

两种强迫热源对夏季北半球大气低频环流影响的数值试验

胡 欣 朱乾根

(南京气象学院气象学系, 南京 210044)

摘 要 利用 IAP 2-L AGCM 模式, 做了热带西北太平洋对流层中上层两种(恒定和双周振荡)强迫热源, 对北半球夏季大气低频环流影响的数值试验。结果表明, 不同热源可激发出明显不同的遥相关型, 与之相联系的低频系统也不同。恒定热源激发出的低频波列类似 ENSO 事件发生发展阶段(1972 年)的 PNA 型, 伴随的低频气旋和反气旋在热带西北太平洋生成, 沿波列路径传播, 在北美东南部消亡。双周振荡热源产生最显著的遥相关型位于热带西北太平洋-亚洲中纬度地区, 呈经向一波型。低频系统生成于北半球, 以 $1^\circ \cdot d^{-1}$ 的速度向北传播, 在副热带地区达到最强。

关键词 强迫热源, 大气低频环流, 气候异常, 低频天气系统, 数值试验

分类号 P435

大气季节内振荡的观测和数值试验研究证实, 西太平洋“暖池”的热状况异常, 可以激发出低频振荡的遥相关波列, 这个波列大体上从“暖池”出发向东北方向传播, 至北太平洋高纬地区后又折向东南, 最后到达美国南部, 基本上沿大圆路径传播^[1]。然而, 随着热源强度的不同, 这个波列路径存在一些差异。黄荣辉^[2-4]研究指出在 ENSO 的不同阶段, 这种遥相关波列有明显不同, 当西太平洋暖池对流潜热强时路径偏北, 反之偏南。从而形成当暖池加热强时, 中国夏季雨带偏北(位于华北、东北); 当暖池加热弱时雨带偏南(位于长江流域)。为进一步研究对流热源的振荡周期不同时, 是否都能激发出低频遥相关波列, 我们对两种(恒定不变和双周振荡)强迫热源, 利用 IAP 2-L AGCM 模式进行了试验研究。

1 数值试验方案设计

夏季西北太平洋的热带辐合带平均位于 $15^\circ N \sim 20^\circ N$ ^[6], 是对流活动发展最旺盛的地区。积云对流的热力作用主要在对流层中上层, 我们依据陈隆勋等计算的亚洲季风区 7 月份多年平均热源位置、强度、潜热源的高度和准双周振荡频率^[6], 将强迫热源置于夏季大气加热最旺盛的热带辐合带及其南侧的对流层 400 hPa 高度, 以能较好地表征对流活动的热力作用。为叙述简便, 将恒定热源试验和双周振荡热源试验分别记为试验 1 和试验 2。它们的热源中心强度可分别写为

$$Q_{c1} = e$$

$$Q_{e2} = e + 2 \sin\left(\frac{2-t}{L}\right)$$

其中 $e = 2.71828\dots$ 为常数; $L = 14$; t 是时间(d); Q_{e1} 和 Q_{e2} 的单位为 $\text{W} \cdot \text{d}^{-1}$, 它们的水平分布分别为

$$Q_1 = Q_0 Q_{e1}; \quad Q_2 = Q_0 Q_{e2}$$

其中

$$Q_0 = \sin^2\left[\frac{(2-\lambda)}{2-\lambda_1}\right] \sin^2\left[\frac{(2-\lambda)}{2-\lambda_1}\right]$$

$$\lambda_1 = 2 \text{ N}, \quad \lambda_2 = 22 \text{ N}, \quad \lambda_1 = 2$$

$$\lambda_1 = 110 \text{ E}, \quad \lambda_2 = 170 \text{ E}, \quad \lambda_1 = 2$$

