中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 2 期: 236 ~ 252
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案研究

龚志强①, 赵俊虎②, 封国林①*, 丑纪范②

① 中国气象局国家气候中心开放实验室和预测室, 北京 100081;
② 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000
* 联系人, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

收稿日期: 2014-02-17; 接受日期: 2014-07-06; 网络版发表日期: 2015-01-20
国家重大基础研究计划项目(编号: 2012CB955903)、国家自然科学基金项目(批准号: 41205040, 41105055)和国家公益性行业专项(编号: GYHY201306021)资助

摘要 基于 1983~2011 年 CMAP 降水数据分析, 揭示东亚及其近海地区(简称东亚)的夏季降水距平在 1999 年前后由"+–+"型分布(由北至南)调整为"–+–"型分布, 且这种年代际变化主要体现在 EOF 第 3 模态中; 而在国家气候中心海气耦合模式(BCC_CGCM)回报和预报资料中, 1999 年前后则由"+–+–"分布型(由北至南)调整为"–+–+"型, 即 BCC_CGCM 对降水年代际分布的预报与实况有较大差别. 同时, 结合 EOF 年代际突变分量给出了全球海温场与东亚夏季降水年代际变化有显著联系的关键海区, 分析了 BCC_CGCM 对关键区海温的预报能力及对应的东亚夏季降水预报效果的差异, 验证了基于关键区海温指数对改进模式预报结果的可能性. 在此基础上, 给出了基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案研究, 并进行独立样本回报. 结果表明, 基于 V 区海温指数订正结果的距平相关系数(ACC)达到了 0.25, 距平符号一致率(ACR)达到 61%, 7 个区域订正结果平均的 ACC 为 0.03 和 ACR 为 51%, 较 BCC_CGCM 模式结果的–0.01 和 49%均有一定的改进; 且订正后 1999 年前后两个时段降水距平的空间分布和纬圈平均演变均体现了降水型由"+–+"向"–+–"调整的特征. 因此, 基于海温关键区指数的动力-统计相结合的预报方案能够增加模式对东亚夏季降水的季节预报结果中的年代际变化信息.

关键词
年代际突变
动力-统计预测技术
东亚夏季降水
海温

东亚季风系统具有典型的年代际变化特征. 如, 20 世纪 80 年代初东亚季风出现一次明显的年代际变化(Huang 等, 2007; Ding, 2007). 同时, Kwon 等(2007)指出 20 世纪 90 年代末东亚夏季风又发生一次明显的年代际变化, 这次变化是以中国南部夏季降水明显增加为特征; Si 等(2013)的研究也表明了这次年代际变化特征是东亚夏季风降水梅雨雨带明显北移; 黄荣辉等(2011)研究也表明这次年代际变化使中国东部呈现北方降水异常偏少, 长江和江淮降水偏多的降水模态.

中文引用格式: 龚志强, 赵俊虎, 封国林, 等. 2015. 基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案研究. 中国科学: 地球科学, 45: 236–252
英文引用格式: Gong Z Q, Zhao J H, Feng G L, et al. 2015. Dynamic-statistics combined forecast scheme based on the abrupt decadal change component of summer precipitation in East Asia. Science China: Earth Sciences, 58: 404–419, doi: 10.1007/s11430-014-4967-4

同时, 大量研究(Graham, 1994; 周连童和黄荣辉, 2003; Fu 等, 2009; Huang 等, 2007; 龚志强等, 2013; Wang 等, 2012)表明, 海温异常对东亚季风系统及其夏季降水异常的年代际变化具有重要影响. 如, Gong 等(2002)的研究指出, 20 世纪 70 年代后期赤道东太平洋的海温年代际增暖导致了之后西太平洋副热带高压面积扩大, 强度增强和南撤, 其直接结果是东亚长江流域夏季降水年代际尺度增多. 周连童等(2003)认为这次年代际跃变与热带太平洋存在明显的年代际"ENSO"现象有关. 张庆云等(2007)也强调了东亚夏季风环流以及东亚东部夏季降水型的年代际变化与太平洋年代际振荡(PDO)的位相变化有相同的转折点, 并且认为北太平洋海温可能是东亚夏季风环流及中国东部夏季降水型年代际变化的重要外部强迫因子. 同时, 国内外气象学家也开展了大量关于海温异常对东亚季风系统及夏季降水的数值试验研究. 如: 徐建军等(1999)利用数值试验研究了不同年代际背景下 ENSO 事件对中国东部降水的影响. Li 等(2010)利用 CAM3 和 GFDL AM2.1 模式进行数值试验, 分别考察了热带海温、全球海温对东亚夏季风和中国夏季降水的影响, 验证了热带海温的升高, 尤其是热带中东太平洋的年代际增温是东亚夏季风在 20 世纪 70 年代减弱的主要原因.

显然, 东亚季风系统年代际尺度变化特征及其与海温等外部强迫联系的研究, 使我们对于东亚季风系统及其降水年代际变化的形成机理等有深入的认识. 与此同时, 目前面临的主要问题是动力模式对东亚地区夏季降水预报技巧相对较低(李维京等, 2005), 尤其是关于短期气候预报模式对年代际变化的预报能力还非常有限. 因此, 如何利用现有的诊断分析和数值模拟的研究成果, 基于动力模式探讨在季节预报中增强年代际变化信息的可能途径, 是当前气候变化研究的重要课题.

在提高气候预测准确率方面, 动力和统计相结合的方法被寄予厚望, 该方法能够实现统计学方法与动力学方法相互借鉴, 取长补短, 融合发展(丑纪范, 2003). 丑纪范(1986)从理论上讨论了在短期气候预测中实现动力和统计相结合的作法. 围绕统计和动力相结合的问题, 基于充分利用模式同季节降水的大尺度的环流高预测信息和前期观测信息如关键海温、大气涛动等建立我国不同季节的动力-统计降水预测系统主要思想, 各种动力统计相结合的预报方法先后被提出. 例如, 使用过去演变资料的多时刻预报方法(丑纪范, 1974)、相似动力方法(邱崇践和丑纪范, 1989; Huang 等, 1993)、基于大气自记忆原理的方法(曹鸿兴, 1993; Feng 等, 2001; 封国林等, 2001)等. 近来年, 我国年轻气象工作者围绕动力-统计相结合方法的原理, 研发了一系列业务应用的预报方案和策略(任宏利和丑纪范, 2007; 郑志海等, 2009; 赵俊虎等, 2011), 并将该方法推广到长江流域(王启光等, 2011; 龚志强等, 2012)、东北(Xiong 等, 2011)、华北(杨杰等, 2012)等不同区域. 同时, 秋季、春季和冬季等不同季节的降水预测(Wang, 2001; Liu 和 Fan, 2012a; 2012b; Lang 和 Wang, 2010)以及春季沙尘动力-统计预测(朗咸梅, 2008)研究也先后得到开展. 此外, 年际增量的预测方法兼顾年际和年代际信号相互作用, 该方法基于前一年的观测信息实现预测, 对动力模式还是观测都是客观和准确的, 并有效应用于长江中下游、华北的夏季降水预测(Fan 和 Wang, 2009)及欧洲耦合模式的东亚夏季风预测的改进等(范可等, 2008; Fan 等, 2012).

但值得指出的是, 由于受实况资料长度, 尤其是模式历史回报和预报长度的限制, 目前大多数动力-统计相结合的预报侧重季节预测, 如何应用动力统计相结合的预报原理增强季节预报中的年代际气候变化信息则是值得深入研究的新科学问题. 因此, 本文试图在分析东亚及其近海地区(简称东亚)夏季降水年代际突变特征的基础上, 确定全球海温场中与之有显著联系的关键海区. 在此基础上, 讨论国家气候中心一代海气耦合模式(BCC_CGCM)对东亚地区夏季降水年代际变化的预报能力, 分析其存在预报误差的可能原因. 最终研究基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案, 探讨如何从动力-统计相结合的角度改进 BCC_CGCM 对东亚地区夏季降水季节预报中的年代际变化信息.

1 资料和方法

1.1 资料

国家气候中心(NCC)已经建立了包含季节尺度在内的短期气候预测模式(BCC_CGCM), 即 NCC/IAP T63 海气耦合模式, 水平分辨率为 1.875°×1.875°, 垂直方向为 30 层. 每月开展滚动的季节预测, 每月的滚动季节预报为 48 个成员的集合预报. 其中大气

模式初值采用前一个月最后8天的00Z的大气同化资料, 海洋初值场为海洋资料同化系统经过扰动得到的海洋同化场, 海洋和大气初始场的组合构成季节预报的初值集合. 夏季预测试验使用了从2月底起报(预测在3月完成)的每年6~8月的夏季集合平均的回报结果(丁一汇等, 2002; 李维京等, 2005). 本文利用BCC_CGCM生成的1983~2011年共29年回报和预报数据(2005年以后是直接使用了夏季业务的预报结果), 2月底起报的每年6~8月集合平均结果, 并将其插值到2.5°×2.5°空间. 将CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation)分析资料的6~8月的总降水量作为实况观测资料, 东亚夏季降水预报误差场即这两者的差值场. 海温资料采用1961~2012年NOAA ERSST的海面温度资料(Smith和Reynolds, 2003).

1.2 基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计相结合预报方案

一般而言, 数值预报是作为偏微分方程的初值问题提出来的, 实际大气所满足的模式表示(丑纪范, 1986)为

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) = E(\psi), \tag{1}$$

式中, ψ为模式预报变量, L是ψ的微分算子, E为模式的误差算子, 反映模式中未知的总误差项, 即模式误差. 从动力学观点来看, 我们所掌握的历史资料就模式预报变量ψ的一系列特解.

数值模式是大气实际行为的一种近似, 现有的模式离足够精确还相距甚远, 多年来人们一直努力尝试如何使模式具有更可靠的物理基础及更精确的数值方法, 以此来减小模式误差$E(\psi)$. 同时, 我们所掌握的大量观测资料实际上是满足大气运动方程的一系列特解. 因此, 也可以从反问题的角度利用这些观测资料所提供的信息来弥补模式的缺陷, 达到减小模式误差的目的. 即主要是考虑使用与ψ相似的历史实况$\tilde{\psi}$所提供的模式误差信息, 把预报场视为叠加在历史相似上的一个小扰动, 引入统计相似的方法来估计当前的模式预报误差.

