

# 澳洲大陆热力强迫对南北半球 环流异常的影响效应

徐祥德

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

赵天良 何金海 朱乾根

(南京气象学院, 南京 210044)

## 提 要

本文采用 OSU-AGCM 动力框架加入牛顿加热项构成的简化大气环流模式, 研究澳洲大陆热力强迫与南北半球环流异常的相关关系。本文对不同平衡温度模拟结果的差异(偏差场)进行了分析, 探讨某局地热力强迫对全球其它区域环流异常的影响效应。数值试验结果表明, 南北半球海陆热力结构有利于两半球行星尺度经向环流的加强及其低纬跨赤道气流的形成; 南半球澳洲大陆热力强迫可以通过东、西风带侧向耦合效应, 显著地影响北半球中纬西风带急流状况; 二维 Rossby 波能量频散径向传播可能是澳洲热力强迫与北半球常定环流系统的异常变化相关现象的重要成因, 且澳洲大陆强迫产生的径向波列路径与 PNA、EU 型相似。

**关键词:** 波列; 热力强迫; 西风带; 东风带; 二维 Rossby 波。

## 一、引 言

目前, 南半球与北半球环流是相互影响的, 还是相互独立地被驱动的? 这是一个有争议而又十分有趣的课题。近年来, 大量观测事实的研究结论已打破了环绕东风带不受侵犯及其两半球相互独立的古典概念。观测和理论两方面的研究指出, 中纬度的扰动可以深入到低纬度, 有时甚至可以传播到另一半球的热带外区域。热带大气与中纬度波的传播有联系这一推断是有意义的。对数值天气预报来说, 这意味着半球模式是有缺陷的, 除了通常由于缺乏热带资料外, 还因为它忽略了发源于另一半球中纬度的瞬变波的影响<sup>[1]</sup>。Webster 和 Holton 成功地模拟出北半球强迫源波列在强西风条件下其传播可通过赤道达到南半球<sup>[2]</sup>。

对于外界强迫, 大气不仅在源区有响应, 而且在离强迫源甚远的地方也可出现不同形式的响应, 即所谓遥响应(remote response)现象。本文着眼于澳大利亚热力强迫对北半球环流型异常变化的影响效应及其波列传播特征, 探讨南北半球热力因素与低纬跨赤道气流形成, 北半球中纬西风带, 常定环流系统异常变化的相关关系。

## 二、模式简介

本文采用 OSU-AGCM 动力框架<sup>[1]</sup>, 在热力学方程中引入牛顿加热、冷却强迫项, 构成了包括热力强迫、大地形的简化大气环流模式。

模式垂直方向采用  $\sigma$  坐标, 垂直分层结构  $\sigma$  分别为 0, 1/4, 1/2, 3/4, 1; 其中  $\sigma = P - P_1 / \pi$ ,  $\pi = P_s - P_1$ ,  $P_s$  为地表气压,  $P_1$  为大气顶气压,  $P_1$  取 200 hPa,  $0 \leq \sigma \leq 1$ 。

$\sigma$  坐标模式方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\pi \vec{V}) + \nabla \cdot (\pi \vec{V} \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \vec{V} \dot{\sigma}) + f \vec{k} \times \pi \vec{V} + \pi \nabla \varphi \\ + \pi \sigma \alpha \nabla \pi = \pi \vec{F}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\pi c_p T) + \nabla \cdot (\pi c_p T \vec{V}) + (P/P_{\infty})^{\kappa} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi c_p \dot{\sigma} \theta) - \pi \alpha \sigma \left( \frac{\partial \pi}{\partial t} \right. \\ \left. + \vec{V} \cdot \nabla \pi \right) = \pi c_p \alpha_r^{-1} (T_r - T) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \nabla \cdot (\pi \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \dot{\sigma}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} + \pi \alpha = 0, \quad (4)$$

其中  $\alpha$  是大气比容, 位温  $\theta = T(P_{\infty}/P)^{\kappa}$ ,  $P_{\infty} = 1000 \text{ hPa}$ ,  $\kappa = R/c_p$ ,  $T_r$  为平衡温度,  $\alpha_r$  为张弛时间系数 (即阻尼温度扰动时间尺度),  $F$  代表摩擦力。

大地形采用 Schlesinger 和 Gates 处理方案<sup>[3]</sup>, 本文初始场资料取自 C. Schultz 和 W. L. Gates<sup>[4,5]</sup> 全球气候资料 (地面 800 hPa、400 hPa) 的 1 月、7 月平均温度场及地转风场, 其中资料取 38 年的平均值。

