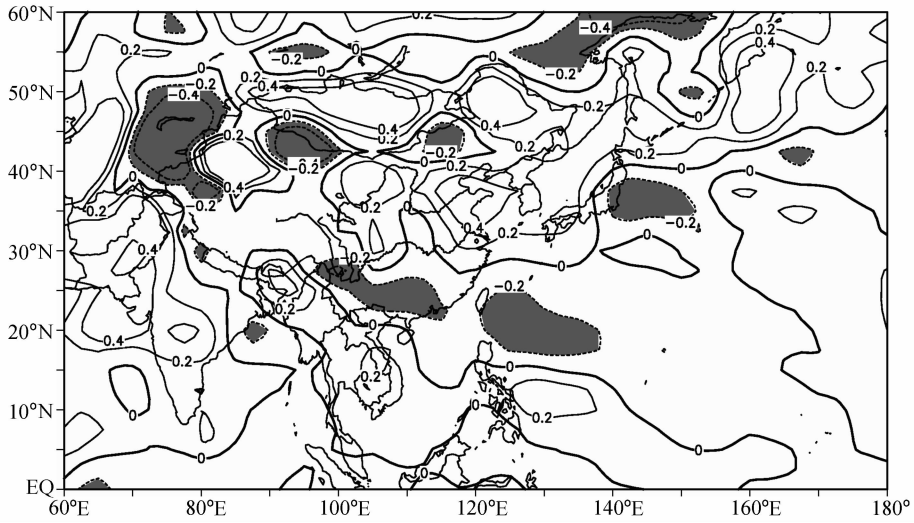

图 5 2003 年 7 月非绝热加热率垂直变化引起的 500 hPa 涡度制造率$[(f+\xi_z)/\theta_z](\partial Q_1/\partial z)$距平分布（单位：$10^{-10}$ s^{-2}，阴影区：$\leqslant -0.2\times10^{-10}$ s^{-2}）

Fig. 5 Anomalous vorticity variation attributed to vertically nonuniform heating $[(f+\xi_z)/\theta_z]\cdot(\partial Q_1/\partial z)$ at 500 hPa in Jul 2003 (units: 10^{-10} s^{-2}, shaded area: $\leqslant -0.2\times10^{-10}$ s^{-2})

时，不仅有利于副高加强，而且还极其有利于副高北抬。2003 年 7 月副高的前两次西伸和北进都主要缘于副高西侧非绝热加热的垂直变化偏强、东侧偏弱的作用，但相对而言副高北进并不十分明显，这与同期副高南侧非绝热加热偏弱而北侧略微偏强，有利于副高偏南有关。与前两次明显不同的是：副高的第三次西伸伴随着非常明显的北进，这是由于副高南侧非绝热加热的垂直变化异常偏强而且远大于北侧的缘故。

3.2.4　非绝热加热导致的 500 hPa 涡度制造率异常分布

为了进一步说明非绝热加热垂直变化对副高位置和强度的影响，图 5 给出了 2003 年 7 月非绝热加热异常产生的 500 hPa 涡度制造率$[(f+\xi_z)/\theta_z]\cdot(\partial Q_1/\partial z)$距平分布，可见在我国西北地区东部、华北、东北一带以及太平洋中北部附近（15°N～30°N，160°E～180°）、菲律宾附近、印度半岛都表现为正涡度制造距平，与该地区异常的对流活动一致。最为引人注目的是，在我国江南大部到副热带西太平洋地区呈现带状的负涡度制造距平区，这种带状分布区正好与副高稳定西伸的区域吻合，说明由于非绝热加热的作用，2003 年 7 月上述地区较常年有异常强的反气旋性涡度制造。这进一步证明：异常的非均匀加热导致了 2003 年 7 月副高的形态和强度的变异。

4　结论

本文主要运用已有的全型垂直涡度倾向方程理论，研究了非绝热加热在垂直方向的变化对 2003 年 7 月副高强度和位置变异的影响。根据分析可以得出以下结论：

(1)副热带地区的非绝热加热对副高的强度和位置的变化有极其重要的影响。与气候平均状况相比较，2003 年 7 月副高北侧、西侧非均匀加热的垂直变化异常偏强，同时南侧、东侧较常年异常偏弱。这种异常的非均匀加热状况导致我国江南到副热带西太平洋地区呈现带状的异常反气旋性涡度制造，有利于 7 月副高偏强偏西。

(2)副高东西侧与南北侧的加热对副高的西伸和北进的作用是相互影响的。在副高西伸过程中，副高西侧非绝热加热作用较东侧更为重要，同时对副高的北进有促进作用；北侧非绝热加热不利于副高的北进，而南侧非绝热加热异常，尤其是南侧热带风暴引起的强降水产生的凝结潜热加热，对于副高北进起着显著的作用。

参考文献(References)

[1] 黄荣辉，李维京. 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物理机制. 大气科学，**12**(特刊)：1988，107～116
Huang Ronghui，Li Weijing. Impact and physical mechanism of anomalous heating over western Pacific on subtropical high over Eastern Asia in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*)(in Chinese)，**12**(Special issue)：1988，107～116

[2] 吴国雄，刘屹岷，刘平. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I：尺度分析. 气象学报，1999，**57**(3)：257～263
Wu Guoxiong，Liu Yimin，Liu Ping. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. I：Scale analysis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese)，1999，**57**(3)：257～263

[3] 刘屹岷，吴国雄，刘辉，等. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 III：凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高. 气象学报，1999，**57**(5)：525～538
Liu Yimin，Wu Guoxiong，Liu Hui，et al. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. III：Condensation heating and South Asia high and western Pacific subtropical high. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese)，1999，**57**(5)：525～538

[4] 刘还珠，姚明明. 降水与副热带高压位置和强度变化的数值模拟. 应用气象学报，2000，**11**(4)：385～391
Liu Huanzhu，Yao Mingming. Numerical simulation on the precipitation and variation of the location and intensity of the subtropical high. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese)，2000，**11**(4)：385～391

[5] 吴国雄，刘还珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展. 气象学报，1999，**57**(1)：1～15
Wu Guoxiong，Liu Huanzhu. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese)，1999，**57**(1)：1～15

[6] Yanai M，Esbensen S，Chu J-H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and source budgets. *J. Atmos. Sci.*，1973，**30**：611～627

[7] 温敏，何金海. 夏季西太平洋副高脊线的活动特征及其可能的机制. 南京气象学院学报，2002，**25**(3)：289～297
Wen Min，He Jinhai. Ridge movement and potential mechanism of western Pacific subtropical high in summer. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese)，2002，**25**(3)：289～297