我们仅在文献 [7] 中的 (2.19) 式右端 400 hPa 上增加 Q_{e1} 或 Q_{e2} 项。

李崇银认为^[8], 异常 SST 试验的扰动试验与控制试验的差异就表示了大气对异常 SST 的响应。一般情况下, 初始异常经过 2 周~3 周即可调整到一平衡状态。因此, 我们取 4 月 30 日为控制试验初始场, 积分从 5 月 1 日~8 月 31 日。热源从 5 月 1 日线性递增, 于 5 月 15 日达到最强, 此后按给定的热源变化形式变化, 选取 6 月 1 日~8 月 31 日(92 d) 予以分析研究。为了突出大气低频特征, 首先将模式资料进行低频(30 d~60 d) 滤波处理。

2 异常试验的遥相关型

2.1 试验 1 的遥相关特征

图 1 为试验 1 的 500 hPa 低频扰动距平高度场的同时点相关(基点为 14 N, 135 E, 这里的距平是指相对于控制试验的差值, 下同)。由图可见, 热带西北太平洋经中南半岛到印度南部为正相关区; 日本和我国大部为负相关区, 中心分别位于日本南部和我国长江以南; 鄂霍次克海至贝加尔湖为正相关区; 白令海及以北为负相关区; 北美大陆西部为正相关区; 美国东南部为负相关区。每个正负相关区中心最大相关系数均超过 ± 0.40 (信度检验在 0.001 左右)。将这一系列正负相关中心联系起来, 视为一个自热带西北太平洋至北美东南部的准定常行星波列。图中波射线作了一定的光滑, 其中心的信度仍很高, 不影响一般性。尽管所取基点与文献 [2] 的基点(20 N, 120 E) 不同。但得到的低频波列走向及经过的地区与文献 [2] 中图 2 基本一致, 类似于 ENSO 发生发展阶段的 1972 年情况。这意味着在 ENSO 发生发展阶段, 对流活动的热力作用可能是一持续稳定过程。

沿特征点 A-F, 绘制扰动传播的时空剖面图 2。可见, 2 个正扰动和 2 个负扰动沿波列传播是主要特征, 第 1 正扰动第 8 天始于热源附近, 6 d 后到日本南部, 20 d 后途经鄂霍次克海, 第 55 天达到北美, 整个传播过程历时 47 d。第 2 负扰动(第 25 天) 经历约 55 d 达到北美。图 2 的分析结果进一步证实, 热源激发出的低频扰动在球面上沿大圆路径传播, 其振幅随纬度增加, 在 60 N 处达到最强(即 C 和 D 所在位置), 这是中高纬大气基本风场的结构所决定的。

由超前、滞后 11 d(图略) 和同时点相关图可分析出波列的动态。在超前 11 d 到同时相关图, 显示日本南部的 -0.40 线向北收缩了 15 个纬度。超前 11 d 相关时, 东西伯利亚与阿拉斯加、北美大陆西部、北部与北美东南部分别为正、负相关中心, 而同时点相关时, 白令海及以北负相关增强, 美国东南部的负相关减弱, 北美西北部正相关区加强。滞后 11 d 相关时, 东西伯利亚、阿拉斯加、北美大陆西部和北部、北美东南部正、负相关区的分布与超前 11 d 相关时呈反位相, 这可能是由于上述地区的正、负相关区沿波列相继移动所致。这表明, 在超前到滞后的