## 三、数值试验方案

模式各类试验方案:

(1) 试验 A: 不考虑南北半球大地形, 采用多年平均的 1 月、7 月温度场作为热力学方程中牛顿强迫项的平衡温度场。

(2) 试验 B: 考虑南北半球大地形, 采用多年平均资料的 1 月、7 月纬向平均温度场作为牛顿强迫项的平衡温度场。

(3) 试验 C: 考虑南北半球大地形, 采用多年平均的 1 月、7 月温度场作为牛顿强迫项的平衡温度场。

(4) 试验 D: 考虑南北半球大地形, 牛顿强迫项的平衡温度场取多年平均的 1 月、7

月温度, 但澳洲大陆区域“扣除”其纬向非均匀热力结构部分, 即该区域经平滑处理, 以纬向平均值取代。

对于海陆温差分布特征的描述, 本文引用多年平均纬向距平场来表达, 即

$$T'_k(x, y) = T_k(x, y) - \overline{T_k}^{\lambda}(x, y), \quad (5)$$

其中  $k$  为垂直层次 (400, 800hPa),  $T_k(x, y)$  为  $k$  层多年平均气温,  $\overline{T_k}^{\lambda}(x, y)$  为纬向平均气温,  $T'_k(x, y)$  为多年纬向平均气温的偏差值。

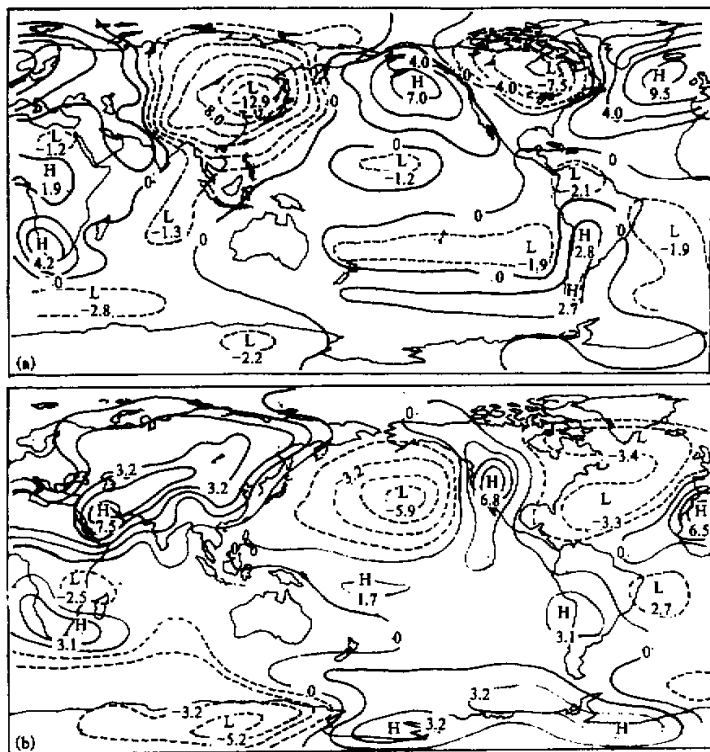


图1 800 hPa 多年平均气温纬向偏差场

(a) 1月; (b) 7月

由图 1a、b 可见, 南北半球陆地、海洋纬向偏差特征表现了显著的差异, 即平均热力状况与下垫面有较好的相关, 且海陆温差呈明显的季节性变化, 另外除欧洲、亚洲、非洲及美洲大陆外, 澳洲大陆热力状况亦呈冬、夏季节性反位相特征。

