

何慧根, 李巧萍, 吴统文, 等. 2014. 月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估 [J]. 大气科学, 38 (5): 950–964, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13166. He Huigen, Li Qiaoping, Wu Tongwen, et al. 2014. Temperature and precipitation evaluation of monthly Dynamic Extended Range Forecast operational system DERF2.0 in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 950–964.

月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估

何慧根^{1,3} 李巧萍² 吴统文² 唐红玉¹ 胡泽勇³

1 重庆市气候中心, 重庆 401147

2 国家气候中心, 北京 100081

3 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

摘 要 基于国家气候中心第二代月动力延伸预测模式业务系统 (DERF2.0) 开展的 1982~2010 年的回报试验结果和国家气象信息中心提供的 669 个台站气象观测资料, 利用距平相关系数 ACC、平均方差技巧评分 MSSS、距平符号一致率 R 和短期气候预测业务分级检验 Pg 等 4 种方法综合评估了 DERF2.0 系统对中国的气温和降水的预测性能。结果表明, DERF2.0 模式对气温的总体预测效果较好, 对气温的预测性能较 DERF1.0 模式有了较明显的提升。与过去全国的短期气候预测业务评分相比, DERF2.0 对气温和降水的预测都有所提高。与气温相比, DERF2.0 对降水的预测性能相对较差, 对降水的预测水平与 DERF1.0 相接近。DERF2.0 对发生在 1998 年和 2006 年的极端旱、涝个例年也有一定的预测能力, 且对气温的预测明显好于降水。从空间上来看, DERF2.0 在西南地区的确定性预测效果较差, 模式仍然有很大的改进空间。

关键词 BCC_AGCM 月动力延伸 DERF2.0 月预测 预测性能

文章编号 1006-9895(2014)05-0950-15

中图分类号 P435+.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13166

Temperature and Precipitation Evaluation of Monthly Dynamic Extended Range Forecast Operational System DERF2.0 in China

HE Huigen^{1,3}, LI Qiaoping², WU Tongwen², TANG Hongyu¹, and HU Zeyong³

1 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 Key Laboratory for Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract On the basis of the data of 669 observed weather stations supplied by the National Meteorological Information Center and hindcast data of the National Climate Centre second-generation monthly Dynamic Extended Range Forecast operational system (DERF2.0) from 1982 to 2010, temperature and precipitation in the prediction performance were evaluated and analyzed by using the anomaly correlation coefficient (ACC), mean square skill score (MSSS), anomaly sign consistency rate (R), and short-term climate prediction operational grading evaluation scores (Pg). The results indicated that the temperature prediction performance of DERF2.0 was significantly better than that of the DERF1.0

收稿日期 2013-05-02, 2014-01-24 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) “气候变暖背景下我国南方旱涝灾害的变化规律和机理及其影响与对策” 2013CB430204, 国家科技支撑项目 “持续性异常气象事件预测业务技术研究” 2009BAC51B01, 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金 LPCC201202, 中国气象局气象关键技术集成与应用面上项目 CMAGJ2013M40, 重庆市气象局业务技术攻关面上项目 ywgg-201311

作者简介 何慧根, 男, 1979 年出生, 硕士, 主要从事短期气候预测和评估研究。E-mail: hhg0258@163.com

operational system in current usage and that the ACC skill score of temperature was noticeably higher than the operational score of the short-range climate forecast. Compared with temperature, the precipitation prediction performance of DERF2.0 was relatively poor. The ACC skill score of precipitation of DERF2.0 was close to that of DERF1.0. DERF2.0 was somewhat skillful in extreme drought and flood years such as 1998 and 2006. Furthermore, the prediction performance of temperature was significantly better than that of precipitation in extreme drought and flood years. From space, the prediction performance of DERF2.0 on the deterministic prediction was poor in the southwest. Thus, DERF2.0 should be improved.

Keywords BCC_AGCM, Monthly dynamic extended range forecast, DERF2.0, Monthly prediction, Prediction performance

1 引言

业务上月尺度气候预测尝试始于 20 世纪 80 年代。自 Miyakoda et al. (1983, 1986) 的一系列月平均环流场异常预测成功后, 长期数值预报迅速发展。最具代表性的欧洲中期数值模式预报中心 (ECMWF) 于 20 世纪 90 年代初就建立了基于持续性海温异常强迫、高分辨率的月尺度气候预测系统 T159L40, 2004 年该系统发展为集合成员达 51 个的海气耦合月尺度集合预测系统 (李维京, 2012)。美国的气候预测中心 (NCEP/CPC) 也于 2004 年基于 NCEP 的大气、海洋和陆地同化资料, 发展了分辨率为 T62L64 (水平近似于 210 km) 的海气耦合模式 CFSv1, 该模式初始场由 15 个不同时间的样本集合而成。2011 年 NCEP/CPC 推出了包含 16 个集合成员、积分时间达 45 天的第二代模式系统 CFSv2, 其水平分辨率提升为 T126 (近似于 100 km) (Saha et al., 2012)。日本气象厅 (JMA) 的集合月动力延伸预报模式由日本的全球大气环流模式 TL159 (近似于 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$) 采用由 JMA 气候资料同化系统提供的初值积分而成, 系统集合了 50 个成员, 每周运行两次 (JMA, 2010)。成立于 2005 年的亚洲太平洋经济合作组织气候中心 (APCC) 集合了美国、日本、加拿大、中国等国家的 15 个模式, 提供全球和东亚地区未来 3 个月的逐月气候预测产品 (Wang et al., 2009)。以上国外模式产品被广泛应用于短期气候预测之中, 目前已成为了月尺度气候预测的主要工具。

“九五”期间, 在国家重中之重点项目“我国短期气候预测业务系统的研究”的支持下, 国家气候中心和中国科学院大气物理研究所共同研制出中等分辨率的全球大气环流模式 BCC_AGCM1.0 (Beijing Climate Center Atmospheric General Circulation Model version 1.0)。该模式水平方向采

用三角形截断, 取 63 波 (近似于 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$), 垂直方向分 16 层 (T63L16) (丁一汇等, 2002)。基于该模式建立了国家气候中心第一代月动力延伸预测模式业务系统 DERF1.0 (Dynamic Extended Range Forecast operational system version 1.0)。该系统初值形成包含滞后平均法和奇异向量法, 对不同的初值进行 45 天积分, 并利用不同的方法进行集合信息提取, 形成最终产品。该系统提供的月预测为逐旬滚动, 每月运行 3 次 (每旬一次), 分别以每旬的最后 4 日 4 个时次的初始场为基本初值, 海温场选用距初值最近的周平均实况海温, 进行 30 天平均集合预报, 集合的最大成员数可达 64 个 (张培群等, 2004)。该模式于 2001 年 6 月进行业务化试验运行, 2005 年作为我国第一代短期气候预测动力气候模式业务系统的重要组成部分投入了业务应用。该模式产品已成了我国月预测的主要参考依据之一。

2005 年起, 国家气候中心基于美国国家大气研究中心 NCAR (Nation Center for Atmospheric Research) 的 CAM3.0 模式 (Community Atmospheric Model version 3.0), 发展了第二代全球大气环流谱模式 BCC_AGCM2.0.1。其水平分辨率为 T42 (近似于 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$), 垂直方向采用混合坐标, 共 26 层 (郭准等, 2011)。该模式引入了参考大气和参考面气压, 改进了对流参数化等物理过程 (Zhang and Mu, 2005; Wu et al., 2008), 并对模式边界层进行了处理, 加入了新的感热和潜热通量计算方案 (董敏等, 2009), 采用了 Wu et al., (2004) 提出的雪盖参数化方案。其他模式物理参数化方案, 如辐射过程传输、陆面过程、边界层过程等与 CAM3.0 相同 (颀卫华和吴统文, 2010)。该模式的具体介绍详见文献 Wu et al. (2010)。2008~2009 年, BCC_AGCM2.0.1 在线耦合了气溶胶模式 (CUACE)、大气化学模式 (MOZART), 还实现

了碳通量交换,建立了包含全球碳循环和动态植被的海—陆—气—冰圈层耦合的气候系统模式 BCC_CSM1.1 版本。该系统已用于 CMIP5 模式比较计划的相关试验。

以往研究表明 BCC_AGCM2.0.1 模式对天气尺度的演变过程具有 4~7 d 的可预报性(颉卫华和吴统文, 2010),对热带大气季节内振荡有较好的预测效果,且明显优于 CAM3.0 模式(董敏等, 2009),对极端温度事件及其趋势变化有较好的预测效果(Dong et al., 2012)。能预测出南涝北旱的格局,还能预测出对流层中上层变冷则西风急流向南倾斜,西南季风偏弱,雨带也随之偏南的相互关系,但对流层的冷中心和大尺度环流的预测存在着偏差(Chen et al., 2012)。对北半球冬季环流场也存在一定的偏差,极涡振荡的振幅较强,振荡的时间也有所漂移,平流层极涡存在偏冷、偏强现象,对流层副热带西风急流偏弱(刘玉镇等, 2012)。