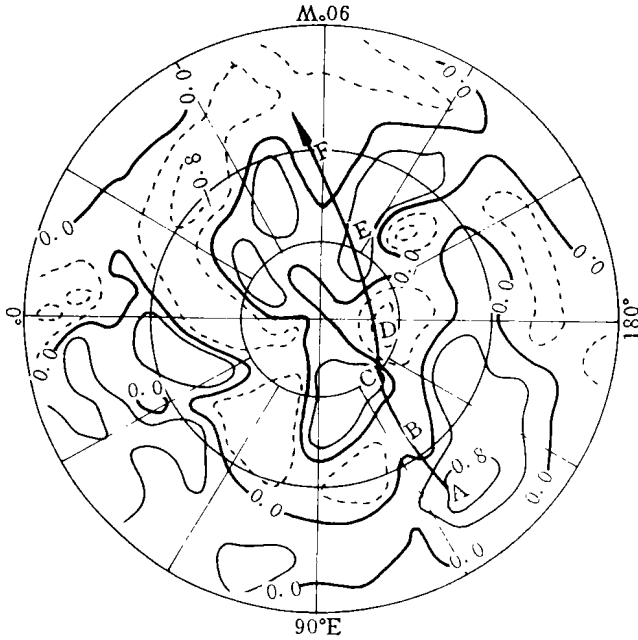


图 1 试验 1 的 500 hPa 低频扰动距平高度场的同时点相关

粗实矢线表示该准定常行星波列的传播路径, A - F 为沿波列选取的特征点 (各遥相关中心)

Fig. 1 Synchronous correlation map of 500 hPa height anomaly of low-frequency disturbance, with the quasi-steady planetary wavetrain track denoted by heavy solid arrowed line and A, B, ..., F are characteristic points selected along the wavetrain from Exp. 1

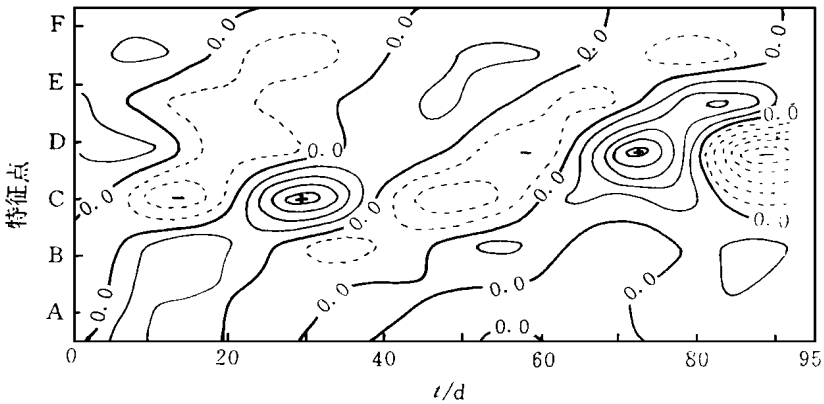


图 2 试验 1 沿特征点 A - F 500 hPa 低频扰动高度场的时变 (单位: dagpm)

Fig. 2 Time-varying variation of 500 hPa height due to low frequency perturbation, with A to F illustrated in Fig. 1. Unit: dagpm

共计 22 d 内, 低频波列完成了半个周期的振荡, 即大气环流的低频变化有准 40 d 的周期。此外, 在低纬度纬向还存在着东、西太平洋扰动高度场呈反相关的现象, 即在低纬度东、西太平洋地区扰动高度场呈明显的“跷跷板”结构, 与文献 [2] 中关于 1972 年的结论吻合。

2.2 试验 2 的遥相关特征

图 3 为试验 2 中 500 hPa 低频扰动距平高度场的同时点相关。分析可见, 热源及南亚(包括华南)、勘察加半岛东部、美国西部的东太平洋分别为正相关区, 亚洲中纬度、东北太平洋、低