由图 2a、b 可见, 试验 D 平衡温度场澳洲大陆冬、夏纬向非均匀热力结构已被“扣除”, 即该区域温度分布呈相对均匀状况, 澳洲大陆区域海陆温差特征基本消除。

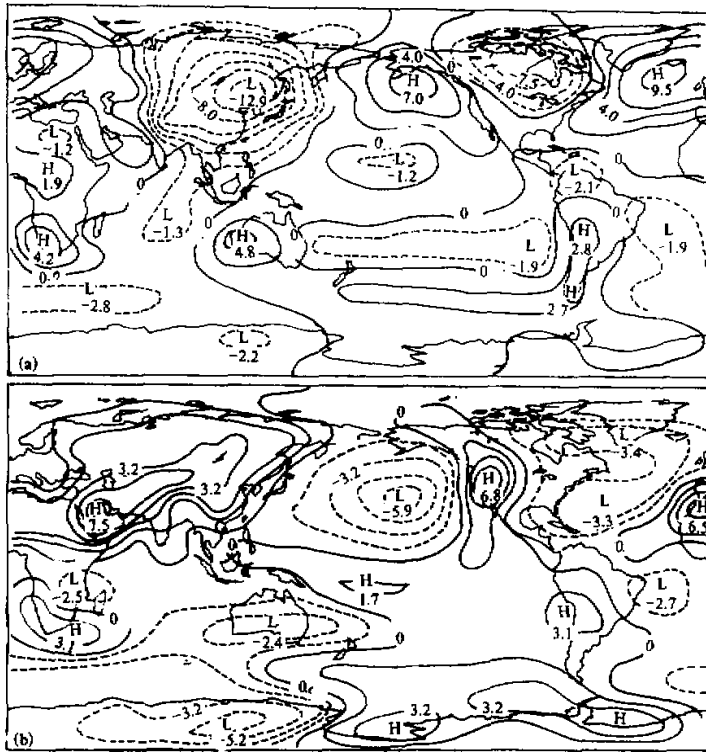


图2 试验D 800 hPa 多年平均气温纬向偏差平衡温度场  
(a) 1月、(b) 7月

#### 四、数值试验结果

##### 1. 亚澳大陆“冷、热源”结构对跨赤道气流的影响效应

南北半球之间的跨赤道气流的成因是探讨维持全球能量平衡的重要环节。赤道地区的PKE (perturbation kinetic energy) 高值区可能是由中纬传到热带或者传到另一个半球的中纬度扰动所形成；由于季风和近赤道加热影响高空气流强度和位置，因此它们也影响天气系统以一个半球向另一个半球的传播。

图3a、b为试验B与C相应的7月份800hPa平均经向风模拟图。对比图3a与b可知，亚澳大陆纬向非均匀热力结构对低纬跨赤道气流通道的构成起了重要的作用，试验B模拟结果表明，若只考虑大地形与极赤温差因素，夏季经向风分布图上非洲大陆东岸索马里急流可越过赤道进入北半球，而亚澳大陆南北半球之间的南风呈“中断”现象，如图3a虚线区域所示，即无连通南北半球V分量跨赤道通道；试验C模拟结果表明，若既考虑大地形、极赤温差因子又加入亚澳大陆海陆纬向热力差异的影响因素，夏季经向风分布图上不仅索马里跨赤道气流明显加强，而且亚澳大陆之间南风跨越赤道呈“连通”特征(图3b)。上述现象揭示了亚澳大陆海陆热力差异不仅影响了区域性环流，而且与距赤道气流、两半球之间的环流遥相关现象有一定的相关关系。

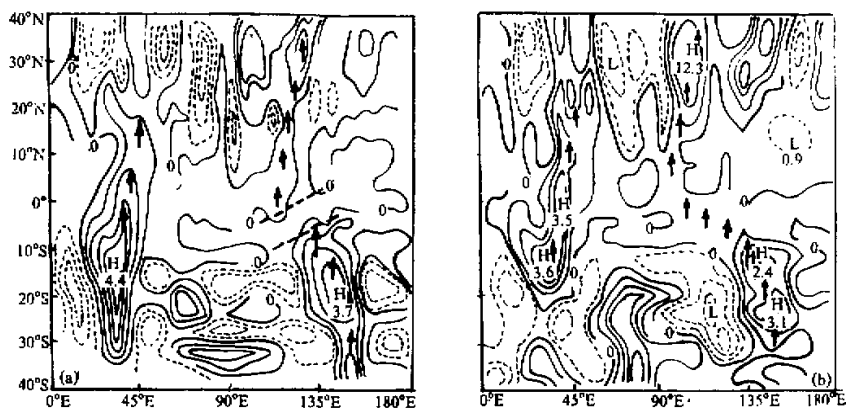
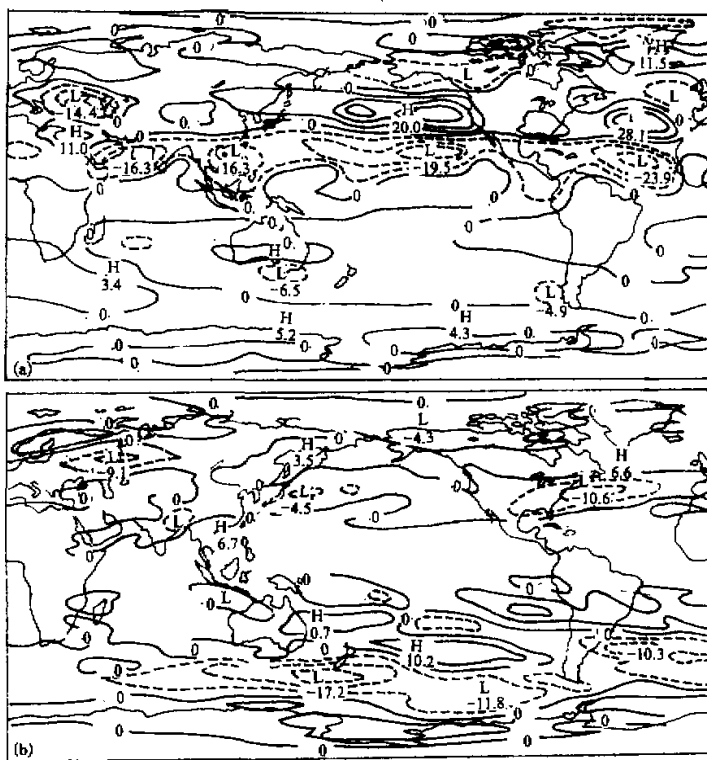