近几年来国家气候中心对 BCC_AGCM2.0.1 再次进行了优化,2011 年 3 月完成了 BCC_AGCM2.2 版本的定型。在模式分辨率方面, BCC_AGCM2.2 比 CAM3.0 有所提高,水平分辨率从原来的 T42 提高到 T106,垂直分为 26 层(T106L26)。在 BCC_AGCM2.2 版本的基础上建立了第二代月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0。第二代月动力延伸预测模式业务系统从模式结果本身、分辨率等方面与第一代相比进行了较大的调整。该系统性能稳定,2014 年应用于预测业务。DERF2.0 的大气初始场采用 NCEP 一日四次的再分析资料,资料使用 nudging 方法输入到模式,海表温度初始场采用 NOAA 的 OISST 再分析资料,包括月平均资料和周平均资料,在资料能够获取的情况下使用最近的周平均资料,在模式中保持初始海温异常持续。本文分析的回报试验结果使用的是每月 1 日起报,预报 2 个月。每月集合预报采用滞后平均方案,由不同起报时间组成,从起报之日向前每隔 12 小时进行一次,共 6 个样本成员进行集合平均。

本文基于 DERF2.0 开展的 1982~2010 年的回报试验结果,利用对模式要求较为严格的距平相关系数 ACC、平均方差技巧评分 MSSS (Mean square skill score)、距平符号一致率 R 和短期气候预测业务分级检验 P_g 评分等 4 种方法综合评估 DERF2.0 的预测性能,为科学利用该模式进行旬、月尺度气候预测提供科学基础,为进一步改进模式性能提供

科学依据,以期提高我国短期气候预测业务服务的准确率。

2 资料来源和数据处理方法

以往的模式评估和业务预测质量评估中都采用全国 160 站实测资料作为评估标准(陈桂英和赵振国, 1998; 丁一汇等, 2004)。一方面近年来模式的分辨率在不断提高,另一方面全国 160 个台站分布不均匀,呈东多西少的分布特征,很难正确反映模式对我国西部地区的预测性能。

本文所用资料主要包括:(1)从全国 756 个站中挑选出资料相对完整的 669 个气象站 1982~2010 年气温和降水资料(来源于中国气象局气象信息中心),气象站分布如图 1 所示。(2)DERF2.0 进行的 1982~2010 年逐月地面气温和降水的回报结果。多年平均采用 1982~2010 年共 29 年平均。格点插值到站点的方法采用的是双线性插值法。

短期气候预测评分方法有很多。预测业务中常用的有相关系数 RR (Chen et al., 2012)、距平相关系数 ACC 、预报技巧评分 S 、异常气候评分 TS 和短期预测业务评分 P_s 等(陈桂英和赵振国, 1998; 李清泉等, 2004; 李维京, 2012)。相关系数 RR 法对相对较大的数比较敏感,预报技巧评分法主要是相对于无技巧的预报技巧评分,是一个比较客观的评分方法,但评分与预报量分级评估有关,分级越多随机预报的准确率越低(王绍武和朱锦红, 2000)。异常气候评分 TS 用于评估预报异常级的能力,以前我国的月气温和降水的异常评分都比较低(陈桂英和赵振国, 1998)。之前我国的业务预测评分方法由国家气象中心长期天气预报科使用的评分方法修改而来,经验性较强。为了加强和规范短期气候预测质量评定,鼓励预测异常级,2010 年中国气象局采用了分级业务评分 P_g 法。为了系统性地评估模式的预测效果,改进预测技术,提高预测质量,本文选用距平相关系数 ACC 、平均方差技巧评分 $MSSS$ 、距平符号一致率 R 和预测业务分级检验 P_g 评分等 4 种指标对预测回报试验结果进行定量评估。

距平相关系数 ACC ,主要反映的是预报值与实况值的相似程度,是世界气象组织(WMO)于 1996 年 11 月在意大利召开的第 11 届工作会议上确定并建议使用的指标。“九五”期间我国短期气候预测系统的评估就以此作为评估参数之一(李清泉等,

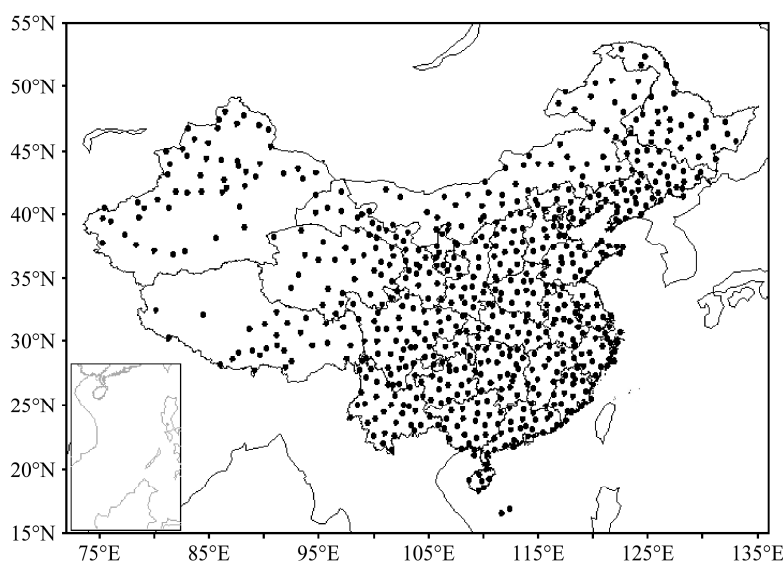


图1 全国 669 个气象站分布

Fig. 1 The distribution of 669 observation weather stations

2004)。距平相关系数公式如下:

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta R_{fi} - \overline{\Delta R_f}) \times (\Delta R_{oi} - \overline{\Delta R_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta R_{fi} - \overline{\Delta R_f})^2 \times \sum_{i=1}^N (\Delta R_{oi} - \overline{\Delta R_o})^2}}, \quad (1)$$

式中 N 为评分的气象站总站数, ΔR_{fi} 和 $\overline{\Delta R_f}$ 分别为预测的距平值及其所有台站的平均值, ΔR_{oi} 和 $\overline{\Delta R_o}$ 分别为观测的距平值及其所有台站的平均值。

平均方差技巧 MSSS 评分是 1996 年 WMO 建议在气候预测中使用的评分办法 (WMO, 1999), 我国的第一代短期气候预测系统曾用此方法进行评估 (李清泉等, 2004)。2006 年 WMO 提出了标准评估系统, 推荐模式的气候预测采用 MSSS 法进行评估 (WMO, 2006)。MSSS 评分法主要是用于不分类的确定性预报检验和评估 (WMO, 2009)。 x_{ij} 和 f_{ij} ($i=1, \dots, n$) 分别表示某一格点或站点 j 处的观测和确定性预测时间序列。两者的均值分别为 $\bar{x}_j$ 和 $\bar{f}_j$, 方差分别为 S_{xj}^2 和 S_{fj}^2 :

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \\ \bar{f}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ij}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_{fj}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{f}_j)^2, \\ S_{xj}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2. \end{cases} \quad (3)$$

预测的均方误差为

$$MSE_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - x_{ij})^2, \quad (4)$$

“气候学”预测的均方误差为

$$MES_{cj} = (n/(n-1)) S_{xj}^2, \quad (5)$$

在 j 点处的均方差技巧评分 (MSSS) 则定义为

$$MSSS = 1 - MSE_j / MES_{cj}, \quad (6)$$

对于不同的纬度位置, MSSS 的计算应该利用下式:

$$MSSS = 1 - \sum_j \cos(\theta_j) MSE_{cj} / \sum_j \cos(\theta_j) MES_{cj}, \quad (7)$$

θ_j 为 j 点处的纬度, 单位为弧度。

距平 (距平百分率) 符号一致率简称同号率, 以百分率的形式表现预报与实况的相似程度, 是过去我国长期天气预报中用来检验的一种有效方法, 是指预测值与实况值距平符号相同, 或是有一个距平为 0 的气象站站数与评分的气象站总站数的百分比。

$$R = N_l / N \times 100, \quad (8)$$

式中, N 为评分的气象站总站数, N_l 为预测与实况距平 (距平百分率) 符号相同或两者中有一个距平为 0 的气象站站数。

分级检验 Pg 评分法主要用于评定预测的气温距平 (降水距平百分率) 量级与实况的气温距平 (降水距平百分率) 的接近程度。根据中国气象局 2010 年 1 月 1 日起执行的业务预测评分标准, 气温和降水的趋势预测按照六级评分制进行评定, 具体的各级划分标准详见表 1。

表 1 气温、降水趋势预测六级评分制用语及各等级划分标准

Table 1 Temperature and precipitation trend prediction of six grades and the grade standard						
预测用语	特少 (低)	偏少 (低)	正常略少 (低)	正常略多 (高)	偏多 (高)	特多 (高)
ΔR	$\Delta R \leq -50\%$	$-50\% < \Delta R \leq -20\%$	$-20\% < \Delta R < 0$	$0 \leq \Delta R < 20\%$	$20\% \leq \Delta R < 50\%$	$\Delta R \geq 50\%$
$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T \leq -2.0$	$-2.0 < \Delta T \leq -1.0$	$-1.0 < \Delta T < 0$	$0 \leq \Delta T < 1.0$	$1.0 \leq \Delta T < 2.0$	$\Delta T \geq 2.0$

注: ΔR 表示降水距平百分率; ΔT 表示气温距平

本检验方法最高分为 100 分, 最低分为 0 分。当预测与实况的距平 (距平百分率) 符号和量级均一致时, 评分为 100 分。当预测与实况的量级相差 1 个级别时, 减 20 分; 量级相差 2 个级别时, 减 40 分; 量级相差 3 个级别时, 减 60 分; 依次类推, 减至 0 分为止。当预测与实况的距平符号不一致时, 在量级减分的基础上再减 20 分; 减至 0 分为止。鼓励预测异常, 当预测为异常级且预测与实况相差 1 个量级时, 可以在上述得分的基础上再加 10 分。六级评分制的各级预测检验评分详见表 2。