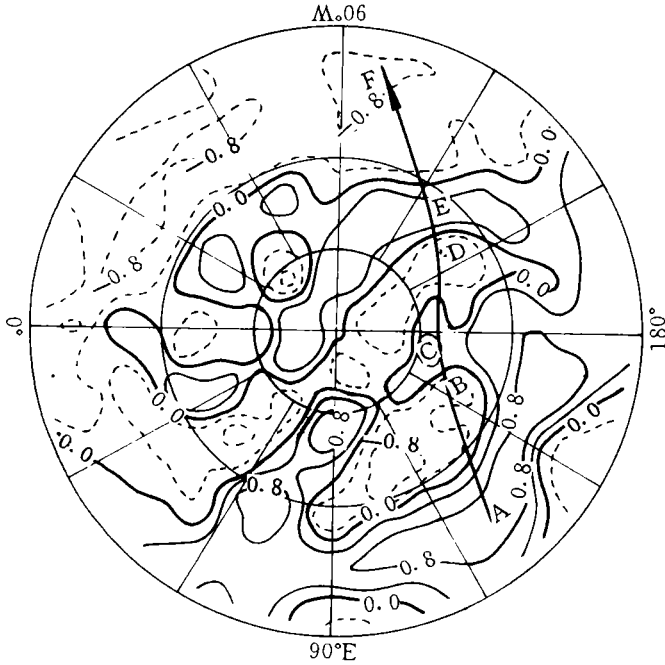


图 3 试验 2 的 500 hPa 低频扰动距平高度场的同时点相关

粗实矢线表示此准定常行星波列路径, A-F 为沿波列选取的(各遥相关中心)特征点

Fig. 3 Synchronous correlation map of 500 hPa height anomaly of low-frequency disturbance, with the quasi-steady planetary wavenumber track denoted by heavy solid arrowed line and A, B, ..., F are characteristic points selected along the wavenumber, from Exp. 2

纬度东太平洋分别为负相关区。各个相关中心的相关系数都超过 ± 0.40 (信度检验为 0.001 左右)。用粗矢线将各中心连接起来, 视为一准定常的行星波列。该波列与试验 1 的波列相比波射线明显偏南, 强度较弱。从波列各相关中心选取特征点作时空剖面(图略)发现, 试验 2 激发出的低频扰动与试验 1 相比较少。因此, 认为沿该准定常行星波列的传播并非为试验 2 的主要低频特征。

分析图 3 及超前、滞后 6 d 和 11 d 的点相关(图略)发现, 在亚洲-西北太平洋(90°E ~ 150°E, 2°N ~ 50°N)地区, 正、负相关区呈纬向分布, 且有明显的自南向北的推移过程。超前 11 d 相关时, 从北印度洋经中南半岛至中太平洋的低纬度地区为正相关区, 北缘的相关 0 线基本上位于 20°N 以南地区; 40°N 为纬向分布的正相关区。超前 6 d 时, 相关 0 线超过 20°N, 东亚至中太平洋的负相关中心位于 30°N。同时相关图 3 中, 相关 0 线移到 25°N, 负相关中心北进到 35°N ~ 45°N 一带。滞后 6 d 时, 相关 0 线已推至 30°N 附近, 负相关中心稳定在 40°N 附近; 此时的正相关区已全部控制了印度次大陆至中太平洋的副热带地区, 中心轴线位于 15°N ~ 20°N。滞后 11 d 相关时, 移至 40°N 附近的负相关区稳定少动, 强度明显减弱; 正相关区控制了 25°N ~ 35°N 的绝大部分地区; 低纬度的负相关区北缘也随之从 5°N 推进到 15°N。上述地区在 22 d 完成了一次正、负相关区的转换, 可视为低频振荡的半个周期。

3 异常试验的低频系统演变

3.1 试验 1 中的低频天气系统演变

取控制试验低频流场作为气候值, 将试验 1 的 400 hPa 低频流场减去气候值, 得到 400 hPa 的距平流场(或称流场)。图 4 给出了试验 1 的 400 hPa 流场情况。分析发现, 低频气旋和

