

戴泽军, 宇如聪, 李建, 等. 三套再分析资料的中国夏季降水日变化特征[J]. 气象, 2011, 37(1): 21-30.

# 三套再分析资料的中国夏季降水日变化特征<sup>\* 1</sup>

戴泽军<sup>1,3</sup> 宇如聪<sup>2</sup> 李 建<sup>2</sup> 陈昊明<sup>2</sup>

1 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

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100039

**提 要:** 利用台站观测降水, 评估分析了三套再分析(NCEP, ERA40 和 JRA25)降水资料对中国夏季降水日变化的再现能力。结果表明, 三套再分析资料呈现的中国夏季降水日变化特征较观测存在明显偏差。对比台站观测的白天(08—20, 北京时间)和夜间(20—08 时)降水比例, 再分析降水在大部分区域都表现为白天较夜间偏多, NCEP 和 ERA40 在观测降水量最小的上午(08—14 时)偏多更为明显, 且 NCEP 模拟的白天和夜间的降水比例在西南地区与台站观测几乎相反。相比之下, 三套再分析资料中, JRA25 的降水量和降水频次的日变化与观测最为接近; NCEP 的降水强度日变化最接近观测; ERA40 可部分再现西南的夜雨特征。

**关键词:** 夏季降水, 日变化, 再分析资料

## The Characteristics of Summer Precipitation Diurnal Variations in Three Reanalysis Datasets over China

DAI Zejun<sup>1,3</sup> YU Rucong<sup>2</sup> LI Jian<sup>2</sup> CHEN Haoming<sup>2</sup>

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

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

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

**Abstract:** The characteristics of summer precipitation diurnal variations in three reanalysis datasets (NCEP, ERA40 and JRA25) over China were analyzed by comparing with those in station rain gauge observations. Results show that the summer precipitation diurnal variations in the three reanalysis products all present obvious deficiencies. Analyzing the percentages of daytime and nighttime rainfall show that the percentage of the daytime (08—20 BT) rainfall to the whole day rainfall is larger than that of nocturnal (20—08 BT) rainfall in all reanalysis datasets over the most region of China while comparing with the station gauge data. Further analyses demonstrate that the percentage of the morning (08—14 BT) rainfall is the smallest in the station gauge data, but in NCEP and ERA40 products it is obviously more than that in the station observations. The proportion of the daytime rainfall to nocturnal rainfall in NCEP products over Southwest China is almost reverse to that of station rain gauge data. Generally, the diurnal variations of precipitation amount and frequency in JRA25 products and precipitation intensity in NCEP products are closest to the corresponding components in station data, but the nocturnal rainfall over Southwest China is only partly reproduced by ERA40 products.

**Key words:** summer precipitation, diurnal variations, reanalysis dataset

\* 国家重点基础研究发展计划(2010CB951900)和国家自然科学基金项目(40625014, 40921003)共同资助  
2010 年 8 月 7 日收稿; 2010 年 9 月 27 日收修定稿  
第一作者: 戴泽军, 主要从事中尺度数值模式应用研究. Email: dai\_zejun@tom.com

## 引 言

东亚地区地形复杂,地貌多变,受独特的季风气候影响,该地区夏季降水一直是数值模拟的一个难点问题<sup>[1-2]</sup>。Chen 等<sup>[3]</sup>对最新的 CAM3 的评估分析表明,当前较为先进的大气模式亦难以准确再现东亚降水的气候态与季节循环。数值模式模拟的东亚夏季降水在降水量、降水强度及雨带位置等方面存在系统性偏差<sup>[4-7]</sup>。为改进数值模式模拟东亚夏季降水的性能,需要对数值模式的模拟结果进行系统评估。当前数值模式的物理过程日益复杂,分析模式内部误差及其产生原因越来越困难,给模式的评估与改进带来许多不确定性。从目前国内外模式评估研究的发展看,模式的发展与改进亟需进一步寻求细致的模式评估标准。降水日变化的模拟涉及到模式中诸多物理过程,如对流、辐射传输、云物理过程、地形—海陆差异、地表与边界层通量交换等物理过程<sup>[8]</sup>,是检验模式物理过程的理想客观标准<sup>[9-12]</sup>。通过对模式降水日变化模拟结果的评估分析,有助于寻找模式系统性误差,为模式及其物理过程参数化的改进提供重要依据。模式降水日变化的评估分析越来越受到各国重视,并日益成为近年来国际上数值模式发展和评估的热点和重要方向。

近几年,高时空分辨率的地面和卫星降水资料的利用,进一步揭示了中国降水日变化的时空演变与区域特征。宇如聪等<sup>[13]</sup>分析了全国 706 站自动观测的逐时降水资料,发现中国夏季降水存在显著的区域差异。宇如聪等<sup>[14]</sup>进一步分析发现,降水持续性是分离中国中东部地区清晨和午后降水峰值位相的重要因子。周天军等<sup>[15]</sup>对比分析了台站观测与卫星资料表现的中国夏季降水及其日变化特征,发现卫星资料基本再现了基于台站观测的降水日变化特征,且降水频率与强度的日变化亦存在区域差异。宇如聪等<sup>[16]</sup>利用 TRMM 2A25 降水率资料,分析了层状云和对流性降水的日变化特征,指出降水峰值时间与降水类型以及降水持续时间密切相关。Chen 等<sup>[17]</sup>分析了夏季长江流域的降水特征后指出,长江流域持续性夜雨与大尺度环流场的日变化密切相关。姚莉等<sup>[18]</sup>对高时间分辨率的雨强资料的时空分布特征进行了分析,发现雨强的日变化具有明显的地区差异,西南和华南地区日变化最为明显。Li 等<sup>[19]</sup>对中国西南和东南区域的

降水日变化的季节特征分析后指出,降水日变化的季节变化体现了热力和动力作用的季节演变,而东西向的差异则反映了地形和海陆分布的影响。中国降水日变化丰富的观测事实,为评估分析模式模拟东亚地区降水的日变化提供了充足的观测依据。

