

韩雪, 魏凤英. 2010. 中国东部夏季降水与东亚垂直环流结构及其预测试验 [J]. 大气科学, 34 (3): 533–547. Han Xue, Wei Fengying. 2010. The influence of vertical atmospheric circulation pattern of over East Asia on summer precipitation in the east of China and its forecasting test [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 533–547.

中国东部夏季降水与东亚垂直环流结构及其 预测试验

韩雪^{1, 2} 魏凤英¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 国家海洋环境预报中心, 北京 100081

摘 要 本文在分析中国东部夏季降水的时空分布特征基础上, 从东亚高、中、低层大尺度环流异常着手, 选取对中国东部夏季降水异常有显著影响的大气环流预报因子, 分别应用逐步回归和最优子集回归法两种统计降尺度方法, 以动力气候模式 CAM3.1 预报输出的大气环流预报因子为基础, 以中国东部夏季降水的典型空间分布型为预报对象, 建立动力与统计相结合的中国东部夏季降水预测模型, 并对 1981~2000 年的中国东部夏季降水进行回报试验。结果表明: 中国东部夏季降水具有 4 类典型的的空间分布型式, 且具有显著的准 2 年和年代际尺度振荡周期; 东亚高、中、低层大气环流异常的特定配置, 对东部夏季降水的空间分布型有显著影响; 使用两种降尺度方案建立的动力与统计相结合的预测模型对中国东部夏季降水异常具有一定的预报技巧, 可以在一定程度上提高动力模式对中国东部夏季降水的预报效果。

关键词 短期气候预测 中国东部夏季降水 CAM3.1 模式 动力与统计相结合 统计降尺度

文章编号 1006-9895 (2010) 03-0533-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Influence of Vertical Atmospheric Circulation Pattern over East Asia on Summer Precipitation in the East of China and Its Forecasting Test

HAN Xue^{1, 2} and WEI Fengying¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081

Abstract Based on the analysis of characteristics of temporal and spatial distribution of summer precipitation in the east of China, the correlativity between the anomalies of high-, mid- and low-level general circulation over East Asia and the typical spatial distribution of summer precipitation over the east of China are discussed. The key areas of atmospheric circulation as prediction factors that cause the abnormal summer precipitation are confirmed. Then, on the basis of prediction factors from the forecast results of CAM3.1, and by using the statistical downscaling methods, a prediction model of summer precipitation in eastern China is built and applied to the forecasting test during 1981–2000. Results show that there are four typical spatial rainfall patterns in the east of China. The summer precipitation not only has significant quasi-biennial oscillation but also has significant interdecadal oscillation. The rain-

收稿日期 2009-06-15, 2009-11-30 收修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200706005, 国家科技支撑计划项目 2009BAC51B04

作者简介 韩雪, 女, 1981 年出生, 博士, 主要从事气候诊断及预测研究。E-mail: hanxue1129@163.com

通讯作者 魏凤英, E-mail: weify@cams.cma.gov.cn

fall patterns in the east of China are influenced by the vertical atmospheric circulation pattern over East Asia significantly. The forecast skill of rainfall pattern in the east of China is improved by using the forecast model combining the dynamic model and statistical downscale methods.

Key words short-term prediction, summer precipitation in the east of China, CAM3.1 model, combining dynamic model and statistical method, statistical downscale

1 引言

中国位于东亚季风气候区,受夏季风等因素的影响,夏季降水的年际变化很大。尤其是中国东部地区的夏季降水,在夏季风的主要影响下,其降水量大,降水变率也较大。中国东部又是人口密集和经济发达地区,极端洪涝、干旱事件的频繁发生,给该地区的经济和人民生命财产安全造成很大威胁。因此,研究中国东部夏季降水的时空分布特征和降水异常成因,提高夏季降水短期气候预测准确率是气候研究的重要课题。已有研究表明,中国东部夏季降水具有复杂的时空变化特征,不仅具有典型的分布型式(魏凤英等,1995;孙林海等,2005;赵振国等,2008),且具有多时间尺度的振荡周期(赵汉光,1986;黄嘉佑,1988;朱乾根和智协飞,1991;殷宝玉等,1996;陈兴芳和宋文玲,1997;况雪源等,2002;Li et al.,2004;杨秋明,2006;赵平和周秀骥,2006;黄荣辉等,2006;钱维宏等,2007;贾建颖等,2009)。而对中国东部夏季降水异常有重要影响的因子也十分复杂。目前,在短期气候预测业务中主要考虑的有太阳活动、地球自转、ENSO、阻塞形势、西太平洋副热带高压、东亚夏季风、青藏高原积雪等(赵振国,1996;Zhang et al.,1999;金祖辉和陶诗言,1999;吴统文和钱正安,2000;黄嘉佑等,2004;彭京备等,2005;魏凤英,2006;马柱国和邵丽娟,2006;武炳义等,2008;邓伟涛等,2009)。其中,东亚地区大气环流异常是造成中国东部夏季降水异常的直接原因。大部分研究工作是从大气环流系统着手进行的,并且重点集中在对流层中层的500 hPa高度场上的环流异常因子。而较少将大气各层环流的垂直结构和相互关系综合起来考虑。事实上,对流层和平流层之间存在相互作用(Boville,1984;van Loon and Labitzke,1987;Kodera and Koide,1997;Kodera and Kuroda,2000;Hartmann,2004;Matthes et al.,2006),对我国夏季降水异常有显著影响的关键

系统,可能不仅仅存在于对流层中、低层,而是从高层到低层的这一区域的环流异常之间的相互配置共同作用的结果。

随着对气候异常认识的升华,短期气候预测手段也有了长足的发展。气候模式预测是现代气候预测技术的发展方向。气候模式吸纳了动力气象学领域的诸多成就,并随着人们对大气物理过程认识的不断提高而不断革新。但是,目前气候模式存在分辨率不够、描述的物理过程还不能完全反映气候演变等问题,还不能满足提高预测准确率的需求。统计方法在我国的短期气候预测业务中仍占很大比例,但其存在忽略物理过程演变的缺陷。因此,将统计与动力学方法相结合,无疑是提高短期气候预测水平的重要途径。在此基础上,进一步发展了利用多年的历史观测资料建立大尺度气候要素和区域气候要素场之间的统计关系,由动力模式输出环流场间接的预报要素场的统计降尺度技术(Frey-Buiness et al.,1995;Wilby and Wigley,1997,2000;Huth,1999;Fuentes and Heimann,2000;Busuioc et al.,2001;Oshima et al.,2002;Widmann et al.,2003)。目前,统计降尺度方法已成为改善模式预报水平不可或缺的有效技术(李维京和陈丽娟,1999;陈丽娟和李维京,1999;陈丽娟等,2003;范丽军等,2005,2007)。

本文在分析我国东部地区夏季降水的空间分布特征和时间尺度变化的基础上,从东亚地区高、中、低层高度场上寻找影响夏季降水异常的关键区域及关键因子,以全球气候模式NCAR CAM3.1的预报输出为基础,以统计降尺度为手段,建立动力与统计相结合的我国东部夏季旱涝趋势预测模型,并对该模型的预报能力进行检验。

2 资料

(1)由国家气候中心气候预测室提供的1951~2007年中国160站逐月降水量资料。以105°E作为分界线,选取105°E以东的中国东部96个测站

的夏季 6~8 月降水量作为研究和预测的对象。

(2) NCEP/NCAR 再分析数据中心提供的 1951~2007 年夏季 6、7、8 月平均的东亚地区 (0°~90°N, 40°E~180°) 范围内的 50 hPa、100 hPa、200 hPa、500 hPa、850 hPa 的位势高度场, 水平分辨率为 2.5°×2.5°。并通过与各层 1971~2000 年平均值相减, 得到上述各层高度距平场。

3 中国东部夏季降水的时空分布特征

将中国东部 96 个测站 1951~2007 年的夏季降水量场进行经验正交函数 (EOF) 分解, 分别得到中国东部夏季降水量场的特征向量及其对应的时间系数。特征向量表征了东部夏季降水的空间变率分布模态, 通过了 North 检验的前 4 个特征向量共解释总方差的 93.40%, 基本上概括了中国东部夏季降水的主要空间分布特征。图 1 中给出了中国东部