表 2 气温和降水趋势预测六级检验评分制单站评分表
Table 2 The evaluation on temperature and precipitation trend prediction of six grades

观测	预测					
	特少 (低)	偏少 (低)	正常略少 (低)	正常略多 (高)	偏多 (高)	特多 (高)
特少 (低)	100	80+10	60	20	0	0
偏少 (低)	80+10	100	80	40	20	0
正常略少 (低)	60	80+10	100	60	40	20
正常略多 (高)	20	40	60	100	80+10	60
偏多 (高)	0	20	40	80	100	80+10
特多 (高)	0	0	20	60	80+10	100

多站气候趋势预测检验总评分计算公式为

$$Pg = \sum_{i=1}^N P_i / N, \quad (9)$$

式中, Pg 为多站气候趋势预测评分, P_i 为单站的评分, N 为参加评分的气象站总站数。

3 结果分析

3.1 距平相关系数 ACC 评估

距平相关系数 ACC 是短期气候预测中最常用的检验方法之一, 反映的是模式的总体预测性能。上世纪 80~90 年代我国汛期预测业务降水的 ACC 平均值为 0.1, 降水预报水平只有 55%~60% (王绍武和朱锦红, 2000)。

从图 2a 可知, DERF2.0 回报的气温各年的 ACC 值都超过了 0.14, 最高的年份达到了 0.43, 多年平均值为 0.26。由此可知, DERF2.0 对气温的总

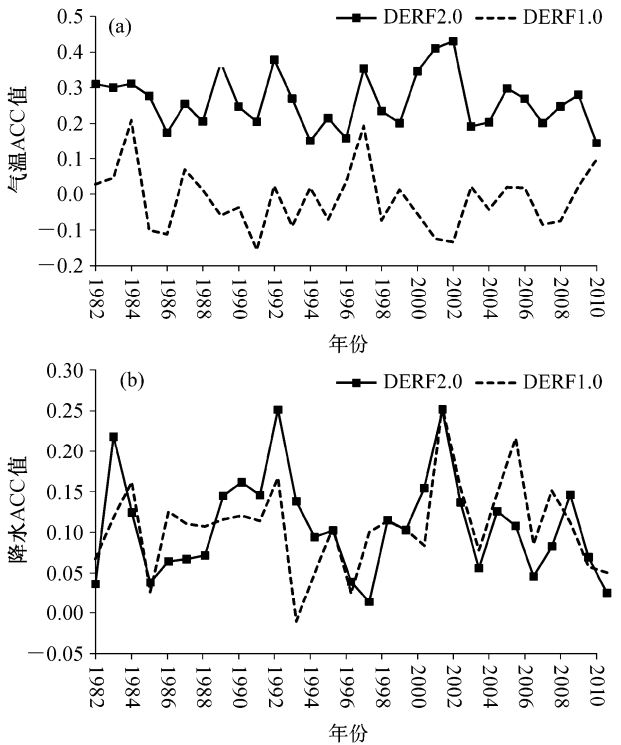


图 2 1982~2010 年中国的 (a) 气温和 (b) 降水的距平相关系数 ACC 随时间的变化
Fig. 2 The annual ACC skill scores of (a) temperature and (b) precipitation in China from 1982–2010

体预测性能较好。与 DERF1.0 回报的评分相比, DERF2.0 回报的气温各年的 ACC 评分都明显高于 DERF1.0, 多年平均提高了 0.27。由此表明, DERF2.0 对气温的预测性能较 DERF1.0 有了较明显的提升。

从图 2b 可知, DERF2.0 回报的降水各年的 ACC 值仍然都大于 0, 多年平均值为 0.11。与气温的 ACC 值相比, 降水的 ACC 值相对较低, 年际差异大。由此表明, DERF2.0 对降水的总体预测性能相对较差, 且预测性能不稳定。DERF2.0 回报的降水与 DERF1.0 在大部分年份的 ACC 值差异较小, 且两个模式的多年平均值相同。由此可知, DERF2.0 对降水的预测性能与 DERF1.0 相接近。DERF2.0 对于降水的预测能力仍然需要进一步

改进。

从表 3 的各月距平相关系数来看, DERF2.0 回报的气温 ACC 评分普遍较高。各月的气温 ACC 值都在 0.18 以上, 月平均气温 ACC 值达 0.26。其中 1 月、2 月、3 月的气温 ACC 技巧相对较高, 都在 0.3 以上, 其中 3 月评分最高, 达 0.4; 相对而言, 6 月、7 月和 9 月的气温 ACC 技巧相对较低。各月的降水 ACC 评分都明显低于气温, 降水的 ACC 评分较气温平均偏低 0.15。然而, 各月的降水 ACC 值都大于 0, 月平均为 0.11。由此表明, DERF2.0 能够预测出全国的总体旱涝趋势。相对而言, 1 月、9 月和 11 月降水的 ACC 技巧相对较高, 都在 0.15 以上; 4 月、5 月和 6 月降水的 ACC 技巧则相对较低。与 DERF1.0 回报的 ACC 评分相比, DERF2.0 各月气温的评分都有明显的提高。各月气温的 ACC 增幅在 0.18~0.45 之间, 月平均增幅为 0.27。其中 2 月增幅最大, 达 0.45。1 月、2 月、3 月、7 月、8 月、9 月和 10 月降水的预测技巧略有提高, 4 月、5 月和 6 月的则有所下降。总体而言, 降水的月平均 ACC 评分与 DERF1.0 相一致。由此表明, DERF2.0 对气温的预测性能明显好于 DERF1.0, 尤其是 2 月气温的预测提升幅度最大。对降水的总体预测水平与 DERF1.0 接近。与过去的国家气候中心业务发布的全国 160 站预测相比(陈桂英和赵振国, 1998; 陈丽娟等, 2008; 李维京, 2012), DERF2.0 对气温和降水的预测性能都有了明显提高。

3.2 平均方差技巧 MSSS 评估

MSSS 为确定性预报的主要评估方法。MSSS 值越接近 1, 表明模式预测越准确。从图 3 的检验结果来看, 1 月的气温确定性预报总体较差, 其中西南大部地区, 尤其是西藏、四川和重庆地区评分很低, 东北部气温预测相对较好。与 1 月相比, 4 月较差区域有所缩小并西移, 华南、江南和河套地区气温预测较好, 西藏、新疆、黑龙江、长江与黄河之间地区相对较差。7 月江南地区、西南的西部和西北的东部预测相对较好, 华南、河套及黄淮地区相对较差。10 月气温预测总体相对较好, 较差的

地区范围明显缩小, 主要集中在西南地区东部和新疆的西部。

从图 3 可知, 降水的 MSSS 评分值相对较小, 总体集中在±1 之间。与气温相比, 1 月的降水 MSSS 评分为正值区域明显扩大, 东北及华北地区的评分能过到 0.4 以上, 而长江流域则预测相对较差。4 月除东北、华北和新疆外, 大部地区评分为负值。7 月和 10 月我国大部地区的降水 MSSS 评分都在 -1~0 之间, 可见我国大部地区的降水确定性预测仍然相对较差, 中高纬度地区的评分高于较低纬度地区。

综上所述, 各月气温的确定性预测评分较差的区域随着季节的变化而变化。西南地区, 尤其是西南的东部地区, DERF2.0 的气温确定性预测较差。从空间分布来看, 气温的评分正值区域明显大于降水, 表明在空间范围内, 气温的确定性预报好于降水。结合降水和气温的 MSSS 评分图可见, 在青藏高原南部、四川盆地的 MSSS 评分都较差, 这可能是由于青藏高原地形的影响所致, 在今后的工作中需进一步探讨青藏高原地形对地面气温和降水预测的影响。

从表 4 可知, 各月的气温和降水的 MSSS 评分值都较低, 表明该模式对气温和降水的确定性预测性能仍然较低, 模式仍然有很大的改进空间。气温只有 2 月和 3 月评分大于 0, 降水则在 1~3 月、11 月和 12 月的评分都大于 0, 由此表明气温和降水的确定性预测相对较好的月份主要集中在冬季, 夏季较差。从月平均来看, 气温的评分反而低于降水, 这主要是由于在气温评分的空间分布中存在评分较差的集中区域, 且这些区域内的评分为较大的负值, 从而影响了区域平均值。

3.3 分级检验 Pg 评估

Pg 评分主要反映的是模式对预测要素在量级上的把握程度。从图 4 可知, 各月的气温 Pg 评分都明显高于降水的评分。1 月各地的气温 Pg 评分都在 65 分以上, 春季和秋季的 4 月和 10 月大部地区达到了 70 分以上, 得分最高的在夏季 7 月份, 大

