

定量诊断华南春旱的形成机理

温之平¹ 吴乃庚^{1, 2} 冯业荣^{1, 2} 林良勋² 袁卓建¹ 陈炳洪^{1, 2}

1 中山大学季风与环境研究中心/大气科学系, 广州 510275

2 广州中心气象台, 广州 510080

摘 要 华南地处气候年际变化很大的东亚季风区, 近年来秋冬春干旱灾害频繁, 尤其自 20 世纪 90 年代末以来的干旱灾害给华南工农业生产和人民生活造成严重的影响。华南地区春季降水多是偏南暖湿气流在华南抬升的结果, 为了全面而客观地查找华南春旱的主要成因, 本研究从建立在流体所有守恒定律的华南(局地纬向平均)经向环流数学模式入手, 在成功地模拟了导致华南春旱的华南地区(105°E~120°E 纬向平均)经向环流后, 定量地诊断分析了各动力热力因子对该经向环流的贡献。结果表明, 激发华南地区下沉和 30°N 附近上升的距平经向环流的因子主要有: 反映位置偏北的锋面对流活动的潜热加热(由其激发的经向环流下沉支对华南地区总下沉运动贡献占 56%)、反映西风带扰动的经向温度平流(占 25%)和反映西风急流的纬向西风动量平流(占 20%)。为了了解使锋面位置偏北的大气环流统计特征, 本研究还分析了华南春旱年(涝年)500 hPa 位势高度距平(相对于 1980~1999 年平均)和华南春旱严重的 1991 年早期(雨期)500 hPa 位势高度场, 发现华南春旱(涝)时乌拉尔山阻塞高压偏强(弱), 副热带高压偏西偏北(偏东偏南)。对华南春旱严重的 1991 年乌拉尔山阻高与 500 hPa 位势高度距平场作相关分析发现, 西太平洋副高变化滞后乌拉尔山阻高变化 2~6 天。

关键词 华南 春旱 局地经向环流 乌拉尔山阻高 西太平洋副高

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1223-14

中图分类号 P462

文献标识码 A

A Quantitative Diagnosis for the Mechanisms of Spring Droughts in South China

WEN Zhi-Ping¹, WU Nai-Geng^{1, 2}, FENG Ye-Rong^{1, 2}, LIN Liang-Xun²,
YUAN Zhuo-Jian¹, and CHEN Bing-Hong^{1, 2}

1 Center for Monsoon and Environment Research/Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

Abstract Since spring droughts in South China (SC) are mainly characterized by the absence of uplifting of moist southerly, it is necessary to carry out an overall quantitative investigation for the forced-local-meridional circulation over SC. With a complete (including dynamic and thermodynamic mechanisms) linear-diagnostic model for the local-meridional circulation and the NCEP/NCAR reanalysis data, the present numerical study show that the contributions to the lower layer subsidence in SC are mainly from the forcing processes associated with the latent heat in the baroclinic troughs located to the north of SC (the compensatory subsidence accounting for 56% of the lower-layer divergence in SC), meridional temperature advection (25%) and the zonal advection of zonal momentum (20%). All of them point to the abnormal northward shift of the baroclinic troughs embedded in the general circulation characterized by the presence of blocking highs around the Ural Mountains and the significant northwestward extension of

收稿日期 2007-05-30, 2007-07-07 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40730951, 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418303, 国家自然科学基金资助项目 40575021, 广东省科技计划重点引导项目 2005B32601008

作者简介 温之平, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 主要从事季风气象学和热带大气环流的研究。E-mail: eeswzp@mail.sysu.edu.cn

the western Pacific subtropical high (WPSH) for the composite spring droughts in SC. For an extrem dry case (i. e. the 1991 spring drought in SC), the variation of the Ural high was 2–6 days prior to that of the WPSH.

Key words South China, spring drought, local meridional circulation model, Ural blocking high, the western Pacific subtropical high

1 引言

我国季风气候明显, 逐年间季风的不稳定性和境内由于地形、山脉等因素造成的水热分布不均导致了我国干旱的频繁发生。每年因干旱造成的粮食减产和经济损失约占气象灾害造成经济总损失的 50% 左右^[1]。华南地区是我国人口密集和经济最发达的地区之一, 它地处气候年际变化非常显著的东亚季风区, 干旱灾害频繁, 尤其是自 21 世纪初以来大范围的秋冬春干旱灾害给工农业生产带来很大的损失, 给人民群众的生活造成严重的影响。可见, 干旱作为华南最严重的气象灾害之一, 已经对社会经济和人民生活造成严重影响。因此, 华南春旱的研究是一个重要的科学问题。

要探讨华南地区今后是否会出现持续严重性干旱, 首先要从华南干旱特征出发, 了解旱年和涝年形成机制。资料统计表明, 华南地区容易发生春旱和秋旱, 尤其是春旱出现频率最高, 对华南春耕播种以及农作物生长影响最大^[2~4]。特别是近几年, 华南地区春旱较为频繁, 严重影响早稻育秧以及华南地区工业和生活用水。因此, 研究华南春季降水变化特征及机制, 对做好华南春季减灾防灾工作有着十分重要的意义。

然而, 到目前为止, 对华南旱涝的研究^[5~11]几乎都侧重于汛期。由于华南前汛期定义是 4~6 月(既有锋面降水也有季风降水^[12~14]), 并没有完全包括春季, 而春初华南天气形势仍处于冬季到春季型调整期, 所以华南春旱与前汛期旱灾的形成机理会存在差别。另外, 华南春旱又与华南夏秋旱不同, 华南夏秋季节降水主要与热带气旋和夏季风活动有关, 春季降水则主要与冷暖空气交绥的锋面活动有关。最近还有分析表明, 来自南海的经向水汽输送的异常变化将导致华南降水异常, 而纬向水汽输送异常变化只导致整个华南地区降水不均, 出现小范围降水异常^[15]。总而言之, 从北方来的冷空气($v < 0$) 和南来的暖空气($v > 0$) 是否在华南辐合抬升($\omega < 0$), 是华南春季降水多寡的关键。因此, 用

南北风分量(v) 和垂直运动分量(ω) 构成的经向环流来综合研究华南春旱问题是恰当的。

本文根据降水异常与大范围水汽输送以及水汽辐合抬升异常密切相关^[16~18]的研究结果, 通过运用经向环流模式^[19], 从定量诊断华南地区($105^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 纬向平均经向环流异常机理入手来探讨华南春旱机理。这么做不仅考虑了华南地区经向环流特征, 还考虑了纬向环流的特征, 如西风急流^[20~22]以及纬向水汽输送的影响可由反映纬向环流作用的纬向西风动量的水平和垂直输送以及纬向温度平流等强迫项对经向环流的垂直分支 ω 和相应的水平散度的驱动作用来体现。所以, 用华南局地纬向平均经向环流来研究华南春旱的机理是可行的。

2 资料来源及模式简介

2.1 资料来源及处理

(1) 本文所用的降水资料为国家气候中心提供的全国 160 个测站 1951~2001 年 3~5 月的降水资料 and 全国 730 个站 1991 年 3~5 月的逐日降水资料; 华南区域选取为 ($20^{\circ}\text{N} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$), 在这个区域内共有 14 个测站, 这些站的降水能较好地代表华南地区降水^[23]。

(2) 用于进行数值模拟及诊断分析的资料来自 NCEP/NCAR 1980~1999 每日 2 个时次 (0000UTC 和 1200UTC, 下同) 的再分析资料。高空资料空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 本研究将 17 层水平风场、位势高度场和温度场资料, 12 层垂直速度资料及 8 层比湿资料线性插值到本模式的 19 层上 ($950 \sim 50 \text{ hPa}$, 间距为 50 hPa); 地面资料为 Gauss 网格点再分析资料, 包括: 水平风场、气压场、温度场和湿度场资料。

2.2 模式简介

该模式共有 19 层, 第一层为 950 hPa , 第 19 层为 50 hPa 。为了将尽可能多的物理过程包含在模式中, 数学模型除了将经向运动方程简化为梯度风平衡关系外, 其余方程均为球 p 坐标系的原始方程组的方程, 所以本模式已经包含了各种重要的热

力和动力过程(因无各层资料,目前仍无法诊断云物理过程和辐射过程)。另外,为了抓住华南地区大气环流特征,本研究考察的是华南地区局地(105°E~120°E)纬向平均的经向环流(距平场)。

通过运用消元法和代入法,将连续方程、运动方程的三个分量式——热力学方程、水汽守恒方程和状态方程有机结合起来,得到本研究所用的诊断华南局地纬向平均的经向环流流函数的椭圆型线性方程为^[19]:

$$\left[\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\bar{A} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + \bar{B} \frac{\partial}{\partial p} \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(\bar{B} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + \bar{C} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right] \bar{\psi} = F, \quad (1)$$

