

李建, 宇如聪, 陈昊明, 等. 对三套再分析资料中国大陆地区夏季降水量的评估分析[J]. 气象, 2010, 36(12): 1-9.

对三套再分析资料中国大陆地区夏季降水量的评估分析^{*}

李 建^{1,2} 宇如聪^{3,4} 陈昊明¹ 原韦华^{4,5}

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 大理国家气候观象台, 大理 671003

3 国家气候中心, 北京 100081

4 中国科学院大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

5 中国科学院研究生院, 北京 100049

提 要: 以中国台站降水为参照, 评估分析了三套再分析资料(NCEP/DOE, ERA 和 JRA)对中国夏季降水场的再现能力。结果显示, 三套资料均能基本再现夏季降水量分布的主要特征, 亦能较好刻画大部分地区降水的年际和季节内变化特征, 但同时也存在诸多问题: NCEP 资料在青藏高原东坡存在一个虚假降水中心, 且对中西部和西南地区夏季降水的季节内演变特征再现能力较差; ERA 资料降水量系统性偏小, 且不能合理描述中西部地区降水的年际变化; JRA 资料高估了华南沿海地区的降水量。三套资料均存在高估弱降水、低估强降水的问题。对日降水量 ≥ 0.1 mm 的降水事件进行 TS、BS 评分, 三套资料的 TS 评分在 0.6 左右, BS 评分在 1.5 左右; 随着参与评分的降水等级的提升, 两项评分都迅速下降, 三套资料对暴雨的预报评分都非常低。通过分析可了解当前较先进的数值预报模式在基本真实的环流场强迫下对我国夏季降水的预报能力, 认识模式中物理参数化过程导致的模拟偏差, 为模式发展和评估提供参照。

关键词: 降水, 再分析资料, 台站资料

Evaluation and Analyses of Summer Rainfall over Mainland China in Three Reanalysis Datasets

LI Jian^{1,2} YU Rucong^{3,4} CHEN Haoming¹ YUAN Weihua^{4,5}

1 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

2 Dali National Climate Observatory, Dali 671003

3 National Climate Center, Beijing 100081

4 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

5 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The summer rainfall data in China represented by three reanalysis datasets (NCEP/DOE, ERA and JRA) are evaluated by comparing with the products of the station rainfall data in this study. Results show that the main characteristics of summer rainfall distribution in China are reasonably reproduced in three datasets, and most of the interannual and intraseasonal variations are captured. However, there are still some deficiencies in all of the three reanalysis rainfall products. In the NCEP product, an artificial rainfall center is located over the east periphery of the Tibetan Plateau, and the intraseasonal evolution of summer rainfall in midwestern and southwestern regions is poorly represented. In the ERA product, the rainfall amount is systematically underestimated and the interannual variation of rainfall over the midwest-

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB951900)和国家自然科学基金项目(批准号:40625014, 40921003 和 40705025)的共同资助
2010年6月3日收稿; 2010年8月7日收修定稿

第一作者: 李建, 主要从事东亚区域气候的观测分析与数值模拟. Email: lijian@cma.gov.cn

ern regions is not well simulated. In the JRA product, the rainfall over coastal regions of South China is overestimated. The overestimation of weak rainfall and underestimation of heavy rainfall can be found in all of the three products. Concerning the TS and BS scores of the rainfall events with daily amount larger than 0.1 mm, the TS score is around 0.6 and the BS score is about 1.5 for all the reanalysis rainfall products. However, with the upgrade of rainfall rates, both of the scores decrease rapidly. The scores of torrential rain are very low for all reanalysis products. The analyses in this work not only indicate the capability of current advanced numerical models in simulating summer rainfall in China under the realistic circulation forcings, but also help to understand the simulation biases resulting from physical parameterization. Results would potentially contribute to the model development and evaluation in future.

Key words: precipitation, reanalysis datasets, station observation data

引 言

长期以来,东亚地区夏季降水一直是各类数值模式模拟的一个难点问题^[1-2]。该地区地理位置独特,天气气候受到热带大洋和青藏高原大地形的显著影响,各圈层相互作用异常复杂。在给定观测海温驱动的条件下,目前世界上几乎所有的大气环流模式对东亚季风及其变率的模拟技巧都很低^[3]。东亚季风降水的模拟尤为困难,因为其涉及到多种影响因子,且各因子之间有复杂的相互作用和反馈,当前的数值模式难以准确再现。例如,目前的大气环流模式所模拟的夏季降水平均态,在高原东侧多存在虚假的降水中心^[1,4-5];模式对东亚降水的季节内变化模拟能力也极为有限^[6];历史海温驱动下的大气环流模式所模拟的夏季降水年际变率,在东亚季风区几乎没有技巧^[7]。数值模式对降水模拟的偏差总体来看可以分为两大类:一类源于模式环流场偏差,如高低空急流位置偏差、副高位置和强度偏差等。此类误差会直接影响水汽输送和雨带位置。另一类源于模式物理过程参数化方案的偏差,如局地对流活动触发条件的偏差、大尺度凝结降水的水汽阈值偏差等。当前模式中的物理过程参数化方案都是对真实过程进行大量简化而得出,且其中的关键参数多是基于单点观测推算的结果,在东亚地区的适用性有待讨论。此类误差可直接影响降水事件的发生发展过程和降水强度。由于降水过程涉及模式中的诸多过程及其相互作用和反馈,在对模式结果进行评估时,往往难以区分上述两类误差。

