

耦合模式长期积分资料所揭示的华南春季降水 及环流特征的年际变化

韩晋平^{1,2} 王会军¹ 姜大膀¹

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 利用一个全球海洋-大气-海冰耦合模式的 300 年控制试验资料, 针对东亚区域雨带移动和大气环流特征演变的研究发现, 华南春季降水是位于副热带的雨带的一部分, 而且华南地区 4、5 月的降水异常具有明显的年际变化特征。在华南 4、5 月降水偏多年份, 前期 3 月阿留申低压加强, 北半球西风减弱, 西太平洋海面温度出现负异常, 导致冷暖空气在这里相遇造成降水异常。

关键词 华南春季气候 环流特征 降水演变 年际变化

文章编号 1006-9585 (2006) 02-0194-09 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

Interannual Variation of Spring Precipitation and Circulation in South China as Simulated by a Coupled Model

HAN Jin-Ping^{1,2}, WANG Hui-Jun¹, and JIANG Da-Bang¹

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Abstract Based on a 300-year integration of a coupled ocean-atmosphere-sea ice climate model, named Bergen Climate Model, the spring rainfall in South China, including April and May, is part of rain belt over subtropical area. Rainfall amount has obvious interannual variation. It is found that during positive years of spring precipitation in South China, strengthened Aleutian Low, weakened westly and negative sea surface temperature anomaly (SSTA) over west Pacific in March contribute to positive precipitation anomaly in South China.

Key words spring climate in South China, circulation feature, rain belt evolution, interannual variation

1 引言

华南是我国降水最多的地区之一, 也是雨涝的多发地区^[1]。华南的雨季持续时间长, 从 3 月末 4 月初华南进入前汛期, 雨季一直持续到 9 月

份, 时间长达半年之久。而春季暴雨频繁通常是引起华南春季洪涝的重要原因, 主要多发生在珠江中下游及广西部分地区。在近几十年中, 几乎每年都有一些地区遭受不同程度的洪涝灾害, 其中 1959、1963、1968、1973^[2, 3] 和 1994 年洪涝比较严重。有研究表明^[4~6], 华南前汛期降水与中

收稿日期 2004-10-15 收到, 2005-10-12 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX3-SW-221、国家自然科学基金项目 40475037 和云南大学青年理工科基金 2002Q015ZH

作者简介 韩晋平, 女, 1978 年出生, 博士生, 主要从事气候变化诊断与模拟研究。E-mail: hanjp@mail.iap.ac.cn

高纬环流, 西太平洋副热带高压, 高原雪盖和南极海冰变化有关。

近年来, 利用观测资料对华南前汛期降水的特征有了一些研究^[2, 7], 它们有的分析华南前汛期降水本身的特征及其变率, 有的则试图找到影响前汛期降水的因子。造成降水的原因有很多, 其过程也是十分复杂。诸多研究^[8~12]都指出即使是区域性的降水, 与大范围的环流背景和气候背景也是分不开的, 如中高纬环流和季风活动。Wang 等^[13]通过分析观测资料, 认为华南春季从气候上发生在 4 月和 5 月。由于观测资料都比较短, 模式长期积分资料正可以弥补这一缺憾, 而且目前针对华南春季气候的数值分析工作也比较少, 因此, 本文从耦合模式长期积分资料出发探讨华南春季气候的环流特征和降水特点。

本文利用一个先进的全球海洋-大气-海冰耦合模式控制试验的长期积分资料, 研究了东亚地区春季大气环流特征, 并以此来划分华南春季季节的时间段, 同时还对华南春季多雨期和少雨期的前期大气环流状况进行了对比分析, 目的在于加深我们对华南春季气候的认识。

2 模式资料和分析方法

本文所使用的分析资料为一个全球耦合模式的 300 年控制试验积分结果, 该模式由挪威卑尔根大学的地球物理学院和挪威南森环境与遥感中心联合发展的全球海洋-大气-海冰耦合模式 (Bergen Climate Model)。模式系统的大气部分是最初由法国气象局与欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 共同创建的大气环流谱模式 (ARPEGE/IFS), 垂直方向为 31 层, 从表层到 10 hPa; 海洋部分是美国迈阿密大学的等密度坐标海洋模式 (MICOM), 水平分辨率约 $2.4^{\circ} \times 2.4^{\circ}$, 垂直方向为 24 层。关于该模式的耦合过程及结果检验可以参看文献 [14], 目前利用这个模式的积分资料已开展了一些气候方面的研究工作^[15, 16]。

文中首先将控制试验积分结果同 NCEP/NCAR 再分析资料中的春季 (3~5 月) 表面温度和 Xie-Arkin 春季降水资料 (1979~1996 年) 进行比较, 考察模式的基本模拟能力, 随后采用差值比较和相关分析的方法确定华南春季降水季节的