再分析降水不受观测资料直接影响,是完全由模式计算输出的变量<sup>[20]</sup>,可以认为再分析资料中的降水场是在基本可信的环流场强迫下,由当前先进的数值预报模式输出,能够反映出目前模式参数化过程导致的误差。以前对再分析降水资料的分析主要是在月、季等时间尺度上对资料的可信度方面予以检验和评价<sup>[21-24]</sup>。最近,李建等<sup>[25]</sup>通过对再分析降水的分析结果表明,再分析资料的降水基本能反映出我国夏季降水量分布的主要特征。该文就再分析资料降水对我国夏季降水的年际和季节内的变化特征的再现能力进行了分析,而再分析资料对我国夏季降水的日变化特征的再现能力需进一步分析。本文利用 12 年(1991—2002 年)夏季每天 4 个时次的再分析资料的降水,并与同时期台站降水进行对比分析,考察在大尺度环流强迫基本可信的情况下,当前较先进的数值模式对中国夏季降水日变化的再现能力,以期揭示物理过程的偏差对降水日变化模拟的影响,为模式发展和评估工作提供参考。

## 1 资料与方法

本文选取了三套常用再分析的降水资料(资料说明见表 1)用于分析,来源分别为: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<sup>[26]</sup>,简称 NCEP;欧洲中期数值预报中心(ECMWF)再分析数据集<sup>[27-28]</sup>,简称 ERA40;以及日本气象厅组织研发的日本再分析数据集<sup>[29]</sup>,简称 JRA25。所用再分析资料为夏季(6—8 月)每天 4 个

表 1 再分析模式和降水参数

Table 1 The parameter of reanalysis model and precipitation

	来源	模式水平分辨率	模式垂直分辨率	降水资料水平分辨率
NCEP	美国 NCEP/DOE	T62, 约 210 km	L28 (sigma)	1.875°×1.875°, 高斯格点
ERA40	欧洲中心 ECMWF	TL159, 约 125 km	L60 (hybrid)	2.5°×2.5°, 规则网格
JRA25	日本 JMA	T106, 约 120 km	L40 (sigma-pressure)	1.125°×1.125°, 高斯格点

时次(02—08 时, 08—14 时, 14—20 时和 20—02 时)的降水资料。为揭示再分析的偏差, 本文利用同时段的中国 706 个台站观测的逐时降水资料(简称 OBS)做对比分析<sup>[30]</sup>。

分析的时段为上述四套资料的交集: 1991—2002 年。分析区域为我国 95°E 以东, 20°N 以北的地区。为便于比较, 台站观测和再分析数据均采用距离权重反比插值方法插值到  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的空间格点上。台站 4 个时次的降水量由与再分析对应时段的逐小时降水量累加生成。当 6 小时累积降水量大于等于 0.1 mm 时, 认为该 6 小时内发生 1 次降水事件。降水次数定义为分析时间段内发生降水事件的次数。降水强度定义为分析时间段内的总降水量与总降水次数的比值。本文分析所用时间为北京时(BT)。

## 2 结果分析

### 2.1 白天与夜间的降水量比较

本文中将在 08—20 BT(20—08 BT)的降水定义为白天(夜间)降水。尽管三套再分析日平均降水量与台站观测降水量分布很相似<sup>[25]</sup>, 但从白天和夜间降水量占日总降水量的百分比看, 再分析资

料与台站观测差别明显。图 1 给出 1991—2002 年夏季平均的夜间与白天降水量占日总降水量的百分比的空间分布。图中第一行至第四行分别对应台站观测(OBS)、NCEP、ERA40 和 JRA25。台站观测白天和夜间降水量百分比区域差别明显(图 1a, 1b)。在长江中上游、黄河下游, 台站观测的夜间降水量比白天多, 夜间降水量百分比最大值位于四川盆地。白天呈现华北北部、华南两条百分比大值带; 华南沿海白天比夜间降水量明显偏多。三套再分析资料白天和夜间的降水量百分比存在明显的差异(图 1c~1h)。NCEP 的降水量百分比在 105°E 以西与 40°N 以南的区域白天(图 1d)比夜间(图 1c)明显偏大。ERA40 的降水量百分比在大部分区域白天(图 1f)远大于夜间(图 1e)。JRA25 的降水量百分比在大部分区域白天(图 1h)亦大于夜间(图 1g)。就西南的降水量百分比而言, NCEP 的降水量百分比夜间(图 1c)较白天(图 1d)少, 与台站观测相反; 而台站观测的西南夜雨在 ERA40(图 1e)和 JRA25(图 1g)中均有体现。总体来看, 三套再分析资料在 105°E 以西的夜雨百分比均小于台站观测, 再分析资料在大部分区域的降水量百分比白天较夜间明显偏大。

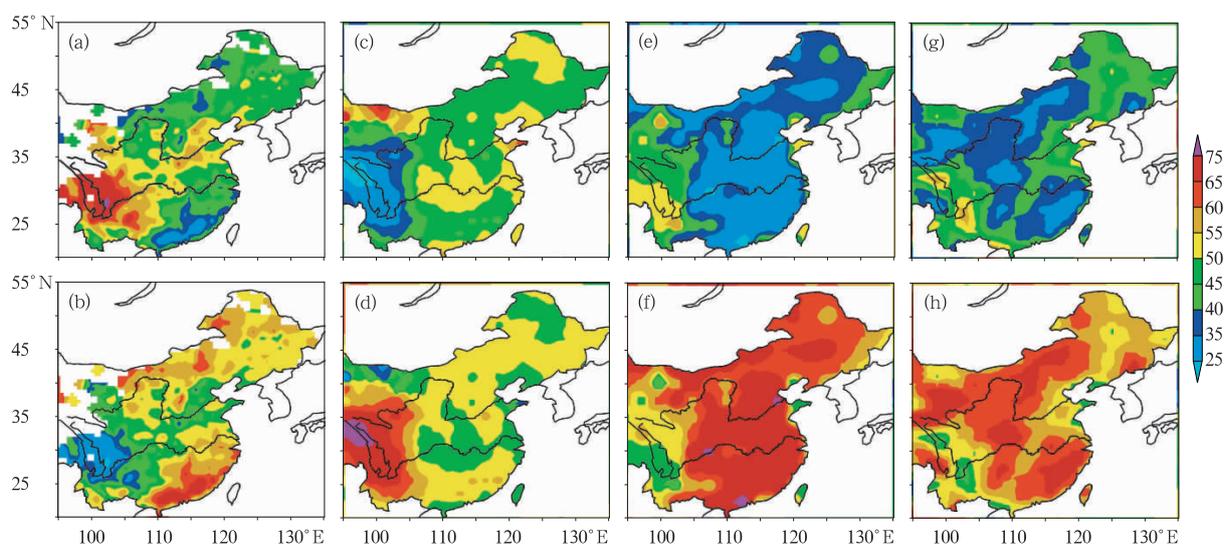


图 1 1991—2002 年夏季平均的台站观测和再分析夜间(a, c, e, g)与白天(b, d, f, h)降水量占日总降水量百分比的空间分布(单位: %)  
图中第一列至第四列分别对应台站观测(OBS)、NCEP、ERA40 和 JRA25