表 3 DERF2.0 和 DERF1.0 回报 1982~2010 年月平均距平相关系数 ACC 表

Table 3 The monthly ACC skill score of DERF2.0 and DERF1.0 in 1982-2010

		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
气温	DERF1.0	-0.08	-0.06	0.04	-0.01	0.10	-0.08	-0.02	-0.03	0.00	0.02	-0.02	-0.03	-0.01
	DERF2.0	0.32	0.39	0.40	0.22	0.28	0.19	0.19	0.29	0.18	0.20	0.20	0.29	0.26
降水	DERF1.0	0.18	0.09	0.13	0.08	0.09	0.07	0.09	0.09	0.12	0.06	0.19	0.11	0.11
	DERF2.0	0.19	0.12	0.14	0.04	0.06	0.06	0.09	0.11	0.15	0.07	0.16	0.11	0.11

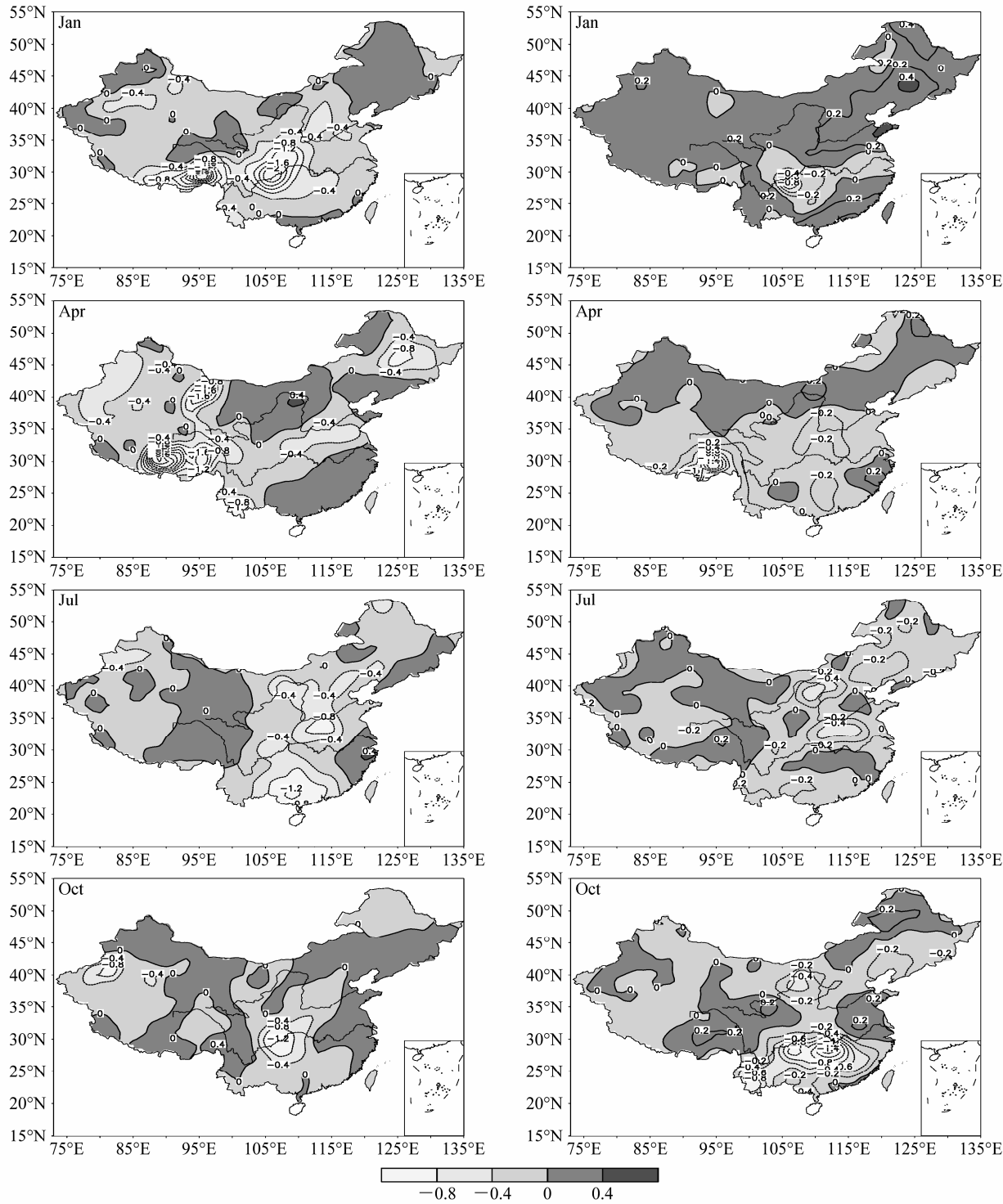


图3 全国1、4、7、10月平均方差技巧 MSSS 评分, 左边为气温, 右边为降水
Fig. 3 The MSSS skill scores of temperature and precipitation in Jan, Apr, Jul, and Oct from 1982–2010 (left: temperature; right: precipitation)

表4 DERF2.0 回报 1982~2010 年全国月平均均方差技巧 MSSS 评分表
Table 4 The monthly MSSS skill score of DERF2.0 in 1982–2010

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
气温	-0.24	0.03	0.08	-0.15	-0.29	-0.34	-0.20	-0.10	-0.18	-0.05	-0.03	-0.16	-0.14
降水	0.10	0.02	0.07	-0.05	-0.09	-0.15	-0.08	-0.03	-0.07	-0.16	0.02	0.03	-0.03

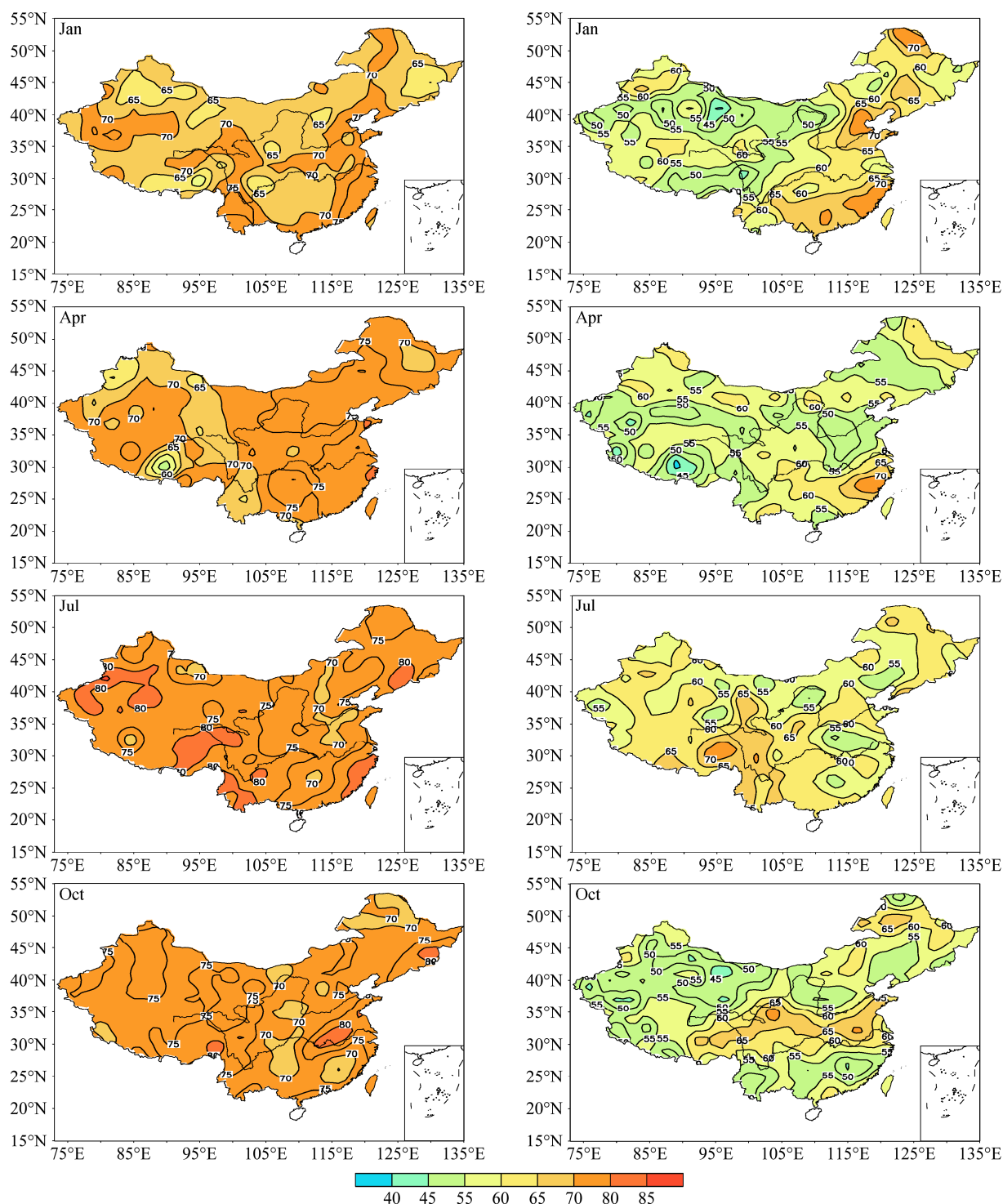


图 4 全国 1、4、7、10 月 Pg 评分，左边为气温，右边为降水

Fig. 4 The Pg skill scores of temperature and precipitation in Jan, Apr, Jul, and Oct from 1982–2010 (left: temperature; right: precipitation)

部地区达到了 75 分以上，其中部分地区达 80 分以上。由此表明，DERF2.0 对大部分地区的气温预测在量级上把握较好，预测的气温距平与实况相差在 2°C 以内，Pg 评分较高。