其中, $\bar{(\quad)}$ 为华南地区(105°E~120°E)局地纬向平均, ϕ 为纬度, 系数 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 分别与静力稳定度、斜压稳定度、惯性稳定度有关, 即

$$\begin{cases} \bar{A} = \frac{\bar{\sigma}_s}{\cos \phi}, \\ \bar{B} = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \phi}, \\ \bar{C} = \frac{\bar{f}_A \bar{f}_B}{\cos \phi}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, σ_s 为静力稳定度; α 为比容; $f_A = f + 2\bar{u} \cdot \tan \phi / a$, $f_B = f - [1/(a \cos \phi)] \partial(u \cos \phi) / \partial \phi$ 。 ψ 为经向环流流函数, 它与风的经向分量 v 和垂直分量 ω 的无辐散有旋成分 $v_\psi (=v - v_\chi)$ 和 $\omega_\psi (= \omega - \omega_\chi)$ 的关系为:

$$\begin{cases} v_\psi = -\frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial \psi}{\partial p}, \\ \omega_\psi = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \psi}{\partial \phi}. \end{cases} \quad (3)$$

诊断方程(1)右边的总强迫项 F 包括以下各强迫因子:

$$F = \frac{\partial}{\partial p} \left[\bar{f}_A \left(-\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \lambda} + \bar{F}_\lambda - \frac{\bar{u}}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \lambda} + \right. \right. \quad (I) \quad (II) \quad (III)$$

$$\left. \bar{f}_B \bar{v}_\chi - \bar{\omega}_\chi \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} - \frac{\bar{u}'}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \lambda} + \frac{\bar{v}' \partial \bar{u}'}{a \partial \phi} - \bar{\omega}'_\chi \frac{\partial \bar{u}'}{\partial p} \right) \Big] - \quad (IV) \quad (V) \quad (VI) \quad (VII) \quad (VIII)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\bar{RQ}}{pc_p} - \frac{\bar{u}}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}_\chi}{a} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \phi} + \bar{\sigma}_s \bar{\omega}_\chi - \right. \quad (IX) \quad (X) \quad (XI) \quad (XII)$$

$$\left. \frac{\bar{u}'}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{\alpha}'}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}'}{a} \frac{\partial \bar{\alpha}'}{\partial \phi} + \bar{\sigma}_s \bar{\omega}'_\chi \right),$$

$$(XIII) \quad (XIV) \quad (XV) \quad (4)$$

方程中 $(\quad)' = (\quad) - \overline{(\quad)}$ 代表涡动量。强迫因子分为两类: 动力因子和热力因子。其中, 动力因子包括气压梯度力(第 I 项)、摩擦力(第 II 项)、西风动量的纬向输送作用(第 III、VI 项)、地转偏向力与平均西风角动量的经向输送(第 IV 项)、涡动西风角动量的经向输送(第 VII 项)以及西风动量垂直输送(第 V、VIII 项); 热力因子包括凝结潜热 Q_L 、地面感热通量 Q_{LS} 、潜热通量 Q_{LF} 、长短波辐射 Q_R (第 IX 项的 Q 为这些因子的叠加, 由于没有各层的辐射资料, 本研究暂时没有考虑辐射加热的影响), 水平温度平流(第 X、XI、XIII 和 XIV 项)以及温度垂直对流项(第 XII、XV 项)。

当流体处于稳定状态时 $AC - B^2 > 0$, 方程(1)为椭圆型偏微分方程。根据理论分析^[19]得知, 方程(1)可表示为:

$$-\psi \propto \frac{\partial D_F}{\partial p} - \frac{\partial Q_F}{\partial \phi}, \quad (5)$$

其中, D_F 和 Q_F 分别代表动力和热力强迫因子。(5)式表明流函数中心的正负号(即环流旋转方向)与热力经向梯度和动力垂直梯度有关。

在求方程(1)的数值解之前, 必须事先给定方程(1)右边的强迫项, 其中包含已知量 v_χ 和 ω_χ 。确定(作为已知量处理的) v_χ 和 ω_χ 的方法有两种^[24], 第一种方法: 用“实测”风场(v 、 ω)求出与经向环流有关的“实测”涡度, 再根据“实测”涡度求解关于“实测”流函数的球坐标系泊松方程, 然后由“实测”流函数求解“实测” v_ψ (可用于检验模拟结果), 最后, 用 $v_\chi = v - v_\psi$ 和连续方程就可以得到 v_χ 和 ω_χ 。用这种方法来确定已知量 v_χ 和 ω_χ 的值并没有包含任何近似, 但因计算涉及用差分方法求解高阶偏微分方程, 计算结果必然会受到截断误差、离散误差、舍入误差以及大量小差等问题影响, 所以, 计算误差会加大且无法估计。第二种方法基于 p 坐标的连续方程, 因为科里奥利参数 f 不变时, 只有非地转成分 v_{ag} 对垂直经向环流有贡献^[24], 故有

$$v_\chi = v_{ag}. \quad (6)$$

这种确定已知量 v_χ 的方法产生的误差仅由 f 为常数引起。故本研究采用第二种方法来估算必须作为

已知量处理的 v_χ 的值。

因为方程 (1) 是线性方程, 方程的解可叠加或分解, 所以用超松弛迭代法^[25]求方程 (1) 的数值解, 就可定量探讨 (4) 式中任意项对应的物理因子单独激发的非地转经向风 $v_{ag} \cong v_\psi$ 以及对应的经向环流 (v_ψ, ω_ψ)。

为了考虑越赤道气流的影响和北方冷空气的作用, 模式区域的南、北边界 (5°N 和 52.5°N) 作开边界处理, 边界处的流函数值 ψ 由 $v_\psi \cong v_{ag} = v_{obs} - v_g$ 和 (6) 式反算出 (其中 v_{obs} 代表 v 的观测值)。考察边界效应对经向环流的贡献的做法如下: 在迭代开始时, 除了南北边界外, 模式区域内的流函数值全部为零^[24, 25], 其中包括上下边界的流函数值, 因为流线不可能起始于地面和作为刚壁处理的模式顶 50 hPa。且在迭代过程中, 内力始终设为零。因此, 在无任何内力作用下模式模拟出的 v_ψ 场纯粹由边界效应导致。在考虑任一内力因子单独作用时, 迭代初始整个模拟区域 (包括南北边界) 的流函数值全部为零, 迭代过程中边界流函数值始终设为零, 并且除了被考察的那个内力因子外, 其它内力也始终设为零, 因此, 迭代算出的流场完全由该内力因子驱动。

3 华南春季降水异常年份的选定

1951~2001 年华南春季降水距平百分率变化曲线 (图 1) 反映华南春季雨量具有明显的年际变化特征, 年与年之间的降水差异很大, 距平百分率最大值可达到 60% 以上。并且, 从 20 世纪 50~70 年代初降水偏少, 之后降水明显偏多, 这可能与 20

世纪 70 年代全球大气环流发生突变有关。

为了去除这一年代际变化的影响, 以下的模拟只用 1980~1999 年 NECP 逐日 2 个时次资料。为不失一般性, 取绝对值大于 30% (已超过标准差) 为标准, 找出华南春旱年为 1991 年和 1995 年。作为对比分析, 选出华南春涝年为 1981、1983、1992 年。

4 导致华南春旱的华南局地经向环流异常成因

4.1 模式性能检验

在运用华南局地纬向平均经向环流模式分解各热力、动力因子, 定量分析各因子对华南春旱形势单独贡献前, 为了确保模式输出结果的可信度, 首先要检验模式的模拟性能。模式性能检验所采取的思路和方法如下: 用“观测”的 $v_\psi \cong v_{ag} = v_{obs} - v_g$ 和垂直运动无辐散成分 $\omega_\psi|_p = \omega - \omega_\chi|_p = \omega - 1/(a \cos \varphi) \int_{p_s}^p [\partial u / \partial \lambda - \partial (v_g \cos \varphi) / \partial \varphi] dp$ 组成的经向环流场 (v_{ag}, ω_ψ) 作为标准场, 与由方程 (1) 和 (3) 算出来的 v_ψ 和 ω_ψ 组成的模拟场 (v_ψ, ω_ψ) 作比较, 若模拟得出的经向环流中心位置和中心强度量级与标准场的差别不大, 则可认为模拟结果是可信的。

用以上标准衡量春旱年和春涝年模拟结果 (图 2), 可以看到, 在开边界条件下由所有内力驱动的模拟的距平经向环流场 (图 2c、d) 与观测的距平经向环流场 (图 2a、b) 的上升中心、中心所在位置及强度的量级均吻合很好 (模拟的不足之处是垂直运动强度稍弱, 原因可能是: 本模式没包括辐射及云物理过程, 且 NCEP 资料中的垂直运动不是实际观测的结果, 而是由预报模式提供, 两种不同数值模