同时, 实际大气中包含了季节尺度、年代际变异等多种尺度的相互作用, 不同的外部强迫源必然导致不同尺度的预报误差. 因此式(1)中的模式预报误差可以理解为多种尺度误差的叠加, 如式(2)所示:

$$E(\psi) \to f(E_{\text{season}}(\psi), E_{\text{decadal}}(\psi), E_{\text{other}}(\psi)), \tag{2}$$

式中, $f()$为各种尺度模式误差的叠加函数. $E_{\text{season}}(\psi)$是季节尺度的预报误差, E_{decadal}为年代际尺度的预报误差, $E_{\text{other}}(\psi)$为其他时间尺度的误差. 大量的业务研究表明(王启光等, 2011; 杨杰等, 2012), 季节气候预测中考虑季节尺度因子对应的误差信息, 能够在一定程度改进BCC_CGCM对季节气候的预报技巧. 但实际气候预测中经常涉及季节尺度因子和年代际尺度因子不一致情况时的取舍问题.

为了验证模式(BCC_CGCM)和历史实况中年代际分量所占的比重. 首先, 我们使用小波滤波方法(Rasmusson等, 1994), 对1983~2012年的模式历史预报(及回报)和历史实况的东亚降水格点序列分别进行8~10年尺度的滤波, 进而得到的8~10年以上尺度的年代际分量. 其次, 对得到的年代际尺度的分量, 我们分别计算其与未处理的原始序列的相关, 并给出了相关系数的空间分布图(图 1). 可以看出, 无论是实况还是模式, 年代际尺度分量与原始序列的相

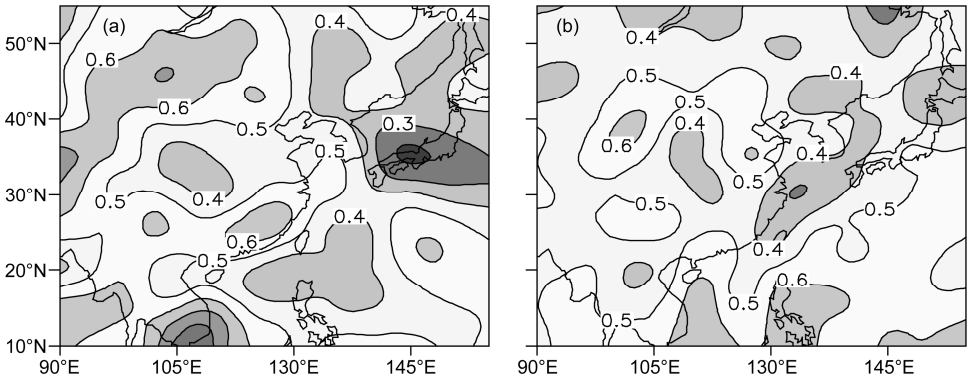


图 1 东亚实况(a)和模式预报(b)降水(1983~2013年)的低频滤波分量与原场的时间相关系数(TCC)的空间分布图

关系数大部分格点都在 0.4 以上, 通过了 95%的显著性检验, 这说明年代际尺度分量的作用是相当重要的. 最后, 我们分别计算了年代际分量和原始序列的方差, 并给出了两者方差比的空间分布图(图 2). 可以看出, 历史实况中, 年代际分量的对应的方差比, 基本都在 0.1 以上, 部分地区达到 0.3 以上; 模式结果中年代际尺度分量的方差比则基本都达到了 0.5 以上. 因此, 考虑季节因子对应误差的基础上, 更需要考虑年代际因子对应的模式预报误差, 以增加模式预报中的年代际气候变化信息.

同时, 由于多尺度相互作用的存在, 不同尺度的预报误差不是线性独立可分的, 需要得到各种尺度模式误差的叠加函数 $f()$是非常困难的. 因此, 本文的研究工作中没有将各种不同尺度的误差进行分离, 然后分别进行处理, 而是尝试从其他途径开展一些尝试性的工作.

动力-统计相结合气候预测的物理基础在于初始状态相似性持续的情况下, 动力预报结果以及预报误差行为具有相似性. 它包含了相似性和动力模式两个方面, 但后者应居主导地位(丑纪范, 1986; 任宏利和丑纪范, 2005). 换而言之, 初始两个状态的相似性可持续到后期一段时间, 那么在后期时段内, 由于两个状态之间的相似性, 就使得对应同期的动力预报结果以及误差行为也具有相似性, 这属于确定性系统的同期相似性关系. 对有动力模式参与的动力统计预报而言, 则不单纯是初始相似性的持续问题, 而更表现为相空间中临近状态点具有相似误差行为.

海温场中 PDO, AMO 等各种异常模态的存在, 必然使一些关键区的海温异常对东亚季风系统及其夏季降水异具有重要影响(Graham, 1994; 周连童和黄荣辉, 2003; 张庆云等, 2007; Fu 等, 2009; 龚志强等, 2013). 模式(BCC_CGCM)能够正确预报东亚地区夏季降水的重要前提之一必然是模式大气能够很好的响应一些关键区海温的外部强迫(Liu 和 Wen, 2008; 王会军等, 2008). 因此, 当模式对关键区海温的预报存在偏差的情况下, 完全有可能基于单个或多个关键区海温, 通过挖掘历史回报中的相似信息达到改进模式的预报偏差的效果.

基于这样的考虑, 我们给出了基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案. 图 3 给出了相应预报方案流程图, 主要技术流程如下:

(1) 基于历年的 CMAP 降水场和 BCC_CGCM 的模式预报场, 得到历年模式对东亚夏季降水预报的误差集; 基于东亚地区的夏季降水场做 EOF 展开, 确定其中包含东亚夏季降水年代际变化显著特征的 EOF 分量及其对应的时间系数.

(2) 结合 EOF 分量的时间系数, 计算其与 3 月全球海温场的相关系数, 并确定高相关的关键海区; 结合高相关的海区, 分析其与东亚夏季降水预报误差集的相关性, 相关性越好则说明该区域越有可能作为历史相似误差信息选取的关键海区.

(3) 基于这些与东亚夏季降水预报误差集的相关性较好的关键海区的海温平均值曲线, 选取历史上与当前实况海温状况最相似的年份, 并提取这些相似年份的模式对东亚夏季降水的预报误差.

(4) 将提取的历史相似误差合成, 并与当前年份 3 月份模式给出的东亚地区夏季的降水预报结果进行的叠加, 进而得到历史相似误差订正的新的预报结果.

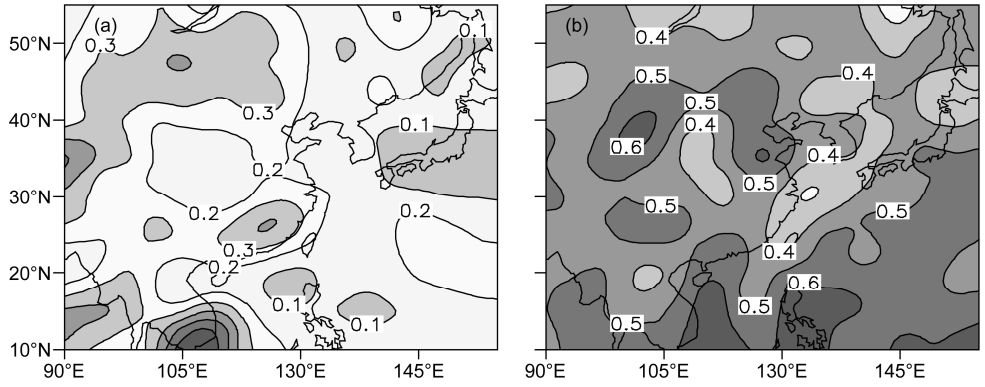


图 2　东亚实况(a)和模式预报(b)降水(1983~2013 年)的低频滤波分量的对原场的方差贡献分布图

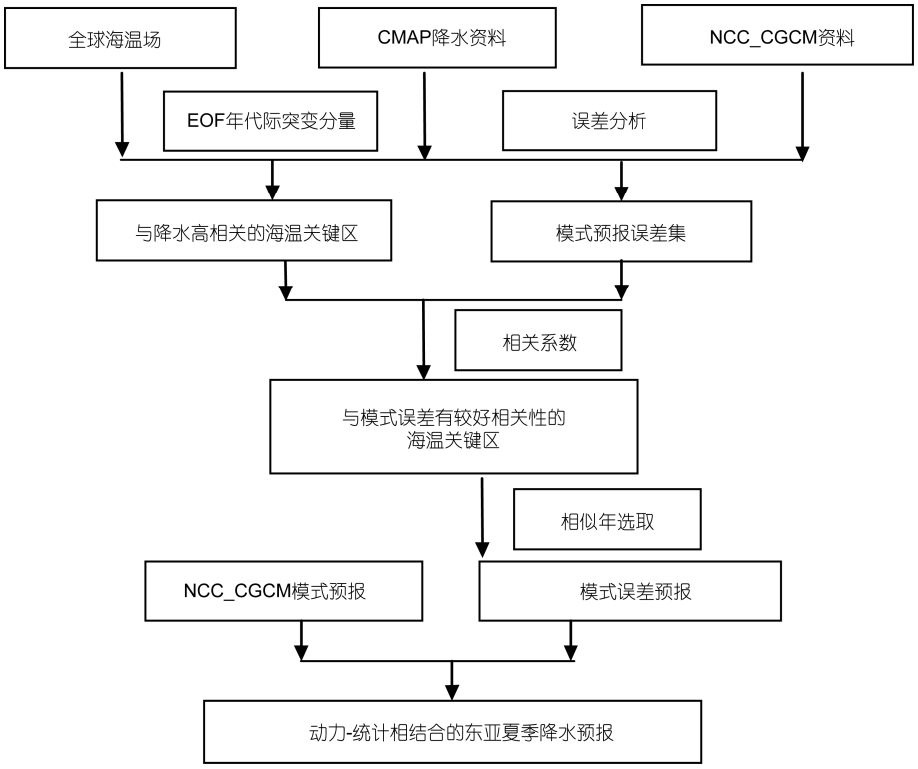


图 3　基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计相结合的预报方案流程图

本方案中的误差是直接由历年的 BCC_CGCM 的预报或回报的结果减去 CMAP 的实况得到, 虽然这样处理没有将季节尺度和其他时间尺度的误差分离, 但因为我们选取的海温关键区海温关键区的选取主要考虑了 EOF 展开后的具有年代际突变特征的分量, 基于当前海温指数寻找历史相似年的时候, 则会选取与当前具有类似年代际特征的年份, 这些年份的历史误差信息则会包含类似的年代际的变化信息, 由此来实现增加季节预报订正结果中的年代际变化信息.