Fig. 1 Spatial distribution of the percentages of the nocturnal rainfall (a, c, e, g) and daytime rainfall (b, d, f, h) to the whole day rainfall about observation and reanalysis in summer seasons (JJA) during 1991—2002 (unit: %)

The figures from the first column to the fourth column stand for OBS, NCEP, ERA40 and JRA25 respectively

## 2.2 四个时次的降水特征

将降水时间段细分,以进一步比较再分析和台站观测降水的时空分布特征。图 2 给出台站观测和再分析 4 个时次降水量占日总降水量的百分比的空间分布。从台站观测来看,在高原东侧川西的降水量主要集中在 20—02 时(图 2d),川东、贵州及云南的降水量则主要分布在 02—08 时(图 2a),华北北部、华南沿海的 14—20 时降水量百分比其他时次大,华东中部地区降水量百分比的日变化特征不明显。三套再分析资料的降水量在 4 个时次上呈现出

的日变化特征与台站观测差异明显。NCEP 和 ERA40 的降水量主要分布在 08—14 时(图 2f, 2j),是台站观测降水量最少的时段。JRA25 的降水量主要分布在 14—20 时(图 2o),是台站观测降水量最多的时段。从三套再分析资料与台站观测各时次降水量百分比的场相关系数(表 2)可以看出,NCEP 主要呈现负相关,而 ERA40 和 JRA25 为正相关,尤其 08—14 时和 20—02 时两个时次的相关性明显好于其他两个时次。总体而言,再分析模拟西南的夜雨能力较差,NCEP 与 ERA40 模拟的降水量主时段较观测提前,JRA25 的降水量日变化与观测最为接近。

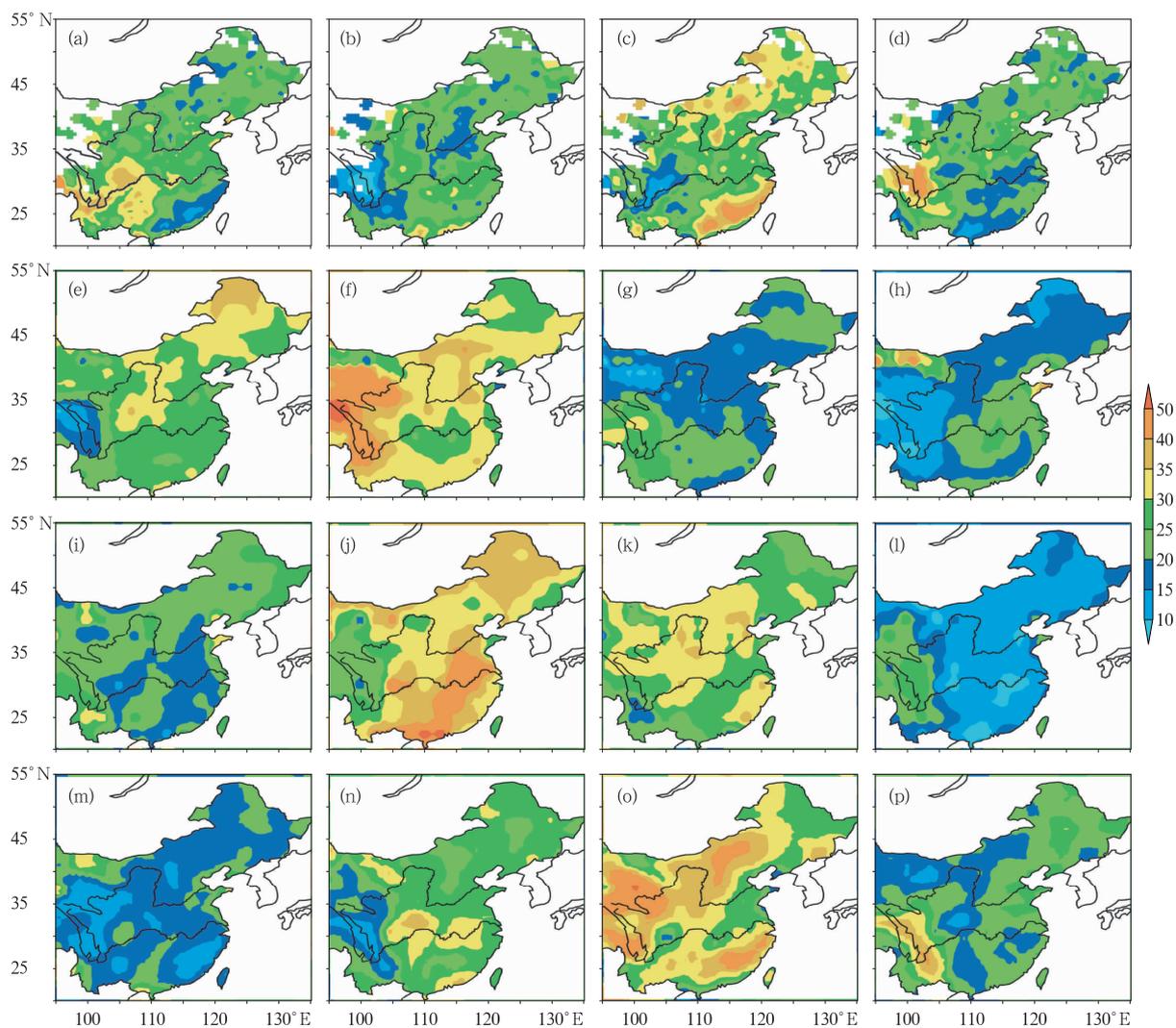


图 2 1991—2002 年夏季平均的台站观测和再分析 02—08 时(a, e, i, m)、08—14 时(b, f, j, n)、14—20 时(c, g, k, o)及 20—02 时(d, h, l, p)降水量占日总降水量百分比的空间分布(单位:%)