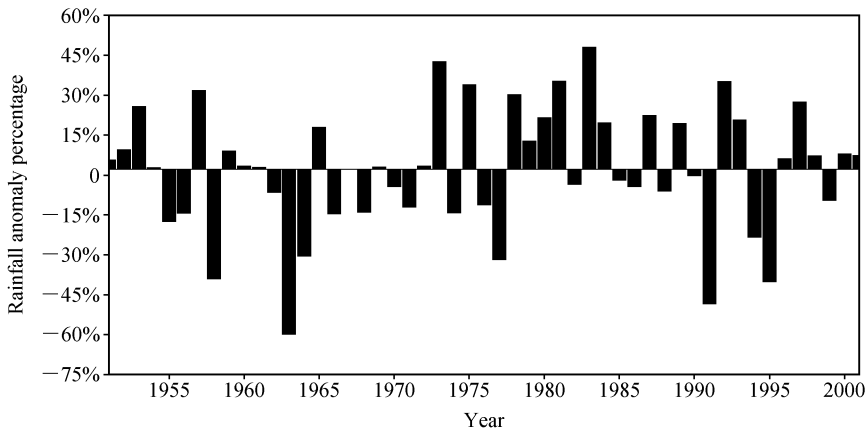


图 1 1951~2001 年华南春季降水距平百分率年际变化

Fig. 1 The interannual variation of spring rainfall anomaly percentage in South China (SC) during 1951–2001

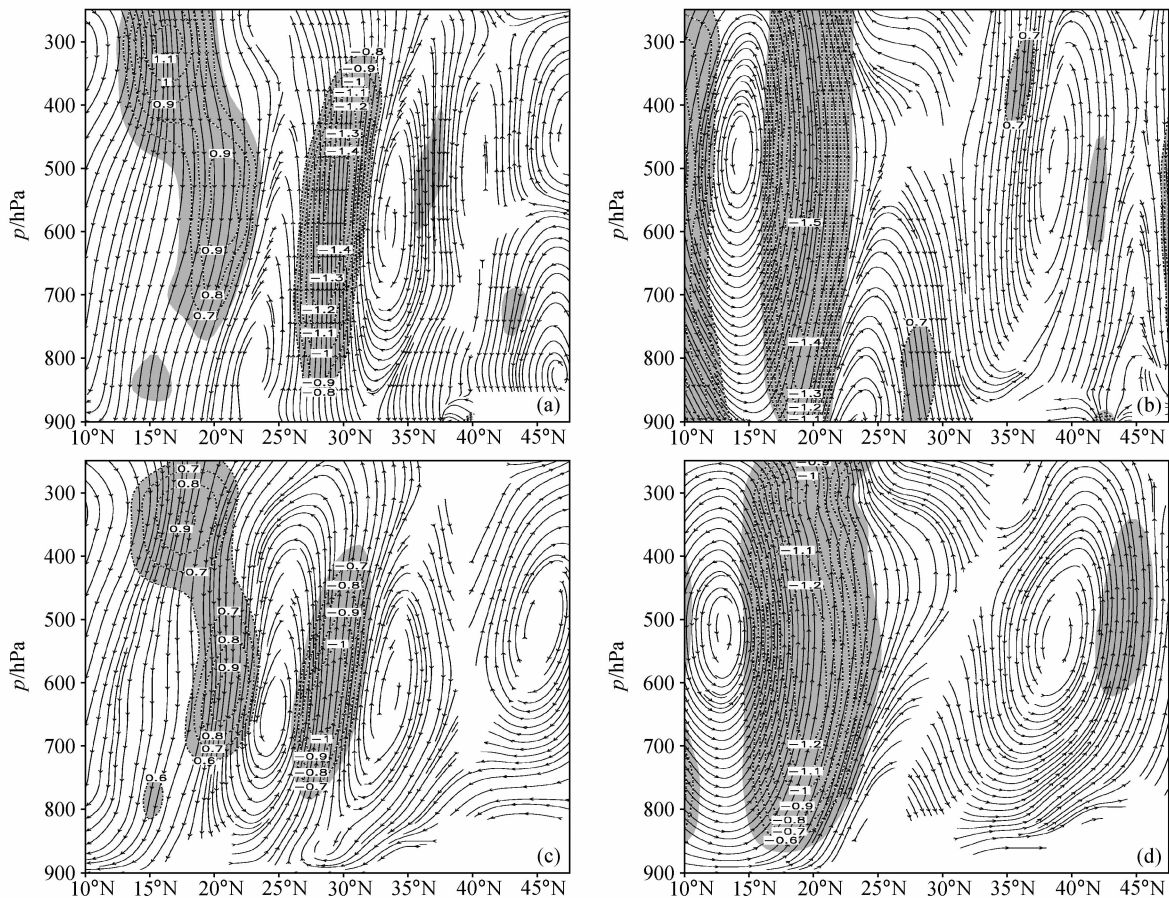


图2 华南春旱年 (a、c) 和涝年 (b、d) 局地 (105°E~120°E) 经向环流距平: (a、b) 实测; (c、d) 模拟。阴影区为垂直运动 (单位: 10^{-2}Pa/s) 中心, 负值代表上升运动

Fig. 2 Zonal averaged (105°E–120°E) meridional circulation anomalies for spring (a, c) drought and (b, d) flood years in SC: (a, b) Observed; (c, d) simulated. Areas with significant vertical motion (10^{-2}Pa/s) are shaded, and negative values represent ascending motion

式的假设条件、计算方法及误差来源都不太相同, 所以两者存在一定差异是可以理解的, 前期相关工作表明这些差异并不影响各物理因子贡献大小的排序^[26~28], 故可认为, 模式输出结果具有一定的可信度。

4.2 数值诊断结果及其对应的天气形势

4.2.1 华南春旱与局地经向环流异常关系

以上给出的观测以及模拟结果都显示华南春旱年 (图 2a), 华南春季局地纬向平均经向环流距平场均以下沉位于华南上升位于 30°N 的反 Hadley 型环流为主要特征。由于华南地区受距平下沉运动影响, 南海地区低层出现距平偏北风, 使得华南地区水汽输送偏弱, 降水偏少。作为对比考察华南春涝年 (图 2b) 发现, 华南以南距平环流形势与春旱年的相反, 经向环流以在 20°N 附近上升、10°N 附近下沉的距平局地反 Hadley 型环流为主要特征,

南海地区低层出现距平偏南风, 使得来自南海低层的水汽得以在华南地区上升, 促使降水增多。是什么物理因子造成这些不同的距平经向环流场? 本研究针对这个问题, 反用线性方程解的叠加原理于局地纬向平均经向环流线性诊断方程, 将各热力、动力因子分解开来, 并定量算出各因子独自造成的距平经向环流对总距平环流的贡献, 找出造成华南春旱 (春涝) 年的主要物理因子。

模式输出结果表明, 在 16 个内力因子中起正贡献的主要内力因子为: 潜热加热 (图 3a)、水平温度平流 (图 3b) 和平均西风动量纬向输送 (图 3c)。另外, 边界效应 (图 3d) 也导致华南下沉以及华南及以南地区低层的距平北风, 这距平北风与模式南边界 5°N 观测的距平北风 (图 6c) 对应得很好。虽然, 由边界效应造成的经向风的值因受模式边界信息必须按质量守恒进行调整的影响 (因模式对流层