2　东亚夏季降水的年代际变化

图 4(a)~(c)中, 东亚地区(90°~145°E, 10°~55°N) 1983~2011 年夏季降水距平经验正交展开(EOF)主分量的空间分布可以看出, 该区域夏季降水的第 1 模态(EOF1)是海陆差异模态, 其方差贡献为 16.7%; 第 2 模态(EOF2)为由北至南的正负交替出现的模态, 方差贡献为 11.2%; 第 3 模态(EOF3)由北至南是"+–+"的模态, 方差贡献为 8.8%; (EOF2)和(EOF3)中, 在大陆上表现"+–+"和南北向的"+–"模态, 这与魏凤英等(1988)关于中国东部夏季雨型的划分; 黄荣辉等(2011)给出的中国东部地区夏季降水的主要模态等研究成果的有关结论是一致的; 3 个模态的方差贡献均通过了 95%显著性水平的 Monte_Carlo 检验, 即每个模态是相互独立的, 这都说明了本文对东亚地区夏季降水 EOF 展开得到的降水异常模态是可信的.

图 4(d)~(f)中给出了 EOF1, EOF2 和 EOF3 的时间系数图. 可以看出, EOF1 和 EOF2 更多的表现为年际振荡, 而 EOF3 的年代际均值变化的特征较突出. 利用 MTT 方法对 EOF1, EOF2 和 EOF3 的时间系数进行年代际位相调整的检验(图 5(a)), EOF1 和 EOF2 均不存在通过 0.05 信度检验的突变点, 而 EOF3 的时间系数存在通过 0.05 信度检验的突变点, 对应的突变时间在 1998 年附近. 此外, BG 算法(龚志强等, 2006)的检测结果与 MTT 方法的类似(图略). 图 5(b)给出了对 EOF3 的时间系数小波系数图, 可以看出 EOF3 时间系数在 1999 年前后存在一次通过 95%显著性的突变, 也进一步说明了存在年代际位相调整的可能性.

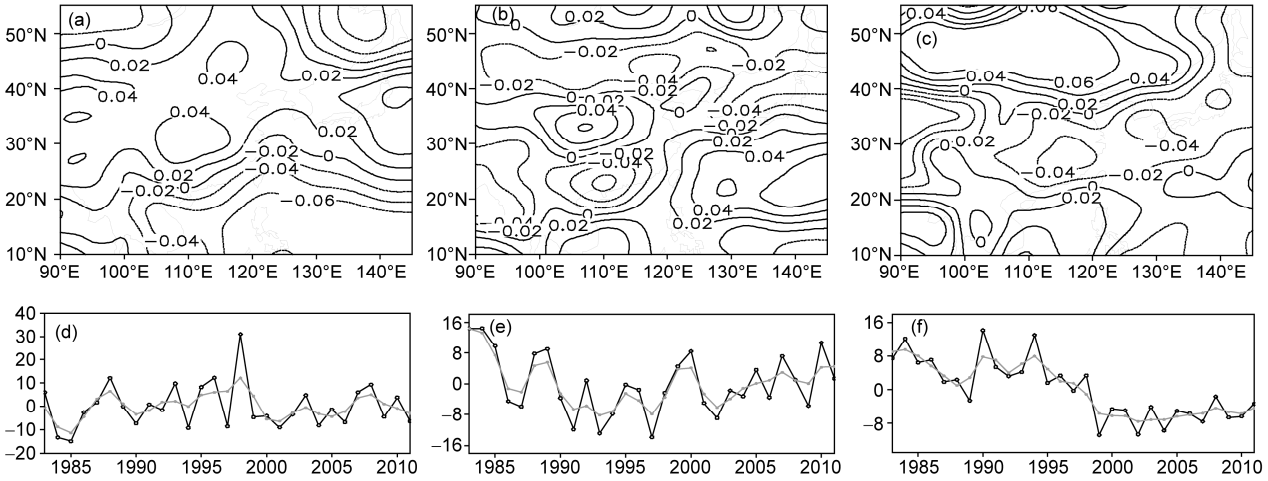


图 4　东亚地区 1983~2011 年夏季降水的 EOF 主分量的空间分布((a)~(c))和时间系数((e), (f))

(a) EOF1, 方差贡献 16.7%; (b) EOF2, 方差贡献 11.2%; (c) EOF3, 方差贡献 8.8%; (d) EOF1 对应的时间系数; (e) EOF2 对应的时间系数; (f) EOF3 对应的时间系数, 灰线为 9 点平滑曲线

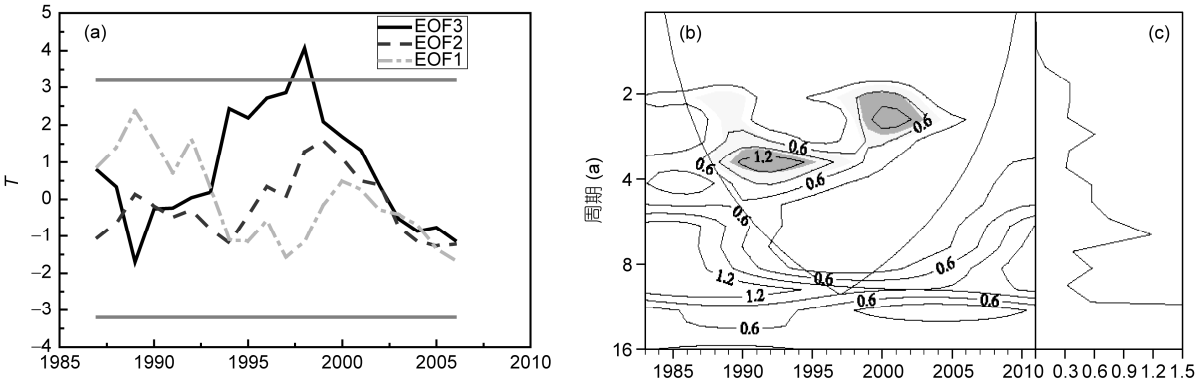


图 5　东亚 1983~2011 年夏季降水的 EOF 主分量时间系数的 MTT 检测(a)和 EOF3 时间系数的小波系数图(b)

(a)中两条平行直线为 0.05 置信度对应的阈值; (b)中极大值表示存在横坐标表对应的准周期振荡, 阴影表示通过 95%的显著性检验; (c)中横坐标为小波系数(*W*)

围绕 EOF3 中蕴含的年代际异常特征, 图 6(a)给出了东亚沿 90°~145°E 夏季降水距平百分率的纬度-时间剖面图. 可以看出, 东亚的夏季降水异常的年代际变化特征显著, 尤其是在 30°~55°N 的这种南北旱涝形势在 1999 年附近的变化. 1999 年以前表现为北方(40°~55°N)湿润, 南方(30°~40°N)干旱, 1999 年以来则更多表现为北方(40°~55°N)干旱, 南方(30°~40°N)湿润. 大量的研究也证实了这种东亚地区夏季降水的年代际变化特征(施能等, 1996; 张庆云等, 2007; 黄荣辉等, 2011; 龚志强等, 2012). 图 6(b)给出了 BCC_CGCM 预报的东亚沿 90°~145°E 夏季降水距平百分率的纬度-时间剖面图. 可以看出, BCC_CGCM 对东亚地区夏季降水的回报和预报结果中包含的关于年代际变化的信息较少, 尤其是没有能够得到 30°~55°N 范围在 1999 年附近的南北旱涝形势调整. CMAP 实况和 BCC_CGCM 预报结果在 30°N 以北地区剖面图的距平相关系数(ACC)为–0.01, 距平符号一致率(ACR)为 49%.

图 7 给出了 CMAP 实况, CGCM 模式回报和预报结果对应的 1983~1998 年和 1999~2011 年两个时段东亚夏季降水距平百分率合成图. 可以看出, CMAP 实况中 1983~1998 年的时段由北至南对应降水距平百分率"+–+"的特征(图 7(a1)), 而 1999~2011 年的时段由北至南则呈相反的"–+–"的异常特征(图 7(b1)).

