

宇婧婧, 沈艳, 潘畅, 等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进. 应用气象学报, 2013, 24(5): 544-553.

# 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进

宇婧婧<sup>1)\*</sup> 沈艳<sup>1)</sup> 潘畅<sup>1)</sup> 赵平<sup>2)</sup> 周自江<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(国家气象信息中心, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

## 摘 要

为考察概率密度匹配法(PDF方法)对中国区域卫星反演降水产品系统误差订正的适用性,基于逐日和逐时我国地面观测降水量资料,引入PDF方法,分别对逐日 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 水平分辨率和逐时 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 水平分辨率的CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)卫星降水产品的系统误差进行订正。在分析CMORPH卫星降水产品误差特征的基础上,根据两种资料不同的时空分辨率和误差特点,调整概率密度匹配时选取样本的时间和空间范围,设计相应的订正方案。评估结果表明:PDF方法订正后,两种分辨率卫星降水资料在中国区域系统误差均显著减小,达到了理想的订正效果。在我国站点稀疏的西部地区,订正后的CMORPH卫星降水产品仍保持卫星观测的降水空间分布,降水量也明显接近于地面观测降水量。可见,PDF方法是中国区域卫星反演降水产品系统误差订正的一种有效方法。

**关键词:** 卫星反演降水; 地面观测降水; 系统误差; 概率密度匹配法

## 引 言

地面站点降水资料被公认为是最可信赖的降水观测资料,但有限的站点观测在时间与空间上均存在明显不连续,难以反映气候空间总体变化及连续过渡的基本特征<sup>[1-2]</sup>。我国气象观测台站的位置与数量分布呈东密西疏,观测资料时间和空间分布的不均匀问题尤为突出。为了更加真实地描述我国降水变化,多将能够较好捕获降水场时空分布的高分辨率卫星反演降水资料与地表站点降水资料进行融合<sup>[3-6]</sup>,得到高精度、高时空分辨率的降水资料产品。卫星反演降水资料的特点是观测范围广、时间间隔小,相对独立,相对离散的站点观测而言,时空分布均较为连续,常常成为稀疏的地面降水观测的重要补充,在天气气候研究与预报中得到广泛应用<sup>[7-11]</sup>。但由于遥感探测仪器或是反演算法等各种原因<sup>[12]</sup>,卫星资料其量值与地面台站观测资料相比,存在明显的系统误差<sup>[13-14]</sup>。而进行降水资料融合要求使用

无偏的卫星资料<sup>[15]</sup>。因此,卫星反演降水资料系统性误差订正的好坏,成为决定降水资料融合产品质量好坏的关键环节之一。

理论上讲,任何测量(或估计)都不可避免地存在误差<sup>[16]</sup>,根据其不同统计特征可分为两种:系统误差和随机误差。随机误差是观测资料中普遍存在的固有特性,在统计上常呈平均值为零的正态分布<sup>[17]</sup>。因此,随机误差的影响程度在气候平均处理中可基本被消除。系统误差与随机误差的主要差别在于其平均值不为零,在资料平均处理时会出现与实际状况明显的偏差,当时间序列或空间分布上系统误差不一致时,就会产生资料的不均一性<sup>[18]</sup>,严重影响研究结果。而系统误差又有独立误差和非独立误差之分<sup>[19]</sup>,所谓独立误差,是指误差不随区域、时间或是观测值大小而变化,可通过对整个气象场减去相同的常数来消除,订正方法相对简单。而在实际的气象资料场中,最为普遍存在的是非独立误差,这种误差会随观测量而变化,订正较为困难。对于时空分辨率较高的卫星反演降水资料,它不仅存

2012-10-15 收到, 2013-04-03 收到再改稿。

资助项目:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951602),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006042)

\* email: yujj@ema.gov.cn

在明显的非独立系统误差,且误差随时间和空间变化大,通常的线性方法难以订正<sup>[12]</sup>。可见,如何有效剔除或减小卫星反演降水资料的系统误差是一个具有挑战性的问题。

虽然卫星反演降水资料的非独立系统误差随时间和空间的变化较大,但一定时空范围内的降水概率密度分布相对稳定<sup>[20]</sup>。因此,可以通过调整卫星反演降水值,使卫星反演降水与地面观测降水的概率密度分布一致,从而达到订正卫星反演降水资料系统误差的目的。上述思路正是概率密度匹配法(probability density function matching method,简称 PDF 方法)订正资料系统误差的主要思想<sup>[19,21]</sup>。研究表明:PDF 方法在订正非独立系统误差方面具有优越性,不必分析资料产生系统误差的复杂来源,运算思路简便,且订正效果良好,近年来逐渐成为国际上主流的卫星资料订正方法<sup>[19,21-23]</sup>。

本文选用东亚地区质量较好<sup>[13]</sup>的高时空分辨率 CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)卫星降水产品<sup>[24]</sup>,以我国地面观测降水资料为基准,引入 PDF 方法分别订正逐日、逐时两种时空尺度上卫星反演降水资料的系统误差,探讨该方法对于不同时空分辨率资料系统误差订正思路及适用性。