降水的 Pg 评分随季节变化较为明显。1 月 Pg 评分在 60 分以上的区域主要分布在我国中东部地区，4 月我国大部地区的评分没有达到 60 分，7 月评分达 60 分以上的地区主要位于西南和西北地区，

10 月则位于长江与黄河之间地区。由此表明, DERF2.0 对各地的降水预测在等级上把握不是很好, 预测的降水距平百分率与实况符号相同时往往相差两个等级, 或是同处正常级别但符号相反, Pg 评分相对较低。

从表 5 的各月 Pg 评分可知, 各月的气温 Pg 评分基本保持在 70 分以上, 月平均达 73.8 分。其中夏季的 7、8 月份得分最高, 达 76 分以上, 冬季几个月的得分相对较低。各月的降水 Pg 评分则维持在 60 分左右。得分较低的月份分别为 2 月、4 月和 10 月, 夏季几个月得分则相对较高, 维持在 60 分左右。

2010 年全国预测业务评分采用了新评分办法——分级检验 Pg 评分法。从中国气象局下发的 2010 年全国各省 1~11 月的业务 Pg 评分来看, 全国各省的气温业务评分平均 74.3 分, 其中最高的重庆市业务评分达 84.8 分, 国家气候中心的 160 站业务评分为 72.9 分。DERF2.0 利用 160 站评分为 75.1 分, 利用 669 站评分为 59.3 分。全国 1~11 月业务预测降水平均 58.6 分, 其中最高的贵州省业务评分达 70 分, 国家气候中心的业务评分为 56.8 分。DERF2.0 利用 160 站评分为 58.8 分, 669 站为 55 分。由此表明, DERF2.0 直接预测的气温评分已明显高于全国各省的平均分和国家气候中心的评分。利用 669 站的气温评分结果明显低于 160 站的评分结果。DERF2.0 直接预测的降水评分也高于全国平均和国家气候中心的业务评分, 且利用 669 站评分与利用 160 站评分结果差异较小。总之, DERF2.0 直接预测的气温和降水超过了目前的业务预测评分。

以往研究表明模式对降水的解释应用评分要高于模式的直接输出产品(林纾等, 2007; 王娜和方建刚, 2009)。但由于解释应用本质上依赖于模式的预报能力和解释应用方法。因此, 仍然需要模式在性能完善、模式的系统性误差订正和解释应用

方法上做进一步研究和应用。

3.4 距平符号一致率 R 评估

同号率 R 反映的是一定范围内预测值与实况值距平(距平百分率)符号一致的站点数占总站点数的比例, 是以往模式检验常用的方法之一。只有当同号率大于 50%, 降水的主要趋势被反映出来时, 再考察强度预测才有意义(李清泉等, 2004)。从表 6 可知, 各月的气温同号率都达 60%以上, 其中 3 月同号率达到了 71.5%, 月平均为 64.2%。降水的同号率则相对要低些, 但各月的值都超过了 50%, 月平均为 56.9%, 由此可知, DERF2.0 的预测总体上能够反映出气温和降水的主要趋势。其中 1 月、11 月和 12 月降水的同号率达 60%以上, 而最少的月份降水同号率只有 52.7%。

尽管 1982~2010 年月平均气温的同号率都较高, 但仍然也有个别年份的效果较差, 如 1996 年的 1 月、2001 年的 4 月、1982 年的 10 月的气温同号率只有 30%多。这些年份的预测效果较差的原因值得进一步探讨。尽管月平均的降水同号率较低, 但仍然有一些年份的同号率较高, 如 1986 年的 1 月能达到 88%, 2004 年的 10 月达 72%。

4 典型旱涝年预测效果分析

1998 年夏季由于降水比较集中, 加上暴雨的影响, 长江流域发生了 20 世纪仅次于 1954 年的特大洪涝(黄荣辉等, 1998)。2006 年川渝地区则出现了百年不遇的重伏旱(李永华等, 2009)。接下来对这两年的气温和降水预测进行回报检验和评估, 初步考察 DERF2.0 对极端气候事件的预测能力。

4.1 1998 年夏季回报检验与评估

从图 5 可知, DERF2.0 在 1998 年 6 月份回报结果显示全国大面积气温偏低, 偏高的区域主要分布在青藏高原和长江下游。实况是新疆西部、东北

表 5 DERF2.0 回报 1982~2010 年全国月平均 Pg 评分表

Table 5 The monthly Pg skill score of DERF2.0 in 1982–2010

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
气温	69.6	72.7	75.7	73.2	74.6	74.1	76.2	77.7	75.2	73.7	73.3	70.0	73.8
降水	60.4	57.5	59.7	56.6	59.1	59.1	60.5	60.8	60.8	57.1	60.8	59.2	59.3

表 6 DERF2.0 回报 1982~2010 年全国月平均距平符号一致率 R

Table 6 The monthly R skill score of DERF2.0 in 1982–2010

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
气温	64.2%	69.5%	71.5%	65.6%	64.7%	60.9%	62.8%	62.5%	61.6%	61.1%	64.8%	60.8%	64.2%
降水	61.3%	57.9%	58.8%	52.1%	53.9%	52.7%	54.6%	55.8%	57.9%	55.9%	61.8%	60.8%	56.9%

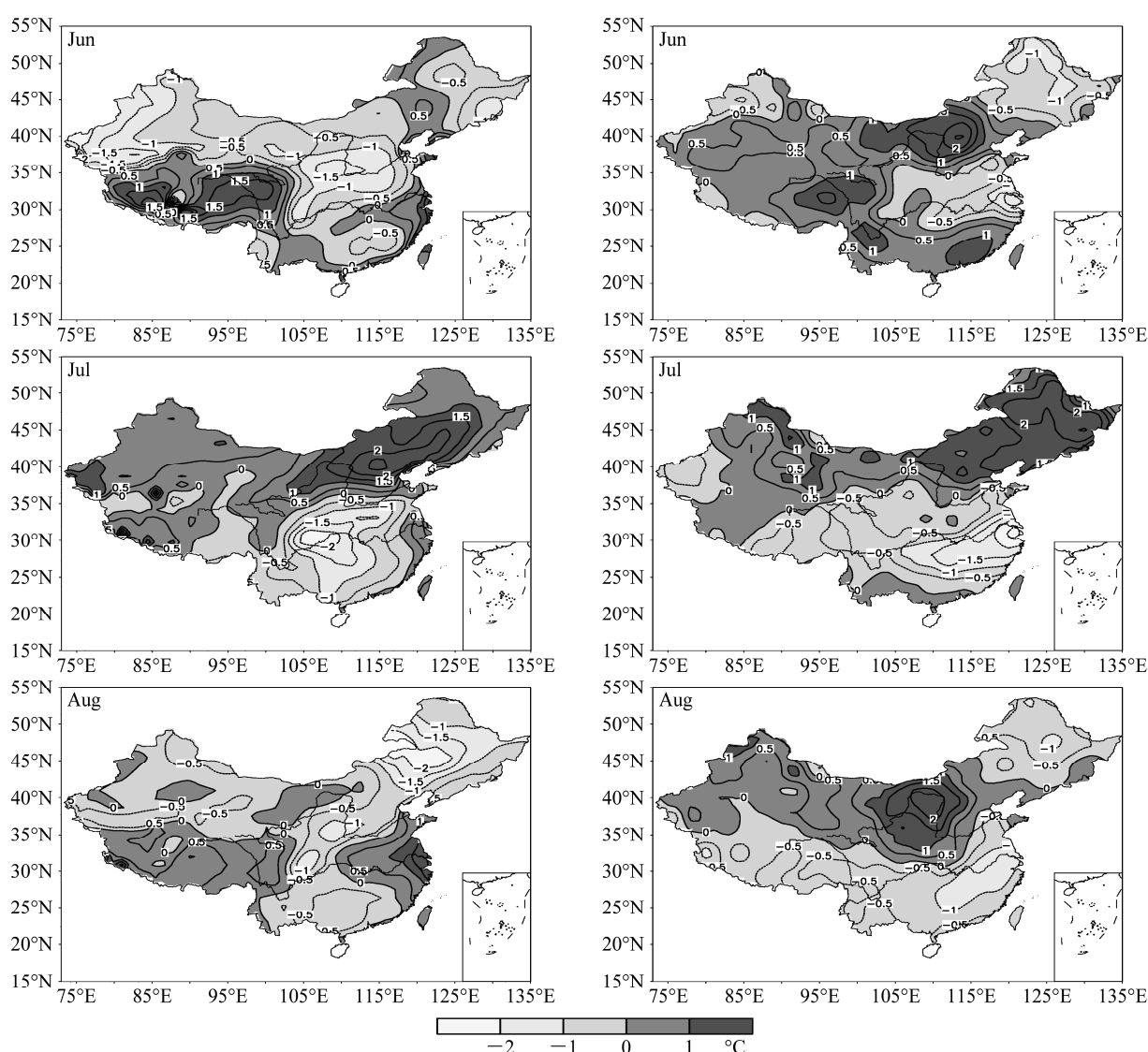


图5 1998年全国6、7、8月气温距平, 左边为预测, 右边为实况。多年平均为1982~2010年, 下同

Fig. 5 The distributions of temperature anomalies (to 1982–2010 mean) in Jun, Jul, and Aug of 1998 (left: hindcast; right: observations)