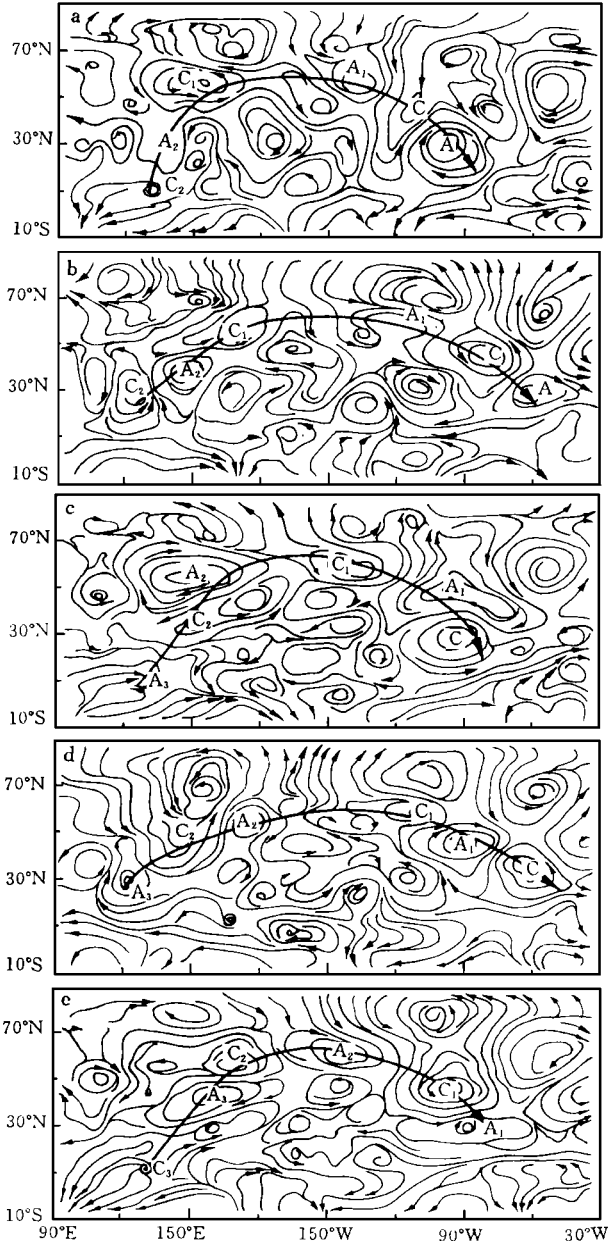


图 4 试验 1 的 400 hPa 低频流场中低频系统的演变

a, b, c, d, e 分别为第 8、19、30、41、52 天的流场

Fig. 4 Variation in a low-frequency system in the 400 hPa flow field where a, b, c, d and e denote the patterns on days 8, 19, 30, 41 and 52, respectively, from Exp. 1

反气旋的生成、发展和传播始终是沿着波列演变。第 8 天(图 4a)沿热源、日本、鄂霍次克海、阿拉斯加至北美南部的波列上有 3 对气旋和反气旋中心。便于跟踪说明,将上述系统分别记为 A、C、A₁、C₁、A₂、C₂。C₂ 是在热源附近一初生的气旋。第 19 天(图 4b)中, C₁ 和 A₁ 约东移 20 个经度, A₂ 由 30°N, 135°E 移至 40°N, 150°E, C₂ 由菲律宾东部向北略偏西移至长江口附近。第 30 天(图 4c)中, 在菲律宾有一反气旋初生 A₃, 其他各中心继续沿波列移动; C₂、C₁ 分别位于日本东南部和加拿大西部; A₂、A₁ 控制了鄂霍次克海和北美中部; 反气旋 A 在北美东南部减弱消失; 与图 4a 相比各个中心位置变化不大, 位相完全相反。第 41 天(图 4d)上 A₃ 移到华东及东海。在图 4e 上只是在菲律宾附近又出现了气旋扰动 C₃, 气旋 C 在北美东南部消亡, 其他各低频系统与图 4a 基本一样。在上述 44 d 内完成了一个完整的低频系统变化过程。尽管在此期间, 波列有东西或南北摆动, 但是波列始终存在, 而且一直控制着西北太平洋、东亚至北美地区。追踪各系统, 44 d 内日本南部和阿拉斯加南部的反气旋 A₂ 和 A₁ 取代了阿拉斯加南部和美国南部的反气旋 A₁ 和 A; 鄂霍次克海和菲律宾的气旋 C₁ 和 C₂ 代替了美国中部和鄂霍次克海的气旋 C 和 C₁, 并且各低频系统从热源地区向中纬度移动中都伴随着发展过程。