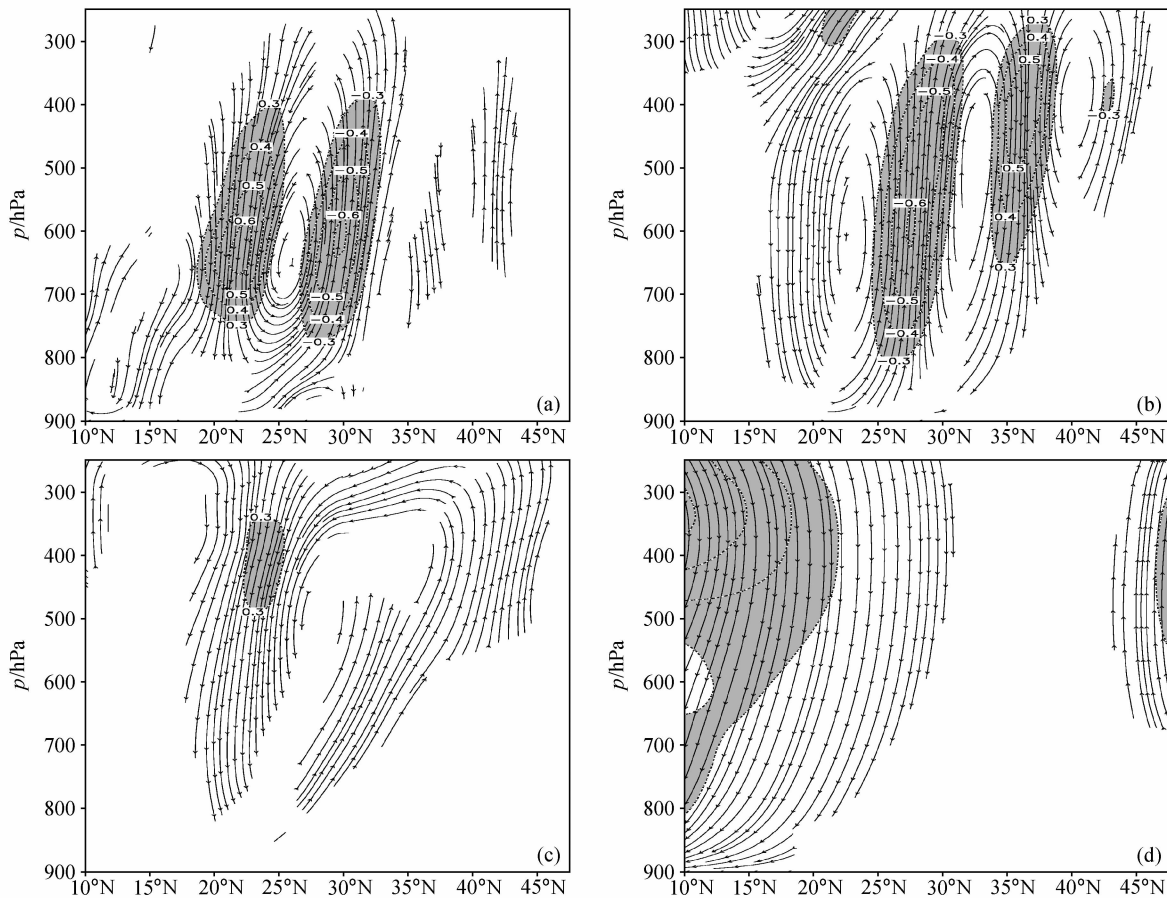


图 3 华南春季旱年各主要因子激发的距平经向环流：(a) 潜热加热；(b) 水平温度平流；(c) 平均西风动量水平输送；(d) 边界效应。阴影区为垂直运动中心（单位： 10^{-2}Pa/s ）

Fig. 3 The same as Fig. 2, except for the circulations attributed to (a) latent heat, (b) horizontal temperature advection, (c) horizontal transport of mean westerly momentum and (d) boundary effect for sprint drought years in SC

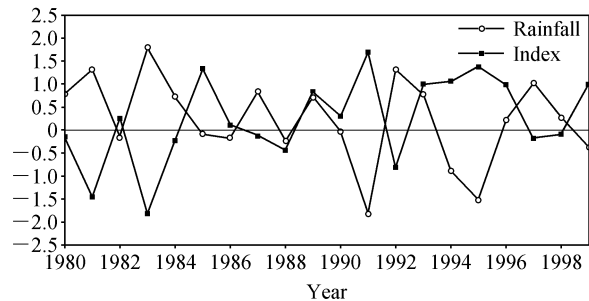


图 4 1980~1999 年华南春季降水标准化序列与华南地区低层辐合指数 ($\partial v_{\psi}/\partial y$) 标准化序列。指数选取区域为 ($17.5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$, $900\sim 700\text{ hPa}$)

Fig. 4 The time series of the normalized spring rainfall and the low-level divergence index (the negative stands for convergence) over SC from 1980 to 1999. The selected index region is ($17.5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$, $900\sim 700\text{ hPa}$)

顶设为 50 hPa) 而难免有些失真,但这并不影响内力因子排序^[26],故在此对边界作用不作进一步展

开讨论,以下将重点讨论内力作用。为定量比较各因子对造成华南春旱的低层下沉辐散贡献的大小,以 $17.5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$, $900\sim 700\text{ hPa}$ 平均的 $\partial v_{\psi}/\partial y$ 作为指标,将这指标的时间序列与华南春季降水标准化序列进行对比(图 4)发现,它们之间有很好的反相关关系,相关系数为 -0.74 ,通过 99% 的信度检验,说明华南低层下沉辐散,华南易发生春旱。通过运用该指标按下式计算各因子的贡献:各因子贡献百分率=

单因子造成的环流指标值/模拟总环流指标值,得出各因子的贡献大小(表 1)。分析这些结果得知,无论是图 3a 还是表 1 都表明与处在华南北侧的锋面对流活动有关的潜热加热激发的经向环流的下沉支对华南的下沉辐散运动贡献最大(占华南总下沉辐散运动的 56%),是造成华南春旱最为重要的原因。此外,反映西风带斜压槽影响的水平温度平

表 1 华南春旱年和涝年模拟的各强迫因子对华南低层辐合指数 ($\partial v_y/\partial y$) 贡献

Table 1 The contribution of each forcing term to the lower-level convergence index over SC

强迫因子	春旱年		春涝年	
	环流指标值	百分比	环流指标值	百分比
潜热加热	0.9	56%	-0.6	25%
感热通量	0.02	1%	-0.005	0%
潜热通量	0.02	1%	0.01	0%
涡动量垂直温度对流	0.02	1%	0.006	0%
平均量垂直温度对流	-0.3	-22%	-0.8	33%
涡动量经向温度平流	0.02	1%	-0.002	1%
平均量经向温度平流	0.4	25%	-0.1	4%
涡动量纬向温度平流	-0.02	-1%	-0.001	0%
平均量纬向温度平流	-0.01	0%	-0.2	9%
涡动量西风动量对流	-0.008	0%	-0.001	0%
平均量西风动量对流	0.02	1%	-0.04	1%
涡动量纬向西风动量平流	0.002	0%	0.005	0%
平均量纬向西风动量平流	0.3	20%	0.07	-3%
涡动量经向西风动量平流	0.02	1%	-0.006	-2%
平均量经向西风动量平流	-0.2	-14%	0.07	-3%
摩擦力	-0.1	0%	0.004	0%
边界效应	0.49	29%	0.27	32%
总强迫力	1.6	100%	-2.4	100%

注：表中黑体字表示主要贡献因子

流以及反映西风急流影响的纬向西风动量输送，对激发导致华南春旱的总经向环流和华南低层下沉辐散运动也有一定正贡献（分别占 25%和 20%）。这几个因子都预示着处在华南北侧的西风带系统异常在华南春旱中起了主导作用。

作为对比分析，华南春涝年（图 5）驱动华南低层辐合上升运动的内力主要与热量垂直输送（图 5a）、潜热加热（图 5b）和水平温度平流（图 5c）有关，而边界效应影响（图 5d）与华南春旱相反，究其原因发现边界影响造成的华南距平南风来自西太副高西南侧的距平东南风为主（图 6d）。

4.2.2 对应的天气形势

为了将以上基础理论和数值研究结果用于指导实际业务，本节分析各主要强迫因子对应的气象要素场的特征。重点分析三个贡献最大的内力因子（图 6），即潜热加热（反映低层水汽辐合抬升作用）、水平温度平流（西风带斜压槽作用）以及西风动量纬向输送作用（西风急流周围次级环流作

用^[20~22]）。

在华南春旱年，与潜热加热驱动的距平经向环流（图 3a）对应的 850 hPa 距平水汽通量场（图 6a）反映，在上升运动所在的 30°N 附近是一个水汽辐合区，而下沉运动所在的华南地区则是一个水汽辐散区。这种低层水汽辐散场的南北不均匀分布显然有利于水汽从南海输送到 30°N，华南因缺乏降水所需的水汽辐合而遭旱灾。另外，与这种低层水汽在 30°N 辐合抬升在华南地区辐散相对应的必然是 30°N 上升、华南下沉的反 Hadley 型经向环流（图 3a）。

与图 3b 对应的 850 hPa 距平温度场和风场配置情况（图 6c）表明，35°N 附近存在一支很明显的从北向南的冷平流，而在该冷平流南侧 25°N 附近存在一支明显的从南向北的暖平流。两支平流在 30°N 附近相遇必然有利于锋区在 30°N 附近加强，锋面抬升不但导致图 3b 的 25°N~30°N 距平上升运动，还造成了华南地区的距平下沉。500 hPa 距平温度场和风场配置同样有类似特征，反映了斜压槽活动的影响（图略）。

因为图 3c 反映的与西风带斜压槽有关的西风急流主要出现在高层，故本研究重点考察 200 hPa 距平纬向风场（图 6e，图中框出区为模拟所用资料区），图 6e 表明华南处在中高纬距平西风急流出口区右侧，高层受急流出口区非地转距平北风辐合场影响。这结果与图 3c 一致。因此西风急流使得华南高层北风辐合下沉（图 3c）。

作为对比，简要地讨论华南春涝年的情况。与华南春旱年不同，华南春涝年 850 hPa 距平水汽通量场低层水汽辐合区移到了华南地区（图 6b），而低层水汽辐散区在该水汽辐合区南侧的 10°N~15°N 附近，这种距平水汽通量分布形势十分有利于华南地区水汽辐合上升，由其导致的凝结潜热释放，使得华南地区上升运动进一步加强，降水增多。另外，华南上升运动的加强也有利于其南边 10°N 附近下沉运动的加强，这下沉区近地面向北的辐散还起到加强往华南地区的水汽输送。这种反映低层水汽散度分布不均匀的潜热加热的南北不均匀分布必然导致华南上升 10°N 附近下沉的反 Hadley 型经向环流（图 5b），其对华南降水起的是正反馈作用。