时间段, 然后利用小波分析展现华南春季降水异常存在的多时间尺度特征, 最后用合成分析的方法讨论了华南春季降水异常时前期大气环流的特征。

3 模式基本模拟能力

有关该耦合模式模拟能力的详细检验可以参看文献 [14], 这里只给出春季 (3~5 月) 表面温度和降水的模拟结果分别同 NCEP/NCAR 再分析资料的表面温度和 Xie-Arkin 全球气候平均降水^[17]的差值分布 (图 1)。

从图 1a 可以看出模式模拟的春季表面温度普遍偏低, 在黄河中上游地区模拟与观测的差别比较大, 在长江以南的华南地区差别比较小, 基本在 2°C 以下。图 1b 为模式对春季降水的模拟误差, 显示黄河上游与长江上游之间出现一个虚假的降水中心, 这很可能与青藏高原大地形的处理有关; 在我国其他地区模式模拟的春季降水与观测结果的差别比较小, 特别在华南地区差值的绝对值小于 $2\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。综上, 模式对东亚区域气候有比较合理的模拟能力, 特别是在本研究关心的华南地区模拟效能较好。

4 华南春季降水季节的确定

雨带的移动是我国学者一直比较关心的问题之一。由图 2 所示的模拟结果中 3~6 月逐月降水可以看出东亚雨带的逐渐移动过程, 6 月我国长江以南地区的降水是前期分别位于副热带和热带的 2 条雨带交汇叠加的结果, 来自热带的雨带 3~5 月都位于 20°N 以南, 6~7 月则在 20°N 以北, 9 月开始退回到 20°N 以南地区, 10 月回到热带地区 (图略)。4、5 月影响华南降水多寡的主要是位于副热带的雨带, 而 3 月华南地区的降水较少。所以, 华南在 4、5 月的降水是位于副热带的雨带的一部分, 6~8 月则为来自热带和副热带雨带的叠加。Wang 等^[13]指出华南的雨季可以分为 2 个次雨季。4、5 月华南进入前汛期雨季, 这时我国的其他地区都未进入雨季, 影响前汛期降水的系统主要是副热带系统和中高纬系统。6 月以后来自热带海洋的暖湿气流与副热带高压西南侧的东南气

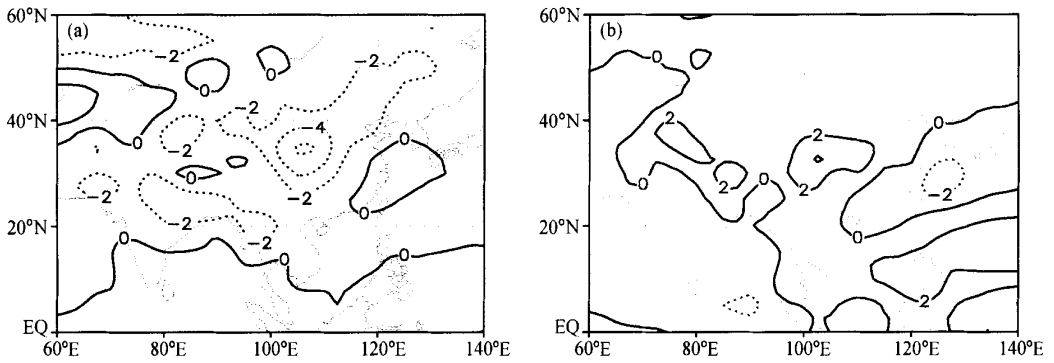


图1 模拟与观测的差值。(a) 春季表面温度(单位:°C);(b) 春季降水(单位: mm · d⁻¹)
Fig. 1 Differences of (a) T_{as} (units: °C) and (b) Precipitation (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) between model integration and NCEP (BCM-NCEP) in the spring season (Mar–May)