图中第一行至第四行分别对应台站观测(OBS)、NCEP、ERA40 和 JRA25。

Fig. 2 Spatial distribution of the percentages of four times [02—08 BT (a, e, i, m), 08—14 BT (b, f, j, n), 14—20 BT (c, g, k, o) and 20—02 BT (d, h, l, p)] rainfall to the whole day rainfall about observation and reanalysis in summer seasons (JJA) during 1991—2002 (unit: %)

The figures from the first row to the fourth row stand for OBS, NCEP, ERA40 and JRA25 respectively.

表 2 再分析资料与台站观测降水百分比的场相关系数  
Table 2 Spatial correlation coefficient between reanalysis and observation precipitation

	02—08 时	08—14 时	14—20 时	20—02 时
NCEP	-0.41	-0.44	-0.30	-0.40
ERA40	0.19	0.48	0.23	0.60
JRA25	0.24	0.60	0.21	0.57

图 3 给出了台站观测和再分析 4 个时次降水次数占日总降水次数的百分比的空间分布。同种再分析资料的降水次数百分比与降水量百分比的空间分布相似。在 02—08 时(图 3a), 台站观测降水次数百分比自西南向江淮流域呈现大值带。在 08—14 时(图 3b), 103°~110°E 区间自东北向西南存在一

大值带, 在东北北部、长江中下游及华南南部也存带状分布的大值区。在 14—20 时(图 3c), 华北北部及华南沿海的降水次数偏多。在 20—02 时(图 3d), 降水次数百分比的大值带主要分布在四川盆地、江淮流域及东南沿海。4 个时次台站观测降水次数百分比大多分布在 20%~32% 之间。在大部分区域, NCEP 在 02—08 时(图 3e) 和 08—14 时(图 3f) 降水次数百分比比较大, 其他两个时次相对较小。大部分区域的 ERA40 和 JRA25 降水次数百分比相对较大的时次为白天的 08—14 时(图 3j) 与 14—20 时(图 3o)。与台站观测相比, 再分析资料在 08—14 时的降水次数百分比偏大最为明显。

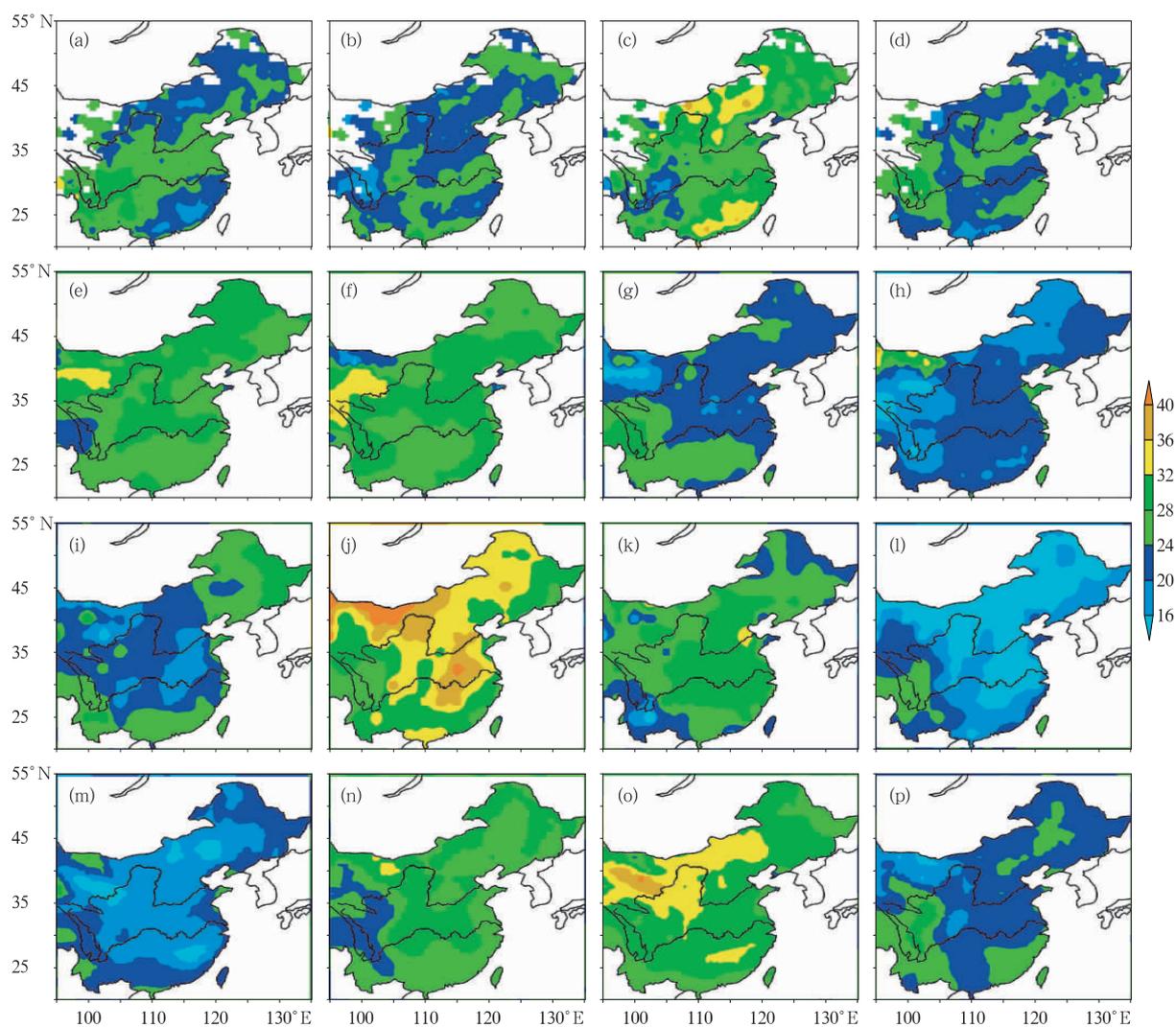


图 3 同图 2, 但为降水次数的结果

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for precipitation frequency

图 4 给出了台站观测和再分析资料 4 个时次降水强度的空间分布。4 个时次的台站观测降水强度大值区主要在我国东部和南部。在 02—08 时

(图 4a), 台站观测的降水强度大值中心主要分布在云南、长江流域及江淮流域, 降水强度超过  $8 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 。华南南部的部分区域存在降水强度小值