夏季降水前 4 个特征向量 (各分量数值均乘以 100), 其中第 1 特征向量 (EOF1) 解释总方差的 89.97% (图 1a), 可以看出, 整个中国东部地区大范围为正值, 它所反映的是中国东部夏季降水从东南向西北逐渐递减的变化趋势, 其对应的时间系数代表了逐年东部大范围夏季降水多寡的年际变化, 我们将其称作东部大范围型。第 2 特征向量 (EOF2) 的分量呈现出负、正、负相间的分布型式 (图 1b)。这一特征向量代表了江淮流域降水与其南、北呈相反趋势的两种分布型式, 称之为江淮型。第 3 特征向量 (EOF3) 代表了长江中下游及其以南地区与黄淮之间的降水呈相反趋势的两种分布型式 (图 1c), 这也是我国夏季比较常见的降水分布型式, 称之为江南型。第 4 特征向量 (图 1d) 基本上主要表征了北方以及长江中下游地区降水与淮河流域以及华南地区降水呈相反趋势的两种空间分布型, 称之为北方型。

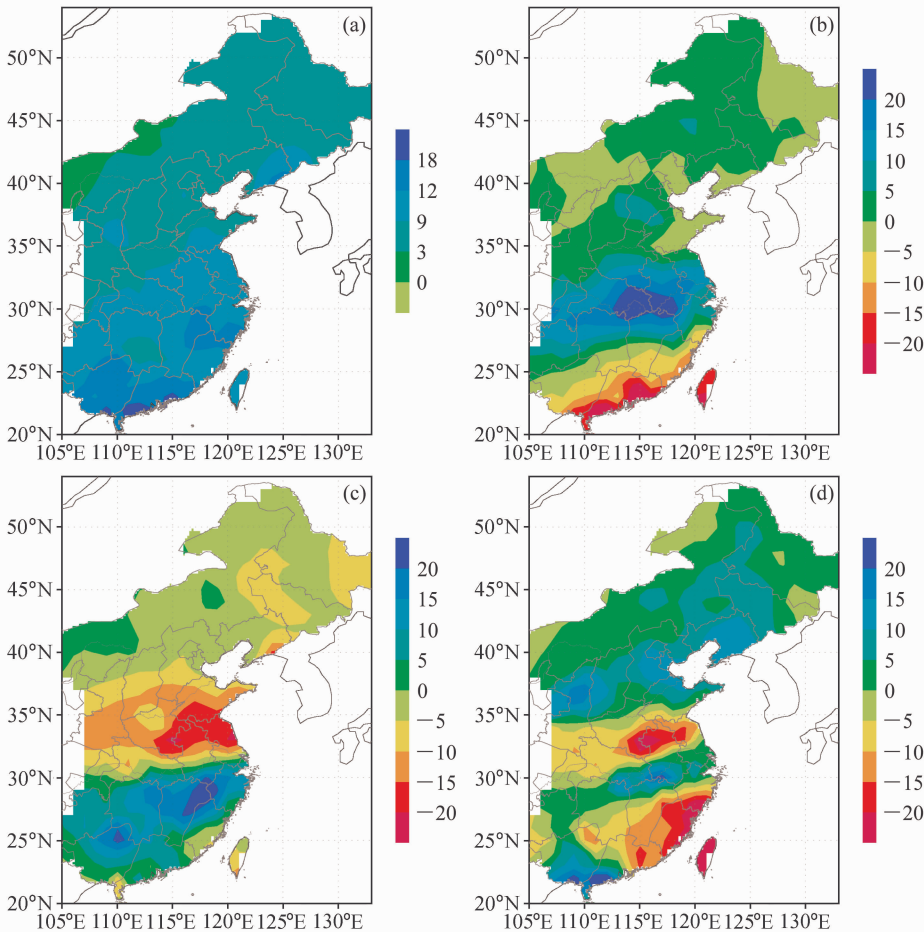


图 1 中国东部夏季降水量场的前 4 个特征向量 (各分量数值均乘以 100): (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3; (d) EOF4

Fig. 1 The first four EOF eigenvectors of summer precipitation in the east of China (each eigenvector is multiplied by 100): (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3; (d) EOF4

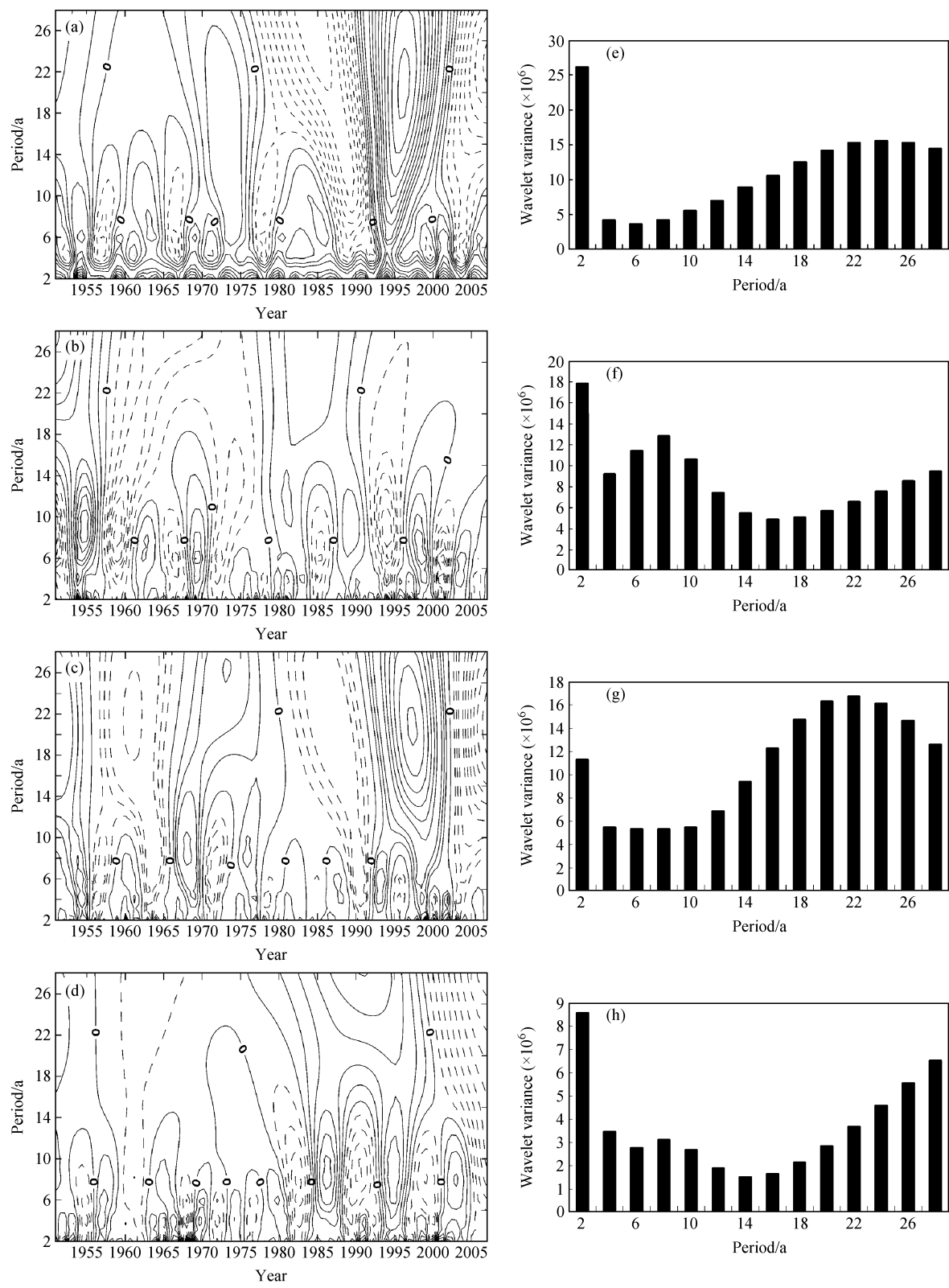


图2 中国东部夏季降水的前4个特征向量的时间系数的(a-d)小波变换和(e-h)小波方差:(a、e) EOF1;(b、f) EOF2;(c、g) EOF3;(d、h) EOF4

Fig. 2 (a-d) Wavelet transform and (e-h) wavelet variance for time coefficients of the four typical eigenvectors of summer precipitation in the east of China; (a, e) EOF1; (b, f) EOF2; (c, g) EOF3; (d, h) EOF4

特征向量的时间系数代表了该模态随时间的变化特征。分别对中国东部夏季降水的前 4 个特征向量的时间系数序列进行小波分析。图 2 中给出 4 个特征向量的时间系数的小波变换(图 2a~d)及小波方差(图 2e~h)。从小波变换图中可以看出,中国东部夏季降水的 4 类典型空间分布型包含了复杂的多时间尺度变化。从小波方差图可知,中国东部夏季降水具有显著的准 2 年的变化周期,其小波方差远远高于其他时间尺度。另外,尺度在 24 年左右的变化周期也很突出。