近年来,再分析资料在气候科研和业务工作中得到了越来越多的重视。利用先进的资料同化系统和数值预报模式,结合经过严格质量控制的各类观

测探测资料,一些数值预报中心已经制作出时间跨度为几十年的、具有良好一致性的全球大气再分析资料。这些资料被广泛应用于模式试验和评估、天气气候诊断分析等。根据观测资料和模式对变量的相对影响程度,再分析资料中的数据可大致分为四大类^[8]:A类为受观测资料显著影响的变量,也是可信度最高的变量,如大气各层气温场、风场和位势高度场;B类为既受观测资料的直接影响、又受到模式较强调制作用的变量,如湿度和表面气温;C类为完全由模式输出、不受观测资料直接影响的变量,包括云、降水和表面通量等;D类为完全与模式无关的场(如地形高度、海陆分布)。由此可知,再分析资料中的降水场是在基本真实的环流场强迫下,由当前最先进的数值预报模式计算输出的,因此再分析资料的降水场能够反映出目前模式参数化过程导致的误差。

此前对再分析资料的分析和比较主要是从资料可信度方面予以检验和评价^[9-11]。本文将我国台站观测资料为参照,对三套再分析资料的夏季降水场进行比较评估,目的在于揭示当前高水平数值预报模式的物理过程偏差对降水模拟的影响,从而为今后的模式发展和评估工作提供参照。

1 数据和方法

本文分析夏季(6—8月)中国区域的逐日降水量,使用的台站观测资料为中国气象局国家气象信息中心整理发布的中国地面气候资料日值数据集。该数据集共包括全国753个站点的观测资料,数据来源为各省、市、自治区气候资料处理部门逐月上报的《地面气象记录月报表》的信息化资料,经过较严格的质量控制,数据质量良好。图1中用黑点标示出753个台站的站点位置。

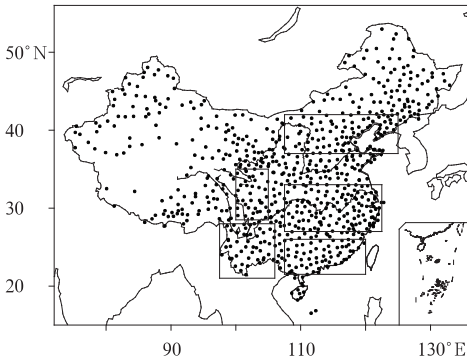


图 1 我国 753 个气象台站的位置分布(黑点标示)

图中 5 个矩形标示出 5 个关键区:东部自北至南依次为华北区,长江中下游区和华南区,西部自北至南分别为中西部地区和西南区

Fig. 1 The locations of 753 rain gauge stations over mainland China (black dots)

Five key regions are marked by rectangles: the eastern three ones denote North China, the mid- and lower reaches of Yangtze River valley and South China from north to south, while the western ones are the mid-western China and the southwestern China from north to south, respectively

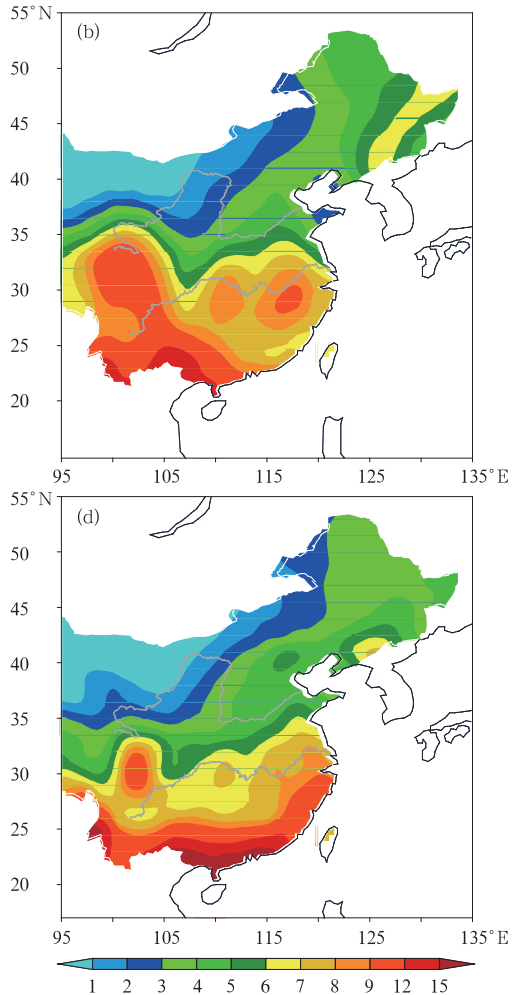
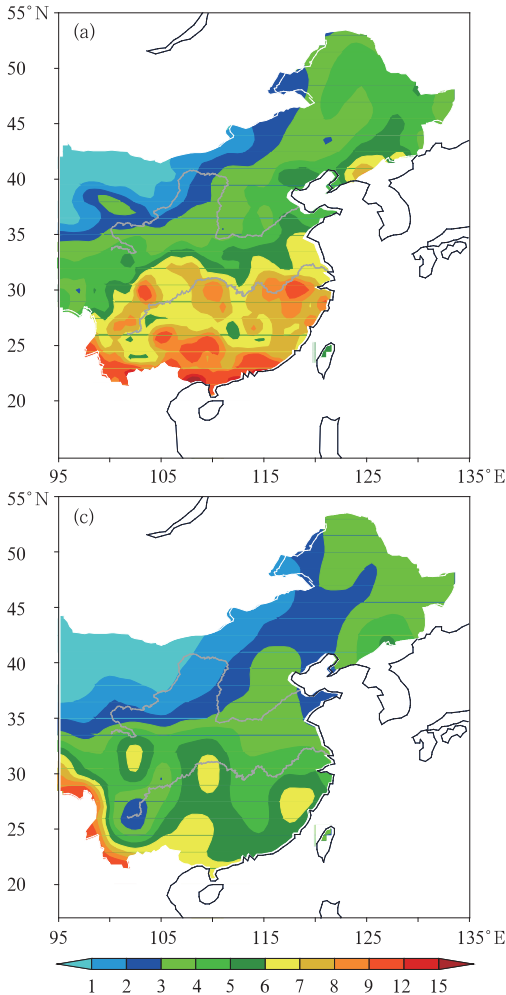