区,降水强度小于  $6 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 。相对 02—08 时,从 08—14(图 4b)时到 14—20 时(图 4c),台站观测降水强度大于  $6 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$  的区域范围逐渐向东、向南缩小,02—08 时华南南部降水强度相对较小的区域的降水强度逐渐增大。20—02 时(图 4d)的降水强度大于  $6 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$  的区域相对于其他 3 个时次为最小。再分析资料的降水强度普遍比台

站观测偏小,尤其是 ERA40 四个时次(图 4i~4l)的降水强度均小于其他再分析资料。从四个时次来看,NCEP 降水强度偏大的时次为 08—14 时(图 4f),JRA25 在白天的 08—14 时(图 4n)与 14—20 时(图 4o)降水强度较夜间大。总体而言,NCEP 的降水强度分布最接近台站观测,其次是 JRA25。

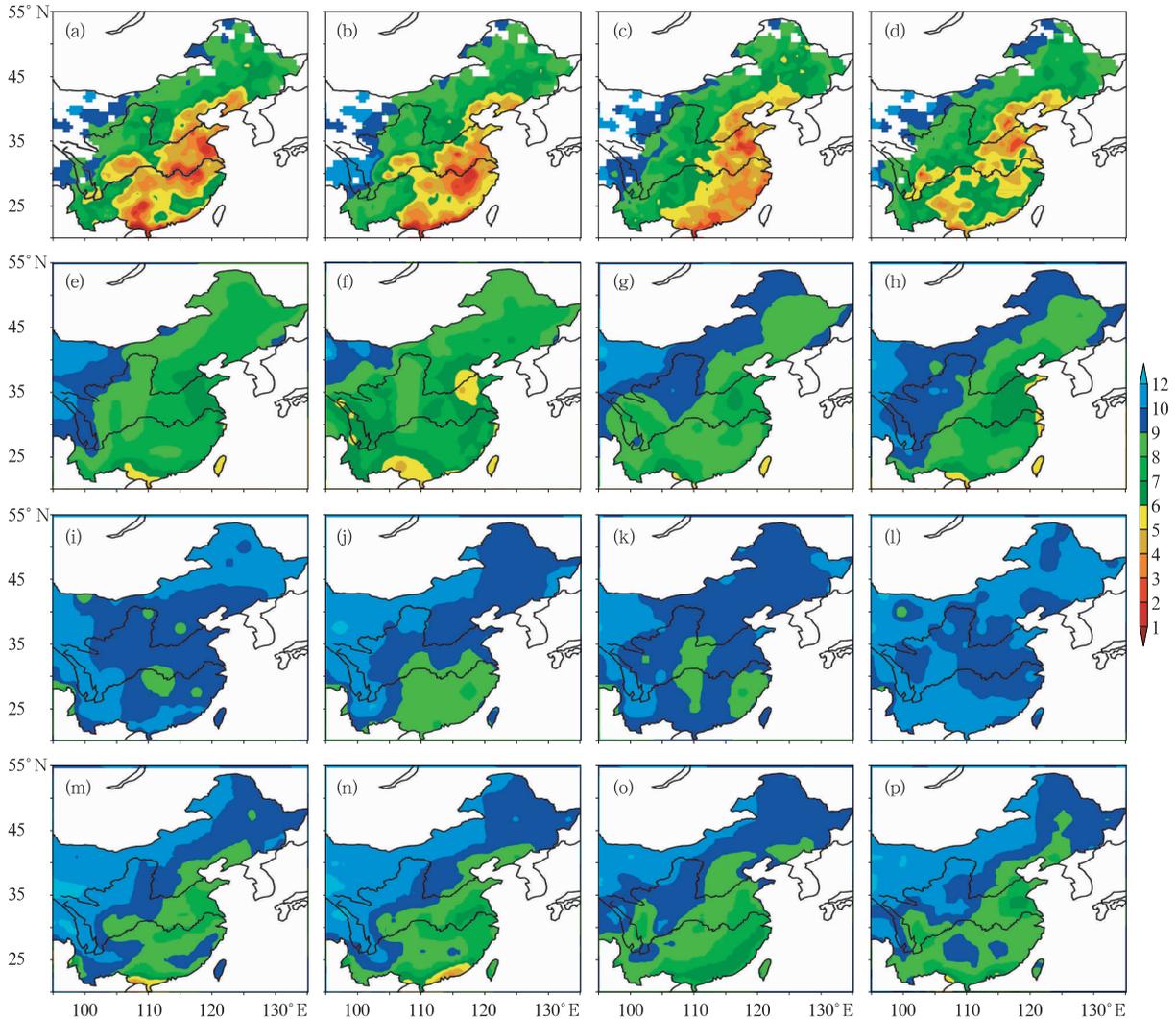


图 4 1991—2002 年夏季平均的台站观测和再分析 02—08 时(a, e, i, m)、08—14 时(b, f, g, n)、14—20 时(c, g, k, o)及 20—02 时(d, h, l, p)降水强度的空间分布[单位:  $\text{mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ ]  
图中第一行至第四行分别对应台站观测(OBS)、NCEP、ERA40 和 JRA25。

Fig. 4 Spatial distribution of four times [02—08 BT (a, e, i, m), 08—14 BT (b, f, g, n), 14—20 BT (c, g, k, o) and 20—02 BT (d, h, l, p)] precipitation intensity about observation and reanalysis in summer seasons (JJA) during 1991—2002 [unit:  $\text{mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ ]

The figures from the first row to the fourth row stand for OBS, NCEP, ERA40 and JRA25 respectively