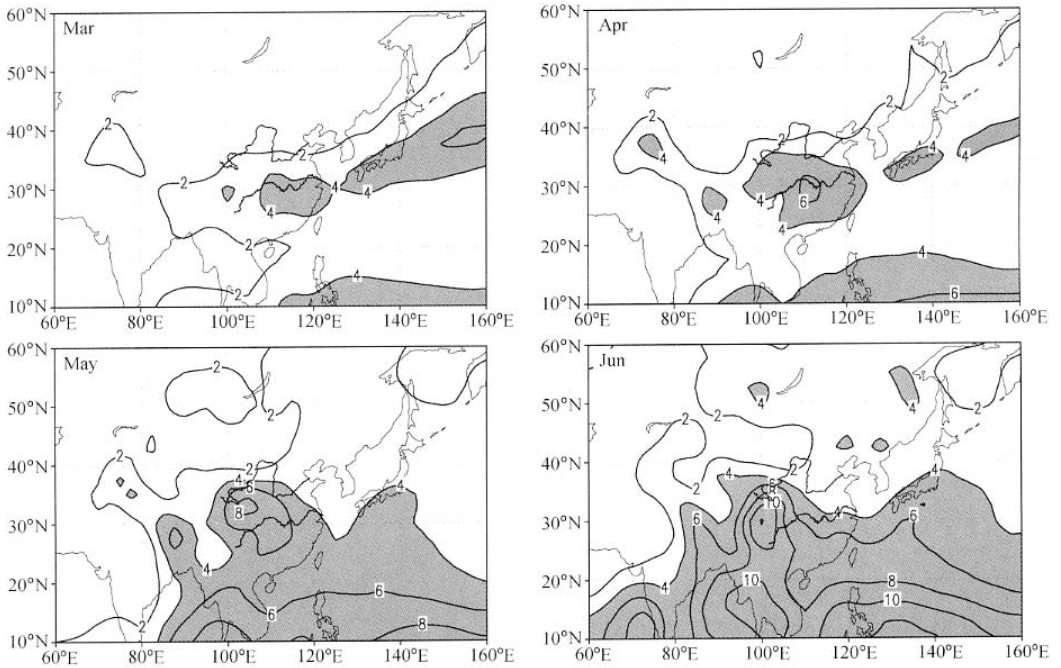


图2 模拟的3~6月逐月降水(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 阴影区为大于 $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的区域)
Fig. 2 The evolution of rain belt in model integration (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), values larger than $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ are shaded

流汇合,共同影响华南地区的降水。因此从模式积分资料中得到的上述结论与实测结果是基本一致的。

计算积分资料中华南(22.5~32.5°N, 112.5~122.5°E)4月降水与其他各月降水的相关系数,发现它与5月降水的相关系数是最大的,达到0.25,通过了95%的显著性检验;同理,用5月

的降水跟其他各月的降水做相关发现,与4月降水的相关也为最大。

由图3所示的850 hPa风场可见,1、2月亚洲北部和北太平洋地区是强大的西风带,低纬为东风带。6月北太平洋为强大的反气旋,其南侧的东南气流伸展到华南地区,来自印度洋上的西南气流吹向华南地区。4、5月的850 hPa风场介于