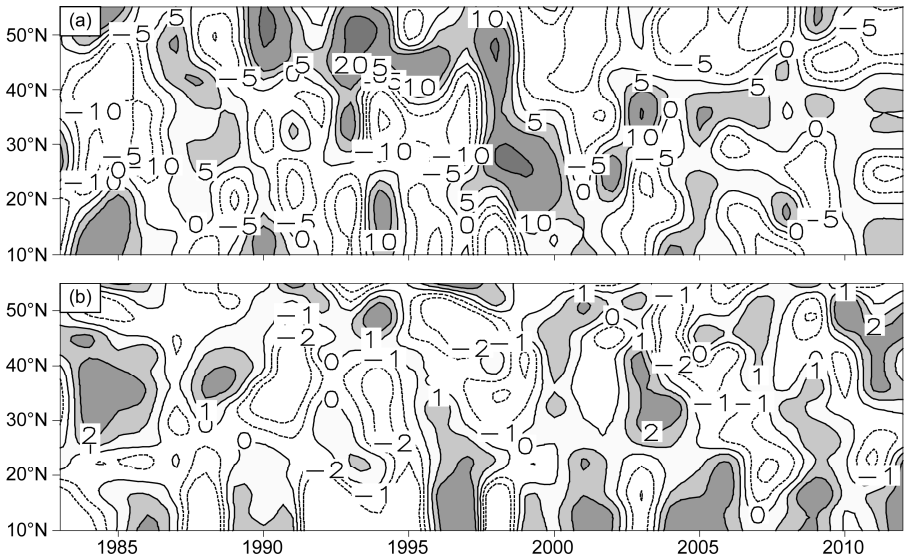


图 6　东亚沿 90°~145°E 夏季(6~8 月)降水距平百分率(%)的纬度-时间剖面图

实、虚线: 正、负距平. 阴影: 正距平. (a) CMAP, (b) NCC_CGCM

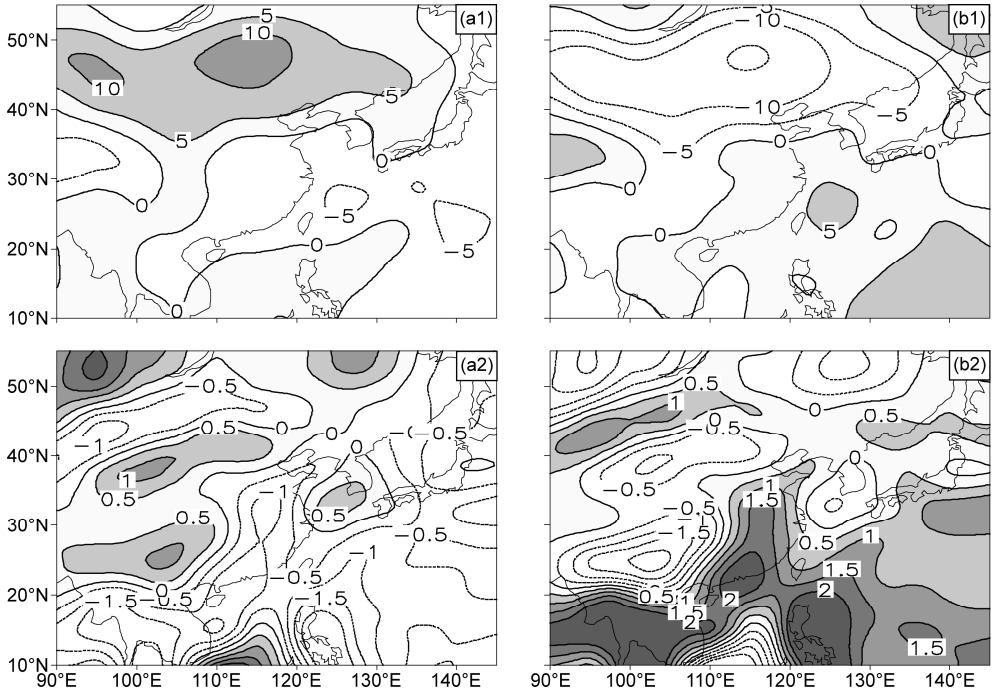


图 7　东亚夏季降水距平百分率(%)合成图

实、虚线: 正、负距平. 阴影: 正距平. (a1)~(a2)分别为 CMAP 实况的 1983~1998 年和 1999~2011 年的合成图. (b1)~(b2)同(a1)~(a2)但为 NCC_CGCM 的回报和预报结果

BCC_CGCM 的回报和预报结果中, 1983~1998 年的时段由北至南对应降水距平百分率"+−+−"的特征(图 7(a2)), 而 1999~2011 年的时段由北至南则呈相反的"−+−+"的异常特征(图7(b2)). 因此, 有必要进一步改进 BCC_CGCM 对东亚地区夏季降水预报中包含的年代际变化的信息.

3　东亚夏季降水预报中增加年代际变化信息的可能性分析

中国东部降水年代际调整的可能是由于外部强迫和大气内动力过程的共同作用, 增加 BCC_CGCM 对东亚地区夏季降水预报中年代际变化变化信息, 首先需要明确模式预报误差来源. 已有的研究表明, 东亚夏季降水的年代际变化与北太平洋和赤道太平洋的海温有密切的联系(Huang 等, 2007; 张庆云等, 2007; 邓伟涛等, 2009). 因此, 首先需要明确对东亚的夏季降水年代际突变分量有显著相关性的海温关键区(简称关键区, 余同), 然后分析模式对关键区海温的预报能力, 进而讨论 BCC_CGCM 的东亚夏季降水预报中增加年代际变化信息的可能性.

前文的分析中, EOF3 的时间系数存在年代际时间尺度的突变特征, 可以在一定程度表征东亚夏季降水年代际位相调整的特征. 我们计算了 EOF3 的时间系数与当年 3 月(主要考虑到 3 月下旬开展东亚地区的夏季降水预报会商等)全球海温场的相关系数(图 8). 可以看出, 东亚夏季降水的 EOF3 与西风漂流、赤道西太平洋、澳大利亚西南侧海域、南美洲西南端海域的海温存在显著的负相关; 与西北印度洋、赤道西太平洋中东部海域存在显著的正相关; 正负相关区均通过了 0.05 的置信度. 因此, 将全球海温场的高相关区划分为 7 个不同关键区(图 8), 负相关区包括: Ⅰ区(20°N, 42°N; 150°E, 170°W); Ⅱ区(4°S, 18°N; 128°E, 154°E); Ⅲ区 (30°S, 12°S; 128°E, 170°W); Ⅳ区(50°S, 30°S; 70°E, 110°E); Ⅴ区(64°S, 30°S; 94°W, 80°W). 正相关区包括: Ⅵ区(12°S, 10°N; 50°E, 70°E); Ⅶ区(8°S,10°N; 168°E,170°W).

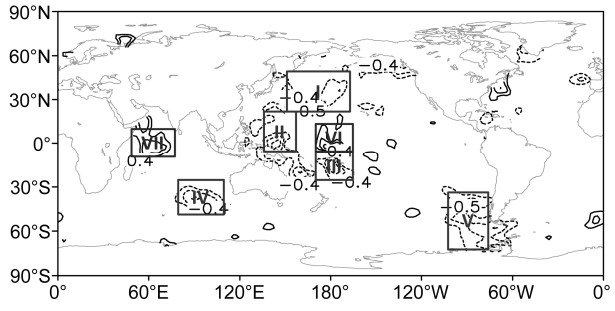


图 8　东亚 1983~2011 年夏季降水的 EOF3 时间系数与当年 3 月海温场的相关分布

Ⅰ~Ⅴ区为负相关区, Ⅵ~Ⅶ为正相关区

本文中 EOF3 的一个最显著的特征是 1999 年前后的年代际调整特征, 依此选取的关键区的海温均值曲线大多也基本包含了类似的特征, 在图 8 的海温历年曲线中可以看出. 同时, 我们对 EOF3 的时间系数做 9 年滤波的低频分量与海温场计算相关(图略), 得到的关键区与未滤波的情况相比, 空间分布相似, 但相关系数的值有所增加. 因此, 本文选取海温关键区包含了年代际调整的信号. 换而言之, 东亚夏季降水的年代际变化可能主要受这些区域海温的影响.

针对上述关键海区, 我们分别基于 NOAA 的海温资料和 BCC_CGCM 预报的海温结果, 计算相应区域 1983~2011 年 3 月的海温距平指数. 图 9 给出了 3 月全球海温场关键区的平均海温距平历史曲线图. 在此基础上, 进一步计算了两类指数的 ACC 和 ACR, 以分析 BCC_CGCM 对关键海区海温的预报效果(表 1). 可以看出, BCC_CGCM 对Ⅰ区、Ⅳ区和Ⅴ区海温的预报技巧较高, 1983~2011 年预报结果的距平相关系数均通过了 0.05 的信度检验, 距平符号一致率也都在 65%以上. 然而, BCC_CGCM 对Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅵ区和Ⅶ区海温的预报技巧较低, 1983~2011 年的预报结果的距平相关系数都没有通过 0.1 的信度检验, 距平符号一致率也多在 50%左右波动.

BCC_CGCM 对关键区的预报效果有所差异, 故全面验证模式对降水预报和海温场预报之间的联系, 既要考虑预报效果较好的关键区, 又要分析预报效果较差的关键区. 下面我们分别给出对 7 个关键区海温预报较好年份和预报较差年份对应的东亚夏季降水的预报效果. 关键区海温预报较好年份和预报较差的判断方法为: 对于预报较好年份而言, 首先海温指数的预报和实况的距平符号一致, 然后距平的绝对值超过指数序列标准偏差的 0.5 倍; 对于预报较差的年份而言, 海温指数的预报和实况的距平符号相反, 然后距平的绝对值超过 0.3 倍标准偏差(因为取 0.5 倍方差有些区域达不到条件, 故取 0.3 倍). 结合图 9 给出的 7 个关键区 3 月平均海温历史曲线和模式

表 1　7 个关键区的海温指数与 BCC_CGCM 预报指数的 ACC 和 ACR

	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区	Ⅴ区	Ⅵ区	Ⅶ区
ACC	0.46*	0.12	0.04	0.34*	0.69*	0.17	–0.05
ACR(%)	0.69	0.61	0.54	0.67	0.75	0.44	0.53