降水的日变化振幅是反映降水日变化特征的重要指标。用上述观测和再分析资料的降水量、降水次数和降水强度在 4 个时次中的最大值减去最小值,得到降水的日变化振幅的空间分布图(图 5)。台站观测降水量(图 5a)的日变化振幅大值区主要

分布在华北北部、华南沿海和四川盆地,振幅超过 12%,局部地区超过 20%。降水次数(图 5b)与降水量的振幅分布相似,但相对偏小,大值带偏窄。降水强度(图 5c)的振幅在  $33^\circ\text{N}$  以北的大部分地区小于  $1 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ ,而在  $33^\circ\text{N}$  以南的大部分地区超过

$2 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ , 在四川盆地、长江中下游和华南沿海的局部地区存在  $2 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$  及以上的大值中心。三套再分析资料降水的日变化振幅分布相对观测存在明显的差异。从降水量的振幅来看, 在华东中部的部分区域, 三套再分析资料较观测不同程度

地偏大。而 NCEP(图 5d) 的振幅在  $35^{\circ}\text{N}$  以北地区显著偏强; ERA40(图 5g) 在四川盆地的振幅较小, 东部地区振幅偏大; JRA25(图 5j) 的振幅分布与台站观测较为一致, 但量值偏大, 在黄河上游的部分地区偏大尤为明显。再分析资料的降水次数振幅分布

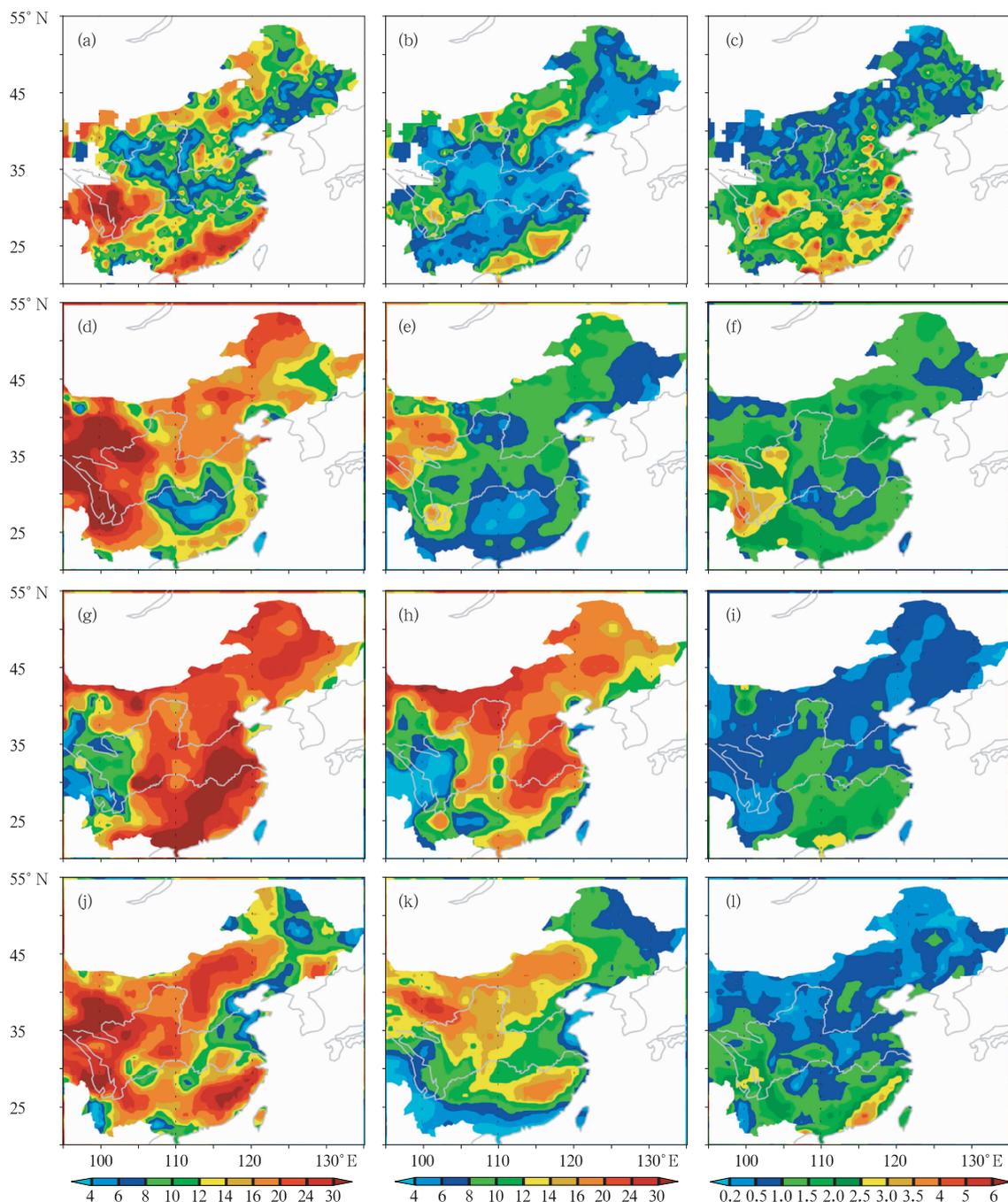


图 5 1991—2002 年夏季平均的台站观测和再分析降水量(a, d, g, j)、降水次数(b, e, h, k) 日变化振幅(单位:%)和降水强度(c, f, i, l)日变化振幅[单位: $\text{mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$  ]的空间分布  
图中第一行至第四行分别对应台站观测(OBS)、NCEP、ERA40 和 JRA25

Fig. 5 Spatial distributions of the diurnal amplitude of precipitation amount [(a, d, g, j), unit: %], frequency [(b, e, h, k), unit: %] and intensity [(c, f, i, l), unit:  $\text{mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ ] about observation and reanalysis in summer seasons (JJA) during 1991—2002

The figures from the first row to the fourth row stand for OBS, NCEP, ERA40 and JRA25 respectively

与降水量的振幅分布相似。就降水强度的振幅来看,NCEP(图 5f)的振幅在华北的部分地区较观测偏大,而在长江中下游及华南的地区偏小;ERA40(图 5i)和 JRA25(图 5l)的振幅在长江流域及以南的部分地区较观测偏小。