提取 24 年和 2 年周期的小波系数并分别绘制出年代际尺度和 2 年小波系数的时间-纬度剖面图(图 3)。由图 3a 可以看出,20 世纪 50 年代前半期,除江淮流域处于降水偏多时期外,东部其他地区均处于偏少时期;1950 年代中期至 1960 年代中

期,北方地区降水偏多,江淮流域及其以南地区的降水偏少;1960 年代中期至 1970 年代末,长江中下游及其以南地区处于降水偏多时期,淮河及北方地区处于降水偏少时期;1980 年代,东北及淮河流域夏季降水偏多,其他地区处于降水偏少时期;进入 1990 年代后,东北地区、长江中下游及其以南地区的夏季降水偏多;21 世纪以来,淮河流域夏季降水进入显著偏多阶段,其他地区夏季降水偏少。由此可见,中国东部夏季降水的年代际尺度变化在纬向上存在显著的位相差异,尤其是处于过渡带的淮河流域和长江中下游地区的年代际尺度变化的位相差异较明显。由图 3b 可以看出,江淮流域夏季降水的准 2 年振荡比较突出,而东北地区的准 2 年振荡相对较弱。且当东部夏季降水处于较稳定的降水偏多的年代际背景下,其准 2 年周期振荡也更为

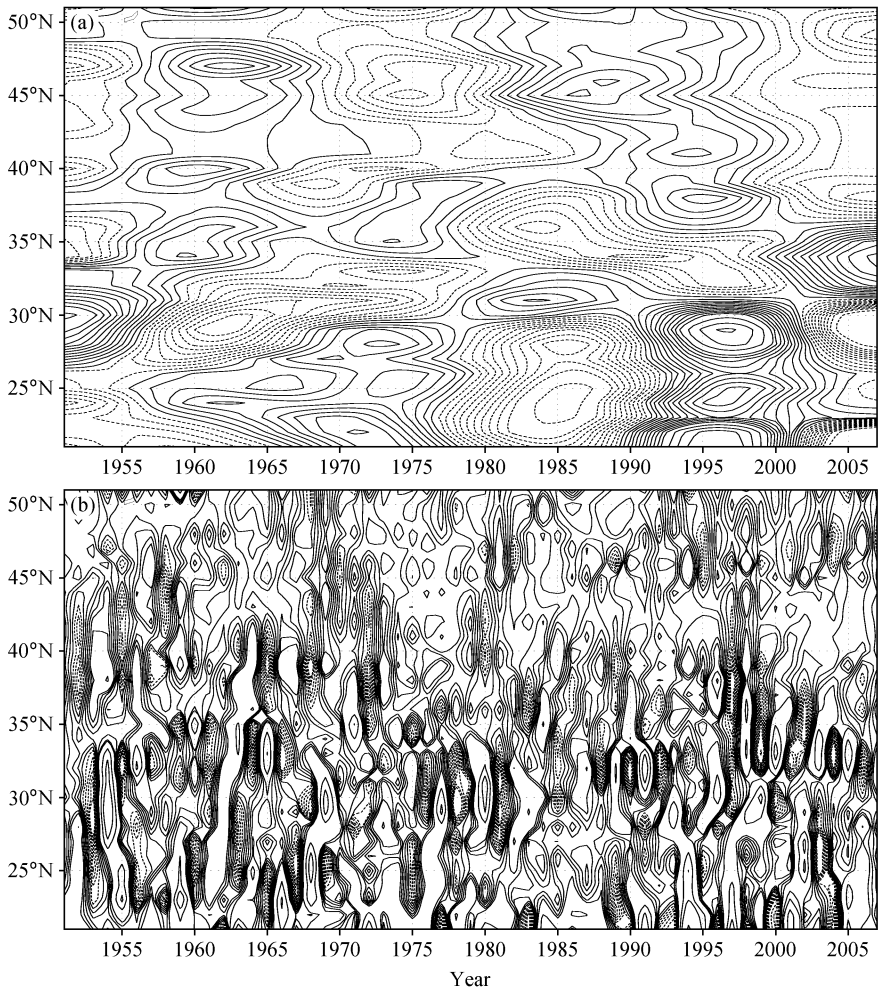


图 3 中国东部夏季降水的 (a) 年代际振荡和 (b) 年际振荡的时间-纬度剖面图。实、虚线: 夏季降水相对偏多、偏少时期
Fig. 3 The time-lat cross sections of (a) interdecadal and (b) interannual oscillations of summer precipitation in the east of China. Real line (dashed line) indicates the summer precipitation in the positive anomaly (negative anomaly) period

显著。例如,进入 21 世纪后,淮河流域处于显著的夏季降水偏多时期,同时这一时期淮河流域的准 2 年周期振荡也十分显著。

中国东部夏季降水量场可以看作是空间特征向量及其时间系数的线性组合。因此,对中国东部夏季降水空间分布型的预报,可以通过寻找合适的预报因子,对代表东部夏季降水主要分布特征的前 4 个特征向量的时间系数进行预报,用预报的时间系

数与 4 个特征向量合成,就可以得到中国东部夏季降水场的预报。

4 中国东部夏季降水的空间分布型与东亚夏季大气环流的相关关系

4.1 东亚夏季大气环流异常与东部夏季大范围降水的相关关系

对东亚地区各层的高度距平场与中国东部夏季

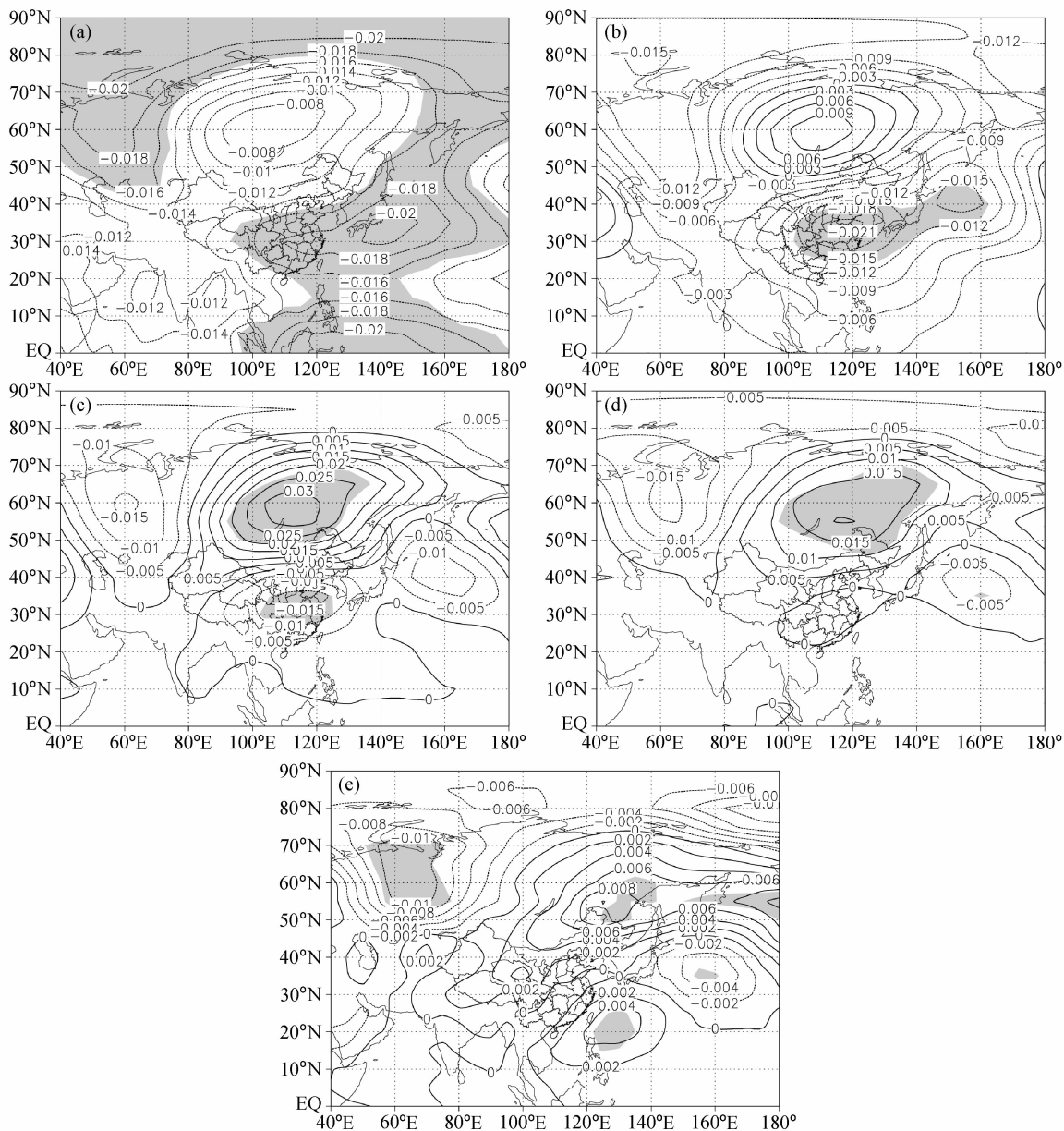


图 4 东亚夏季各高度距平场与东部大范围夏季降水的回归: (a) 50 hPa; (b) 100 hPa; (c) 200 hPa; (d) 500 hPa; (e) 850 hPa。实、虚线: 正、负回归系数; 阴影: 回归系数超过 $\alpha=0.05$ 显著性水平