3.2 试验 2 中的低频天气系统演变

试验 2 的 400 hPa 低频流场分析结果表明(图 5), 在东、南亚至太平洋中部地区的低频系统主要特征是, 准纬向分布的气旋性环流带和反气旋性环流带依次生成于赤道北半球, 逐渐向北推移, 在副热带地区发展到最强盛。移至 40°N ~ 50°N 时稳定少动, 逐渐减弱消亡。平均移速为 $1^\circ \cdot d^{-1}$, 比文献 [9] 的计算结果略偏快。在 2°N ~ 50°N 之内经向呈一波型。在图 5 中用粗实(虚)线连接各个气旋(反气旋)性环流中心可见, 低频系统生成、移动、发展和消亡的一个周期演变。第 35 天(图 5a)有两个气旋性环流带分别记为 C₁ 和 C₂。环流带 C₁ 处于减弱阶段的中纬度地区(45°N 附近); 环流带 C₂ 处于初生阶段的赤道北半球上空。一个反气旋性环流带 A₁ 位于发展阶段的副热带地区。第 46 天(图 5b)气旋性环流带 C₁ 位置少动且有所减弱; 反气旋性环流带 A₁ 向北推移约 10 个纬度到达 30°N; 气旋性环流带 C₂ 从赤道附近北进至 10°N ~ 15°N, 环流已发展完整, 强度略有增强。此刻, 赤道地区(5°N 附近)一个反气旋性环流带 A₂ 初生。在第 57 天(图 5c)中, 气旋性环流带 C₁ 消亡; 反气旋性环流带 A₁ 移至 40°N ~ 45°N 且较为强盛; 气旋性环流带 C₂ 和反气旋性环流带 A₂ 持续北进, C₂ 移动较快抵达 20°N。一直到第 68 天(图 5d) C₂ 处于 30°N 附近, 此间始终维持着较强的环流特征。A₂ 明显加强, 接近 20°N。而 A₁ 较以前显著衰败。

上述低频气旋与反气旋性环流带都有同 C₁ 和 A₁ 类似的生消过程。由此构成了一个低频系统的演变循环。低频系统的演变过程同点相关分析中的亚洲至西北太平洋地区的正、负相关区呈纬向分布的结果也是一致的。

4 小 结

(1) 两种强迫源型均可激发出类似 PNA 型的低频波列。恒定热源的波列明显强于双周振荡热源, 波射线位置偏北。

(2) 恒定热源激发的扰动从热源附近传至美国东南部为 50 d 左右; 在此波列上维持着 3 对气旋和反气旋, 它们在热带西北太平洋上生成, 沿行星波列传播, 在北美东南部消亡, 每对低频系统的生消呈现出准 40 天周期。

(3) 双周热源以热带西北太平洋-亚洲中纬度地区的遥相关型为主, 呈经向一波型。低频气旋和反气旋性环流带生成于赤道北半球, 以 $1^\circ \cdot d^{-1}$ 的速度向北传播; 北移至副热带地区达