## 1 资料和方法

### 1.1 中国逐日格点降水分析资料

国家气象信息中心(National Meteorological Information Center, NMIC)和美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)气候预测中心(Climate Prediction Center, CPC)合作开发了中国逐日格点降水量实时分析(China Precipitation Analysis, CPA)系统,该系统基于我国 2419 个国家级地面气象站(暂不包括我国台湾省)日降水量观测数据,采用构建气候背景场的最优插值法<sup>[25-26]</sup>(Optimal Interpolation, OI),生成  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  网格的逐日降水分析场(简称逐日地面观测格点资料, CPA daily data)。该降水资料<sup>[27]</sup>间接订正了地形的影响,能较好地再现降水强度、落区范围、空间与时间分布特征,精度较高。

### 1.2 全国自动站小时格点降水分析资料

气象部门在全国已建国家级自动气象站及区域

自动气象站超过 30000 个(暂不包括我国台湾省)。利用经过质量控制的小时站点降水资料<sup>[28]</sup>,仍采用最优插值法<sup>[29]</sup>,生成水平分辨率为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的小时格点降水分析场(简称逐时地面观测格点资料, CPA hourly data)。

### 1.3 CMORPH 卫星降水产品

CMORPH 卫星降水产品是 NOAA-CPC 开发的实时卫星反演降水产品<sup>[24]</sup>。CMORPH 采用运动矢量方法,首先计算连续静止气象卫星红外云图的空间相关性,以此确定云的运动矢量;进一步采用时间权重插值法外推微波反演降水量,估计无微波观测期内的降水量,生成更高时空分辨率的降水资料。CMORPH 卫星降水产品原始时间分辨率为 30 min,空间分辨率为  $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 。进一步被处理成逐日  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  分辨率和逐时  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  分辨率降水格点产品(简称逐日和逐时卫星降水资料)。

我国夏季(6—8 月)降水最强,洪涝灾害最为突出,对夏季降水的监测有重要意义,本文均以 2009 年夏季降水数据为例,分析 PDF 方法的应用及订正效果。

### 1.4 PDF 方法简介

根据 PDF 方法的思路,介绍其具体做法:对于每个订正格点,根据资料的时空分辨率及误差特征选取适当的时空窗口,收集匹配的地面观测和卫星反演降水格点资料,样本量足够大时,分别得到二者稳定的累积概率密度分布。相同的降水累积概率密度值对应不同的地面观测和卫星反演降水量时,根据二者的偏差来订正卫星反演降水量。例如,当降水累积概率密度为 30% 时,卫星反演降水量为 4.5 mm,而地面观测降水量为 5 mm,则此时卫星降水量的误差为 -0.5 mm。

### 1.5 交叉检验方法简介

文中采用交叉检验方法<sup>[30]</sup>(Generalized Cross-Validation, GCV)评估 PDF 方法对系统误差的订正效果。为保证精度,均选取有观测站的地面格点资料(称为有效观测格点)作为参考值<sup>[13,26]</sup>。具体方法:将每个时次的有效观测格点随机分成 10 份,每次只用其中 9 份参与订正,而保留的 1 份作为地面观测真值与该格点对应的订正值进行比较。如此循环 10 次,则每 1 个真值都被保留 1 次,与相互独立的订正值进行独立样本的统计检验。

## 2 逐日 CMORPH 卫星降水产品系统误差订正

### 2.1 逐日卫星降水资料的误差特征

从逐日 CMORPH 卫星降水产品与地面降水观测资料的偏差随时间变化(图 1a)可以看到,中国区

域 CMORPH 卫星降水产品的误差随时间变化有明显差异,6 月以正偏差为主,7 月、8 月以负偏差为主。图 1b 给出了逐日 CMORPH 卫星降水产品平均偏差随降水量的变化:在不同的降水量范围,卫星降水产品的平均偏差不同,随降水量的增加偏差由正到负变化,表明 CMORPH 卫星降水产品高估了低值降水,而低估了高值降水。