图 2 1979—2002 年夏季降水量的气候态分布(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

图 a~d 分别为台站观测值、NCEP 资料、ERA 资料和 JRA 资料

Fig. 2 Summer mean precipitation (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) averaged from 1979 to 2002 based on (a) station observation, (b) NCEP, (c) ERA and (d) JRA

本文共选取了三套再分析资料与台站资料进行对比分析,分别为:美国国家环境预报中心(NCEP)/美国能源部(DOE)的再分析数据集 II(在下文中简称 NCEP)^[8,12],欧洲中期数值预报中心(ECMWF)再分析数据集(简称 ERA)^[13],以及日本气象厅组织研发的日本再分析数据集(简称 JRA)^[14]。三套再分析资料完全独立,且基于不同的同化系统和数值预报模式。NCEP 资料使用的模式水平分辨率为 T62(约 210 km),垂直 28 层;ERA 资料的数值模式为 TL159(约 125 km),60 层;JRA 资料基于一个水平分辨率为 T106(约 120 km),垂直 40 层的模式。

本文分析的时段为上述三套资料的交集:1979—2002 年。为了便于对降水量进行点对点的比较,三套资料均利用双线性插值法插值到站点位置上。

2 夏季降水量气候态的比较

图 2 中给出 1979—2002 年夏季降水量的气候态

分布。从台站观测可知(图 2a),我国中东部地区夏季降水量主要集中在长江流域及其以南地区,大体呈现出南北两条雨带:一条位于 30°N 附近,由三个降水量大于 $7\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的降水中心组成,且三个中心分别位于长江上游、中游和下游;另一条雨带位于华南,包括云南南部、广西和广东沿海地区。总体来看,三套资料都能在一定程度上反映出我国夏季降水量分布的基本特征。图 2b 中给出 NCEP 资料夏季平均降水量分布,能清楚分辨出两条雨带的结构,且长江中下游的两个降水中心和华南降水中心的位置和强度均与台站资料有较好对应;但西南地区降水中心范围明

显偏大且位置偏西。与观测相比,ERA 的降水资料(图 2c)呈现出较大偏差:两条雨带的降水量均大幅偏少且长江上游降水中心的位置明显偏北,下游中心的位置明显偏南。JRA 资料(图 2d)与台站资料相似度较高,较准确地再现了长江上游降水中心的位置;但长江下游的降水中心位置偏东偏南,且与华南雨带相连,覆盖整个东南沿海地区。从夏季气候平均降水量的空间相关系数来看,JRA 资料最高,为 0.85,NCEP 次之(0.79),ERA 资料最低(0.58)。

为了更好地比较台站降水和再分析资料降水的气候态分布,图 3 给出了两类降水资料的差值比例:

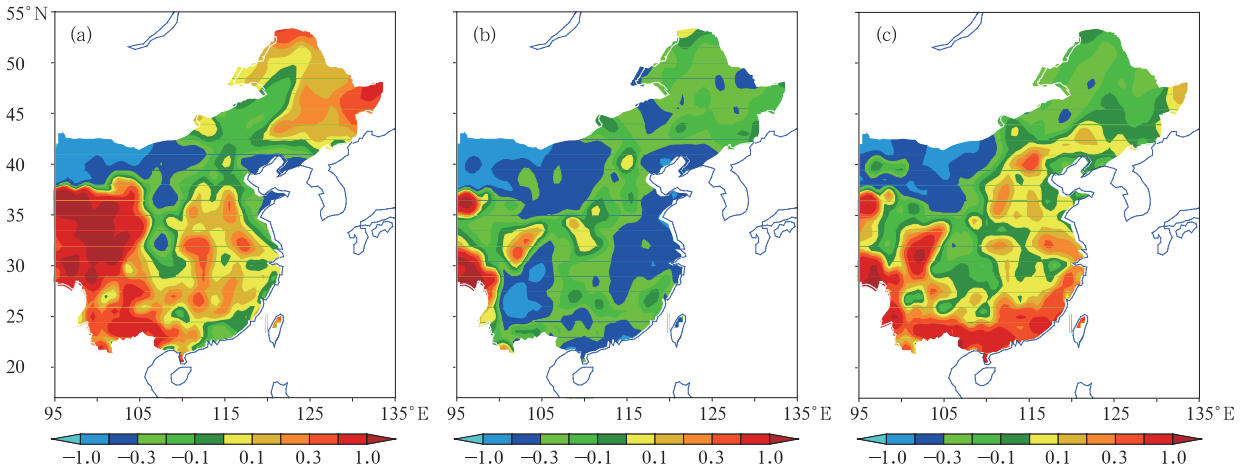


图 3 NCEP 资料(a)、ERA 资料(b)和 JRA 资料(c)的夏季平均降水与台站观测资料的差值比例(1979—2002)

Fig. 3 The difference proportions of summer rainfall in reanalysis datasets compared to station observation from (a) NCEP, (b) ERA and (c) JRA

$$P_{\text{差值比例}} = \frac{P_{\text{再分析}} - P_{\text{观测}}}{P_{\text{观测}}} \quad (1)$$