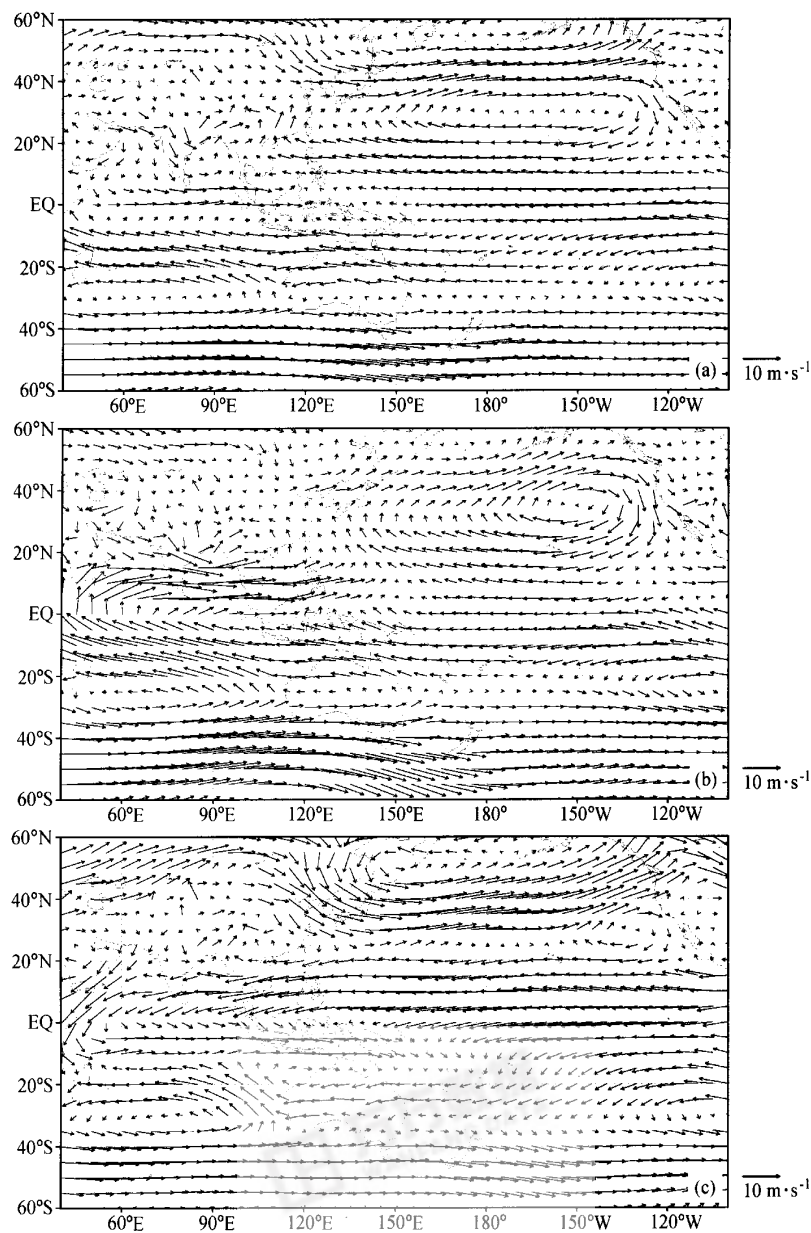


图3 模拟的平均850 hPa风场。(a) 4、5月；(b) 6月；(c) 1、2月
Fig. 3 850 hPa wind of (a) Apr/May, (b) Jun, and (c) Jan/Feb in integration

二者之间，中高纬的西风带明显减弱，北太平洋上的反气旋初步形成，但来自热带的西南气流还没有向北伸展到华南地区，也就是说4、5月华南地区低层主要受副热带系统和中高纬冷空气的影响，在6月还受到热带系统的作用。

由500 hPa高度距平场（图4）可以发现，1、2月的高度距平场分布几乎跟6月的距平场相反，表现为二者在大陆东岸等值线的南北梯度相当，在东

亚的东北部存在一个极值中心。6月在大陆中部存在一个由中纬度向高纬度伸展的脊，而在冬季脊只达到中纬度。4、5月的500 hPa高度距平场在高纬度是负值，中低纬度大陆中部及东亚东岸为正。总体看来，500 hPa的转换是由低纬度向高纬度推进，由大陆向海洋扩展的，4、5月的高度场正是介于冬季和夏季之间。进一步印证了Wang等^[13]把4、5月作为华南春季时段的合理性。

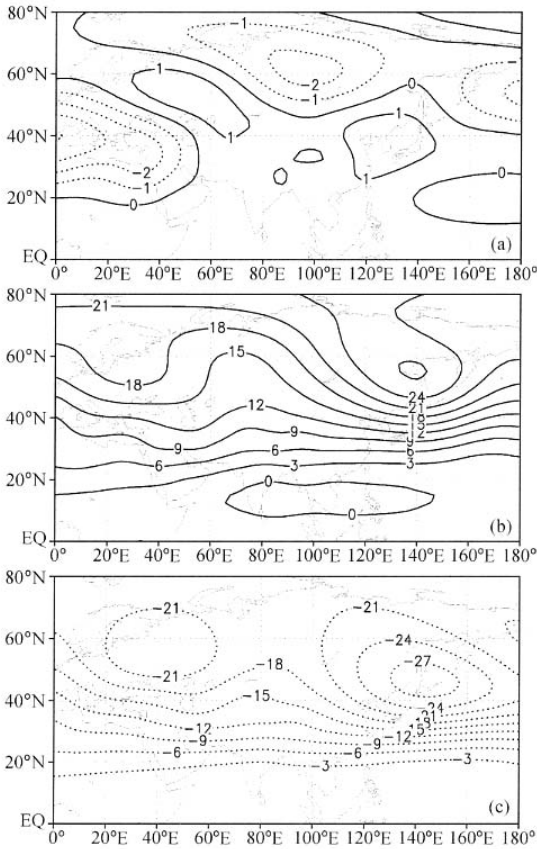


图4 模拟的 500 hPa 高度距平场。(a) 4、5 月；(b) 6 月；(c) 1、2 月 (单位：10 gpm)

Fig. 4 500 hPa Height anomaly of (a) Apr / May, (b) June and (c) Jan / Feb in integration (units: 10 gpm)

综上，耦合模式的长期积分资料中显示 4、5 月华南地区的雨带受副热带系统和北半球中高纬度环流的共同影响，环流特征表现为介于冬季和夏季之间，所以华南春季气候发生在 4、5 月，这与从观测结果中得到的结论一致。

5 华南春季降水的年际变化及其前期大气环流特征

Xue 等^[18] 和曾庆存等^[19] 的研究指出亚洲-太平洋地区大气环流从春季到夏季的转换最早发生在对流层高层和平流层低层。Wang 等^[13] 从观测资料中验证了上述观点，并指出 3 月大气环流特征发生了转变，与 1、2 月迥然不同。因此分析前期 3 月的大气环流特征对华南春季降水的预报有重要意义。