a) *表示预报效果较好的区域

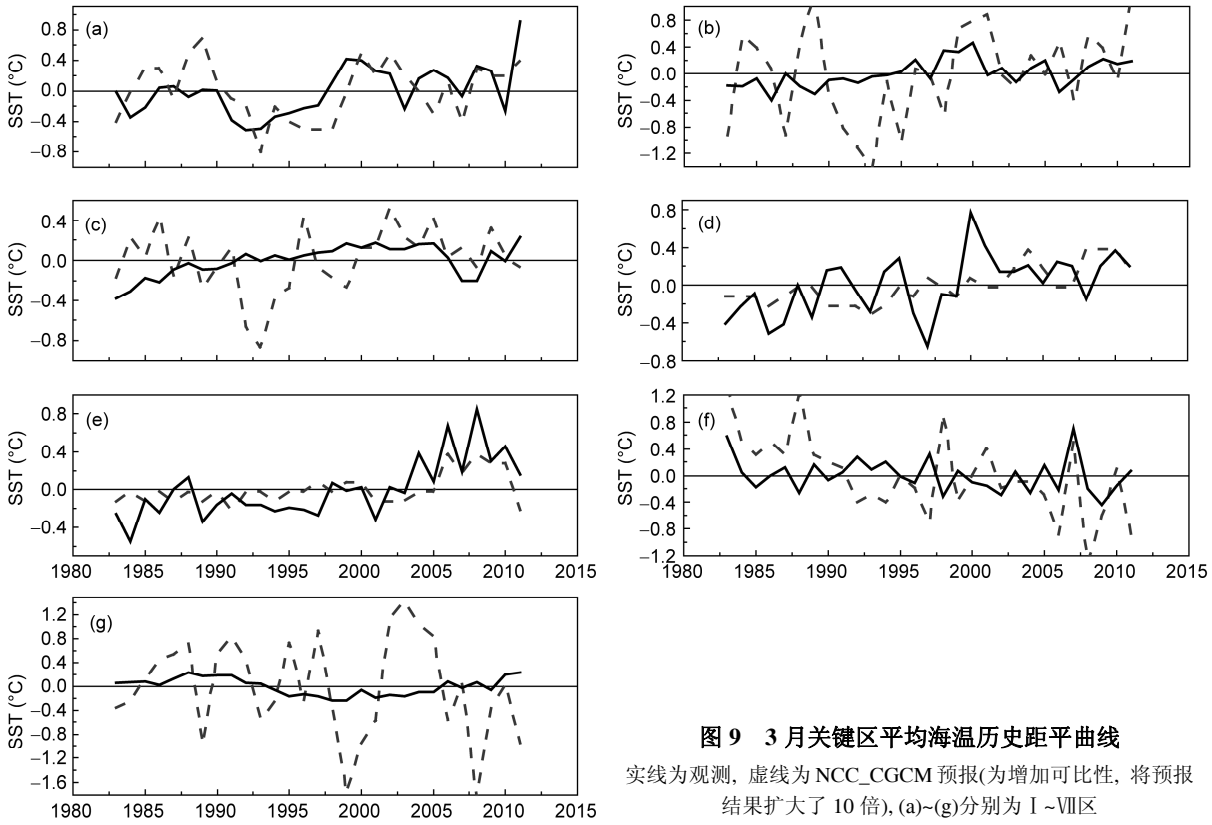


图 9　3 月关键区平均海温历史距平曲线

实线为观测, 虚线为 NCC_CGCM 预报(为增加可比性, 将预报结果扩大了 10 倍), (a)~(g)分别为Ⅰ~Ⅶ区

预报的距平曲线, 分别选取了对 7 个关键区海温预报效果较好的 5 年和预报效果较差的 5 年(表 2). 图 10 给出了模式对 7 个关键区海温场预报较好和较差年份对应的东亚夏季降水距平百分率合成图. 可以看出, BCC_CGCM 对 7 个关键区 3 月海温预报效果较好的年份, 对应东亚地区夏季降水的模式预报中, 降水异常的正负距平中心(图 10(b1)~(b7))大多与实况(图 10(a1)~(a7))相符合, 尤其是对于南北雨带的预报效果尤为显著. 相反, BCC_CGCM 对 7 个关键区 3 月海温预报效果较差的年份, 对应东亚夏季降水的模式预报中, 降水异常的正负距平中心(图 10(d1)~(d7))大多与实况(图 10(c1)~(c7))符合效果相对差一些. 表 3 分别给出了模式对 7 个关键区海温预报较好和较差的 5 年对应的东亚夏季降水预报结果的 ACC 和 ACR 的平均值. 可以看出, 除个别区域外, 对关键区海温预报较好年份的 ACC 或 ACR 高于对关键区海温预报较差年份的情况. 这里的 ACC 和 ACR 是 5 年合成分析的结果, 故难免会出现个别区域不一致的情况. 总

表 2　BCC_CGCM 对 7 个海温关键区预测较好与预测较差的年份列表

海温关键区	预测较好的 5 年	预测较差的 5 年
Ⅰ区	1992 1993 1997 2000 2011	1988 1985 2003 2005 2010
Ⅱ区	1983 1992 2000 1999 2011	1984 1986 1989 1998 2006
Ⅲ区	1983 1987 2003 2004 2005	1984 1986 1998 1999 2007
Ⅳ区	1983 1986 1993 2004 2011	1990 1991 1994 1997 2008
Ⅴ区	1983 1993 2006 2008 2010	1984 1988 1997 1999 2011
Ⅵ区	1983 2006 2007 2008 2009	1988 1994 1998 2001 2005
Ⅶ区	1987 1988 1990 1999 2001	1984 1989 2002 2003 2008

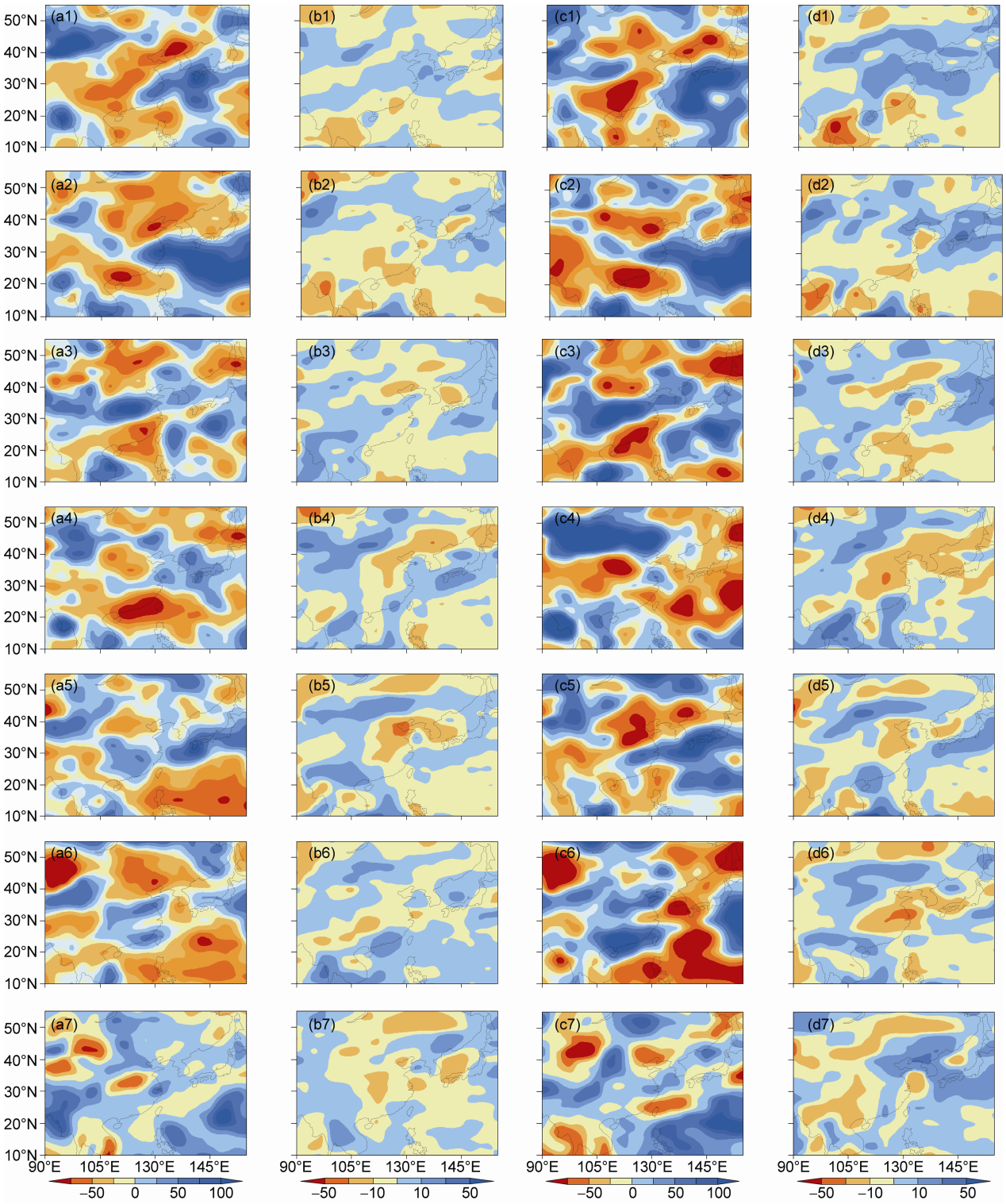


图 10　模式对 7 个关键区海温预报较好和较差年份对应的东亚(10°N~55°N, 90°E~145°E)夏季降水距平百分率合成图

(a1)~(a7)和(b1)~(b7)分别为预报较好 5 年的 CMAP 降水距平百分率和模式预报的距平百分率, (c1)~(c7)和(d1)~(d7)分别为预报较差 5 年的 CMAP 降水距平百分率和模式预报的距平百分率

表 3　模式对 7 个关键区海温预报较好和较差的 5 年的东亚夏季降水预报结果的 ACC 和 ACR

情形	方法	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区	Ⅴ区	Ⅵ区	Ⅶ区
预报效果较好 5 年	ACC	0.01	0.24*	0.13*	0.21*	0.16*	0.12*	–0.10
	ACR(%)	47	53	53	57	61	46	43
预报效果较差 5 年	ACC	–0.10	0.26*	0.08	0.21*	0.11	0.15*	–0.15
	ACR(%)	42	55	54	57	49	59	47

a) 95%的显著性的临界相关值为 0.11, *为超过 95%显著性检验的情况

体而言, 对 3 月关键区海温预报效果较好的年份, 夏季的降水预报效果也总体好于对 3 月关键区海温预报效果较差的年份, 即对关键区的总体预报效果可能直接决定夏季降水的预报的误差.

通过表 2 和表 3 的分析可以初步验证两点: (1) BCC_CGCM 对海温关键区的预报存在一定的差异性, 由此可能造成后期海温强迫下的大气响应的异常, 形成东亚夏季降水预报误差; (2) 对于关键区海温预报较好的情况, 后期的预报误差相对小一些, 即后期开展动力-统计订正具有一定的可能性.