图3 7月800 hPa平均经向风分量模拟结果

(a) 试验 B, (b) 试验 C

## 2. 南北半球东、西风带侧向耦合效应

图4 400 hPa 试验 C 减去试验 D 的纬向风偏差场 ( $u_c - u_D$ )

(a) 1月; (b) 7月

Blackmon 等<sup>[6]</sup>指出,西北太平洋冬季气旋生成的极大值区域与亚洲急流的流出区域相联系,而后者又与冬季季风在赤道地区强大对流相关。Webster<sup>[7]</sup>也指出,南北半球低纬热源形成的经圈季风环流对另一半球冬季西风急流有显著的影响。

图 4a 为北半球冬季澳洲大陆热力强迫引起  $u$  分量偏差模拟场(即试验 C 模拟场减去试验 D 模拟场)。由图 4a 可知,  $u_c - u_d$  场呈显著的经向非均匀分布,例如由澳洲大陆向北至太平洋区域  $u'$  呈带状分布。这表明南半球澳洲热力强迫不仅影响了南北半球东、西风带结构,而且可能通过东、西风带侧向耦合效应,改变北半球中纬西风带急流强度,即引起北半球冬季低纬、中纬东、西风带急流同步增强。由此可知,南北半球环流系统的相互影响作用可能通过经圈环流机制或者东、西风带侧向耦合效应两类途径来实现,从而产生两半球的遥响应现象。

对照图 4a、b 可知,上述东、西风带侧向耦合效应也具有显著的季节性差异,即对于澳洲大陆热力强迫,北半球冬季环流型的响应强于夏季。

### 3. 北半球准定常系统对于澳洲热力强迫的遥响应

观测事实表明,季节平均的纬向风场具有随经度变化的显著分量;在赤道东风带中有西风区域,在某些地理位置西风还强大得足以把南北两半球的热带以外西风气流联系起来。赤道纬向风分量符号的改变可能与缓慢变化的强迫作用生成的行星波有关<sup>[8]</sup>。

图 5 为澳洲大陆热力强迫引起北半球冬季涡度平均偏差场( $\nabla^2\phi_c - \nabla^2\phi_d$ )。由图 5 可见,南北半球大气环流型结构与澳洲大陆热力强迫有较密切的相关关系,即澳洲大陆热力强迫扰动通过大气动力调整,不仅可以引起南半球局地环流的变化,而且也可以导致北半球准定常系统的强度与位置发生改变,即产生了遥响应现象。图 7 上涡度平均偏差( $\zeta'$ )分布呈带状特征,且涡度偏差高、低值中心相间配置表现出由澳洲出发向南、向北的经向波列特征。这类  $\zeta'$  分布状况与上述  $u'$  偏差量侧向耦合特征有所吻合。另外,值得注意的是澳洲大陆热力强迫引起的  $\zeta'$  场,北半球冬季仍比夏季更为显著。