根据第 4 部分的分析结果，将积分资料中的华南 (22.5~32.5°N, 112.5~122.5°E) 地区 4、5 月降水异常的区域平均值作为华南春季降水的指数，得到其年际变化时间序列 (图 5)。为了更清楚的表现华南春季降水异常的周期性，对该降水异常指数做小波分析 (图 6)。由图 6 可以看出，华南 4、5 月的降水异常除了存在 4 年和 8 年左右的周期外，还存在年代际变化，如前 200 年中 12~16 年的周期，后 100 年中 10 年左右的周期。此外，60 到 270 积分年里 50 年周期也是比较明显的。根据图 5，将降水指数大于 1.0 的 64 个高指

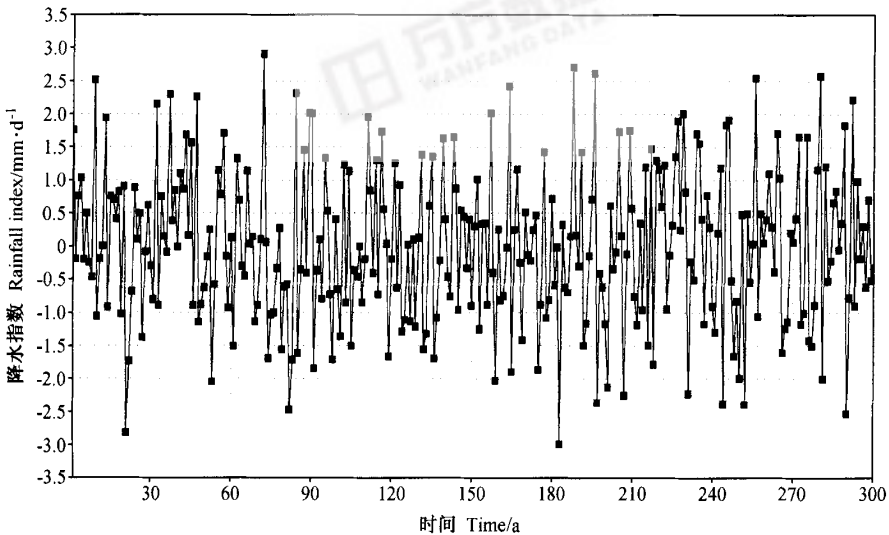


图5 华南 (22.5~32.5°N, 112.5~122.5°E) 4、5 月降水指数的年际变化时间序列

Fig. 5 Spring (Apr/May) rainfall index of South China (22.5~32.5°N, 112.5~122.5°E)

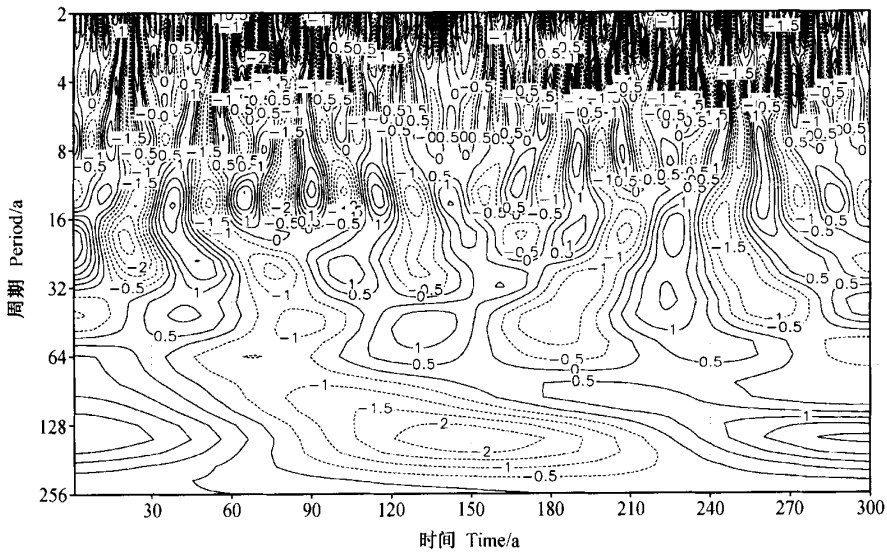


图 6 华南 (22.5~32.5°N, 112.5~122.5°E) 4、5 月降水指数的小波分析
Fig. 6 Wavelet coefficients of spring rainfall index of South China (22.5~32.5°N, 112.5~122.5°E)