### 2.3 最大降水发生时间的分布特征

我国夏季降水具有鲜明的时空分布特征。图 6 给出了台站观测和再分析四个时次(02—08 时, 08—14 时,14—20 时和 20—02 时)中最大降水量、

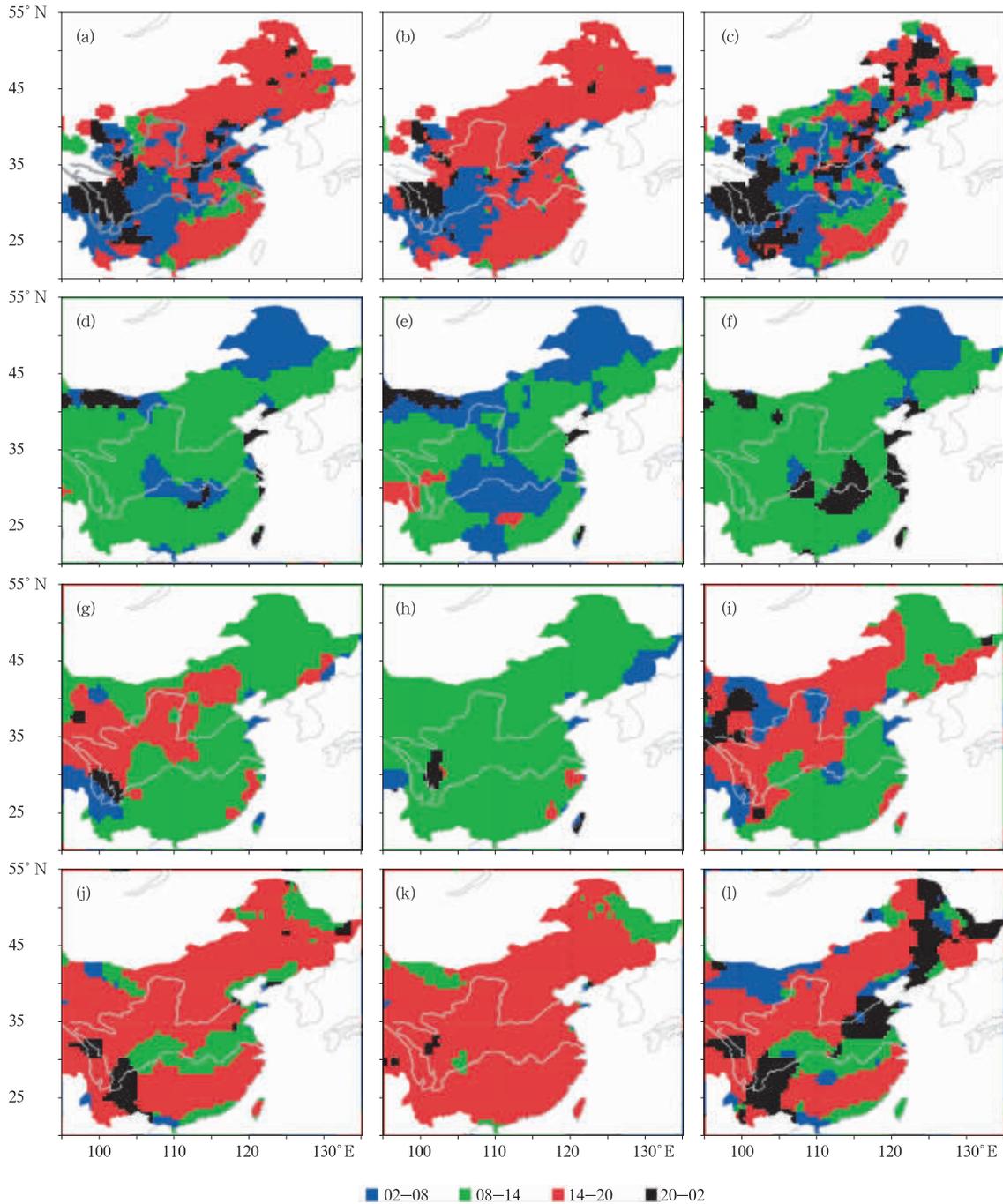


图 6 1991—2002 年夏季平均的台站观测和再分析最大降水量(a, d, g, j)、降水次数(b, e, h, k)和降水强度(c, f, i, l)发生时间的空间分布。图中最大发生时间(北京时间)用实心彩色矩形表示  
图中第一行至第四行分别对应台站观测(OBS)、NCEP、ERA40 和 JRA25  
Fig. 6 Spatial distributions of maximum precipitation amount (a, d, g, j), frequency (b, e, h, k) and intensity (c, f, i, l) about observation and reanalysis in summer seasons (JJA) during 1991—2002.  
Colored solid rectangle denotes maximum phase time (BT)  
The figures from the first row to the fourth row stand for OBS, NCEP, ERA40 and JRA25 respectively

降水次数和降水强度发生时间的空间分布。台站观测最大降水量发生时间沿长江流域自西向东滞后的特征明显(图 6a)。华南与华北的最大降水量主要发生在下午至傍晚。最大降水次数发生的时间更集中,主要表现为西南的夜雨与其他区域下午至傍晚的降水次数较多(图 6b)。NCEP 在  $105^{\circ}\text{E}$  以东的最大降水量时间主要发生在 08—14 时(图 6d)。ERA40 部分再现了四川盆地的夜雨特征,最大降水量发生时间在大部分区域超前于台站观测(图 6g)。相对其他再分析,JRA25 的最大降水量发生时间的分布最接近台站观测(图 6j)。综合比较几套资料最大降水量、降水次数和降水强度的时间分布,降水次数和降水强度对最大降水量贡献各异。在  $35^{\circ}\text{N}$  以南,台站最大降水量的发生时间与降水强度分布较为相似,表明最大降水量主要来自降水强度的贡献;而在  $35^{\circ}\text{N}$  以北,最大降水量的发生时间与降水次数分布较为相似,表明最大降水量主要来自降水次数的贡献。NCEP 的最大降水量主要来自降水次数的贡献,而 ERA40 的最大降水量主要来自降水强度的贡献。JRA25 的最大降水量时间的分布与台站观测相似,在  $35^{\circ}\text{N}$  以南以降水强度的贡献为主,而在  $35^{\circ}\text{N}$  以北主要来自降水次数的贡献。