和长江下游出现了气温偏低, 全国大范围的气温偏高。7月回报偏低的范围有所南移, 与实况相比, 偏低的区域范围偏大。8月回报的全国仍然是大部地区以气温偏低为主, 实况是除东北外, 全国北暖南冷。总体而言, 长江流域6、7月份的气温偏低预测效果较好, 8月较差。DERF2.0回报的偏冷范围较实况要偏大, 偏冷区域与实况也有所出入。

从图6可知, DERF2.0在6月回报全国大范围的降水偏多, 实况是雨带主要位于长江及以南、东北和新疆西部地区。7月回报的雨带主要位于黄河以南地区, 实况是全国大范围的出现了降水偏多。8月回报全国大范围降水偏多, 实况也是全国大范围的偏多, 只是在河套地区、华南及长江下游相对

较差。总体而言, 各月DERF2.0都回报出了长江流域的降水偏多, 只是在幅度上有所偏弱。

1998年夏季全国大范围的降水偏多, 且长江流域出现了特大暴雨, 6、7月份主要出现长江中下流地区, 8月出现在上中游地区。从表7可知, DERF2.0在6月回报相对较差, 气温和降水的ACC评分都为负值, 气温的同号率只有41.9%, 降水的同号率也只有46.8%。尽管同号率评分较低, 但气温Pg评分还是达到了67.3分, 降水得分相对较低些。预测效果最好的是8月, 气温和降水的ACC评分都为正值。同号率和Pg评分都较6月明显提高。整个夏季而言, 降水的ACC评分略高于气温。气温Pg评分达到了71分, 降水为56.9分, 评分略低于

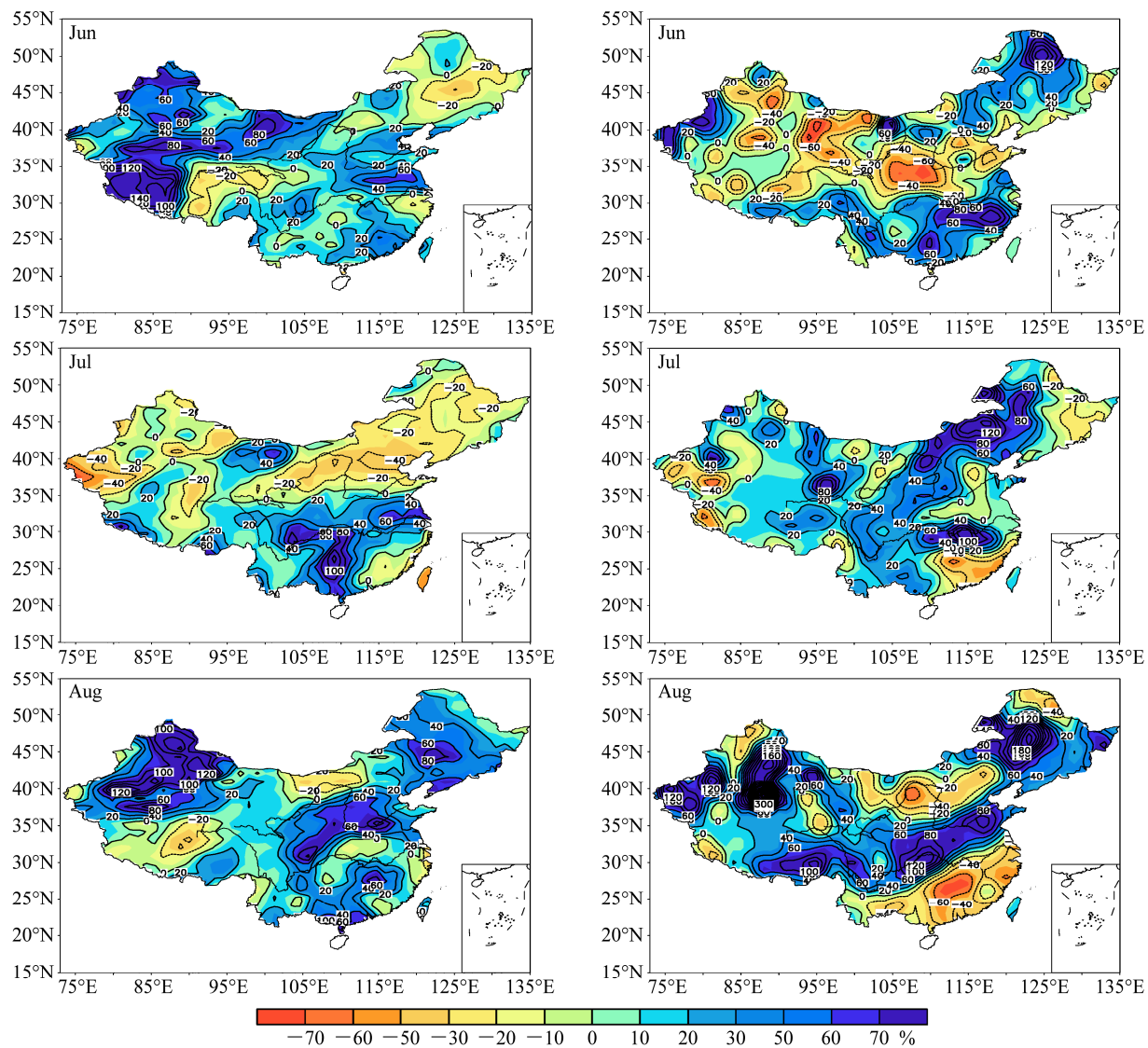


图6 1998年全国6、7、8月降水距平百分率, 左边为预测, 右边为实况
Fig. 6 The distributions of precipitation anomaly percentage in Jun, Jul, and Aug of 1998 (left: hindcast; right: observations)

2010 年的全国业务评分。由此说明, 对于出现极端洪涝的 1998 年, DERF2.0 对气温和降水仍然有一定的预测性, Pg 评分接近于常年的业务水平。

表 7 1998 年夏季各月全国气温和降水的 ACC 评分、Pg 评分和同号率 R

Table 7 The monthly ACC, Pg, and R skill scores of DERF2.0 in the summer of 1998

		6 月	7 月	8 月	夏季
ACC 评分	气温	-0.07	-0.22	0.25	-0.01
	降水	-0.13	0.03	0.17	0.02
Pg 评分	气温	67.26	69.24	76.38	70.96
	降水	54.02	58.57	57.98	56.86
同号率 R	气温	41.85%	46.86%	56.95%	48.55%
	降水	46.79%	53.96%	56.2%	52.32%

DERF2.0 能够较好地回报出 1998 年夏季大范围的气温偏低和降水偏多。这与 DERF2.0 能够较好地预测出 1998 年夏季 500 hPa 高度场上, 欧亚中高纬环流呈两脊一槽型, 中纬度高度场偏低有关。回报的 1998 年夏季气温偏低范围和降水偏多的区域较实况都偏大, 降水的主要落区与实况有所差异, 这可能与 DERF2.0 预测的 1998 年夏季乌拉尔山地区的阻塞高压和鄂霍次克海高压较实况偏强, 西太平洋副热带高压(西太副高)较实况面积偏大, 强度偏强有关(图略)。