$P_{\text{差值比例}}$ 由公式(1)在每个站点上分别计算得出。由图 3a 可知,NCEP 降水在高原东部大幅偏多,在多个站点的偏差甚至超过观测降水量 1 倍以上。通过对大气环流模式 CCM3 对东亚夏季风降水模拟能力的分析,宇如聪等^[1]指出,大气环流模式倾向于在青藏高原东坡模拟出虚假降水中心,且这一偏差与模式对高原附近表面感热通量的大幅高估有关。NCEP 资料在我国东北和华中地区也有较明显的正偏差。整体来看,NCEP 资料在 60.3%(39.7%)的站点高估(低估)了降水量。ERA 降水量则在全国大部分地区(84.9%的站点)偏少;仅在高原南缘和东侧部分站点出现了正偏差(图 3b)。JRA 资料中降水量偏多与偏少的站点比例相近,分别为 53.3%和 46.7%;最强的正偏差呈带状分布在我国大陆南部(图 3c)。三套再分析资料在青藏高原东南部(30°N 以南、 100°E 以西)都有很强的正偏差。该地区地形复杂,多高大山脉,

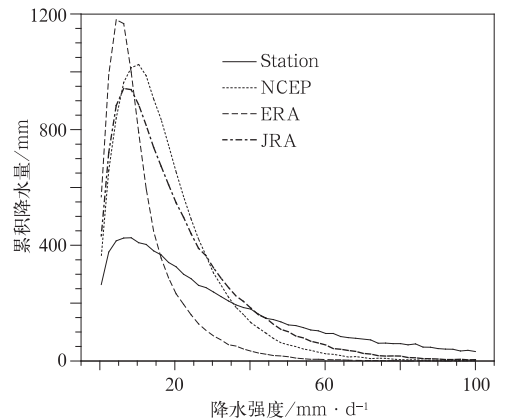


图 4 夏季降水量随日降水强度的分布
横坐标为日降水强度(单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$),
纵坐标为对应强度的累积降水量(单位: mm),
每条曲线都是全部站点平均的结果

Fig. 4 The distribution of averaged summer rainfall amount with different daily intensities
The X-axis is daily rainfall intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$),
while the Y-axis is the accumulated rainfall amount (unit: mm). The curves are averaged from all of the stations

降水受局地地形强迫作用影响显著;而这一区域站点密度较低,且关键降水中心位于我国境外。因此这里的正偏差可能与站点位置分布有关,尚需利用卫星资料作进一步验证。

除空间分布之外,降水量气候态的另一个重要特征是降水量随降水强度的分布特征。图 4 为对所有降水日以日降水强度为标准进行分类、累加后得到的不同强度降水的累积降水量,分类时采用的降水强度间隔为 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,逐站计算后对所有站点进行平均。与黑色线代表的台站观测降水相比,三套再分析资料呈现出一致的偏差:弱降水的累积降水量偏多,

强降水的累积降水量偏少。对所有日降水强度小于 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的降水,NCEP、ERA 和 JRA 给出的降水量分别为台站观测降水量的 2.01 倍、2.56 倍和 2.05 倍;而对所有日降水强度大于 $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的降水,NCEP、ERA、JRA 给出的降水量分别为台站观测降水量的 20.9%、3.9% 和 43.4%。结合以上数据和图 4 中线条的走势可知,以日降水强度为标准,JRA 资料的降水结构与观测值最接近,NCEP 次之,ERA 资料与台站降水的偏差最大。高估弱降水,低估强降水,这是当前大多数气候模式都存在的一个问题,可能与模式物理过程的偏差密切相关。