图 11 给出了 7 个关键区 3 月海温指数与 BCC_CGCM 的夏季降水预报误差的相关分布. 总体而言, 除Ⅵ区海温指数的相关范围相对小外, 其他区的海温指数均与 BCC_CGCM 的夏季降水预报误差有较好的相关性. 其中, Ⅰ区主要与东亚北部和南部的预报误差呈显著负相关, 与副热带西太平洋局部呈显著正相关(图 11(a1)); Ⅱ区主要与贝加尔湖以西、中国东北和东亚南部及其近海等区域呈显著负相关, 与中国长江流域和日本北部等区域呈显著正相关(图 11(a2)); Ⅲ区主要与贝加尔湖附近、东亚南部及其近海等区域呈显著负相关, 与东亚西部的中部、中国东南沿海等区域呈显著正相关(图 11(a3)); Ⅳ区主要与东亚北部呈显著负相关, 与台湾附近海域呈显著正相关(图 11(a4)); Ⅴ区主要与贝加尔湖附近, 东亚南部及其近海等区域呈显著负相关(图 11(a5)); Ⅵ区的显著相关区较小, 仅在中南半岛附近存在显著正相关区(图 11(a6)); Ⅶ区主要与中国西北中东部和东南部等存在显著负相关, 与中国东北部、东亚南部至副热带西太平洋等呈显著正相关(图 11(a7)).

本文中 BCC_CGCM 对一些关键区 3 月份海温的预报效果不理想, 会导致模式中后期海洋对大气强迫的误差, 从而造成夏季降水预报误差, 此类误差信息可能也蕴含在蕴含历史信息中. 因此, 确定与夏季降水预报误差联系较大的关键海区的基础上, 可以基于 3 月关键海区的海温实况, 选取历史上与 3 月海温相似的年份, 由相似年对应的夏季降水预报误差来订正当前的模式预报结果, 可以在一定程度弥补模式对关键区海温预报效果差而导致的后期预报误差. 显然, 对 3 月关键区的海温预报误差越大, 则可能导致夏季降水预报误差也越大, 依据相应海区选取的历史相似信息对模式的订正效果则会越好. 关于这一点, 从图 10 中各海温高相关区预报效果较好和较差的情况分别对应的夏季降水预报结果可以得到验证. 丑纪范(1974)也指出天气数值预报中使用过去历史资料的重要性和可行性, 封国林等(2013)则采用动力-统计相结合的方法, 利用历史资料做预报弥补动力模式本身的缺陷, 在实际的中国夏季降水预测中取得了较好的效果. 因此, 3 月份基于 BCC_CGCM 的东亚夏季降水预测中, 根据历史上海温实况场相似年, 提取相似年份对应东亚夏季降水的模式预报误差. 然后结合提取的历史信息订正 BCC_CGCM 对东亚夏季降水的预报, 进而提高 BCC_CGCM 对东亚夏季降水的预报技巧. 由于前期关键区的选取主要考虑了东亚夏季降水 EOF 的年代际突变的分量, 故而该方法完全有可能增加 BCC_CGCM 的逐年季节预报结果中的年代际变化信息, 进而改进 BCC_CGCM 回报和预报结果中的年代际演变特征.

4　东亚夏季降水的年代际变化的动力-统计订正

上述分析的基础上, 并参照 1.2 节中的具体流程, 基于单个关键区的海温指数开展 BCC_CGCM 的东亚夏季降水预报的动力-统计误差订正的独立样本回报试验, 旨在改进模式对夏季降水预报中包含的年代际变化信息. 海温指数相似年的选取, 主要是计算历史指数与当前指数的差, 差值越小则说明越相似. 本文中给出了相似年数分别取 1~9 年时, 基于 7 个关

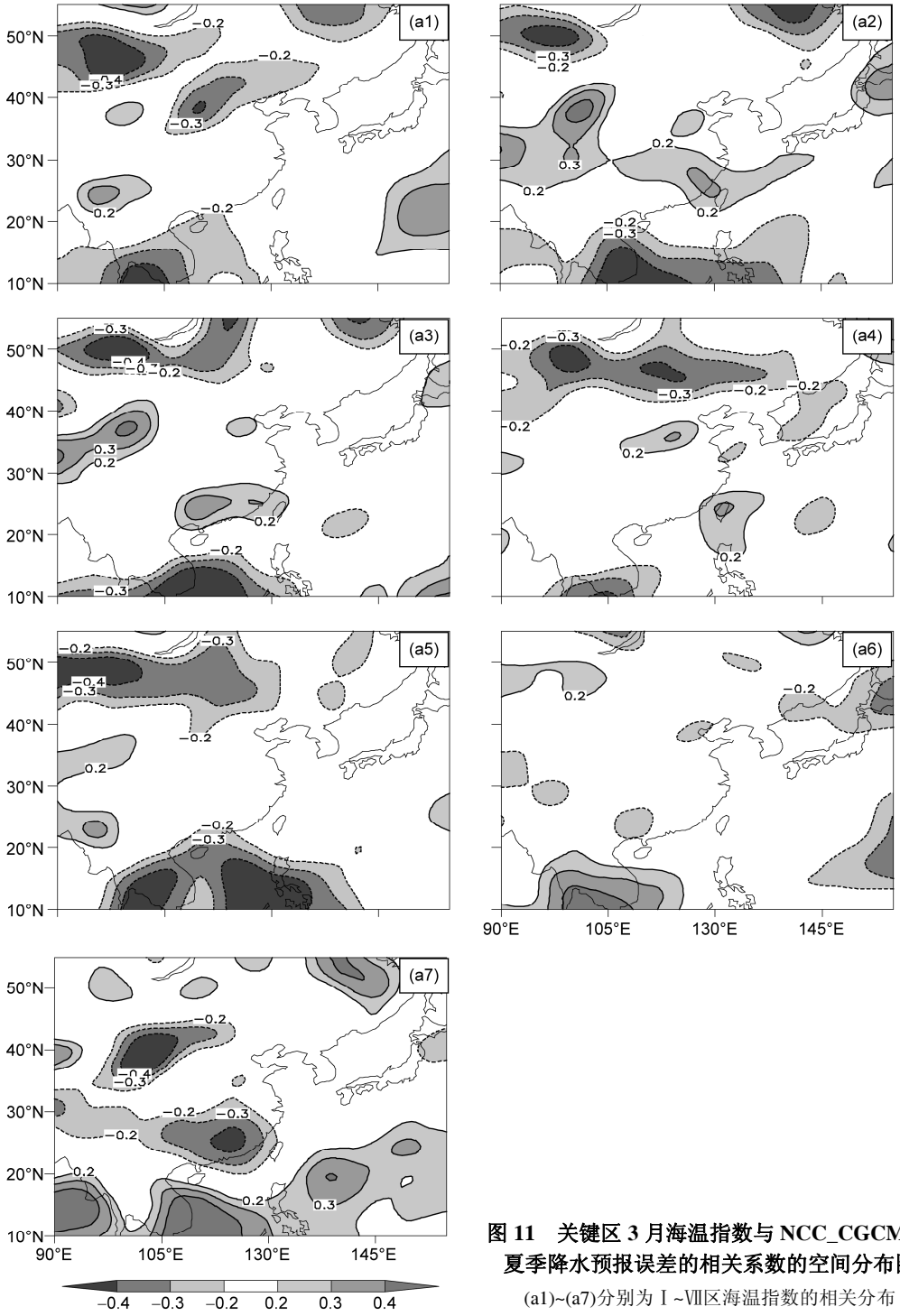


图 11　关键区 3 月海温指数与 NCC_CGCM 的夏季降水预报误差的相关系数的空间分布图

(a1)~(a7)分别为Ⅰ~Ⅶ区海温指数的相关分布

键区海温指数对东亚夏季降水进行动力-统计误差订正的平均 ACC 和 ACR. 我们选取 ACC 和 ACR 均较好情况对应的相似年数, 作为最佳相似年数. 图 12 可以看出, 相似年个数取 1~6 年时, ACR 呈波动变化, 当相似年个数大于 6 个以后则迅速下降, 且当相似年分别取 1, 3, 5 时有极大值; 同时, 相似年取 1 年或取 4~7 时, ACC 的值较大, 且 4~7 年时相对更稳定. 考虑到如果相似年个数选取 1, 即仅用 1 年的历史相似

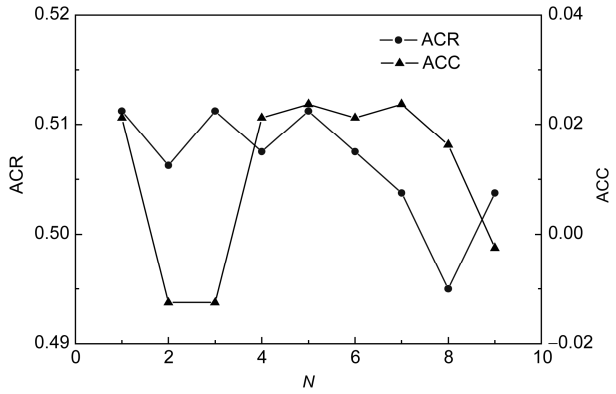


图 12　动力-统计误差订正的平均 ACR 和 ACC 随选取的相似年数的变化

信息对当前模式预报进行订正, 预测的不确定性会增加, 所以我们选取 5 个相似年进行东亚夏季降水的动力-统计订正, 主要是考虑整体平均的效果会好一些, 但对于不同的区域最优相似年的个数可以单独考虑.