Fig. 4 Linear regression between height anomalies in East Asia and the wide-range precipitation in eastern China; (a) 50 hPa; (b) 100 hPa; (c) 200 hPa; (d) 500 hPa; (e) 850 hPa. Real line (dashed line) indicates the positive (negative) regression coefficient; shading indicates regression coefficients at 0.05 significance level

降水的前 4 个特征向量的时间系数之间进行线性回归分析，回归系数代表了东亚地区高、中、低层大气环流与中国东部 4 种典型空间分布型降水的相关关系。

图 4 分别给出了东亚地区夏季 50 hPa、100 hPa、200 hPa、500 hPa、850 hPa 高度距平场与中国夏季降水第 1 典型分布型（东部大范围型）的回归图，正、负回归系数代表了环流场与降水型的相关特性。从垂直方向来看，平流层 50 hPa 上亚洲北极地区的环流异常通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平，该地

区是影响东部大范围降水异常的关键区域。同时，东亚高层的中纬西风带地区；50 hPa、850 hPa 上乌拉尔山地区；对流层内贝加尔湖地区；850 hPa 上鄂霍次克海附近的位势高度异常对东部大范围夏季降水都有显著地影响。此外，在对流层中、低上西太平洋副高地区也是影响东部大范围降水异常的关键区域。

4.2 大气环流异常与江淮型降水的相关关系

图 5 给出了东亚夏季高、中、低层高度距平场与江淮型降水的回归图。可以看出，东亚高、中、

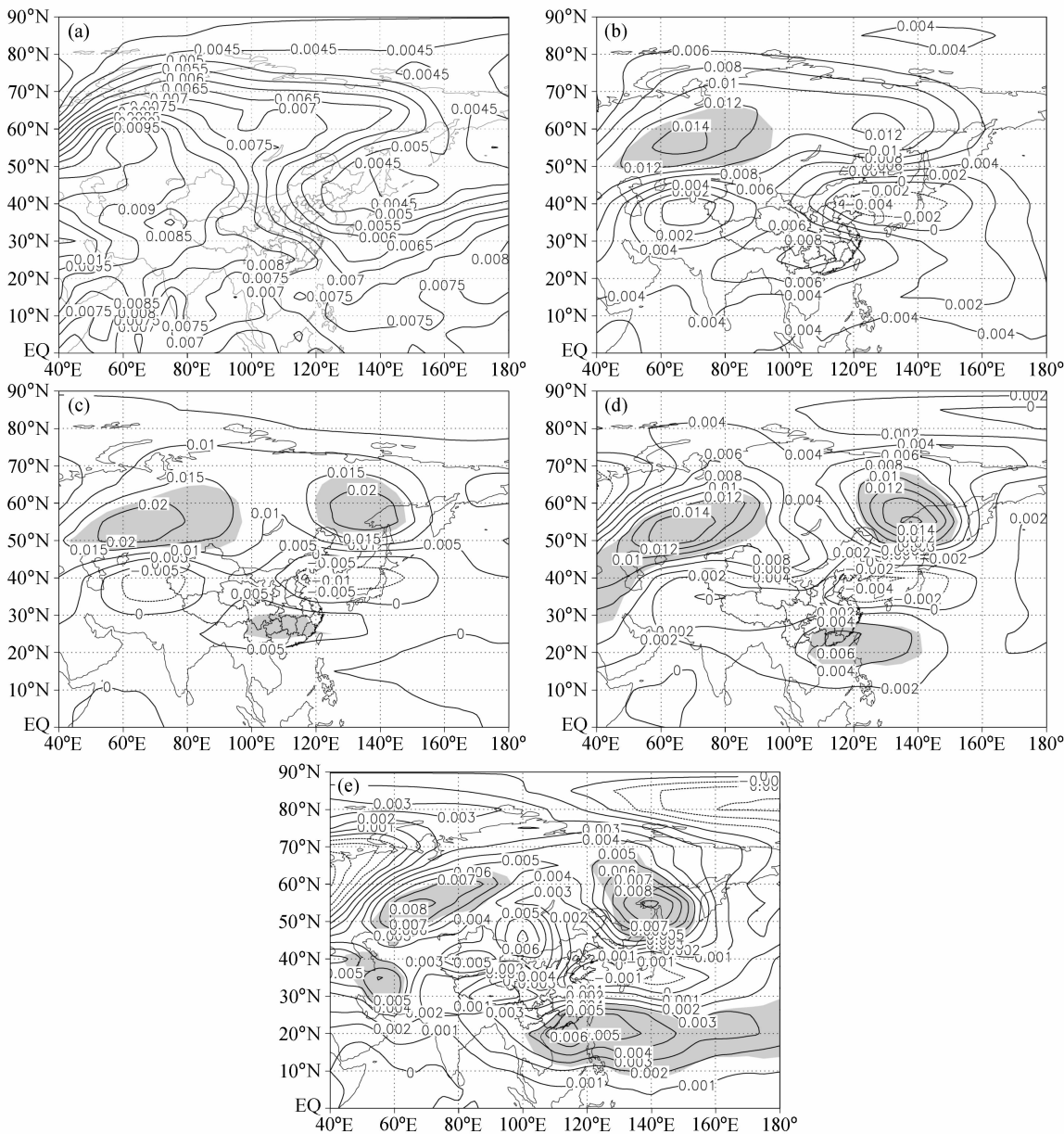


图 5 东亚夏季各高度距平场与江淮型降水的回归，其余同图 4

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for linear regression between height anomalies in East Asia and the Jianghuai-pattern precipitation

低层的亚洲北极、中纬西风带地区的位势高度异常与江淮型降水基本呈一致的反相关关系,而高、中、低层的高纬阻塞形势和西太平洋副热带地区的位势高度异常与江淮型降水呈一致的正相关关系。其中对流层内的乌拉尔山、鄂霍次克海以及西太平洋副热带地区是对夏季江淮型降水有显著影响的关键区域。

4.3 大气环流异常与江南型降水的相关关系

图 6 给出了东亚夏季高、中、低层高度距平场与江南型降水的回归图。可以看出,亚洲北极地区

的位势高度在高、中、低层上均与江南型降水呈反相关关系,且均通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平,说明东亚地区高、中、低层北极地区是对江南型降水有显著影响的关键区域。中纬度西风带附近的位势高度异常在中、高层与江南型降水呈反相关关系,其中 100 hPa、200 hPa 上该区域的回归系数通过了显著性水平。高纬度地区的高度场异常与江南型降水的相关关系较复杂,其中对江南型降水有显著影响的关键区域为平流层的乌拉尔山地区以及对流层中、低层的贝加尔湖地区,且均与江南型降水呈正