### 3 结论与讨论

本文利用 1991—2002 年台站观测的逐时降水资料,评估分析了三套常用再分析资料对中国夏季降水日变化的再现能力。结果表明,再分析资料对中国夏季降水日变化特征的再现存在明显偏差。主要结论如下:

(1) 从昼雨与夜雨的百分比看,再分析资料在  $105^{\circ}\text{E}$  以西的夜雨百分比均小于台站观测。在大部分区域,再分析的降水量百分比白天较夜间偏大。在四川盆地及以南,NCEP 的降水量百分比与台站观测相反。

(2) 四个时次的再分析与台站观测降水的日变化特征差别更加清晰。降水量的日变化特征分析表明,三套再分析资料未能较好地再现西南夜雨。再分析的降水强度均小于台站观测。从降水量和降水次数的日变化来看,JRA25 与观测最为接近,而 NCEP 的降水强度日变化最接近观测。

(3) 三套再分析中,NCEP 和 ERA40 的降水量偏多的发生时间较台站观测提前,JRA25 部分再现

了西南的夜雨及华南、华北的最大降水在午后至傍晚发生的特征。NCEP 最大降水量主要来自降水次数的贡献,ERA40 的最大降水量主要来自降水强度的贡献,而 JRA25 最大降水量在  $35^{\circ}\text{N}$  以南主要来自降水强度的贡献,而在  $35^{\circ}\text{N}$  以北主要来自降水次数的贡献,与台站相似。

本文的分析结果反映当前较先进的数值模式在环流基本可信的前提下对我国夏季降水日变化的模拟能力有限,由此可知目前的数值模式在降水相关的诸多物理过程处理方面存在一定的缺陷<sup>[25]</sup>。降水日变化的模拟涉及到数值模式中的对流、辐射传输、云物理过程、地表与边界层通量交换等物理过程<sup>[8]</sup>,物理过程的参数化方案不完善会给模式降水日变化的模拟结果带来不确定性。数值模式对降水的模拟与模式的分辨率密切相关。高学杰等<sup>[31]</sup>通过数值模拟试验指出,模拟东亚的降水可能需要使用 60 km 及以上分辨率。曾新民等<sup>[32]</sup>利用区域气候模式对我国夏季降水的数值模拟试验结果表明,水平分辨率与垂直分辨率的提高均有助于提高模式的降水模拟效果。Feng 等<sup>[33]</sup>最近分析了全球 40 km 的 ECHAM5 模式模拟的东亚夏季降水,结果较之中低分辨率模式亦有改进。而当前再分析模式的分辨率较低,尚不足以精确刻画区域尺度的复杂地形、海陆分布及其他物理过程,也可能导致降水日变化的模拟不足。

### 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.
- [3] Chen H, Zhou T, Richard B Neale, et al. Performance of the new NCAR CAM3. 5 in East Asian summer monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23:3657-3675.
- [4] 张莉, 丁一汇, 孙颖. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验[J]. *大气科学*, 2008, 32(02): 261-276.
- [5] 许崇海, 沈新勇, 徐影. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(05): 287-292.
- [6] 胡娅敏, 丁一汇. 东亚地区区域气候模拟的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(09):956-963.
- [7] Zhou T -J, and Z Li. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM[J]. *Climate Dyn*, 2002, 19:167-180.

- [8] Trenberth K E, A Dai, R M Rasmussen, et al. The changing character of precipitation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1217.
- [9] Dai A, F Giorgi, and K E Trenberth. Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D6): 6377-6402.
- [10] Dai A. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(18): 4605-4630.
- [11] Lin X, D A Randall, and L D Fowler. Diurnal variability of the hydrologic cycle and radiative fluxes: Comparisons between Observations and a GCM[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(23): 4159-4179.
- [12] Yang S and E A Smith. Mechanisms for diurnal variability of global tropical rainfall observed from TRMM[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(20): 5190-5226.
- [13] Yu R, T Zhou, A Xiong, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L01704.
- [14] Yu R, Y Xu, T Zhou, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): L13703.
- [15] Zhou T, R Yu, H Chen, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(16): 3997-4010.
- [16] Yu R, W Yuan, J Li, et al. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China[J]. *Climate Dynamics*, 2009, doi:10.1007/s00382-00009-00568-x.
- [17] Chen H M, R C Yu, J Li, et al. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(4): 905-917.
- [18] 姚莉, 李小泉, 张立梅. 我国 1 小时雨强的时空分布特征[J]. *气象*, 2009, 35(2):80-87.
- [19] Li J, R C Yu, T Zhou. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in southern contiguous China[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(22): 6036-6043.
- [20] 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.
- [21] 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(002): 278-294.
- [22] 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(001): 14-32.
- [23] 王红丽, 刘健, 况雪源. 四种再分析资料与长江中下游地区降水观测资料的对比研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(05): 703-711.
- [24] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 等. NCEP/NCAR 再分析资料在纳木错流域湖泊/冰川区适用性分析[J]. *气象*, 2009, 35(5): 66-73.
- [25] 李建, 宇如聪, 陈昊明, 等. 再分析资料夏季降水量与中国台站降水量的比较[J]. *气象*, 2010, 36(12):1-9.
- [26] 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.
- [27] Gibson J K, Kallberg P, Uppala S, et al. ERA description, ECMWF reanalysis project report series1, ECMWF [J]. Reading, 1997, 66pp.
- [28] 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.
- [29] Onogi K, J Tsutsumi, H Koide, et al. The JRA-25 reanalysis [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85(3): 369-432.
- [30] Yu R, T Zhou, A Xiong, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L01704.
- [31] 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验[J]. *大气科学*, 2006, 30(2): 185-192.
- [32] 曾新民, 刘金波, 宋帅, 等. 区域气候模式垂直分辨率对我国夏季降水模拟的影响[J]. *水动力学研究与进展*, 2009, 24(1): 71-81.
- [33] Feng L, T Zhou, B Wu, et al. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model[J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, doi: 10.1007/s00376-010-1016-x.