同样，与华南春旱年比较发现，在华南春涝年，华南地区受强暖平流影响（图 6d）。与这种距

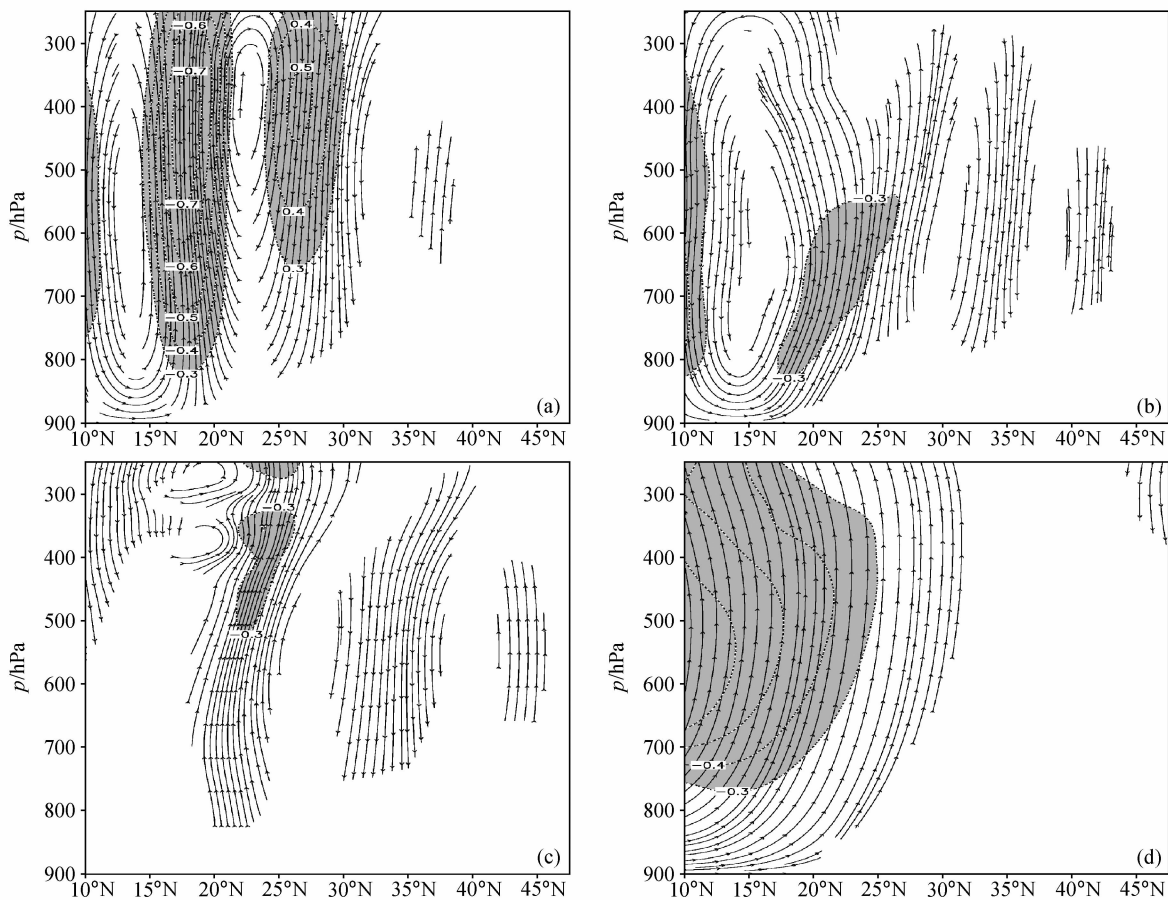


图 5 华南春涝年各主要因子分别激发的距平经向环流：(a)热量垂直输送；(b)潜热加热；(c)水平温度平流；(d)边界效应。阴影区为垂直运动中心（单位： 10^{-2}Pa/s ）

Fig. 5 The same as Fig. 3, except for spring flood years with (a) vertical temperature convection, (b) latent heat, (c) horizontal temperature advection and (d) boundary effect

平温度平流相对应的经向环流以华南地区出现较强上升运动，其南北两边出现较弱的下沉运动为主要特征（图 5c）。比较图 5c 和图 3b 还发现，温度平流在华南春旱年和春涝年作用相反：在春旱年驱动 20°N 附近华南地区下沉运动，在春涝年驱动华南地区上升运动。

起类似相反作用的还有西风动量的水平输送（图略），这明显反映在春涝年 200 hPa 纬向风距平场上（图 6f）。图 6f 显示，华南春涝年华南地区处于 200 hPa 距平西风急流出口区左侧，受高层距平偏北风辐散抽吸影响，华南低层空气辐合抬升。

4.2.3 对应的大气环流的统计特征

综合以上分析得知，在华南春旱年起主要作用的物理因子均与华南北边西风带扰动有关，其中包括与锋面降水有关的潜热加热，与西风带斜压槽有关的温度平流以及与西风急流有关的西风动量水平

输送，而后两者均与纬向环流有关。

以上全面客观的定量分析结果意味着，从统计意义来看，与华南春旱和春涝相应的大气环流必有差异。为此本研究运用统计分析方法对 $1980\sim 1999$ 年华南春旱年（涝年） 500 hPa 位势高度场进行了分析，发现华南春旱（涝）年大气环流场出现乌拉尔阻高偏强（弱），华南地区位势高度偏高（低）的显著特征（图 7）。这一结果从另一个角度证实了过去的研究成果，即阻高形势与中国降水密切相关等^[29, 30]。通过进一步对华南春旱最严重的 1991 年作 EOF 分析得出：乌拉尔山阻高所在的中高纬区域春季（3~5 月） 500 hPa 位势高度场的前 5 个模态累计方差贡献达 81%，其中第一模态、第二模态方差贡献分别为 53%、12%，第一模态空间分布图（图略）主要反映的是季节变化趋势，而第二模态能较好地反映乌拉尔山阻高季节内活动特征（图

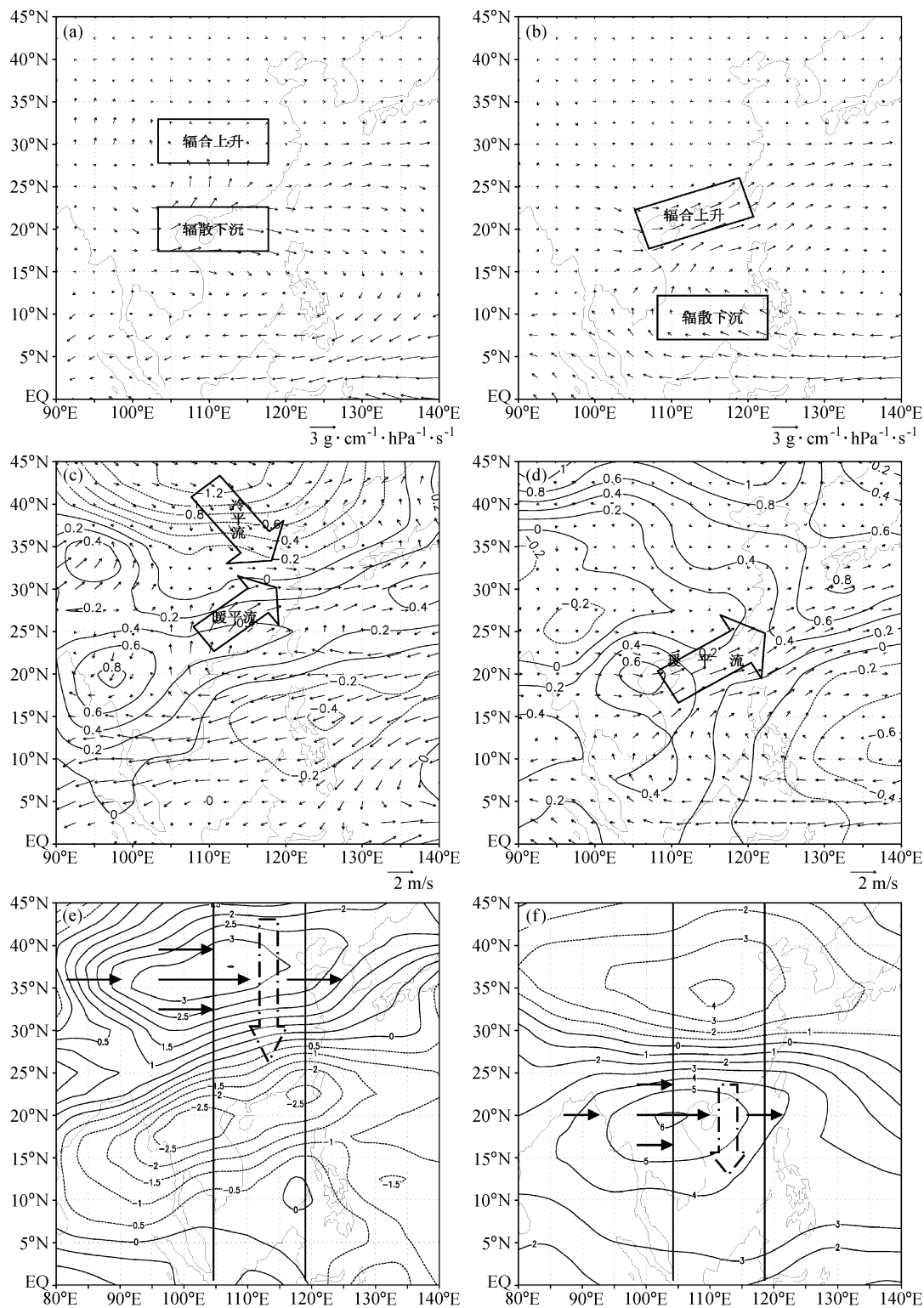


图 6 华南春旱年(a、c、e)和春涝年(b、d、f)距平场：(a、b) 850 hPa 水汽通量场(单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)；(c、d) 850 hPa 温度场(单位：K)与风场(单位：m/s)；(e、f) 200 hPa 纬向风场(单位：m/s)