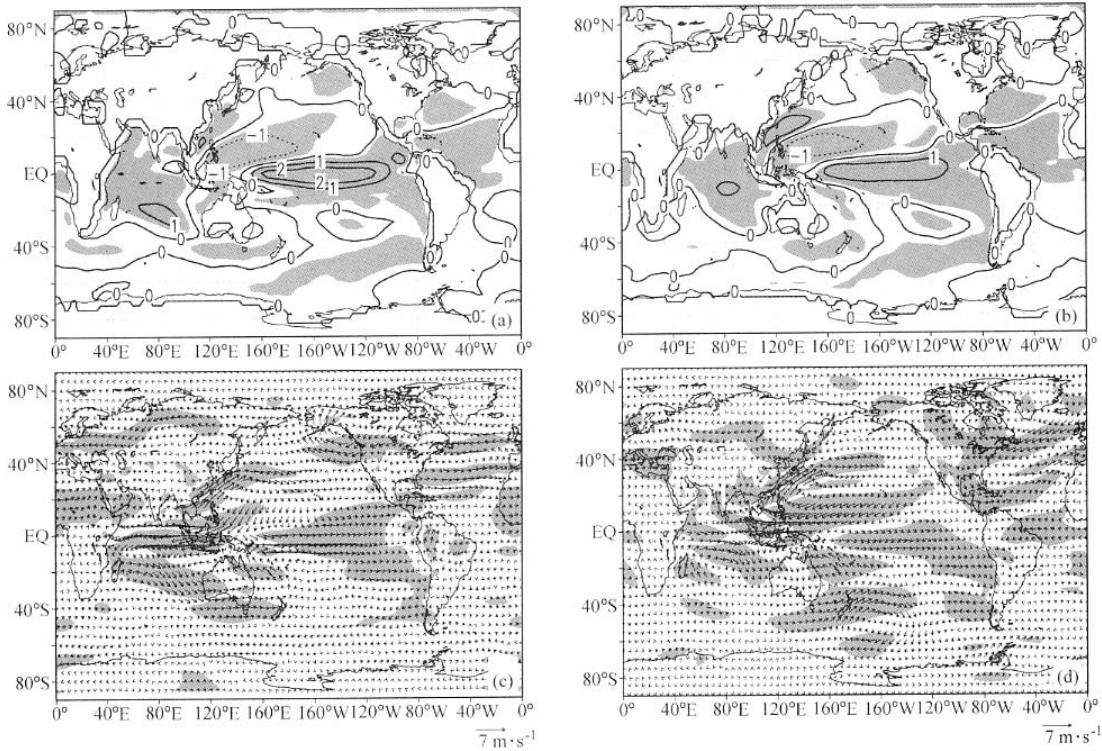


图 7 华南 4、5 月降水高低指数对应的 (a) 3 月海面温度差异 (单位:℃); (b) 4、5 月海面温度差异 (单位:℃) 以及 (c) 3 月 850 hPa 风场差异; (d) 4、5 月份 850 hPa 风场差值分布。阴影区通过 95% 显著性检验

Fig. 7 Differences of SST in (a) Mar, (b) Apr / May (units:℃) and wind at 850 hPa in (c) March and (d) Apr/May between positive and negative spring rainfall year in South China (positive—negative). Shaded areas indicate significant differences at the 95% level

数年和降水指数小于-1.0 的 61 个低指数年的前期 3 月气候要素场分别做合成分析并相减, 以便对不同时期前期要素场的分布状况作对比分析。

图 7 分别给出 3 月和 4、5 月海表面温度和 850 hPa 风场在高低降水指数年的差异分布图。3 月与 4、5 月海表温度异常的分布形势相似, 区别是印度洋和赤道中东太平洋的正异常在 3 月较强, 而热带西太平洋的负异常和中国东海、南海的正异常在 4、5 月较强; 在 850 hPa 风场上, 3 月与 4、5 月分布形势也基本相似, 不同在于通过显著性检验的气旋、反气旋式环流在 4、5 月更明显, 风速更大, 如中心位于 20°N 西太平洋上的反气旋式环流和中心位于 30°N 西大西洋上的气旋式环流。耦合模式积分资料显示出 3 月的海温和低层环流与 4、5 月有相似之处, 表明气候系统有较好的持续性, 所以分析 3 月大气环流特征有一定的预报意义。

从图 8 可以看到, 热带西太平洋, 北美西北部以及中纬度西北大西洋都有通过显著性检验的异常区域, 该异常区从低层(海平面)到高层(200 hPa)都存在。500 hPa 上热带西太平洋为正差值, 亚洲中纬度为负差值, 北美大陆西北部到北极地区为正差值, 北美中纬度地区为负差值, 这种分布类似于太平洋-北美遥相关型, 但中纬度的负差值没有通过显著性检验。所以, 华南春季降水偏多的年份, 前期 3 月热带西太平洋海表温度降低(图 7), 气压升高, 而阿留申低压是加强的。

与气压场和高度场相对应, 高层风场差值图(图 9)上中心位于(60°N, 140°W)附近的反气旋性异常在对流层上下层都有体现(图 7d), 表现为一个正压系统。在中纬度西太平洋有异常偏西气流, 热带西太平洋为偏东气流, 赤道东太平洋在大气上层存在异常的偏东气流。以上的异常区域