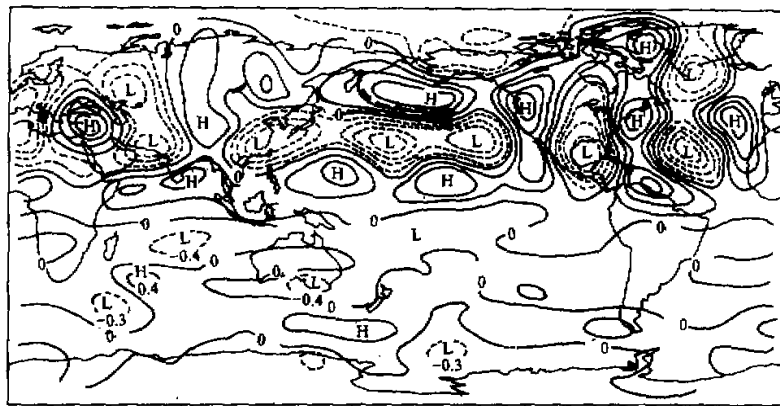


图 5 400 hPa 试验 C 减去试验 D (积分 21—40d) 涡度平均偏差场 ( $10^{-5}/s$ )

必须指出的是图 5 为模式积分 21—40d 涡度平均模拟偏差场,它反映了南北半球大气环流对澳洲热力强迫响应的平均特征。图中粗箭头为  $\zeta'$  偏差引起北半球阿留申低压

与中低纬太平洋副热带高压系统加强效应的环流方向, 箭头汇合处恰好与图 4a 北半球冬季中纬  $u'$  西风偏差高值区 (即急流加强) 相对应. 这一模拟结果与 Blackmon、Webster 等诊断结论相符. 由此可知, 澳洲热力强迫对北半球永久性活动中心 (阿留申低压、冰岛低压) 的形成亦有较显著的贡献, 且对太平洋东部副热带高压系统的强度、范围变化有明显的影响. 另外, 由图 4 可见, 亚欧、北美大陆等区域的环流系统与澳洲大陆热力强迫也有较好的相关关系.

#### 4. 澳洲大陆热力强迫激发的经向波列传播路径

大气环流的遥相关, 大气对外源强迫的响应以及高、低频系统的传播都可表现出经向波列的特征, Hoskins 提出了大圆理论, 他认为经向波列波射线路径类似于一个大圆, 遥相关波列可视为球面二维 Rossby 波波能量传播特征<sup>[9]</sup>.

如图 7 所示, 澳洲热源强迫形成的涡度偏差平均状况表现了类似经向波列的特征, 这模拟结果也反映了大气对局地热源强迫的波列特征. 但是上述结论还不能对以下问题作出明确的解释: 例如澳洲大陆热力强迫的经向波列传播路径究竟为何种类型? 这类路径特征与大气遥相关现象有何联系?

Wallace 和 Gutzler 从北半球冬季多年观测资料的分析发现, 北半球冬季经常出现太平洋北美型大气环流遥相关型, 即当热带和副热带太平洋高压加强, 则位于阿留申地区的低压加深, 北美西北部脊加强, 美国东部处于低槽控制. 观测事实及其数值试验表明, 这种流型的异常在赤道东太平洋海面温度异常升高时表现尤其清楚 (图 6<sup>[10]</sup>).

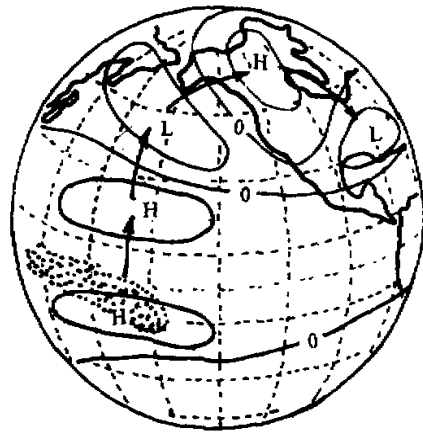


图 6 北半球冬季对流层上层位势高度场对赤道东太平洋异常增暖的响应

黄荣辉曾详细分析了 1976 年冬季北半球高度场的异常分布, 研究了 PNA 型大气环流的异常对北美、日本、我国东北等地区环流特征及其天气的影响效应<sup>[11]</sup>.

对照图 5 与图 6 可发现, 澳洲大陆热力强迫引起的平均涡度偏差分布与赤道东太平洋海温异常构成的 PNA 型遥相关特征两者有十分相似之处, 即遥响应的共同特征是热带、副热带反气旋环流加强, 阿留申气旋环流亦增强, 北美反气旋环流也加强等. 这将意味着 PNA 型环流异常的形成不仅与赤道东太平洋海温异常有关, 而且可能与南半球澳洲大陆的热力强迫相关.