Fig. 6 (a, b) 850 hPa horizontal moisture flux anomalies, (c, d) 850 hPa horizontal wind anomalies and temperature anomalies (K) and (e, f) 200 hPa zonal wind anomalies (m/s) in spring drought years (a, c, e) and spring flood years (b, d, f) in SC

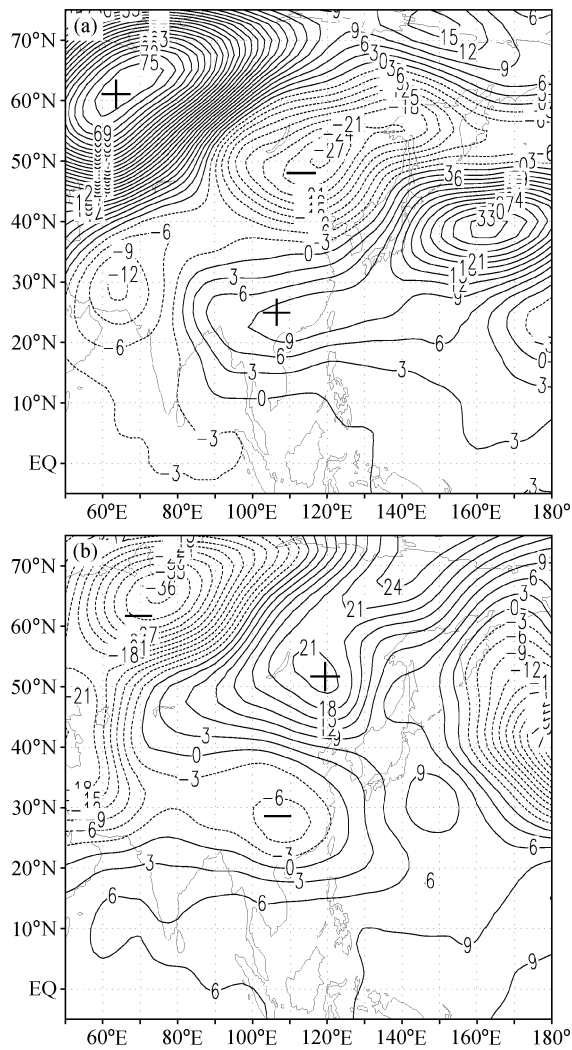


图 7 1980~1999 年 3~5 月华南 500 hPa 位势高度距平场 (单位: gpm): (a) 春旱年; (b) 春涝年
Fig. 7 500 hPa geopotential height anomalies (gpm) averaged over Mar - May for (a) spring drought years and (b) spring flood years during 1980 - 1999

8)。该模态时间系数为正,代表乌拉尔阻塞高压加强,其下游蒙古-贝加尔湖高压脊减弱,东亚大槽也减弱,西风带较平直(图 8a)。对比该时间系数(图 8b)与华南逐日降水量序列(图 8c)可知,反映乌拉尔山阻高季节内活动的第二模态时间系数的峰值(谷值)与华南地区的干期(湿期)有较好的对应关系,且第二模态时间系数超前华南降水变化 1~6 天(平均相关系数 -0.27,通过 95% 信度检验)。这意味 1991 年华南春旱期,因乌拉尔山高压建立使得南下的冷空气较弱,锋面系统(高空西风带斜压槽和西风急流)主要在华南以北地区活动。

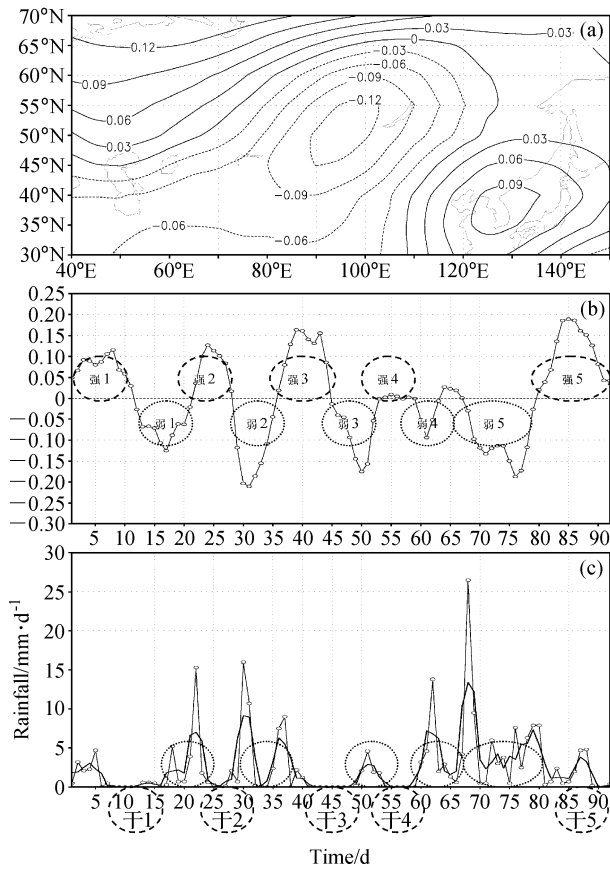


图 8 1991 年 3~5 月亚洲中高纬度地区 500 hPa 位势高度场 EOF 分析和华南地区逐日降水序列: (a) EOF 第二空间模态; (b) EOF 第二模态时间系数; (c) 华南地区逐日降水序列,粗线为三点平滑线. 图中虚线圈为阻高强期和华南干期,点线圈为阻高弱期和华南湿期

Fig. 8 The spatial field (a) and the temporal coefficient (b) of the second mode of EOF analysis for 500 hPa geopotential height in the middle - high latitudes of Asia during Mar - May 1991; (c) the time series of rainfall in SC during Mar - May 1991, thick curve is for three - point smoothing one. Dashed loops stand for periods when the blocking high is strong and SC is dry, dotted loops stand for periods when the blocking high is weak and SC is wet

与北边锋面抬升对应,华南地区易受下沉运动影响,使得华南地区春季偏旱。另外,1991 年 500 hPa 的位势高度场还显示,在华南早期(相对雨期而言)发生前 3 天,不但乌拉尔山阻高偏强,而且西太平洋副高也偏强,位置偏西(图 9a~d),副高西北侧西南暖湿气流与北方冷空气形成的 850 hPa 的切变线位置也偏北,所以雨区主要处在华南以北地区(图 9e、f)。