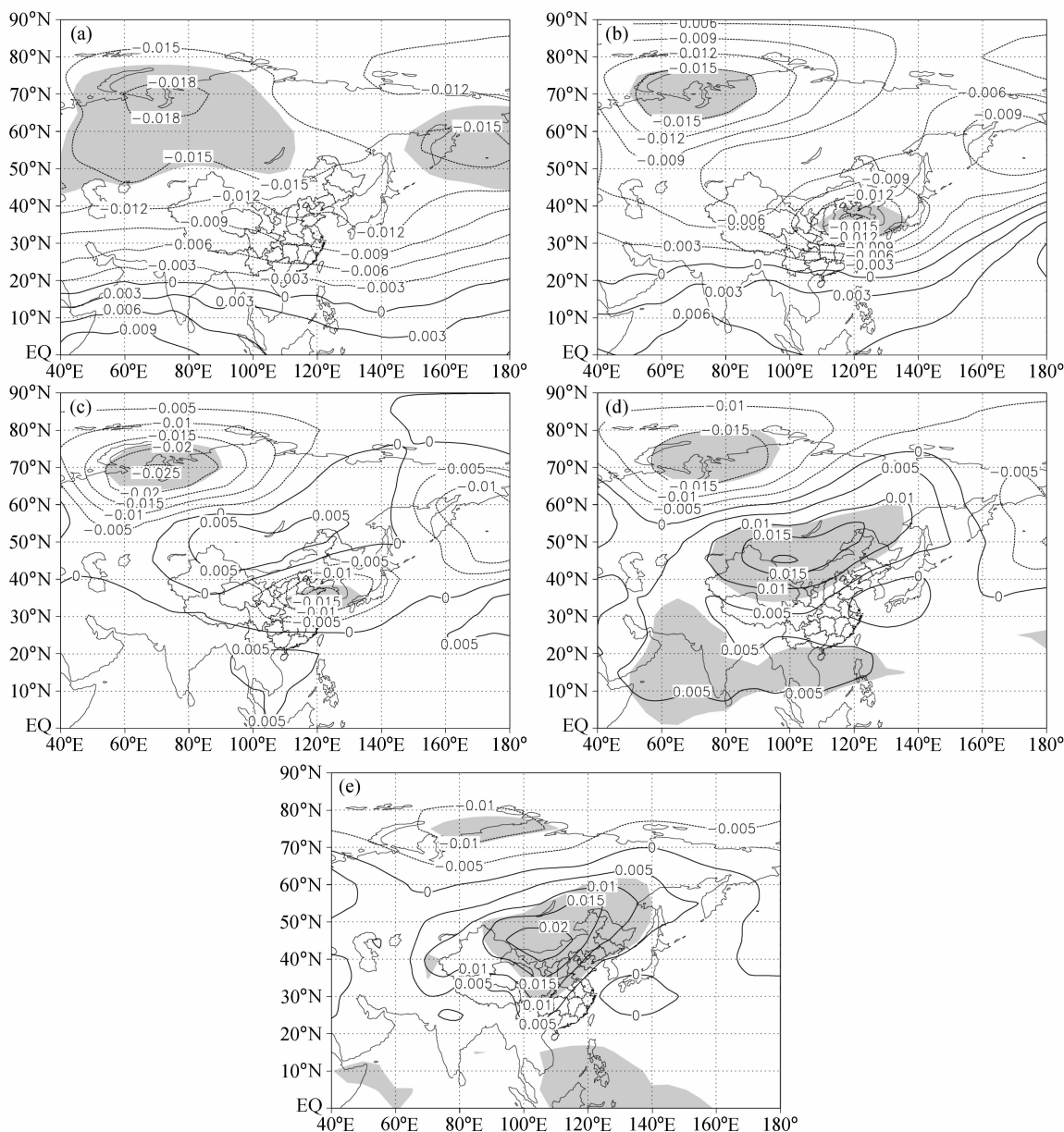


图 6 东亚夏季各高度距平场与江南型降水的回归,其余同图 4

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for linear regression between height anomalies in East Asia and the Jiangnan-pattern precipitation

相关关系。此外，对流层中、低层上西太平洋副高的强弱与江南型降水的正相关关系也通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平。

4.4 大气环流异常与北方型降水的相关关系

图 7 分别给出了东亚夏季高、中、低层高度距平场与北方型降水的回归图。与北方型降水有显著相关关系的大气环流异常信号较弱，特别是对流层中、低层上的高度场异常信号较少。除了亚洲北极地区从高层到低层，南亚地区以及中纬度西风带在高层呈现明显的正异常信号外，高层到低层的高纬

度地区和西太平洋副热带地区都没有高度场异常的信号。这表明当东亚地区的大气环流表现为高、中、低层上北极附近地区的位势高度一致偏高，即亚洲极涡偏弱、高层南亚高压偏强、并且中、高层上中纬度西风带地区的位势高度一致偏高时，中国东部夏季可能易形成北方降水偏多，淮河流域及华南地区降水偏少的分布；反之亦然。

从 4 类典型降水型与东亚地区高、中、低层关键区域的相关分布可以看出，对中国东部夏季降水有显著影响的东亚夏季大尺度环流异常的关键区域

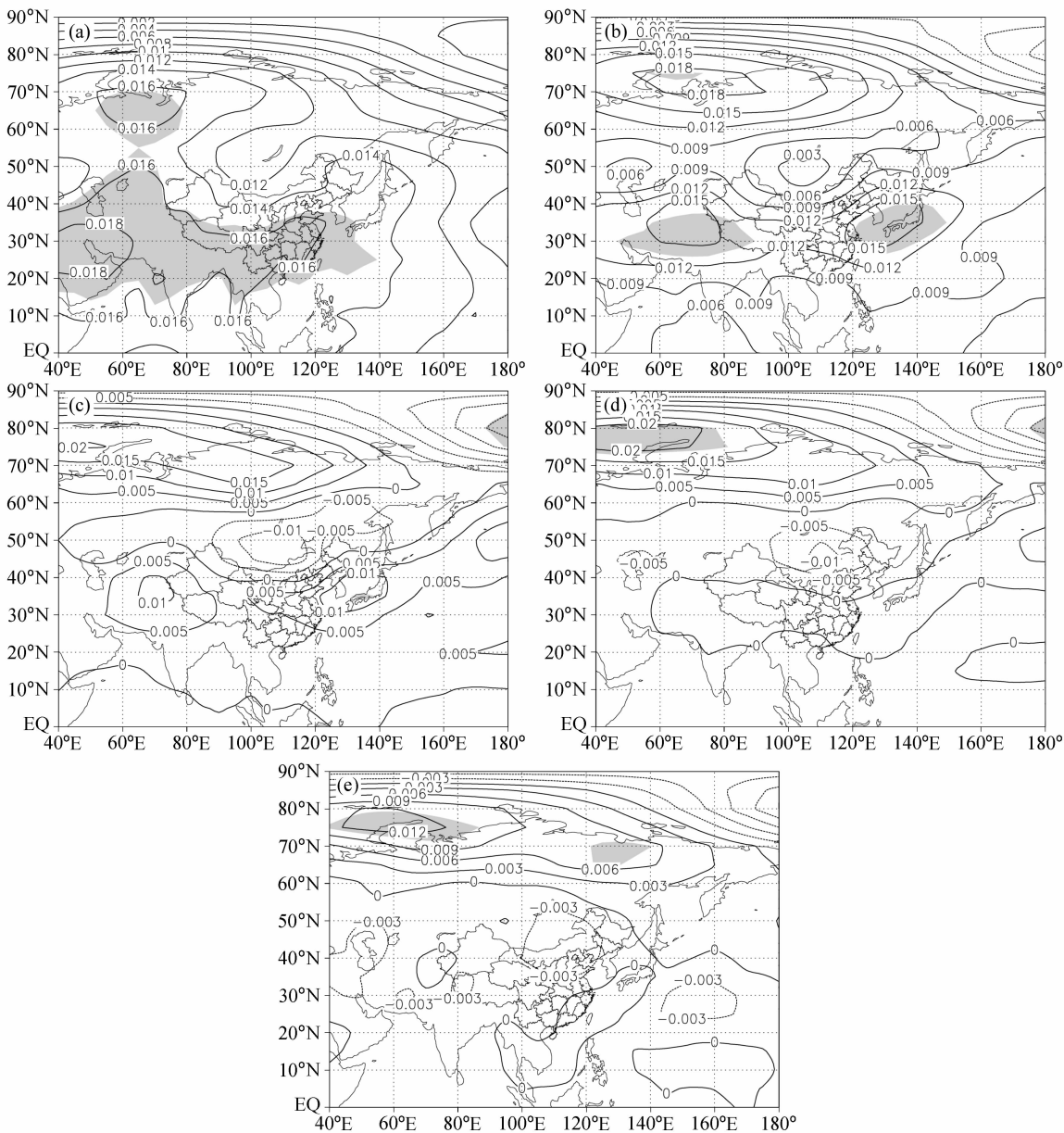


图 7 东亚夏季各高度距平场与北方型降水的回归，其余同图 4

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for linear regression between height anomalies in East Asia and the north-pattern precipitation

表 1 影响中国东部 3 类典型分布的主要显著因子及其配置
Table 1 The significant impact factors and circulation patterns for three typical rainfall patterns in the east of China