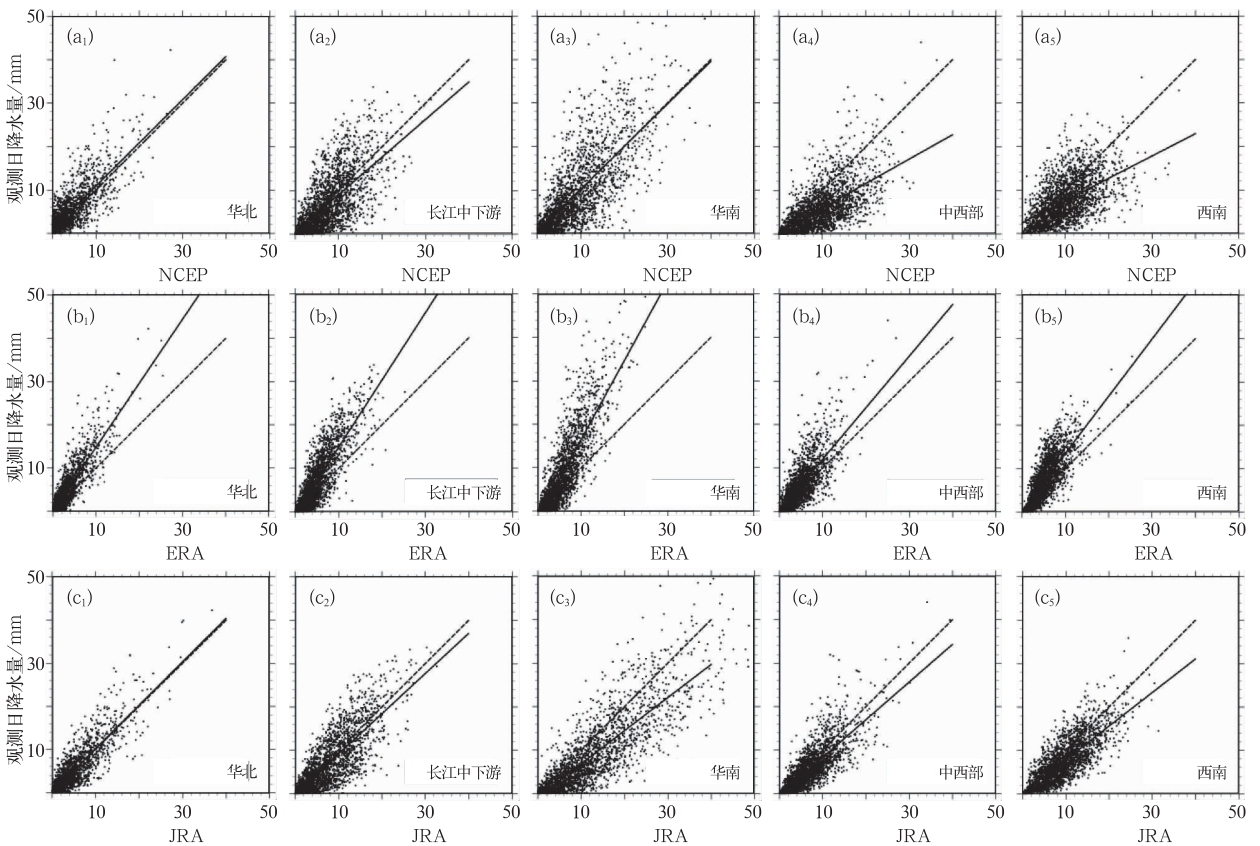


图 5 再分析资料(X轴)和台站观测(Y轴)的区域平均日降水量散点图

统计时段为 1979—2002 年夏季(6—8 月)。自上至下三行(a~c)分别为 NCEP、ERA 和 JRA 三套资料,自左至右五(1~5)列分别为华北、长江中下游、华南、中西部地区和西南区 5 个地区。X 轴和 Y 轴的单位均为 mm。虚线为 $X=Y$ 的参考线,实线根据散点回归得出

Fig. 5 Scatter plots of regional mean daily rainfall during summer (JJA) of 1979–2002.

The X-axis denotes rainfall in reanalysis (unit: mm) while Y-Axis denotes rainfall observed by stations (unit: mm).

The three rows from the upper to bottom show results from NCEP, ERA and JRA, and the five columns represent for North China, mid- and lower reaches of Yangtze River valley, South China, the mid-western China and the southwestern China, respectively.

The dashed lines are references for $X=Y$, and solid lines are the least squared regression

考虑到降水具有很强的区域依赖性,本文选取了 5 个关键区进行分析。如图 1 中 5 个方框所示,在我国东部的 3 个分区自北至南依次为华北区 ($37^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}, 107.5^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$), 长江中下游区 ($27^{\circ} \sim 33^{\circ}\text{N}, 107.5^{\circ} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$) 和华南区 ($21.5^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}, 107.5^{\circ} \sim$

120°E), 西端的两个分区自北至南分别为中西部地区 ($28.5^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}, 100^{\circ} \sim 105^{\circ}\text{E}$) 和西南地区 ($21^{\circ} \sim 28^{\circ}\text{N}, 97.5^{\circ} \sim 106^{\circ}\text{E}$)。东部 3 个区域可分别代表暖季不同时段雨带所处的关键位置,中西部地区包括高原东侧的降水大值区,西南区具有复杂的地形分布且降水量

局地差异显著。图 5 较直观地给出了 5 个区域中三套资料的夏季降水与台站观测的比较。对应分析时段的 2208 个样本(24 年 \times 92 天),每幅图中都有 2208 个点,分别以当日的再分析日降水量为横坐标,以台站观测日降水量为纵坐标在图中定位。左侧第一列为华北地区,可知 NCEP 和 JRA 资料在该地区与台站资料相差不大,散点回归线(实线)与 $X=Y$ 的参考线(虚线)几乎重合;而 ERA 资料的回归线偏向于 Y 轴,说明对华北区降水有明显低估。第二列为长江中下游地区区域平均的结果,NCEP 和 JRA 资料略为偏多,而 ERA 则明显偏少。在华南区(第三列),NCEP 资料的偏差不大,ERA 资料降水偏少而 JRA 资料降水偏多。第四列为我国中西部地区,NCEP 资料的偏差最大,显著高估了该区的降水。在西南区(第五列),NCEP 资料的降水仍大幅偏大,ERA 资料偏少、JRA 资料偏多。综合 5 个关键区的情况,NCEP 资料和 JRA 资料对区域降水的再现要优于 ERA 资料,且前两套资料多表现为降水量偏多,而 ERA 资料却系统性偏少。

3 夏季降水量变率的比较

我国夏季降水具有显著的年际变化和季节内变化^[15-16],能否合理反映出这些变率是评估降水资料的一个重要方面。

图 6 给出了三套再分析资料在 5 个关键区域的逐年夏季平均降水量,各种线条代表不同资料,实线为台站观测值;图 6a~e 幅图自上至下分别对应于

华北区、长江中下游地区、华南区、中西部地区和西南区。相对应的,图 7 为各再分析资料与台站观测降水量在年际尺度的相关系数。在华北区,NCEP 和 ERA 资料的降水量与观测相比都明显偏小;三套资料的年际变化较为一致,与观测值具有较高的相关性,相关系数均超过 0.82。在长江中下游地区,ERA 资料较观测偏少,年际变化相关系数为 0.58,年际变化幅度较观测明显偏弱;NCEP、JRA 降水量与观测值基本相当,相关系数分别为 0.43 和 0.72;三套资料均在一定程度上反映出长江中下游地区的夏季降水量在 20 世纪后 20 年间的上升趋势。ERA(JRA)资料低估(高估)了华南地区降水,而 NCEP 资料与观测数据有很好的一致性;各再分析资料在华南区与观测资料的相关性很高,相关系数均超过了 0.87;且三套资料都能识别出该地区降水量在 20 世纪 80 年代末、90 年代初的跃升。在中西部地区,NCEP 降水明显偏多但与观测的相关性较好,相关系数为 0.68;另两套资料降水量偏差较小但相关性较差,相关系数均未超过 0.50;特别是 ERA 资料,相关系数仅为 0.09,对该地区年际变化的描述几乎没有可信度。在西南地区,NCEP 和 JRA 资料偏多而 ERA 资料偏少,JRA 资料的相关系数最高(0.74),ERA 资料次之(0.54),NCEP 资料最低(0.47)。总体来看,在年际尺度上,再分析资料降水变率与观测降水的一致性在华北和华南要明显优于另外三个地区;三套再分析资料中,ERA 资料对年际变化的描述能力相对较弱,JRA 资料相对较好。