图 13(a1)~(a7)分别给出了基于单个关键区海温指数的动力-统计订正的东亚的夏季降水距平百分率的纬度-时间剖面图. 多数区域的回报试验结果中, 1999 年以前东亚 40°N 以北地区降水持续偏多, 30°~40°N 区域降水以偏少为主, 而 2000 年以来 40°N 以北地区转为偏少, 30°~40°N 区域降水转为偏多为主. 这一特征与图 5(a)中 CMAP 资料的纬度-时间剖面图较好吻合, 并且这种相似性较图 5(b)的 BCC_CGCM 系统误差订正结果有一定的改进. 尤其是图 13(a5)基于Ⅴ区海温指数的回报结果, 基本给出了 1999 年以前北方地区降水异常以"+−+"为主, 2000 年以来是以"−+−"为主的东亚夏季降水的年代际变化特征. 图 13(a8)给出了上述 7 个回报试验的等权重的平均结果, 对东亚 30°N 以北地区降水的年代际变化特征也有一定的体现. 此外, 我们分别给出了基于 7 个关键区海

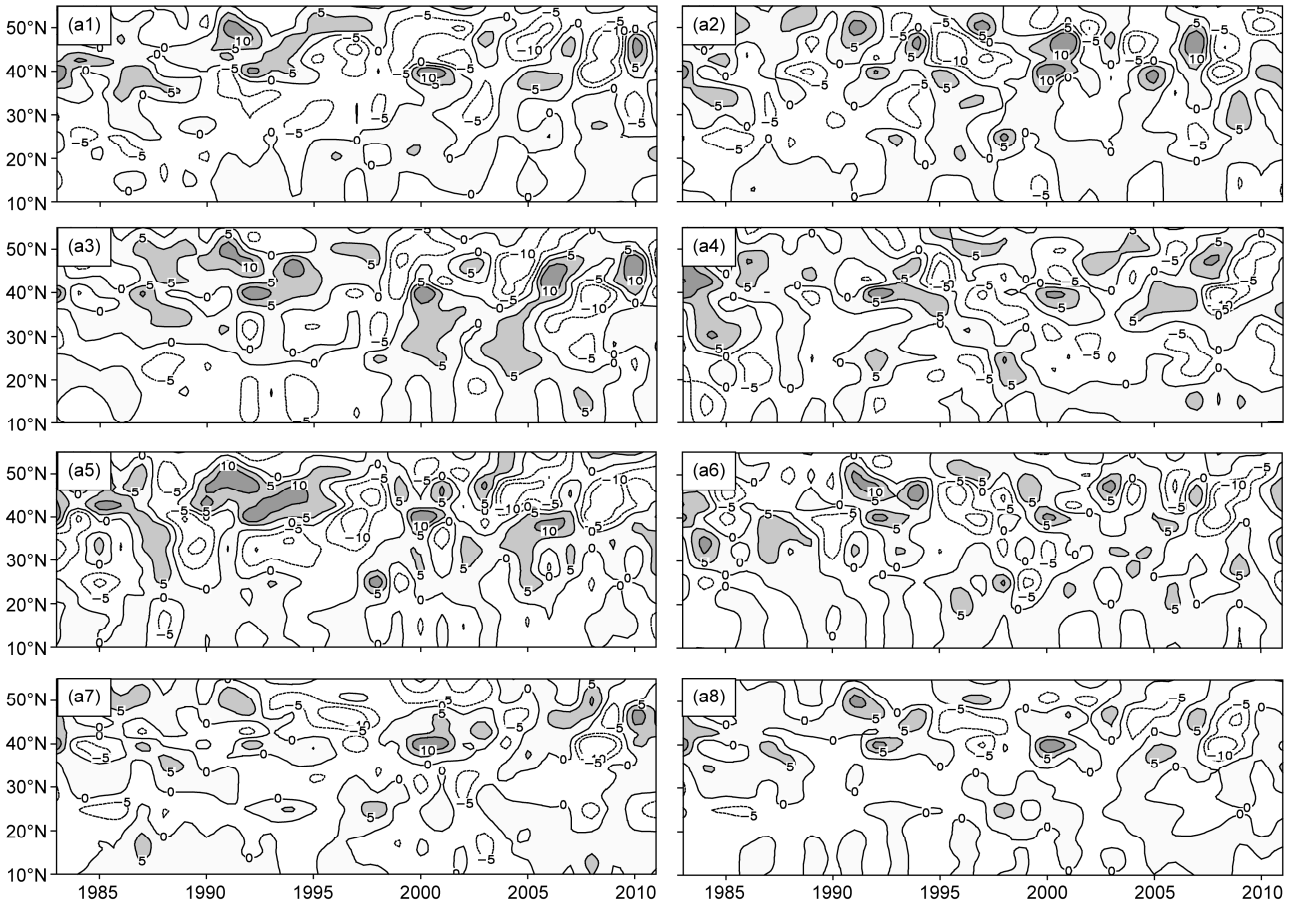


图 13　动力-统计订正的东亚沿 90°~145°E 夏季(6~8 月)降水距平百分率(%)的纬度-时间剖面图

实、虚线: 正、负距平. 阴影: 正距平. (a1)~(a7)分别为基于单个海区海温指数的订正结果, (a8)为 7 个海区订正结果的平均

温指数订正的夏季降水距百分率纬圈平均(30°N 以北地区)的 ACC 和 ACR(表 4). 基于Ⅰ区、Ⅲ区、Ⅴ区和Ⅵ区海温指数的动力-统计订正的东亚的夏季降水距平百分率纬圈平均较模式系统误差订正均有所提高, 尤其是Ⅴ区的 ACC 达到了 0.25, 距平符号一致率达到 61%. 此外, 7 个区域动力-统计订正的加权平均结果对应的 ACC 为 0.03, 距平符号一致率为 51%, 较 NCC_CGCM 模式结果的–0.01 和 49%有一定的改进.

我们给出了基于 7 个关键区订正后的以及 7 区订正结果平均的 1983~1998 年和 1999~2011 年两个时段对应的东亚夏季降水距平百分率合成图(图 14)及订正前后的中国东部夏季降水的 ACC 和 ACR(表 5). 可以看出, 两组订正结果中, 1983~1998 年时段的合成图部分表现为由北至南呈"+–+"的异常特征(图 14(a1), (a5), (a8)), 而 1999~2011 年时段的合成图部分表现为

表 4　30°N 以北地区东亚夏季降水距百分率纬圈平均的 ACC 和 ACR(独立样本回报检验&CMAP 实况)

	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区	Ⅴ区	Ⅵ区	Ⅶ区	平均值	订正前
ACC	0.02	–0.05	0.10*	–0.09	0.25*	0.02	–0.11	0.02	–0.01
ACR(%)	52	49	54	46	62	50	45	51	49

a) 90%的显著性的临界相关值为 0.10, *为相关超过 90%显著性检验的情况

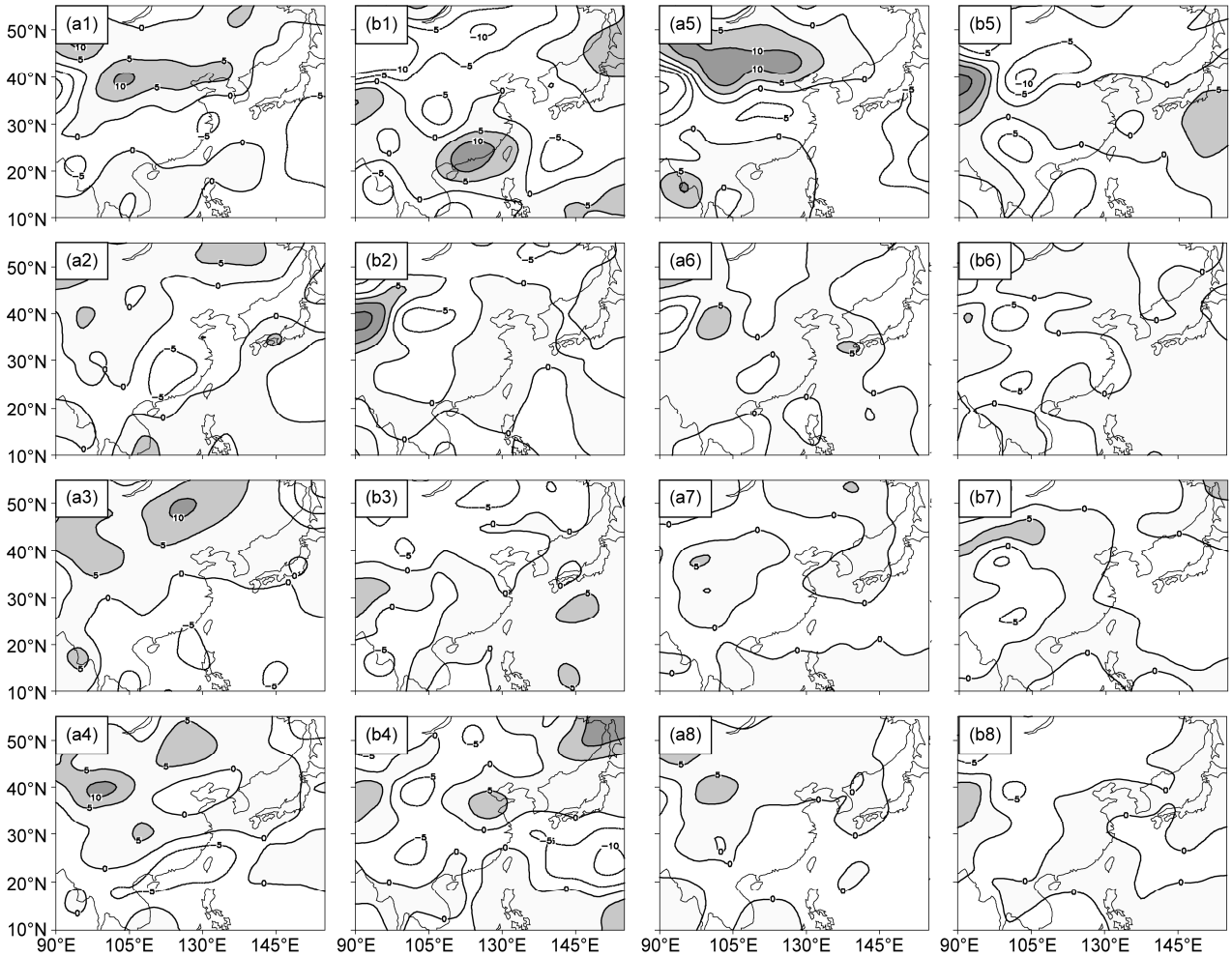


图 14　动力-统计订正的东亚夏季降水距平百分率(%)1983~1998 和 1999~2011 年合成图

实、虚线: 正、负距平. 阴影: 正距平. (a1)~(a7)和(b1)~(b7)分别为基于 7 个区的动力-统计订正, (a8)和(b8)为 7 区动力-统计订正平均