4.2 2006 年夏季回报检验与评估

从图 7 可知, 2006 年 6 月全国出现了大范围的气温偏高, DERF2.0 回报的气温偏低面积较实况偏

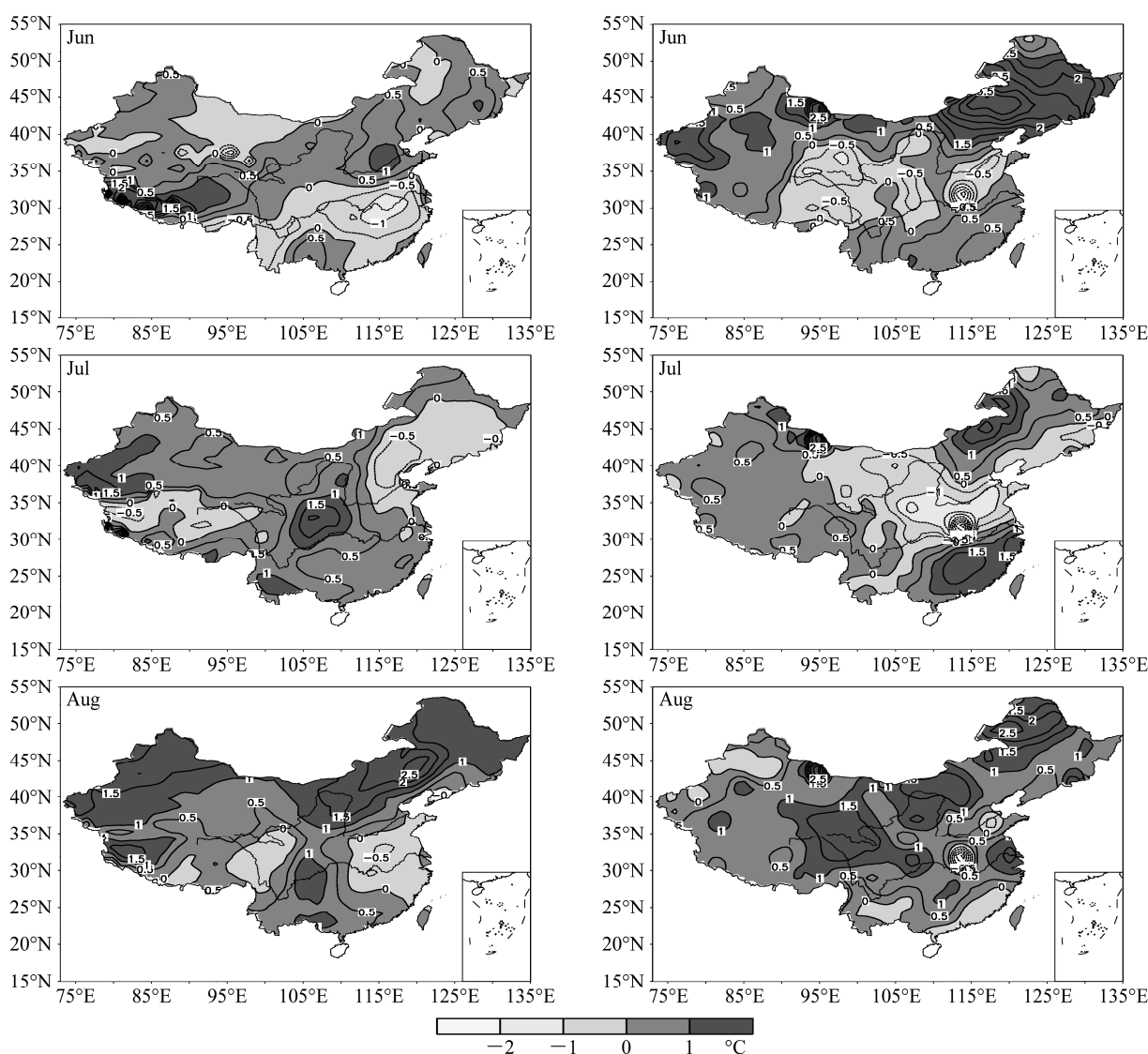


图 7 2006 年全国 6、7、8 月气温距平, 左边为预测, 右边为实况

Fig. 7 The distributions of temperature anomaly in Jun, Jul, and Aug of 2006 (left: hindcast; right: observations)

大, 且回报的气温偏高区域的增温幅度较实况有所偏弱。7 月的气温预测和实况都是全国大范围的偏高。与实况相比, 回报的气温偏低区域与实况有所差异。8 月 DERF2.0 预测出全国大范围的气温偏高, 西南地区气温偏高的范围比实况小。总体而言, 2006 年夏季 DERF2.0 对气温的回报较好, 只是高温范围较实况有所偏小, 在程度上有所偏弱。

从图 8 可知, DERF2.0 对 2006 年 6 月的北方降水回报较好, 对长江流域和西南地区的降水回报较差。7 月 DERF2.0 对雨带的主要位置把握不是很好。对华北、黄淮的雨带面积回报偏大, 对华南的雨带面积回报偏小偏弱。8 月回报效果相对较好, 把握住了全国大范围的降水偏少形势, 对西北的降

水异常偏少的回报效果也较好。

2006 年夏季, 西南地区气温偏高, 川渝地区出现了极端高温和严重干旱。DERF2.0 对西南地区的气温回报 6 月效果较差, 7、8 月效果较好。对于降水的回报同样在西南地区 8 月份好于 6、7 月份。从表 7 可知, 对 7、8 月回报的气温 ACC 评分都为正值, 同号率达 66% 以上, Pg 评分更是达到了 75 分以上。尽管降水的同号率要低一些, 但各月的降水 ACC 评分都为正值, 表明 DERF2.0 对各月的旱涝总体趋势有较好的回报。降水 Pg 评分最低的 6 月仍然达到了 56.9 分。最高的 8 月甚至达到了 62.2 分。整个夏季而言, 气温的 ACC 评分达 0.12, 同号率高达 65%。由此可知, DERF2.0 对 2006 年夏

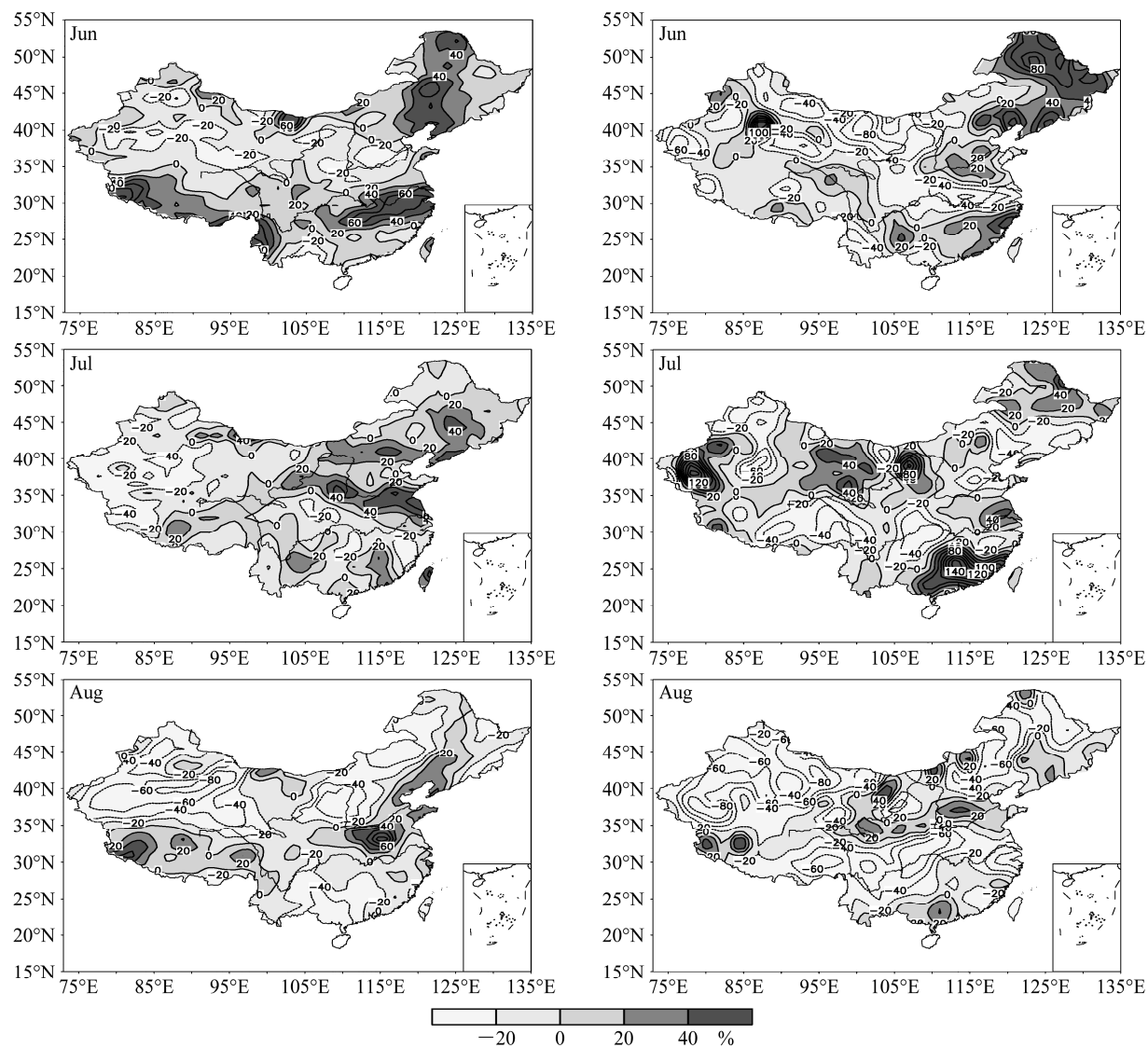


图 8 2006 年全国 6、7、8 月降水距平百分率, 左边为预测, 右边为实况
Fig.8 The distributions of precipitation anomaly percentage in Jun, Jul, and Aug of 2006 (left: hindcast; right: observations)

季全国范围的高温有较好的回报效果。夏季气温的 Pg 平均分达 77.6 分, 降水也接近 60 分, 这两个评分都超过了 2010 年的全国业务预测平均分。由此表明, 对于极端干旱的 2006 年, DERF2.0 对降水的预测仍然有一定的预测性, 对气温的预测效果明显好于降水。从表 7 和表 8 对比可知, 无论是气温还是降水, DERF2.0 对极端旱年的预测效果要明显好于极端涝年。DERF2.0 能够较好地回报的 2006 年夏季大范围的高温少雨。这与 DERF2.0 能够较好地预测出 2006 年夏季 500 hPa 高度场上, 欧亚中高纬的环流形式呈两槽一脊型有关。回报的气温偏高区域较实况偏小, 强度偏弱, 这可能与 DERF2.0 预测的 2006 年夏季中纬度地区高度场偏低范围较实

况偏大, 西太副高较实况面积偏小, 强度偏弱, 脊线位置偏南有关(图略)。

表 8 2006 年夏季各月全国气温和降水 ACC 评分、Pg 评分和同号率 R

Table 8 The monthly ACC, Pg, and R skill scores of DERF2.0 in the summer of 2006

		6 月	7 月	8 月	夏季
ACC 评分	气温	-0.07	0.36	0.05	0.12
	降水	0.06	0.02	0.04	0.04
Pg 评分	气温	72.8	84.33	75.7	77.61
	降水	56.92	58.01	62.2	59.04
同号率 R	气温	51.05%	78.48%	66.22%	65.25%
	降水	51.57%	50.22%	59.49%	53.76%