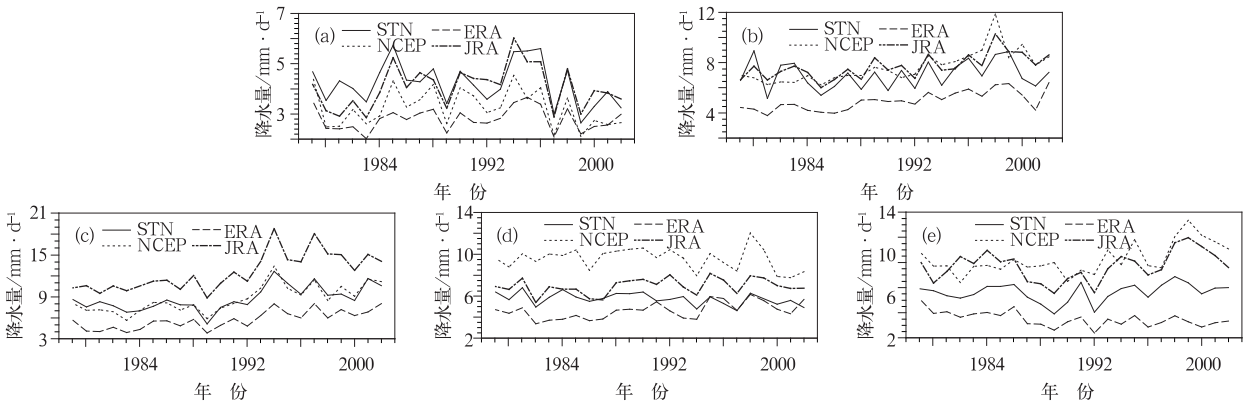


图 6 再分析资料和台站资料在 5 个关键区域的逐年夏季平均日降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
(a)~(e)分别对应于华北区、长江中下游地区、华南区、中西部地区和西南区。图中横轴为年份,纵轴为降水量

Fig. 6 The summer mean daily rainfall amount (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) averaged over five key regions for each year from 1979 to 2002.

Lines with different colors denote rainfall from different sources. (a)~(e) represent the result from North China, mid- and lower reaches of the Yangtze River valley, South China, the mid-western China and the southwestern China, respectively. The X-axis is year and Y-axis is rainfall amount

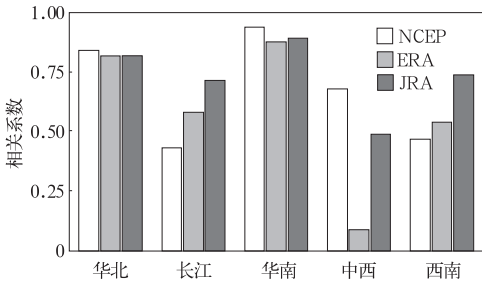


图 7 再分析资料与台站观测的区域平均夏季降水量在 1979—2002 年间的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients of regional mean summer rainfall amount between the reanalysis datasets and station observation from 1979 to 2002

我国东部地区暖季降水的一个重要特征是雨带的南北向移动和停滞,局地降水量具有显著的季节内演变。为了反映这一特征,本文考察各再分析资料与观测降水间历年的夏季逐日相关系数(图 8)。图 8 中不同的线条代表不同资料夏季逐日(92 天)降水相关系数在 24 年间的变化;五幅图自上至下分

别为华北区、长江中下游地区、华南区、中西部地区和西南区。在华北区,三套资料历年相关系数都很高,绝大部分年份都大于 0.80,且逐年之间差异不大,很好地再现出该区域降水的季节内变化。在长江中下游地区,三套资料间出现了较明显的差异:ERA 资料一直保持较高的相关系数,不同年份间差异不大;JRA 资料略低于 ERA 结果,NCEP 资料的相关系数最低。华南区三套资料相关系数在绝大多数年份均大于 0.70,相对而言 NCEP 资料的相关性稍差。在我国中西部地区,ERA 和 JRA 两套资料的相关系数基本维持在 0.70 以上,而 NCEP 资料相关系数大于 0.70 的年份仅有 3 年,大部分年份的相关性都较弱,有 4 年的相关系数小于 0.50。在西南区 NCEP 资料的相关系数仍大幅偏低,在 1987 年仅为 0.30。总体来看,ERA 和 JRA 资料在季节内变化方面表现稳定,在各区域都与观测资料有较好相关,且相关系数的年际波动相对较小。NCEP 资料对降水季节内演变的描述能力较弱,特别在西部两个地区与观测的差异更为明显。