下面,讨论(与华南春旱有关的)乌拉尔山阻

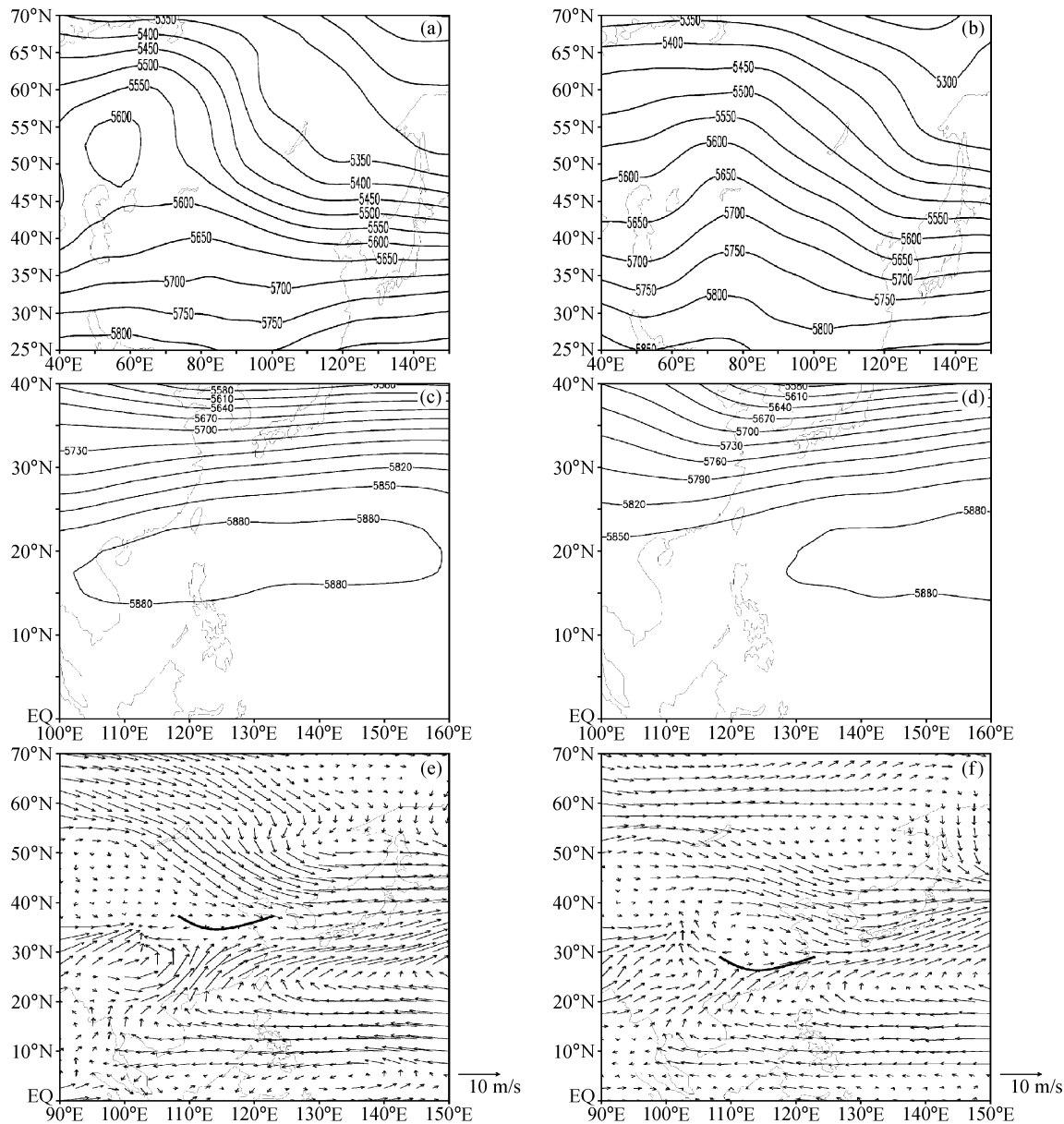


图 9 1991 年 3~5 月华南地区早期 (a、c、e) 和雨期 (b、d、f) 500 hPa 位势高度场 (a~d, 单位: gpm) 和 850 hPa 风场 (e、f)。(a、b) 为旱 (涝) 期前 3 天平均, (c~f) 为旱 (涝) 期平均

Fig. 9 500 hPa geopotential height fields (a~d, units: gpm) and 850 hPa horizontal wind fields (e, f) for the three-day average prior to the drought (a) and rain (b) periods and for the average over the dry spells (c, e) and the rain periods (d, f) in SC during Mar–May 1991

高与西太副高的正相关是否存在超前滞后关系。仍以华南春旱最严重的 1991 年为例, 通过对 1991 年 3~5 月 500 hPa 乌拉尔山地区 (50°N~65°N, 45°E~60°E) 的位势高度距平 (相对于 1980~1999 年 500 hPa 位势高度的平均值) 与全球 500 hPa 位势高度距平场作超前滞后相关分析可知 (图 10), 乌拉尔山阻塞高压变化超前华南地区位势高度变化 2~6 天, 相关系数约 +0.4, 通过 99% 的信度检验

(图 10)。这意味着高纬稳定的乌拉尔山阻高建立后, 其下游西风带较平直, 西风带上的槽脊偏弱 (冷空气势力偏弱) 将有利于西太副高偏强和向西北方向伸展, 华南上空位势高度偏高, 使得华南地区偏旱。

5 总结

本文抓住来自南边的水汽在华南地区是否被锋

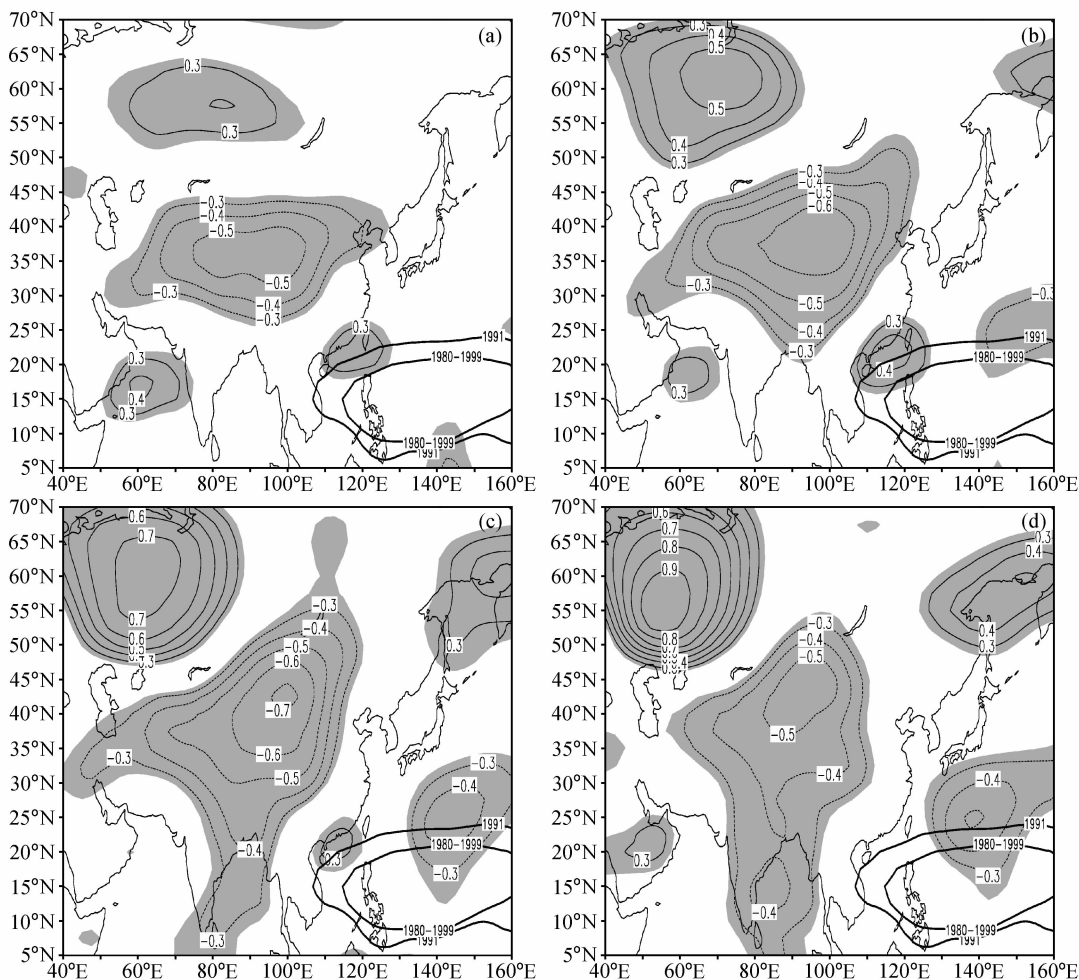


图 10 1991 年 3~5 月乌拉尔阻塞高压与 500 hPa 位势高度距平场相关分布: (a) 超前 6 天; (b) 超前 4 天; (c) 超前 2 天; (d) 超前 0 天。粗实线为 1980~1999 年以及 1991 年 3~5 月平均西太平洋副高 5880 线, 阴影区为通过 95% 信度检验区域

Fig. 10 The correlation coefficients between the Ural blocking high and 500 hPa geopotential height anomaly field with the variation of the Ural blocking high prior to the western Pacific subtropical high (WPSH) six days (a), four days (b), two days (c) and zero day (d) during 1 Mar to 31 May 1991. Areas with significance level exceeding 95% are shaded. Thick solid lines are the WPSH 5880 lines averaged over 1980-1999 and Mar-May 1991

后冷空气抬升是决定华南春季降水多寡这一经向环流特征, 从定量诊断华南地区局地纬向 ($105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 平均经向环流异常机理入手来探讨华南春旱机理, 并结合 EOF 和相关分析等统计方法, 找到华南春旱的大气环流特征, 得出以下主要结果:

(1) 华南春旱与局地经向环流异常密切相关。观测和模拟结果均显示, 华南各春旱年春季总经向环流距平场均以下沉位于华南, 上升位于 30°N 的反 Hadley 型环流为主要特征。华南地区受距平下沉运动影响, 南海地区低层出现距平偏北风, 使得华南地区水汽输送偏弱, 从而遭受春旱。

(2) 定量分析表明, 反映中高纬度西风带系统

活动的物理因子对影响华南春旱的局地经向环流异常有着重要影响。华南春旱年, 驱动华南地区下沉和 30°N 附近上升的距平经向环流的因子主要有反映处于华南北侧的锋面对流活动的潜热加热, 由其激发的经向环流的下沉支对影响华南春旱的低层下沉辐散贡献占 56%; 与西风带斜压槽有关的水平温度平流 (25%) 和与西风急流有关的纬向西风动量平流 (20%)。