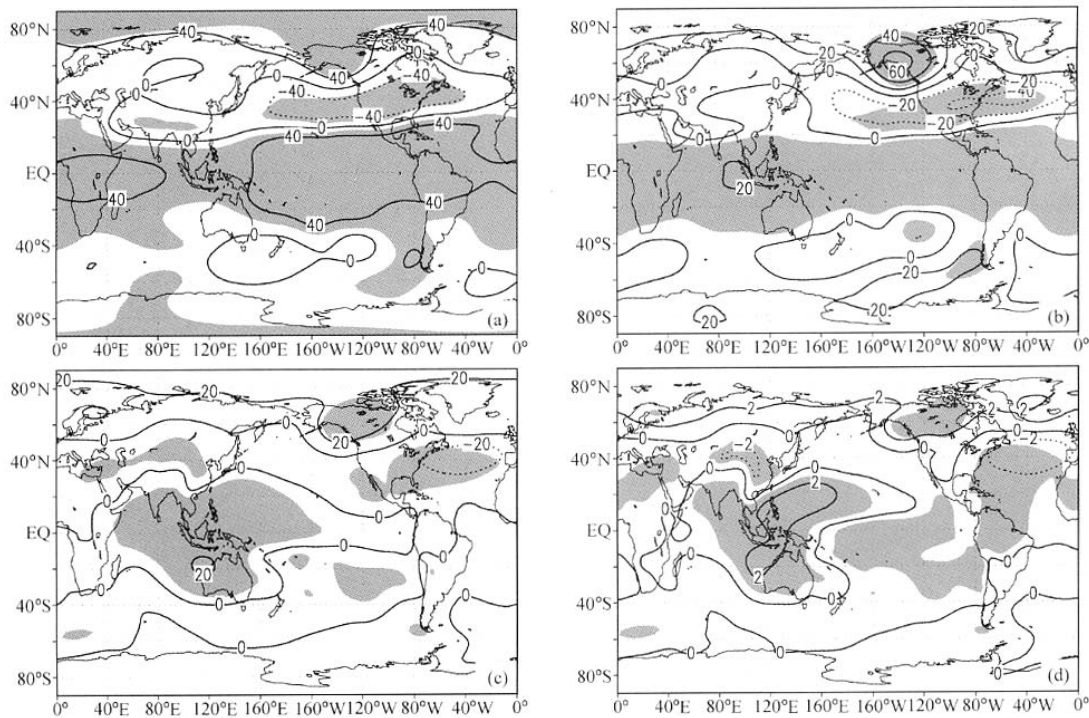


图 8 华南 4、5 月降水高低指数对应的 3 月 (a) 200 hPa 高度差异; (b) 500 hPa 高度差异; (c) 850 hPa 高度差异(单位: gpm) 和 (d) 海平面气压差异(单位: hPa)。阴影区通过 99% 显著性检验

Fig. 8 Differences of height at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa (units: gpm) and (d) sea level pressure (units: hPa) in March between positive and negative spring rainfall year in South China (positive--negative). Shaded areas indicate significant differences at the 99% level

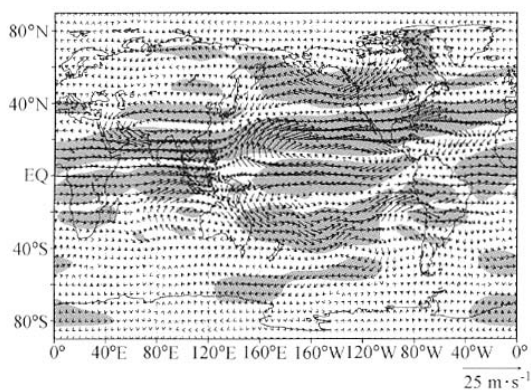


图9 华南4、5月高低降水指数前期3月200 hPa风场差值。阴影区通过95%的显著性检验

Fig. 9 Differences of wind at 200 hPa in March between positive and negative spring rainfall year in South China (positive-negative). Shaded areas indicate significant differences at the 95% level

都通过了95%的显著性检验。综合图7、8、9可知,当华南4、5月降水出现正异常时,前期3月阿留申低压加强,西风带减弱,有利于中高纬冷空气的南下;热带西太平洋海表面温度降低,气压升高,使得西太平洋副热带高压位置偏南,偏东,导致来自洋面的水汽只能到达较低的纬度,即华南地区。这样南来的水汽和北下的冷空气在华南地区相遇,造成这里降水出现正异常。

6 结论与讨论

本文通过对耦合模式长期积分资料的分析,得到以下的结论:

(1) 从雨带移动和大气环流特征上看,华南春季气候主要受副热带系统和中高纬环流的影响。

(2) 华南地区4、5月的降水异常具有明显的年际变化和多周期性特征。

(3) 华南4、5月降水正异常年,前期3月阿留申低压加强,西风带减弱,有利于中高纬的冷空气的南下;热带西太平洋海表面温度降低,气压升高,使得西太平洋副热带高压位置偏南,偏东,导致来自洋面的水汽只能到达较低的纬度。冷暖空气在华南地区相遇,造成这里降水出现正异常。