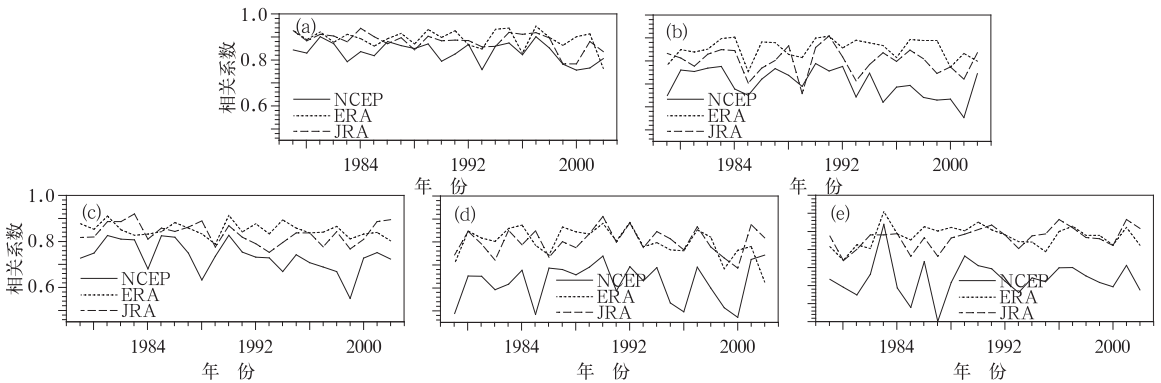


图 8 再分析资料和台站资料在 5 个关键区域的历年夏季逐日降水量相关系数

(a)~(e) 分别对应于华北区、长江中下游地区、华南区、中西部地区和西南区。图中横轴为年份,纵轴为相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients of regional mean summer daily rainfall between the reanalysis datasets and station observation

(a)~(e) represent the result from North China, mid- and lower reaches of the Yangtze River Valley, South China, the mid-western China and the southwestern China, respectively. The X-axis is year and Y-axis is correlation coefficient

4 三套再分析资料的 TS、BS 评分

TS 评分和 BS 评分是近年来比较通用的降水预报统计检验方法,该方法可以对数值天气预报模式的预报效果做出客观量化的评价^[17-18]。两项评分的具体计算公式如下:

$$TS = \frac{N_{\text{正确}}}{N_{\text{正确}} + N_{\text{空报}} + N_{\text{漏报}}} \quad (2)$$

$$BS = \frac{N_{\text{正确}} + N_{\text{空报}}}{N_{\text{正确}} + N_{\text{漏报}}} \quad (3)$$

其中, $N_{\text{正确}}$ 为预报正确的(再分析资料和观测均出现特定量级以上降水)的站点数, $N_{\text{空报}}$ 为空报的台站数, $N_{\text{漏报}}$ 为漏报的台站数。由式(2)可知,TS 评

分为预报正确的区域与预报、观测降水合集之比。当比值为 1 时, 预报和观测降水站点重合, 降水落区预报正确; TS 越趋于 0, 则降水落区预报越差。 BS 评分为模式预报降水区域与观测降水区域之比 (式 3), 可反映模式预报高估 ($BS > 1$) 或低估 ($BS < 1$) 实际降水范围的程度。评估我国夏季降水, 多采用 TS 、 BS 评分相结合的方法: TS 评分值越大且 BS 越接近 1 时, 预报效果越好。

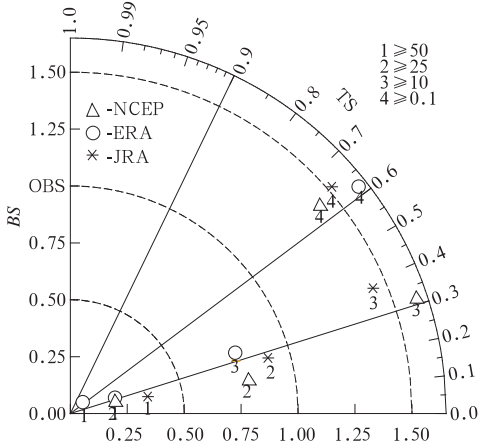


图9 三套再分析资料的 TS 、 BS 评分结果
 TS 值用图中每个点与横轴的夹角表示, BS 值用点距原点的直线距离表示。不同的再分析资料用点上的标号标识, Δ , \circ , $*$ 分别代表 NCEP、ERA 和 JRA 资料; 不同数字表示不同的降水等级

Fig.9 TS and BS scores of rainfall in three reanalysis datasets

TS score is shown by separation angle between each point and the X-axis, and BS score is proportional to the radial distance from the origin. Different numbers represent different data sources: Δ for NCEP, \circ for ERA and $*$ for JRA. Different numbers denote different rainfall grades

本文中, 为了增强再分析资料与业务数值预报模式结果的可比性, 我们将三套再分析资料的降水场看作数值模式对 1979—2002 年汛期的后报试验结果, 分别计算其逐日 TS 评分和 BS 评分。计算过程中将降水分为 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, $\geq 25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 四个等级, 并按不同等级计算评分。图 9 给出了再分析资料评分结果的气候平均值: TS 值用弧度表示, 与横轴的夹角越大则 TS 值越高; BS 值用距原点的直线距离表示, 标注 OBS 的点为 TS 、 BS 值均为 1 的点, 代表预报降水落区与观测降水落区完全一致。不同等级的降水用不同数字 (1, 2, 3, 4) 表示, 数字上的符号标示出再分析资料的类别。这样在图中可以直观地得到两类评分的数值, 便于进行综合分析。由图 9 可知, 3 个数字 4 (所有日降水量大于 0.1 mm 的降水事件) 与横轴的夹角最