	亚洲极涡	中纬西风带	乌拉尔山	贝加尔湖	鄂霍次克海	副高
江淮型			+		+	+
江南型	—	—		+		+
北方型	+	+				

在水平方向和垂直方向上存在一定联系。水平方向上,分布在 500 hPa 和 850 hPa 上的环流异常关键区域和关键因子最多,主要为亚洲极涡、中纬度西风带、亚欧大陆阻塞高压及西太平洋副热带高压。这 4 个关键系统的特定配置对东部夏季降水的分布有显著影响(表 1)。其中“+”代表该地区的位势高度正异常;“—”代表该地区的位势高度负异常。由此可见,当对流层中、低层的大气环流呈现为乌拉尔山阻高、鄂霍次克海阻高的建立,且西太平洋副高偏强时,东部江淮流域的夏季降水易偏多;而当亚洲极涡偏强,贝加尔湖阻高建立,且西太平洋副高偏强时,东部长江中下游及其以南地区的夏季降水可能易偏多。从表 1 中还可以看出,影响北方型降水偏多的因子配置恰与江南型相反。同时,这种水平方向上的配置并不仅位于某一层高度场上,而常常是从高到低贯穿整个东亚地区。例如亚洲极涡、高纬阻塞形势等关键系统常呈现从高层到低层一致的变化特征。这表明,各层高度场上的大气环流异常因子可能的相互作用,构成东亚地区垂直方向上从高层到低层呈一致变化特征的深厚系统,从而可能对东亚地区夏季降水产生较稳定的影响。由此可见,对中国东部夏季降水有显著影响的环流因子不仅取决于某一高度场上大气环流异常的配置,也取决于高、中、低层大气环流的垂直结构的异常。

5 中国东部夏季的动力与统计相结合预测模型及其预测试验

5.1 CAM3.1 模式的预报效果检验

我们首先对全球大气环流模式 CAM3.1 模式对中国东部夏季预报效果进行检验。图 8a 给出的是 1981~2000 年观测的东部 96 站夏季降水距平百分率与 CAM3.1 模式预报的 96 站夏季降水距平百分率间的相关系数。可以看出,正的相关系数主要位于淮河以北地区,这说明 CAM3.1 模式对中国

东部东北北部、内蒙古北部和东部、华北大部,尤其是山东半岛的夏季降水异常的预报效果较好。尤其是山东半岛地区的相关系数达到 0.4;而淮河、长江中下游、江南和华南地区的相关系数均为负值,说明 CAM3.1 模式对淮河及其以南地区的夏季降水变化趋势没有预报能力,无法直接应用于业务预报工作中。同时,有研究(韩雪等,2009)表明,应用适当的统计方法订正后的 CAM3.1 模式对东亚夏季大尺度环流模态具有一定的预测能力。图 9 给出了订正后的 CAM3.1 模式预报的 1997 年和 1998 年的东亚夏季 500 hPa 高度距平场,其中 1997 年为中国东部夏季降水呈典型的江南型分布,1998 年夏季降水呈典型的江淮型分布。可以看出,订正后的 CAM3.1 模式预报的 1997 年 500 hPa 高度距平场上高纬度贝加尔湖地区的高度场为正异常;CAM3.1 模式预报的 1998 年 500 hPa 高度距平场上乌山和鄂海所在地区的高度场为正异常,副高也为正异常。这与表 1 中预报因子的配置基本一致。因此,有必要依靠动力模式对东亚大尺度环流异常的预报结果应用统计降尺度方法对中国东部的夏季降水进行短期气候预测。

5.2 动力与统计相结合的中国东部夏季降水预报模型及回报效果检验

从统计订正后的全球大气环流模式 CAM3.1 预报输出的东亚 50 hPa、100 hPa、200 hPa、500 hPa、850 hPa 高度距平场中分别选取与中国东部夏季降水 4 类空间分布型有显著相关关系的关键区域,即图 4~7 中线性回归通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平的阴影区域。计算关键区域内的高度距平场的均值,作为统计降尺度降水预报的预报因子。分别采用逐步回归和最优子集回归方法,建立动力与统计相结合的中国东部夏季降水的降尺度预报模型,并对 1981~2000 年的中国东部夏季降水量场进行独立样本回报试验。

本文采用以下两种方法,检验动力与统计相结合降水预报模型的预报效果:

(1) 计算 1981~2000 年观测的中国东部 96 站夏季降水距平百分率分别与逐步回归和最优子集回归降尺度预报夏季降水距平百分率之间的相关系数。

(2) 计算国家气候中心业务上使用的评判预报效果的得分,评分公式为:

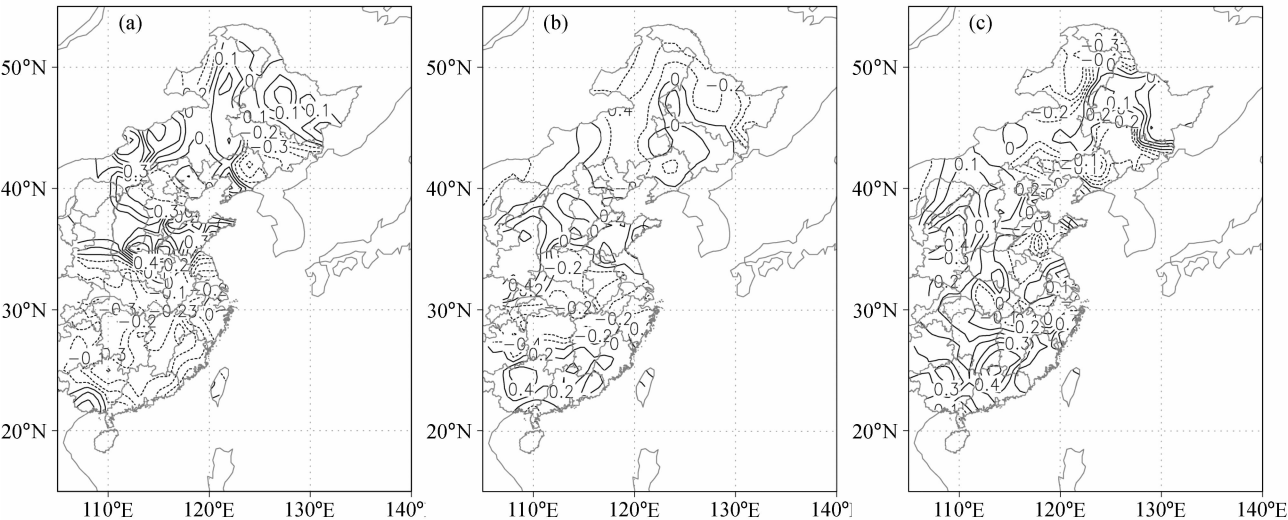


图 8 观测的中国东部夏季降水距平百分率与 (a) CAM3.1 模式预报、(b) 逐步回归降尺度预报、(c) 最优子集回归降尺度预报的中国东部夏季降水距平百分率之间的时间相关

Fig. 8 The time correlation between observed and (a) CAM3.1 forecasted, (b) stepwise regression downscale forecasted, (c) optimal subset regression downscale forecasted percents of precipitation anomalies in the east of China

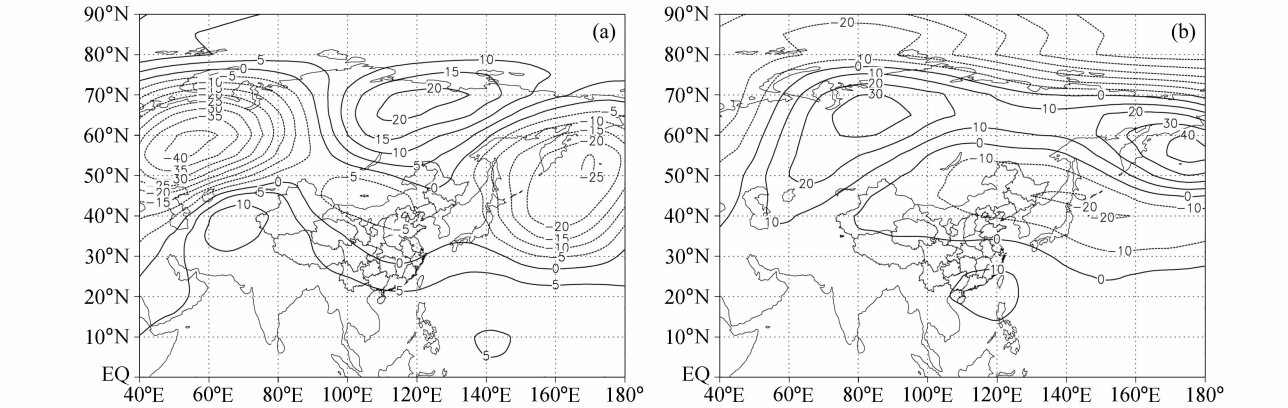


图 9 订正后的 CAM3.1 模式预报的东亚夏季 500 hPa 高度距平场 (单位: gpm): (a) 1997 年; (b) 1998 年

Fig. 9 The 500-hPa height anomalies (gpm) for revised CAM3.1 forecast in summer over East Asia; (a) 1997; (b) 1998

$$S = \frac{N + N_0 + N' + N''}{M + N' + N''} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, M 为预报的站数, 这里为 96 个站; N 为预报与观测降水距平百分率同号的站数; N_0 为预报与观测距平百分率异号 $< 20\%$ 的站数; N' 为距平百分率绝对值在 $20\% \sim 40\%$ 之间的同号的站数; N'' 为距平百分率 $\geq 50\%$ 同号的站数。按此评分标准, 若得分达到 65 分, 则认为对汛期降水的预报具有一定的预报技巧。表 2 中给出了近年来业务预报 (国家气候中心、中国气象科学研究院、中国科学院大气物理研究所等 9 单位) 的距平相关系数和评分, 可见得分达到 65 分以上是十分困难的。