以上分析从一个耦合模式的角度划分了华南

春季气候的时间段,并分析了前期3月的环流异常,试图从前期大气环流场中提取到预报信息,旨在为华南春季降水的短期预报提供思路,但是它们究竟能在多大程度上作用于华南春季的降水还需要做进一步详细的分析,相关的工作还有待开展。

参考文献 (References)

- [1] Ding Yihui. *Monsoon over China*. Kluwer Academic Publishers, 1995, 429pp
- [2] 邓立平, 王谦谦. 华南前汛期(4~6月)降水异常特征及其与我国近海海温的关系. *热带气象学报*, 2002, **18** (1): 45~55
Deng Liping, Wang Qianqian. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April-June) in southern China and SST over offshore waters in China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2002, **18** (1): 45~55
- [3] 高波, 陈乾金, 任殿东. 江西南部—华南北部前汛期严重旱涝诊断分析. *应用气象学报*, 1999, **10** (2): 219~226
Gao Bo, Chen Qianjin, Ren Diandong. Diagnostic analysis on the severe drought/flood for the beginning of flood season in southern part of the south of Yangtze river valley and northern South China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, **10** (2): 219~226
- [4] 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. *热带气象学报*, 1994, **10** (3): 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** (3): 274~279
- [5] 蔡学湛. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响. *应用气象学报*, 2001, **12** (3): 358~367
Cai Xuezhan. The influence of abnormal snow cover over Qinghai-Xizang Plateau and east Asian monsoon on early rainy season rainfall over south China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (3): 358~367
- [6] 吴恒强, 张爱华, 蒋伯仁, 等. 华南前汛期降水与南极海冰变化的关系. *南京气象学院学报*, 1998, **21** (2): 266~273
Wu Hengqiang, Zhang Aihua, Jiang Boren, et al. Relationship between the variation of Antarctic sea ice and the pre-flood season rainfall in southern China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1998, **21** (2): 266~273
- [7] 覃武, 孙照渤, 丁宝善, 等. 华南前汛期雨季开始期的降

- 水及环流特征. 南京气象学院学报, 1994, **17** (4): 455~461
- Qin Wu, Sun Zhaobo, Ding Baoshan, et al. Precipitation and circulation features during late-spring to early-summer flood rain in south China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1994, **17** (4): 455~461
- [8] 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
- [9] 孙颖, 丁一汇. 1997 年东亚夏季风异常活动在汛期降水中的作用. 应用气象学报, 2002, **13** (3): 277~287
- Sun Ying, Ding Yihui. Role of summer monsoon in anomalous precipitation patterns during 1997 flooding season. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (3): 277~287
- [10] 叶瑾琳, 王绍武, 李晓东, 等. 亚非季风区夏季降水变率. 气候与环境研究, 1996, **1** (2): 173~184
- Ye Jinlin, Wang Shaowu, Li Xiaodong, et al. Variability of summer rainfall in the monsoon region of Asia-Africa. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1996, **1** (2): 173~184
- [11] 丁一汇, 胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报, 2003, **61** (2): 129~145
- Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (2): 129~145
- [12] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响. 气象学报, 1998, **56** (2): 199~211
- Zhang Qingyun, Tao Shiyan. Influence of Asian mid-high latitude circulation on east Asian summer rainfall. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (2): 199~211
- [13] Wang Huijun, Xue Feng, and Zhou Guangqing. The spring monsoon in South China and its relationship to large-scale circulation features. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (4): 651~664
- [14] Furevik T, Bentsen M, Drange H, et al. Description and validation of the Bergen Climate Model: ARPEGE coupled with MICOM. *Climate Dyn.*, 2003, **21** (1): 27~51
- [15] Zhou Tianjun, Drange H, Furevik T., et al. Response to the North Atlantic thermohaline circulation to the atmospheric forcing in a global air-sea coupled model. *Climate Dyn.*, 2003, **28**: 1~5
- [16] 姜大膀, 王会军, Helge Drange, 等. 耦合模式长期积分中东亚夏季风与 ENSO 联系的不稳定性. 地球物理学报, 2004, **47** (6): 976~981
- Jiang Dabang, Wang Huijun, Drange H, et al. Instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship in a coupled global atmosphere-ocean GCM. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47** (6): 976~981
- [17] Xie P., Arkin P. A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2539~2558
- [18] Xue Feng, Zeng Qingcun. Diagnostic study on seasonality and interannual variability of the wind field. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (4): 537~543
- [19] 曾庆存, 张邦林. 大气环流季节变化和季风. 大气科学, 1998, **22** (6): 805~813
- Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (6): 805~813