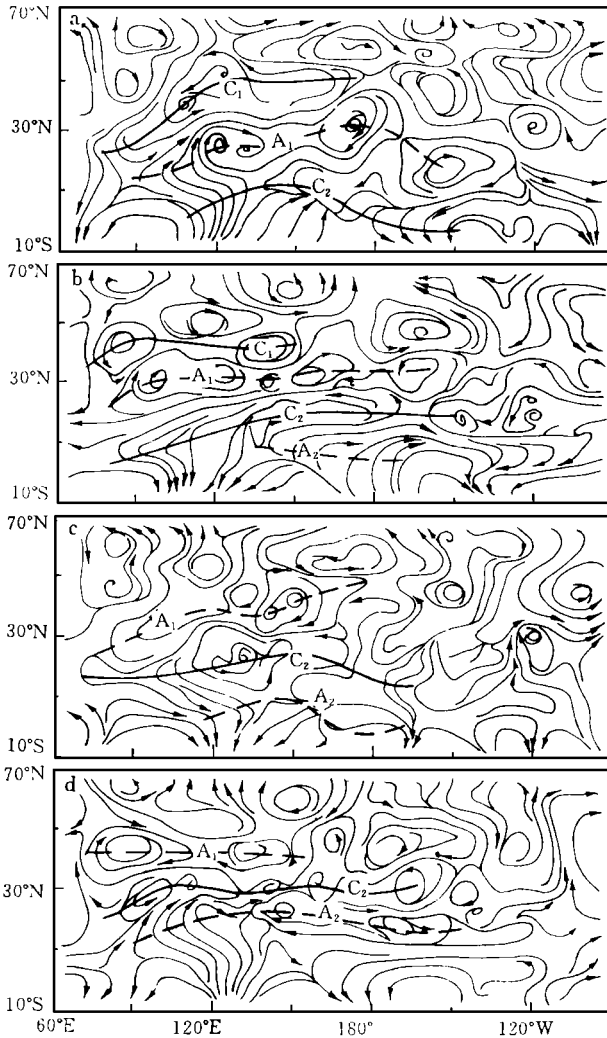


图 5 试验 2 的 400 hPa 低频流场中低频系统的演变

a、b、c、d 分别为第 35、46、57、68 天的流场

Fig. 5 Variation in a low-frequency system in the 400 hPa flow field where a, b, c and d denote the patterns on days 35, 46, 57 and 68, respectively, from Exp. 2

到最强; 进入 40°N ~ 50°N 之间稳定少动, 减弱消亡。

参 考 文 献

- 1 Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J A S*, 1981, 38(2): 1179 ~ 1196
- 2 黄荣辉. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究. 见: 黄荣辉主编. 旱涝气候研究进展. 北京: 气象出版社, 1990. 37 ~ 50
- 3 黄荣辉, 孙凤英. 北半球夏季遥相关型的年际变化及其数值模拟. *大气科学*, 1992, 16(1): 52 ~ 61
- 4 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖热的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. *大气科学*, 1994, 18(2): 141 ~ 151
- 5 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1981. 328 ~ 394

- 6 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362
- 7 Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, Liang Xinzong, et al. Documentation of IAP two-level atmosphere general circulation model, DOE/ER/60314-H1, TRO44, Prepared for United States Department of Energy, 1989. 383
- 8 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1991. 207

NUMERICAL EXPERIMENT IN EFFECTS OF HEAT FORCING ON SUMMER NORTHERN LOW-FREQUENCY CIRCULATIONS

Hu Xin Zhu Qian gen

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract In the context of the IAP 2-level AGCM, numerical study was performed of effects on summer Northern atmospheric low-frequency circulations of two kinds of heat source forcing (constant and quasi-biweekly) in the mid-upper troposphere. Evidence suggests that either of the sources is responsible for a particular teleconnection pattern associated with a characteristic system; the constant source excites a low-frequency wavetrain analogous to PNA pattern associated with 1972 ENSO at a development phase and the related low-frequency cyclone and anticyclone are produced in the tropical NW Pacific, travelling along the wavetrain and disappearing in SE North America; the quasi-biweekly one generates a very strong teleconnection, showing meridional wavenumber 1 over the tropical NW Pacific-mid-latitude Asia; the low-frequency system forms in the Northern Hemisphere, moving northward at 1 degree per day and reaching its maximum strength at subtropics.

Keywords heat source forcing, atmospheric low-frequency circulation, climate abnormality, low-frequency weather system, numerical experiment