大, TS 值在 0.6 左右; 且 3 个数字 4 的 BS 值均大于 1.25, 这表明三套资料总降水的落区都大于观测值。3 个数字 4 中 JRA ($*$) 的 TS 值最高 (0.633), NCEP 降水的 BS 值最小 (1.393), 而 ERA 资料的 TS 值最小 (0.599)、 BS 值最大 (1.589)。随着日降水量的增大, 数字 3 (大于 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 的与横轴的夹角与数字 4 相比减小约了二分之一; NCEP 和 JRA 降水的 BS 评分仍在 1 以上, 而 ERA 降水的 BS 评分明显下降, 减至 0.756, 说明 ERA 资料中 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上量级的降水落区已明显小于观测结果。当降水量计算阈值提升到 $25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 后 (数字 2), TS 和 BS 值都大幅下降。JRA 降水的 TS 值最高 (0.205), 且 BS 评分 (0.895) 在所有 12 个点中最接近于 1; NCEP 降水的评分略逊于 JRA 资料 ($TS=0.138$, $BS=0.785$); 相较而言, ERA 降水的评分则明显偏低, TS 为 0.074, BS 为 0.193。评估暴雨量级的降水, 3 个数字 1 均贴近横轴且靠近原点, 说明再分析资料对暴雨落区的预报能力很弱。其中评分最高的还是 JRA 资料 ($TS=0.077$, $BS=0.338$), 而 ERA 降水的分值最低 ($TS=0.007$, $BS=0.059$)。整体来看 12 个点的分布, 可知三套资料中 $25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上降水的 BS 评分均小于 1, 说明都低估了较强降水的落区范围, ERA 降水的此类偏差最为突出; JRA 资料在各个量级的 TS 分值均高于另两套资料, 且在较强降水区间 BS 值更接近于 1, 表现出了较好的预报能力。

5 结论与讨论

通过与中国台站降水资料的比较, 本文对 NCEP、ERA 和 JRA 三套再分析资料的夏季降水场进行了较细致的评估分析。三套资料对应的 3 个数值预报模式既呈现出一定的共性, 又在不同区域、不同时间尺度上表现出模拟能力的显著差异。现将评估分析的主要结论列举如下。

(1) 三套再分析资料都能反映出我国夏季降水量分布的基本特征。但 NCEP 资料在青藏高原东坡存在一虚假降水中心, ERA 资料降水量系统性偏少, JRA 资料高估了华南沿海地区的降水。

(2) 三套再分析资料均高估了弱降水、低估了强降水, 说明数值模式中降水过程的触发与发展机制尚存在问题。

(3) 再分析资料对研究时段内的降水的年际变化有一定的表现能力。在 5 个关键区中, 长江中下

游地区和西部两个地区夏季降水的年际变化与观测结果的相关性相对较差,特别是 NCEP 资料在长江中下游地区和西南区、ERA 和 JRA 资料在中西部地区相关系数均小于 0.50。

(4) 再分析资料能合理反映出夏季降水的季节内演变。相对较差的是 NCEP 资料,其西部两个地区降水的季节内演变与台站观测资料的相关性较低。

(5) 当考虑日降水量 ≥ 0.1 mm 的降水事件时,再分析资料降水的 TS 评分在 0.6 左右,BS 评分在 1.5 左右。随着参与评分的降水等级的提高,TS、BS 评分都迅速下降,三套资料对暴雨的预报能力均非常弱。

在环流场基本正确的前提下,当前较先进的数值预报模式对我国夏季降水的模拟仍存在较大不足,由此可知目前的数值模式在降水相关的物理过程处理方面尚存在一定缺陷。同时,模式对不同时间变率降水的再现能力亦不相同,如 ERA 对降水季节内变化表述较好,但未能准确模拟出中国东部降水的年际变化特征,NCEP 对降水年际变化的表现尚可,但对季节内演变的再现相对较差。不同模式对不同时间尺度降水过程模拟能力的差异,可在一定程度上反应出各模式对不同时间尺度物理过程再现能力的不同。在物理过程参数化方案得到突破性进展之前,对模式降水场的评估分析不能求全责备,对数值预报产品的释用也要充分考虑到这种由物理过程不完善导致的预报偏差。另外,值得指出的是,部分降水偏差来源于与模式分辨率相关的、对小尺度局地地形及植被等下边界强迫场的不准确描述;由于在插值过程中没有考虑局地地形影响、台站分布密度不均等因素,也会导致部分误差。

参考文献

[1] Yu R, W Li, X Zhang, et al. Climatic features related to Eastern China summer rainfalls in the NCAR CCM3 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17(4): 503-518.

[2] 周天军,宇如聪,王在志,等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s [M]. 北京: 气象出版社, 2005: 1-3.

[3] Zhou T, B Wu and B Wang. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the asian-australian monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(5): 1159-1173.

[4] Kitoh A and S Kusunoki. East Asian summer monsoon simulation by a 20-km mesh AGCM [J]. *Climate Dynamics*, 2007, 31(4): 389-401.

[5] Zhou T and Z Li. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM [J]. *Climate Dynamics*, 2002, 19(2): 167-180.

[6] Kang I S, K Jin, B Wang, et al. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs [J]. *Climate Dynamics*, 2002, 19(5): 383-395.

[7] Zhou T, B Wu, A Scaife, et al. The CLIVAR C20C project: which components of the Asian-Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(7): 1051-1068.

[8] Kalnay E, M Kanamitsu, R Kistler, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.

[9] 赵天保,艾丽坤,冯锦明. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较[J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(2): 278-294.

[10] 赵天保,符淙斌. 中国区域 ERA-40, NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 14-32.

[11] 赵天保,符淙斌. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 634-648.

[12] Kanamitsu M, W Ebisuzaki, J Woollen, et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(11): 1631-1643.

[13] Uppala S M, P W Kallberg, A J Simmons, et al. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(612): 2961-3012.

[14] Onogi K, J Tsutsui, H Koide, et al. The JRA-25 Reanalysis [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85(3): 369-432.

[15] Huang R, J Chen and G Huang. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6): 993-1023.

[16] Tao S and Y Ding. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1981, 62(1): 23-30.

[17] 何光碧,陈静,肖玉华,等. AREM 数值模式对 2005 年汛期四川的降水预报[J]. *气象*, 2006, 32(7): 64-71.

[18] 公颖,张兵,廖移山,等. 2005 年 AREM 模式汛期试验结果评估分析[J]. *气象*, 2007, 33(1): 87-93.