(3) 华南春旱时大气环流的统计特征是乌拉尔山阻高和副热带高压均偏强。对华南春旱最严重的 1991 年进行 EOF 和超前滞后统计分析表明, 乌拉尔山阻高超前副热带高压变化 2~6 天, 高纬稳定

的乌拉尔山阻高建立和维持后，其下游西风带较平直，锋面及其锋面上升支气流位置偏北，使下沉支气流出现在华南造成了西太副高偏强位置偏西北，因而华南地区偏旱。因此，在预报华南春旱时要特别关注乌拉尔山阻高的建立和维持。

参考文献 (References)

[1] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究, 大气科学, 2003, **27** (4): 770~787

Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the relationship between the server climatic disasters in China and the East Asia climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 770~787

[2] 梁必骐, 叶锦昭. 广东的自然灾害. 广州: 广东人民出版社, 1993. 181~184

Liang Biqu, Ye Jinzhao. *Natural Disasters in Guangdong* (in Chinese). Guangzhou: Guangdong People's Press, 1993. 181~184

[3] 广东省农业厅, 广东省气象局. 广东省农业气象灾害及其防灾减灾对策. 北京: 气象出版社, 2000. 223~252

Guangdong Provincial Department of Agriculture, Guangdong Meteorological Bureau. *Agricultural Meteorology Disasters of Guangdong Province and Control Measures* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 223~252

[4] 广东省地方史志编纂委员会. 广东省志 (自然灾害志). 广州: 广东人民出版社, 2001. 166~201

Guangdong Local Records Compilation Committee. *Annals of Guangdong Province* (annals of natural disasters) (in Chinese). Guangzhou: Guangdong People's Press, 2001. 166~201

[5] 郭其蕴, 王继琴. 近三十年我国夏季风盛行期降水的分析. 地理学报, 1981, **2**: 187~195

Guo Qiyun, Wang Jiqin. Interannual variations of rain spell during predominant summer monsoon over China for recent thirty years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1981, **2**: 187~195

[6] Zhu Qian'gen, He Jinhai, Wang Panxing. A study of the circulation differences between East-Asian and India summer monsoons with their interaction. *Advances in Atmospheric Sciences*. 1986, **3**: 466~477

[7] 吴尚森, 黄成昌, 薛惠烟. 华南后汛期降水的年际变化. 热带气象, 1990, **6**: 348~356

Wu Shangsen, Huang Chengchang, Xue Huixian. On interannual variation of precipitation during the second rainy season in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1990, **6**: 348~356

[8] 吴尚森, 梁建茵. 华南前汛期旱涝时空分布特征. 热带气象,

1992, **8**: 87~92

Wu Shangsen, Liang Jianyin. Temporal and spatial characteristics of the drought and flood during the rainy season in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1992, **8**: 87~92

[9] 梁建茵. 6月西太平洋副高脊线的年际变化及其对华南降水的影响. 热带气象, 1994, **10**: 274~279

Liang Jianyin. The interannual variations of the subtropical high ridge position over western Pacific in June and its influence on precipitation in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1994, **10**: 274~279

[10] 梁建茵, 吴尚森. 夏季广东降水异常变化与夏季风. 热带气象, 1999, **15** (1): 38~47

Liang Jianyin, Wu Shangsen. The variations of summer-monsoon rainfall anomalies in Guangdong. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1999, **15** (1): 38~47

[11] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, **23** (3): 257~266

Li Chongyin, Zhang Liping. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 257~266

[12] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991

Chen Longxun, Zhu Qian'gen, Luo Huibang, et al. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991

[13] 陈隆勋, 李薇, 赵平, 等. 东亚地区夏季风爆发过程. 气候与环境研究, 2000, **5** (4): 345~355

Chen Longxun, Li Wei, Zhao Ping, et al. On the process of summer monsoon onset over East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 345~355

[14] 池艳珍, 何金海, 吴志伟. 华南前汛期不同降水时段的特征分析. 南京气象学院学报, 2005, **28** (2): 163~171

Chi Yanzhen, He Jinhai, Wu Zhiwei. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (2): 163~171

[15] 陈长胜, 林开平, 王盘兴. 华南前汛期降水异常与水汽输送的关系. 南京气象学院学报, 2004, **27** (6): 721~727

Chen Changsheng, Lin Kaiping, Wang Panxing. Relation between pre-flood season precipitation anomalies in South China and water vapor transport. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27** (6): 721~727

[16] 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用. 大气科学, 1992, **16**: 718~724

Gao Shouting, Tao Shiyang, Ding Yihui. Upper waves-East Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1992, **16**: 718~724

[17] Zhou Yushu, Gao Shouting, Shen Samuel S P. A diagnostic

- study of formation and structures of Meiyu front system over East Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*, 2004, **82** (6): 1564~1576
- [18] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期水汽输送特征分析. *大气科学*, 2005, **29** (2): 195~204
Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basin 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 195~204
- [19] 袁卓建, 王同美. 局地经向环流的诊断方程. 见: 中国科学院大气物理研究所编. 东亚季风和中国暴雨. 北京: 气象出版社, 1998: 496~505
Yuan Zhuojian, Wang Tongmei. A diagnostic equation for the forcing of the local meridional circulation. *East Asian Monsoon and Torrential Rain in China* (in Chinese). Edited by the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Beijing: China Meteorological Press, 1998. 496~505
- [20] 高守亭, 孙淑清. 次天气尺度低空急流的形成. *大气科学*, 1984, **8**: 178~188
Gao Shouting, Sun Shuqing. The formation of subsynoptic scale low level jet stream. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1984, **8**: 178~188
- [21] 高守亭, 陶诗言. 高空急流加速与低层锋生. *大气科学*, 1991, **15** (1): 11~21
Gao Shouting, Tao Shiyan. The lower layer frontogenesis induced by the acceleration of the upper jet stream. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1991, **15** (1): 11~21
- [22] 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响. *地球物理学报*, 2004, **47** (1): 10~18
Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. Anomalies of the extra tropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47** (1): 10~18
- [23] 徐海明. 华南夏季降水与全球海温的关系. *南京气象学院学报*, 1997, **20** (3): 392~399
Xu Haiming. Relationship between South-China summer precipitation and global SST. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1997, **20** (3): 392~399
- [24] Yuan Zhuojian, Wang Tongmei, He Haiyan, et al. A comparison between numerical simulations of forced local Hadley (anti-Hadley) circulation in East Asia and Indian monsoon regions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (4): 538~554
- [25] 袁卓建, 王同美, 郭裕福. 东亚季风经向环流数值模拟及结果分析 I 算法设计. *中山大学学报(自然科学版)*, 2000, **39** (6): 112~116
Yuan Zhuojian, Wang Tongmei, Guo Yufu. A numerical simulation of a local-zonal-mean Hadley circulation over East Asia. Part I: Numerical schemes. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (in Chinese), 2000, **39** (6): 112~116
- [26] 陈桂兴, 袁卓建, 梁建茵, 等. 南海夏季风经向环流的 20 年平均 4~6 月演变机制. *气候与环境研究*, 2004, **9** (4): 605~618
Chen Guixing, Yuan Zhuojian, Liang Jianyin, et al. The mechanisms for the evolution of the monsoon meridional circulation over the South China Sea from (20-year mean) April to June. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (4): 605~618
- [27] 梁肇宁, 温之平, 袁卓建, 等. 影响 1991 年和 1994 年南海夏季风爆发迟早的物理因子探讨. *大气科学*, 2004, **28** (2): 216~230
Liang Zhaoning, Wen Zhiping, Yuan Zhuojian, et al. The comparison between the mechanisms of the early (1994) and late (1991) onset of the South China Sea summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 216~230
- [28] 陈桂兴, 黎伟标, 袁卓建, 等. 1998 年长江流域洪水期大气季节内振荡特征及机理研究. *中国科学(D 辑)*, 2004, **34** (6): 562~572
Chen Guixing, Li Weibiao, Yuan Zhuojian, et al. Evolution mechanisms of the intra-seasonal oscillation associated with the Yangtze River basin flood in 1998. *Science in China (Ser. D Earth Sciences)* (in Chinese), 2004, **34** (6): 562~572
- [29] 张恒德, 陆维松, 陶丽, 等. 用自由模对 1998 年夏季阻塞形势的诊断分析. *气象学报*, 2004, **62** (6): 450~458
Zhang Hengde, Lu Weisong, Tao Li, et al. Diagnose analyses of atmospheric blocking high by free mode. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 450~458
- [30] 广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组. 广东省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社, 2006. 197~201
The Compilation Group of *Manual of Weather Forecast Technique in Guangdong Province* of Guangdong Meteorological Bureau. *Manual of Weather Forecast Technique in Guangdong Province* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006. 197~201