表 2 2003~2007 年业务预报的相关系数和平均得分

Table 2 The correlation coefficients and scores of operational prediction during 2003 - 2007

年份	相关系数	评分
2003	-0.270	50.7
2004	-0.037	63.7
2005	-0.073	60.1
2006	-0.039	60.4
2007	-0.037	63.0

图 8b 给出的是 1981~2000 年中国东部 96 站观测与逐步回归降尺度预报的降水距平百分率的相关分布, 图中正相关主要位于华北北部的黄河流域

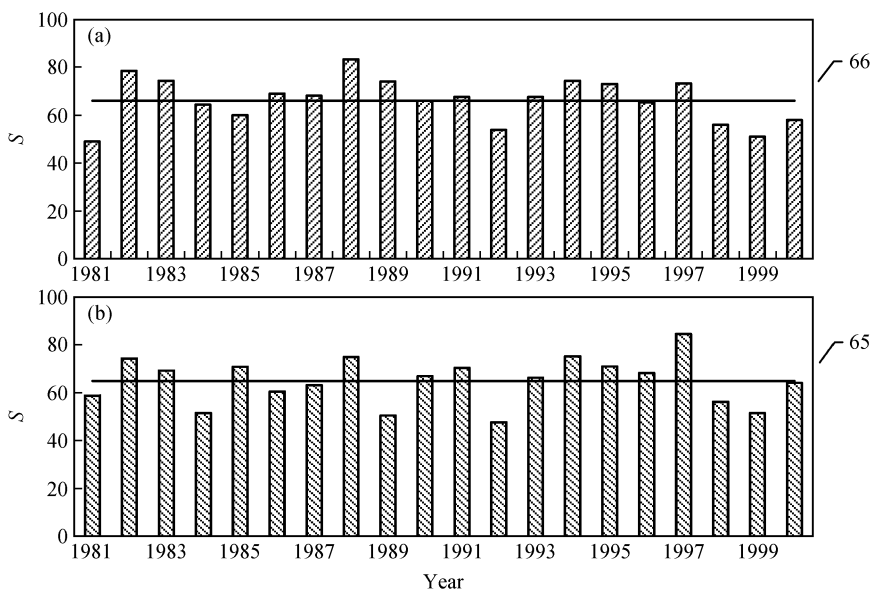


图 10 (a) 逐步回归降尺度方案预报和 (b) 最优子集回归降尺度方案预报的中国东部夏季降水的业务预报评分

Fig. 10 The operational prediction scores for (a) stepwise regression downscale forecasted and (b) optimal subset regression downscale forecasted percents of precipitation anomalies in the east of China

以及华南大部分地区, 相关系数可达到 0.4, 通过了 0.05 的显著性水平。负相关主要位于淮河流域和长江中下游地区。这说明逐步回归降尺度方案对中国东部华北地区、黄河流域以及华南地区的夏季降水异常的预报较为准确。而逐步回归降尺度方案对降水变率较大的淮河流域和长江中下游地区的夏季降水还缺少一定的预报能力。为检验逐步回归降尺度方案在业务工作上的预报效果, 按照公式 (1) 计算了 1981~2000 年每年夏季降水预报的业务评分 (图 10a)。计算结果表明, 20 年的平均业务预报评分为 66 分, 其中有 13 年的业务预报评分超过了 65 分, 这说明采用逐步回归降尺度方案的动力与统计相结合的中国东部夏季降水预报模型比纯动力模式的预报效果要好。

图 8c 给出的是东部 96 站观测与最优子集回归降尺度预报的降水距平百分率的相关分布, 正相关系数主要位于东北北部、黄淮流域以及华南大部分地区, 相关系数可达到 0.4, 通过了 0.05 的显著性水平。这说明最优子集回归降尺度方案对中国东部东北北部、黄淮流域, 尤其是华南地区的夏季降水异常的预报效果较稳定。而东北南部、山东半岛和长江中下游地区为负相关系数所占据, 说明最优子集回归降尺度对东北南部、山东半岛和长江中下游地区的夏季降水还缺少一定的预报能力。1981~

2000 年最优子集方案的 20 年的平均业务预报评分为 65 分 (图 10b), 其中有 11 年的业务预报评分超过了 65 分, 这说明采用最优子集回归降尺度方案的动力与统计相结合的中国东部夏季降水预报模型也比纯动力模式的预报效果有了提高。

通过上述分析表明, 采用逐步回归降尺度方案和最优子集回归降尺度方案明显提高了 CAM3.1 动力模式对中国东部夏季降水的预报效果, 其中最优子集回归降尺度方案对中国东部大部分地区的夏季降水都具有一定的预报技巧。但是本文中建立的动力与统计相结合的夏季降水预测模型对长江中下游地区的夏季降水异常仍然缺少一定的预报技巧。

6 小结

本文在分析我国东部地区夏季降水的时空变化特征的基础上, 利用观测数据建立东亚地区高、中、低层垂直环流结构与我国东部夏季降水典型空间分布型的相关关系, 采用两种降尺度方案, 由 CAM3.1 模式输出环流场间接的预报我国东部夏季降水场。主要结论可归纳为以下几个方面:

(1) 中国东部夏季降水量场除大范围的多寡外, 还存在 3 种典型空间分布型, 即江淮型、江南型和北方型。中国东部夏季降水不仅具有显著的准 2 年振荡, 还具有显著的年代际振荡。中国东部夏

季降水的年代际振荡在纬向上有着显著的位相差异, 且年代际振荡强弱与准 2 年振荡强弱趋势一致, 即当夏季降水处于年代际尺度降水偏多位相时, 准 2 年振荡亦显著。

(2) 东亚地区高、中、低层垂直环流的特定配置对中国东部不同类型降水有显著影响。当高层到低层均呈现乌拉尔山阻高和鄂霍次克海阻高建立, 且西太平洋副高偏强时, 东部江淮流域的夏季降水可能易偏多; 当整层亚洲极涡偏强, 贝加尔湖阻高建立, 且西太平洋副高偏强时, 东部长江中下游及其以南地区的夏季降水可能易偏多; 而当整层亚洲极涡偏弱, 中纬西风带位势高度偏高时, 北方大部地区夏季降水可能易偏多。

(3) CAM3.1 模式缺少预报中国东部地区江淮流域及其以南地区夏季降水异常的能力。分别应用逐步回归和最优子集回归法两种统计降尺度方法, 建立了中国东部夏季降水的预测模型。回报试验结果表明, 动力与统计相结合的降水预报模型的预报结果与动力模式预报相比较, 预报效果在一定程度上有了提高。

本文仅从统计的角度分析了东亚地区高、中、低层垂直环流结构与我国东部夏季降水典型空间分布型的相关关系, 对这些关系所表达的深层次的物理过程和机制还需做更进一步的探索。另外, 本文建立的统计与动力相结合的预测模型对夏季降水的预报技巧距离业务服务的要求仍有一定的差距, 这主要是由于中国东部夏季降水场自身复杂的时空特征、影响因子的复杂性、CAM3.1 模式预报环流场的误差、统计降尺度方案的设计、统计降尺度方法自身的局限性等诸多因素造成的。这些问题也有待进一步的研究。

参考文献 (References)

Boville B A. 1984. The influence of the polar night jet on the tropospheric circulation in a GCM [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41: 1132 – 1142.

Busuioc A, Chen Deliang, Hellström C. 2001. Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimate: Application for Swedish precipitation [J]. *International Journal of Climatology*, 21: 557 – 578.

陈丽娟, 李维京. 1999. 月动力延伸预报产品的评估和解释应用 [J]. *应用气象学*, 10 (4): 486 – 490. Chen Lijuan, Li Weijing. 1999. The score skill and interpretation of monthly dynamic ex-

tended range forecast [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 10 (4): 486 – 490.

陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 2003. 降尺度技术在月降水预报中的应用 [J]. *应用气象学报*, 14 (6): 648 – 655. Chen Lijuan, Li Weijing, Zhang Peiqun, et al. 2003. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 14 (6): 648 – 655.