表 5　1983~1998 年和 1999~2011 年两个时段东亚夏季降水动力-统计订正前后的 ACC 和 ACR

时段 检验量	1983~1998		1999~2011	
	ACC	ACR(%)	ACC	ACR(%)
订正前	0.03	52	0.08	54
Ⅰ区	0.45*	69	0.77*	78
Ⅱ区	0.47*	65	0.22*	64
Ⅲ区	0.57*	67	0.61*	73
Ⅳ区	0.49*	65	0.38*	62
Ⅴ区	0.71*	76	0.38*	65
Ⅵ区	0.01	46	0.05	54
Ⅶ区	0.24*	58	0.02	55
7 区平均	0.70*	77	0.60*	76

a) 95%的显著性的临界相关值为 0.11, *为超过 95%显著性检验

由北至南呈“–+–”为主的异常特征(图 14(b1), (b5), (b8)). 显然, 这个结果和图 7((a1), (b1))中 CMAP 的实况较接近, 较图 7((a2), (b2))中 BCC_CGCM 的预报结果由较大程度的改进. 同时, 基于关键海区的动力统计订正结果的 ACC 和 ACR 除Ⅵ区不太理想外(表 5), 其余的均明显优于为订正前的情况. 7 区订正结果平均的 ACC 和 ACR 在 1983~1998 年时段为 0.70 和 77%, 1999~2011 年时段为 0.60 和 76%, 明显大于为未订正前的 0.03, 52%和 0.08, 54%. 因此, 基于 7 个关键区海温指数的动力统计订正结果中蕴含的东亚夏季降水年代际变化的信息明显高于未订正前的情况. 综合考虑表 4 中 30°N 以北地区东亚夏季降水距百分率的时间-纬度剖面图的 ACC 和 ACR, 基于Ⅴ区和 7 区平均的订正结果的较好, 所以在实际业务中可以重点参考Ⅴ区订正和 7 区平均的结果.

5　讨论和结论

本文基于 1983~2011 年的 CMAP 降水数据, 分析了东亚夏季降水年代际变化特征, 通过 MTT 检验和降水距平纬圈平均的时间演变图等, 明确了东亚地区在 1999 年附近存在显著的年代际调整. 1999 年之前, 东亚地区降水距平百分率由北至南呈“+–+”分布型, 1999 年之后, 则主要呈现由北至南的“–+–”型分布, 且这种年代际变化主要体现在 EOF 分解的第 3 模态中. 同时, 结合 BCC_CGCM 回报和预报的 1983~2011 年东亚夏季降水资料, 分析模式对东亚及其夏季降水年代际变化的预报能力发现, BCC_CGCM 的回报和预报资料中, 1999 年之前, 东亚地区降水距平百分率由北至南呈“+–+–”分布型, 1999 年之后, 则主要呈现由北至南的“–+–+”型分布, 其降水的年代际分布型与实况有较大差别.

围绕增加 BCC_CGCM 对东亚夏季降水的季节预报中的年代际变化信息, 我们首先分析了全球海温场与东亚夏季降水年代际突变分量显著相关的关键海区. 然后, 分析了 BCC_CGCM 对关键区海温的预报的能力, 结合对关键区海温预报正确和预报错误情况下, 对应的东亚夏季降水预报效果的差异, 证实了 BCC_CGCM 对关键区海温的预报能力区域差异大, 模式预报误差的产生与关键区海温有重要的联系. 最后, 我们结合关键区的海温指数, 给出了基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案研究, 并进行 1983~2011 年的独立样本回报试验. 由历年回报结果, 给出了动力-统计订正的东亚沿 90°~145°E 夏季降水距平百分率的纬度-时间剖面图, 1999 年前后两个时段的降水距平百分率合成的空间分布图. 总体而言, 动力-统计相结合的预报方案能够较好的改进模式季节预报中包含东亚的 30°N 以北地区降水的年代际变化信息. 基于Ⅰ区、Ⅲ区、Ⅴ区和Ⅵ区海温指数的动力-统计订正的东亚的夏季降水距平百分率纬圈平均较模式有所提高, 尤其是Ⅴ区的 ACC 达到了 0.25, 距平符号一致率达到 61%. 7 个区域动力-统计订正的加权平均结果对应的 ACC 为 0.03, 距平符号一致率为 51%, 较 CGCM 模式结果的 –0.01 和 49%有一定的改进.

前后两个时段降水距平百分率的空间分布图而言, 基于Ⅵ区的动力-统计订正, 7 区的平均结果中, 1983~1998 年时段的合成图均表现为由北至南呈“+–+”的异常特征, 而 1999~2011 年时段的合成图均表现为由北至南呈“–+–”为主的异常特征, 均与 CMAP 的实况较接近, 较 BCC_CGCM 的预报结果由较大程度的改进. 7 区订正结果平均的 ACC 和 ACR 在 1983~1998 年时段为 0.70 和 77, 1999~2011 年时段为 0.60 和 76%, 明显大于未订正前的 0.03, 52%和 0.08, 54%. 因此, 基于关键海区提取 BCC_CGCM 预报误差的历史相似信息, 从动力-统计相结合的角度改进 BCC_CGCM 对东亚夏季降水的预报能力, 尤其对增加季节预报结果中的年代际变化信息具有一定的促进作用.

参考文献

曹鸿兴. 1993. 大气运动的自忆性方程. 中国科学 B 辑, 23: 104–112
丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学 A 辑, 6: 635–644
丑纪范. 1986. 为什么要动力-统计相结合-兼论如何结合. 高原气象, 5: 367–372
丑纪范. 2003. 短期气候预报的现状问题与出路(一). 新疆气象, 26: 1–4
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. 大气科学, 33: 835–846
丁一汇, 刘一鸣, 宋永加, 等. 2002. 我国短期气候动力预报模式系统的研究及试验. 气候与环境研究, 7: 236–246
封国林, 曹鸿兴, 魏风英, 等. 2001. 长江三角洲汛期预报模式的研究及其初步应用. 气象学报, 59: 206–212
封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 2013. 动力-统计客观定量化汛期降水预测研究新进展. 应用气象学报, 24: 656–665
范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38: 1452–1459
龚志强, 赵俊虎, 封国林. 2013. 中国东部 2012 年夏季降水及年代际转型的可能信号分析. 物理学报, 62: 099205
龚志强, 支蓉, 周磊, 等. 2012. 赤道中东太平洋海温关联指数及其与中国夏季降水的联系研究. 气象学报, 70: 1074–1083
龚志强, 封国林, 万仕全, 等. 2006. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征, 物理学报, 55: 477–484
黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系. 大气科学, 35: 589–606
李维京, 张培群, 李清泉, 等. 2005. 动力气候模式预报系统业务化及其应用.应用气象学报, 16(增刊): 1–11
郎咸梅. 2008. 中国华北春季沙尘天气频次的气候预测模型. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38: 508–518
邱崇践, 丑纪范. 1989. 天气预报的相似-动力方法. 大气科学, 13: 22–28
任宏利, 丑纪范. 2005. 统计-动力相结合的相似误差订正法. 气象学报, 63: 988–993
任宏利, 丑纪范. 2007. 动力相似预报的策略和方法研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37: 1101–1109
施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常. 大气科学, 20: 575–583
王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等. 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果. 大气科学, 32, 806–814
王启光, 封国林, 郑志海, 等. 2011. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量化预测研究. 大气科学, 35: 287–297
魏风英, 张先恭. 1988. 我国东部夏季雨带类型的划分及预报. 气象, 14: 15–19
杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 等. 2012. 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验. 大气科学, 36: 11–22
张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系. 大气科学, 31: 1290–1300
赵俊虎, 封国林, 王启光, 等. 2011. 2010 年我国夏季降水异常气候成因分析及预测. 大气科学, 35: 1069 –1078
郑志海, 黄建平, 任宏利. 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值试验. 物理学报, 58: 7359–7367
周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. 气候与环境研究, 8: 274–290
徐建军, 朱乾根. 1999. ENSO 及其年代际异常对全球及亚洲季风降水影响的数值研究. 气象学报, 57: 301–215
Ding Y H. 2007. The variability of the Asian summer monsoon. J Metoer Soc Japan, 85B: 21–54
Fan K, Wang H J. 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific. Weather Forecast, 24: 974–978
Fan K, Liu Y, Chen H P. 2012. Improving the Prediction of the East Asian Summer Monsoon: New Approaches. Weather Forecast, 27: 1017–1030
Feng G L, Cao H X, Gao X Q, et al. 2001. Prediction of precipitation during summer monsoon with self-memorial model. Adv Atmos Sci, 18: 701–709
Fu J J, Li S L, Luo D H. 2009. Impact of global SST on decadal shift of east summer climate. Adv Atmos Sci, 26: 192–201
Gong D, Ho C. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. Geophys Res Lett, 29: 1436–1439
Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results. Clim Dyn, 9: 135 –162
Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. 1993. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. Q J R Meteorol Soc, 119: 547–565
Huang R H, Chen J L, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. Adv Atmos Sci, 24: 993–1023
Kwon M H, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s. Geophys Res Lett, 34: L21706
Lang X, Wang H J. 2010. Improving extra seasonal summer rainfall prediction by merging information from GCMs and observations. Weather Forecast, 25: 1263–1274
Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000. Clim Dyn, 34: 501–514

Liu Y, Fan K, 2012b. Improve the prediction of summer precipitation in the southeastern china by a hybrid statistical downscaling model. Meteorol Atmos Phys, 117: 121–134

Liu Y, Fan K. 2012a. A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China. Int J Climatol, 33: 1321–1336

Liu Z, Wen N. 2008. On the assessment of non-local climate feedback part I: Generalized equilibrium assessment. J Clim, 21: 134–148

Rasmusson E M, Wang X L, Ropelewski C F. 1994. Secular Variability of ENSO Cycle. San Dong: Academic Press

Si D, Ding Y H. 2013. Decadal change in the correlation pattern between the tibetan Plateau winter Snow and the East Asian summer precipitation during 1979–2011. J Clim, 26: 7622–7634

Smith T M, Reynolds R W. 2003. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data 1854–1997. J Clim, 16: 1495–1503

Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. Adv Atmos Sci, 18: 376–386

Wang X J, Feng A X, et al. 2012. Collective behavior of climate indices in the North Pacific air-sea system and its potential relationships with decadal climate changes. Chin Phys B, 21: 029201

Xiong K G, Feng G L, Huang J P, et al. 2011. Analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors. Acta Meteor Sin, 25: 316–326