图 7a、b 表明, 南半球澳洲大陆热力强迫可引起向南、向北传播的扰动, 它们似乎是一群波列, 且流型所处的地理位置相对固定, 其中向南、向北波列均有偏东、偏西两个分支; 向北的波列可穿越赤道进入北半球, 即为两个分支: (1) 澳洲 → 赤道 → 太平洋 → 北美; (2) 澳洲 → 赤道 → 东亚 → 西北欧. 十分有趣的是上述两支向北的经向波列



(1) 澳洲大陆热力强迫对全球其它地区环流异常有显著影响。

(2) 南半球局地热力强迫可以通过东、西风带侧向耦合效应影响北半球中纬西风带急流状况。

(3) 二维 Rossby 波能量频散径向传播可能是澳洲热力强迫与北半球常定环流系统异常变化相关的重要机制; 这反映了大气对局地强迫的响应特征, 且澳洲热力强迫产生的径向波列路径与 PNA 型、EU 型遥相关特征相似。

## 参 考 文 献

- [1] Hoskins B. and R. Pearce, 1983, Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere, Academic Press.
- [2] Webster, P. J. and J. R. Holton, 1982, Cross-equatorial response to middle-latitude forcing in a zonally varying basic state, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 723 — 733.
- [3] Ghan, S. J., J. W. Linaas, M. E. Schlesinger R. L. Mobley and W. L. Gates, 1982, A documentation of the OSU, two-level atmospheric general circulation model.
- [4] Schutz, C. and W. L. Gates, 1971, Global climatic data for surface, 800 hPa, 400 hPa, January, A Report Prepared for Advanced Research Projects Agency, 11.
- [5] Schutz, C. and W. L. Gates, 1971, Global climatic data for surface, 800 hPa, 400 hPa, July, A Report Prepared for Advanced Research Projects Agency, 11.
- [6] Blackmon, M. I., J. M. Wallace, N. C. Lau, and S. L. Mullen, 1977, An observational study of the Northern Hemisphere winter circulation, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1040 — 1053.
- [7] Webster, P. J., 1987, Monsoons, 11. The Variable and interactive monsoon, Edited by Jay, S. Fein, Pamela, I. Stephens National Science Foundation Washington D. C. 269 — 329.
- [8] Webster, P. J., 1972, Response of the tropical atmosphere to local steady forcing, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 518 — 540.
- [9] Hoskins, B. and D. Karoly, 1981, The Steady Linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179 — 1196.
- [10] Horel, J. D. and J. M. Wallace, 1981, Planetary scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 813 — 829.
- [11] Huang Ronghui, 1986, Physical mechanism of influence of heat source anomaly over low latitudes on general circulation over the Northern Hemisphere in winter, *Scientia Sinica (Series B)*, **29**, 970 — 983.
- [12] Xu Xiangde, 1991, The effect of spatial structure character of heat source on the ray path and the evolution of wave energy of meridional Wave train, *Advances in Atmospheric Sciences*, **8**, No.1, 87 — 98.

## The Effect of Australian Continent Thermal Forcing on Anomalous Variations of Circulation Systems in the Northern and Southern Hemispheres

Xu Xiangde

*(Academy of Meteorological Science, SMA, Beijing 100081)*

Zhao Tianliang, He Jinhai and Zhu Qiangu

*(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)*

### Abstract

The correlation between the thermal forcing of the Australian continent and anomalies of circulation systems in the Northern and Southern Hemispheres have been investigated by a simplified numerical model consisting of the dynamical framework of the OSU-GCM and a Newtonian heating term. The differences between results of simulations with different equilibrium temperatures reflect the effects of local thermal forcing on the anomalous response of the global circulations. The results of numerical experiments indicate that: the thermal distribution of sea-land in the Northern and Southern Hemispheres is advantageous to the intensification of planetary-scale meridional circulations in the Northern and Southern Hemispheres and to the formation of cross-equatorial flows; the thermal forcing of the Australian continent in the Southern Hemisphere may distinctly affects the state of the jet in the northern mid-latitude westerlies through the lateral coupling of easterlies and westerlies; the meridional energy dispersion of 2D Rossby waves may be an important cause for the effects of thermal forcing of the Australian continent on anomalous variations of stationary circulation systems in the Northern Hemisphere, and the propagating paths of meridional wavetrains forced by the Australian thermal forcing are very similar to PNA and EU teleconnection patterns.

**Key words:** Wavetrain; Thermal forcing; Westerlies; Easterlies; Two-dimensional Rossby wave.