陈兴芳, 宋文玲. 1997. 近 10 年我国降水的 QBO 分析 [J]. *应用气象学报*, 8 (4): 469 – 476. Chen Xingfang, Song Wenling. 1997. QBO analysis of precipitation in China from 1986 – 1995 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 8 (4): 469 – 476.

邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. *大气科学*, 33 (4): 835 – 846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 835 – 846.

范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 20: 320 – 329. Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. 2005. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 20: 320 – 329.

范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2007. 统计降尺度法对华北地区未来区域气温变化情景的预估 [J]. *大气科学*, 31 (5): 887 – 897. Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. 2007. Estimation of local temperature change scenarios in North China using statistical downscaling method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 887 – 897.

Frey-Buness F, Heinmann D, Sausen R. 1995. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 50: 117 – 131.

Fuentes U, Heimann D. 2000. An improved statistical-dynamical downscaling scheme and its application to the Alpine precipitation climatology [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 65: 119 – 135.

韩雪, 魏凤英, 董敏, 等. 2009. 统计预报海温场驱动的 CAM3.1 模式预报试验 [J]. *应用气象学报*, 20 (3): 303 – 311. Han Xue, Wei Fengying, Dong Min, et al. 2009. The test basing on effects of statistic forecast SST on CAM 3.1 model forecasting. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (3): 303 – 311.

Hartmann D L. 2004. The stratosphere in the climate system [J]. *SPARC Newsletter*, 22: 15 – 18.

黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. *大气科学*, 28 (4): 517 – 526. Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xiyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (4): 517 – 526.

- 黄嘉佑. 1988. 准两年周期振荡在我国月降水量中的表现 [J]. 大气科学, 12 (3): 267–273. Huang Jiayou. 1988. The representations of the quasi-biennial periodic oscillation in precipitation over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 12 (3): 267–273.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. 大气科学, 30 (4): 546–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 546–560.
- Huth R. 1999. Statistical downscaling in central Europe: Evaluation of methods and potential predictor [J]. Climate Research, 13: 91–101.
- 贾建颖, 孙照渤, 刘向文, 等. 2009. 中国东部夏季降水准两年周期振荡的长期演变 [J]. 大气科学, 33 (2): 397–407. Jia Jianying, Sun Zhaobo, Liu Xiangwen, et al. 2009. Evolution of summer precipitation quasi-biennial oscillation in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 397–407.
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. 大气科学, 23 (6): 663–671. Jin Zuhui, Tao Shiyang. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (6): 663–671.
- Kodera K, Koide H. 1997. Spatial and seasonal characteristics of recent decadal trends in the northern hemispheric troposphere and stratosphere [J]. J. Geophys. Res., 102: 19433–19447.
- Kodera K, Kuroda Y. 2000. Tropospheric and stratospheric aspect of the Arctic oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 27 (20): 3349–3352.
- 况雪源, 丁裕国, 施能. 2002. 中国降水场 QBO 分布型态及其长期变率特征 [J]. 热带气象学报, 18 (4): 359–367. Kuang Xueyuan, Ding Yuguo, Shi Neng. 2002. The distribution patterns and long term variability features for QBO over rainfall field of China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (4): 359–367.
- Li Chongyin, He J H, Zhu J. 2004. A review of decadal/interdecadal climate variation studies in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 21: 425–436.
- 李维京, 陈丽娟. 1999. 动力延伸预报产品释用方法的研究 [J]. 气象学报, 57 (3): 338–344. Li Weijing, Chen Lijuan. 1999. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (3): 338–344.
- Matthes K, Kuroda Y, Kodera K, et al. 2006. Transfer of the solar signal from the stratosphere to the troposphere: Northern winter [J]. J. Geophys. Res., 111: D06108, doi: 10.1029/2005JD006283.
- 马柱国, 邵丽娟. 2006. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 大气科学, 30 (3): 464–474. Ma Zhuguo, Shao Lijuan. 2006. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decadal oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 464–474.
- Oshima Naoko, Hisashi Kato, Shinji Kadokura. 2002. An application of statistical downscaling to estimate surface air temperature in Japan [J]. J. Geophys. Res., 107 (D10): 1401–1410.
- 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2005. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 的多尺度变化及其与中国夏季降水的关系 [J]. 高原气象, 24 (3): 366–377. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2005. Multi-scale variations of snow cover over QXP and tropical Pacific SST and their influences on summer rainfall in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (3): 366–377.
- 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展, 22 (7): 673–684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673–684.
- 孙林海, 赵振国, 许力, 等. 2005. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析 [J]. 应用气象学报, 16 (增刊): 56–62. Sun Linhai, Zhao Zhenguo, Xu Li, et al. 2005. Study of summer rain pattern in monsoon region of East China and its circulation cause [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (Suppl.): 56–62.
- van Loon H, Labitzke K. 1987. The Southern Oscillation. Part V: The anomalies in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in winter and a comparison with the Quasi-Biennial Oscillation [J]. Mon. Wea. Rev., 115: 357–369.
- 魏凤英, 张先恭, 李晓东. 1995. 用 CEOF 分析近百年中国东部旱涝的分布及其年际变化特征 [J]. 应用气象学报, 6 (4): 454–460. Wei Fengying, Zhang Xiangong, Li Xiaodong. 1995. A CEOF analysis on distribution and interannual variation of drought and flood in China during the last 100 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 6 (4): 454–460.
- 魏凤英. 2006. 长江中下游夏季降水异常变化与若干强迫因子的关系 [J]. 大气科学, 30 (2): 202–211. Wei Fengying. 2006. Relationships between precipitation anomaly over the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer and several forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 202–211.
- Widmann M, Bretherton C S, Salathé E P. 2003. Statistical precipitation downscaling over the Northwestern United States using numerically simulated precipitation as a predictor [J]. J. Climate, 16: 799–816.
- Wilby R L, Wigley T M L. 1997. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations [J]. Progress in Physical Geography, 21: 530–548.
- Wilby R L, Wigley T M L. 2000. Precipitation predictors for down-

- scaling: Observed and general circulation model relationships [J]. *International Journal of Climatology*, 20 (5): 641–661.
- 吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析 [J]. *气象学报*, 58 (5): 570–581.
- Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2000. Further analysis of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai–Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (5): 570–581.
- 武炳义, 张人禾, D'Arrigo Rosanne. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. *科学通报*, 53 (12): 1422–1428. Wu Bingyi, Zhang Renhe, D'Arrigo Rosanne. 2008. The influence of arctic pattern on precipitation in the northeast China [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 53 (12): 1422–1428.
- 杨秋明. 2006. 中国降水准 2 年主振荡模态与全球 500 hPa 环流联系的年代际变化 [J]. *大气科学*, 30 (1): 131–145. Yang Qiuming. 2006. Interdecadal variations of connections between the principal biennial oscillation pattern of rain in China and global 500 hPa circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (1): 131–145.
- 殷宝玉, 王莲英, 黄荣辉. 1996. 东亚夏季风降水的准两年振荡及其可能的物理机制 [M]//黄荣辉. 灾害性气候的过程及诊断论文集. 北京: 气象出版社, 196–205. Yin Baoyu, Wang Lianying, Huang Ronghui. 1996. East Asia summer monsoon rainfall quasi-biennial oscillation and its mechanism [M]//Huang R H. *Collected Papers on Disaster Climate Process and Diagnosis* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 196–205.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impacts of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16: 229–241.
- 赵汉光. 1986. 我国降水振荡周期特征的初步分析 [J]. *大气科学*, 10 (4): 426–430. Zhao Hanguang. 1986. Primary analysis of the rainfall period features of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 10 (4): 426–430.
- 赵平, 周秀骥. 2006. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 548–556. Zhao Ping, Zhou Xiuji. 2006. Decadal variability of rainfall persistence time and rainbelt shift over Eastern China in recent 40 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 17 (5): 548–556.
- 赵振国, 朱艳峰, 柳艳香, 等. 2008. 1880–2006 年中国夏季雨带类型的年代际变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (2): 95–100. Zhao Zhenguo, Zhu Yanfeng, Liu Yanxiang, et al. 2008. Decadal variation of summer rain-pattern in China during 1880–2006 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 4 (2): 95–100.
- 赵振国. 1996. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响 [J]. *大气科学*, 20 (4): 422–428. Zhan Zhenguo. 1996. Impact of El Niño events on atmospheric circulations in the Northern Hemisphere and precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 20 (4): 422–428.
- 朱乾根, 智协飞. 1991. 中国降水准两年周期变化 [J]. *南京气象学院学报*, 14 (3): 261–268. Zhu Qian'gen, Zhi Xiefei. 1991. Rainfall quasi-biennial variability of China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 14 (3): 261–268.