5 结论与讨论

(1) 距平相关系数 ACC 反映的是模式的总体预测性能。DERF2.0 对月气温的总体预测性能较好, 较 DERF1.0 有了较明显的提升。与过去全国的短期气候预测业务评分相比, DERF2.0 对气温和降水的预测都有所提高。DERF2.0 对降水的预测水平与 DERF1.0 相接近, 未来仍然需要进一步改进。

(2) MSSS 为确定性预报的主要评估方法。DERF2.0 对气温的确定性预测评分较差的地区主要集中在西南地区, 尤其是西南的东部地区。DERF2.0 对于降水的确定性预测评分较低, 较差的地区主要集中在长江流域及华南地区。

(3) Pg 评分主要反映的是模式对预测要素在量级上的把握程度。DERF2.0 模式对各地的气温预测在量级上把握较好, 但对降水的预测在等级上把握较差, 黄淮地区相对较好, 冬季好于其他季节。DERF2.0 未经订正的预测结果略高于 2010 年的业务预测评分。

(4) 同号率反映的是一定范围内预测与实况距平(距平百分率)符号一致的站点数占总站点数的比例。各月的气温同号率达 60% 以上, 月降水的同号率低于气温。

(5) DERF2.0 对发生在 1998 年和 2006 年的极端旱、涝个例年也有一定的预测能力, 对于气温的预测好于降水。

尽管 DERF2.0 对月气温的总体预测性能较好, 较 DERF1.0 有了较明显的提升。但 DERF2.0 对降水的预测能力仍然需要进一步改进。但从空间上来看, DERF2.0 对气温和降水的确定性预测效果仍然较差, 尤其在我国的西南地区。这可能与 BCC_AGCM2.0.1 模式对流层的冷中心和大尺度环流的预测偏弱有关(Chen et al., 2012)。对北半球冬季环流场也存在一定的偏差, 极涡振荡的振幅较强, 振荡的时间也有所漂移, 平流层极涡存在偏冷、偏强现象, 对流层副热带西风急流偏弱(刘玉镇等, 2012), 对热带地区大气环流的谱结构比较分散, 季节内振荡的西移波和西太平洋地区的振荡都偏强, 印度洋则偏弱有关。也可能与 BCC_AGCM2.0.1 模式预测的间接辐射强迫促使 ITCZ 变大, 全球降水偏少(Wang et al., 2010)有关。要解决以上问题, 需要对模式的各种参数化进一步改进, 并考虑地形影响及海温等初始场的影响, 在不

断调试、检验的基础上对模式系统进行再研发→再验证→再改进。

参考文献 (References)

- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2012. The coherent interdecadal changes of East Asia climate in mid-summer simulated by BCC_AGCM 2.0.1 [J]. *Climate Dyn.*, 39 (1-2): 155-163.
- 陈丽娟, 李维京, 刘绿柳, 等. 2008. 中国区域月气候预测方法和预测能力评估 [J]. *高原气象*, 27 (4): 838-843. Chen Lijuan, Li Weijing, Liu Liliu, et al. 2008. Assessment and analysis of monthly climate prediction in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (4): 838-843.
- 陈桂英, 赵振国. 1998. 短期气候预测评估方法和业务初估 [J]. *应用气象学报*, 9 (2): 178-185. Chen Guiying, Zhao Zhenguo. 1998. Assessment methods of short range climate prediction and their operational application [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 9 (2): 178-185.
- 丁一汇, 刘一鸣, 宋永加, 等. 2002. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 236-246. Ding Yihui, Liu Yiming, Song Yongjia, et al. 2002. Research and experiments of the dynamical model system for short-term climate prediction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 236-246.
- 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展 [J]. *气象学报*, 62 (5): 598-612. Ding Yihui, Li Qingquan, Li Weijing, et al. 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 598-612.
- Dong M, Wu T, Wang Z, et al. 2012. A simulation study on the extreme temperature events of the 20th century by using the BCC_AGCM [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 26 (4): 489-507.
- 董敏, 吴统文, 王在志, 等. 2009. 北京气候中心大气环流模式对季节内振荡的模拟 [J]. *气象学报*, 67 (6): 912-922. Dong Min, Wu Tongwen, Wang Zaizhi, et al. 2009. Simulations of the tropical intraseasonal oscillations by the AGCM of the Beijing climate center [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 912-922.
- 郭准, 吴春强, 周天军, 等. 2011. LASG/IAP 和 BCC 大气环流模式模拟的云辐射强迫之比较 [J]. *大气科学*, 35 (4): 739-752. Guo Zhun, Wu Chunqiang, Zhou Tianjun, et al. 2011. A comparison of cloud radiative forcings simulated by LASG/IAP and BCC atmospheric General Circulation models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 739-752.
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998 年夏季长江流域特大洪涝特征及其成因探讨 [J]. *气候与环境研究*, 3 (4): 300-313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (4): 300-313.
- 顾卫华, 吴统文. 2010. 全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 对 1998 年夏季江淮流域强降水过程的回报试验研究 [J]. *大气科学*, 34 (5): 962-978. Jie Weihua, Wu Tongwen. 2010. Hindcast for 1998 summer heavy precipitation in the Yangtze and Huaihe River valley using AGCM BCC_AGCM2.0.1 model [J]. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese)*, 34 (5): 962-978.

- 李维京. 2012. 现代气候业务 [M]. 北京: 气象出版社, 202–315. Li Weijing. 2012. Contemporary Climate Services [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 202–315.
- 李清泉, 丁一汇, 张培群. 2004. 一个全球海—气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估 [J]. 气象学报, 62 (6): 740–751. Li Qingquan, Ding Yihui, Zhang Peiqun. 2004. Primary verification and assessment on extra-seasonally predictive capability of a global atmospheric-oceanic coupled model in raining season [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (6): 740–751.
- 李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常 [J]. 气象学报, 67 (1): 122–132. Li Yonghua, Xu Haiming, Liu De. 2009. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 122–132.
- 林纾, 陈丽娟, 陈彦山, 等. 2007. 月动力延伸预报产品在西北地区月降水预测中的释用 [J]. 应用气象学报, 18 (4): 555–560. Lin Shu, Chen Lijuan, Chen Yanshan, et al. 2007. Interpretation of monthly dynamical extended range forecast products in northwest China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (4): 555–560.
- 刘玉镇, 任荣彩, 何编. 2012. 两个大气环流模式 SAMIL 和 BCC_AGCM 对北半球冬季极涡振荡的预测对比 [J]. 大气科学, 36 (6): 1191–1206. Liu Yuzhen, Ren Rongcai, He Bian. 2012. Comparison of SAMIL and BCC_AGCM simulations of the polar vortex oscillation in the Northern Hemisphere winter [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 36 (6): 1191–1206.
- JMA. 2010. Outline of the operational Ensemble Prediction System for extended- and long-range forecasting. <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/model/outline/index.html> [2013-07-15].
- Miyakoda K, Gordon T, Caverly R, et al. 1983. Simulation of a blocking event in January 1976 [J]. Mon. Wea. Rev., 111: 846–869.
- Miyakoda K, Sirutis J, Ploshay J. 1986. One month forecast experiments—without anomaly boundary forcings [J]. Mon. Wea. Rev., 114 (12): 2363–2401.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91 (8): 1015–1057.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2012. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. Journal of Climate, 27 (6): 2185–2208.
- 王娜, 方建刚. 2009. 月动力延伸预报产品在陕西月降水预测中的释用 [J]. 气象科技, 37 (5): 520–522. Wang Na, Fang Jian'gang. 2009. Interpretation and application of monthly dynamical extended range forecast products in Shaanxi province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (5): 520–522.
- 王绍武, 朱锦红. 2000. 短期气候预测的评估问题 [J]. 应用气象学报, 11 (A06): 1–10. Wang Shaowu, Zhu Jinhong. 2000. Evaluation of short-term climate prediction [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 11 (A06): 1–10.
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004) [J]. Climate Dyn., 33 (1): 93–117.
- Wang Z, Zhang H, Shen X, et al. 2010. Modeling study of aerosol indirect effects on global climate with an AGCM [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (5): 1064–1077.
- WMO. 1999. Abridged final report with resolutions and recommendations [R]. Secretariat of the WMO, Geneva, Switzerland, No. 896: 154–157.
- WMO. 2006. Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF): New attachment II-8 to the manual on the GDPFS (WMO-No. 485), Volume I [R].
- WMO. 2009. New Attachment II-8 to the Manual on the GDPFS (WMO-No. 485), Volume I: Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) [R]. http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/scores.shtml/Attachment_II-8.doc. [2012-05-21].
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (4): 529–535.
- Wu T W, Yu R C, Zhang F. 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 65 (7): 2235–2253.
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate [J]. Climate Dyn., 34 (1): 123–147.
- Zhang G J, Mu M Q. 2005. Effects of modifications to the Zhang-McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3 [J]. Journal of Geophysical Research, 110 (D9): D09109, doi: 10.1029/2004JD005617.
- 张培群, 李清泉, 王兰宁, 等. 2004. 我国动力气候模式预测系统的研制及应用 [J]. 科技导报, (7): 17–21. Zhang Peiqun, Li Qingquan, Wang Lanning, et al. 2004. Development and application of dynamic climate model prediction system in China [J]. Science & Technology Review (in Chinese), (7): 17–21.