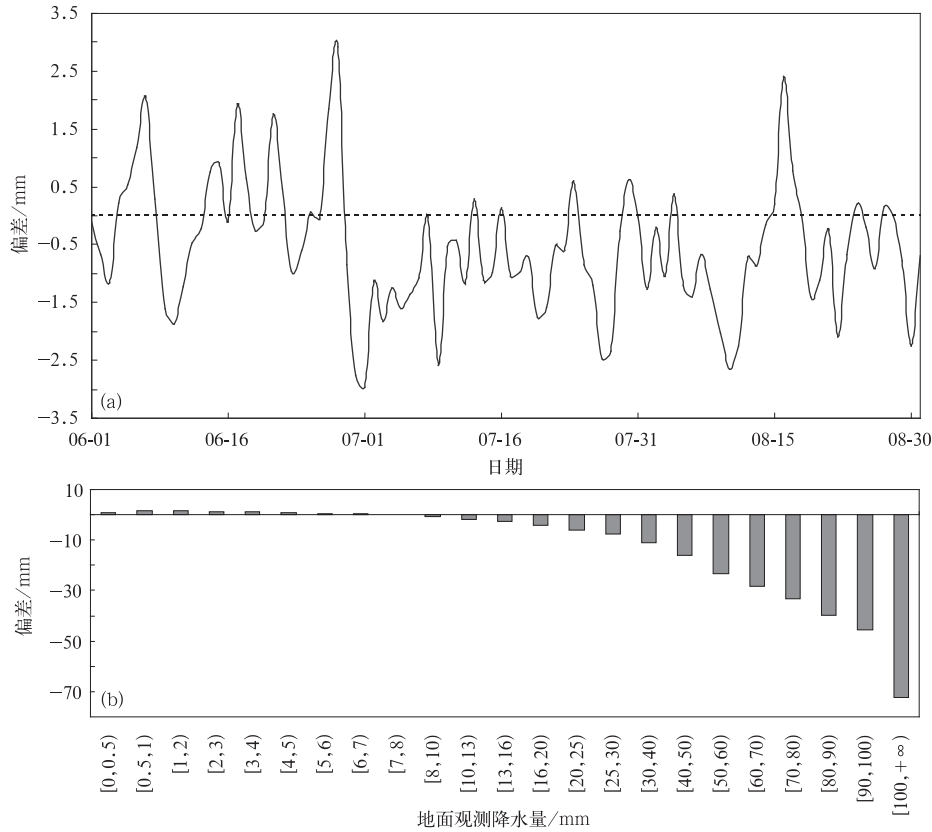


图 1 2009 年夏季中国区域逐日 CMORPH 卫星降水产品的平均偏差

(a)平均偏差随时间演变,(b)不同降水量范围的平均偏差

Fig. 1 The mean bias from CMORPH daily data in summer 2009 over China

(a)time series of mean bias,(b)mean bias in different values of precipitation

图 2 给出 2009 年夏季逐日地面观测和 CMORPH 卫星降水产品平均日降水强度(总降水量除以总降水日数,逐日降水量大于 0.1 mm 的日数记为降水日数)的空间分布及其差异图。可以看出,卫星降水的强弱空间分布(图 2b)与地面观测格点降水(图 2a)基本一致,但两种降水资料的降水量存在明显随地域变化的偏差(图 2c)。我国大部分地区,卫星降水强度明显低于地面观测格点产品,即存在大范围的负偏差。华南、华中、华北等降水大值中心,卫星降水负偏差较大,最大甚至超过  $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 东北东部地区负偏差也较明显,平均达  $5 \text{ mm} \cdot$

$\text{d}^{-1}$ 。CMORPH 卫星降水产品在我国局部地区也存在正偏差,例如,新疆中部存在  $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  的正偏差,而海南的正偏差最大达到  $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

以上分析表明,逐日 CMORPH 卫星产品存在明显的非独立系统误差,即平均偏差值随降水量不同而变化,且随地域和时间变化较大,存在对大降水低估、小降水高估的特征。夏季 CMORPH 卫星降水产品对降水强弱的空间分布反映较为准确,但卫星降水产品降水强度明显低于地面观测格点产品,在中国区域存在大范围负偏差。

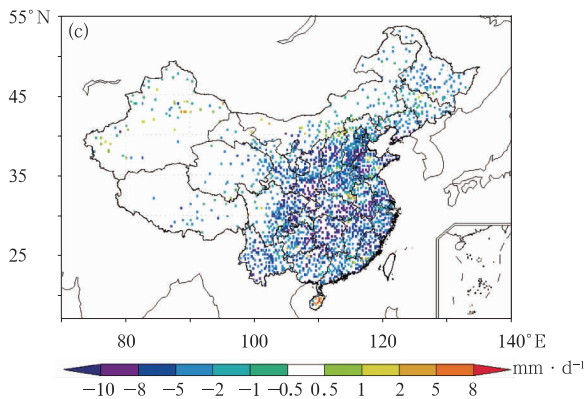
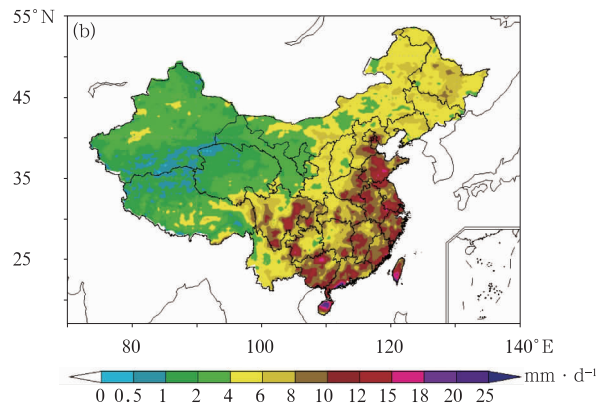
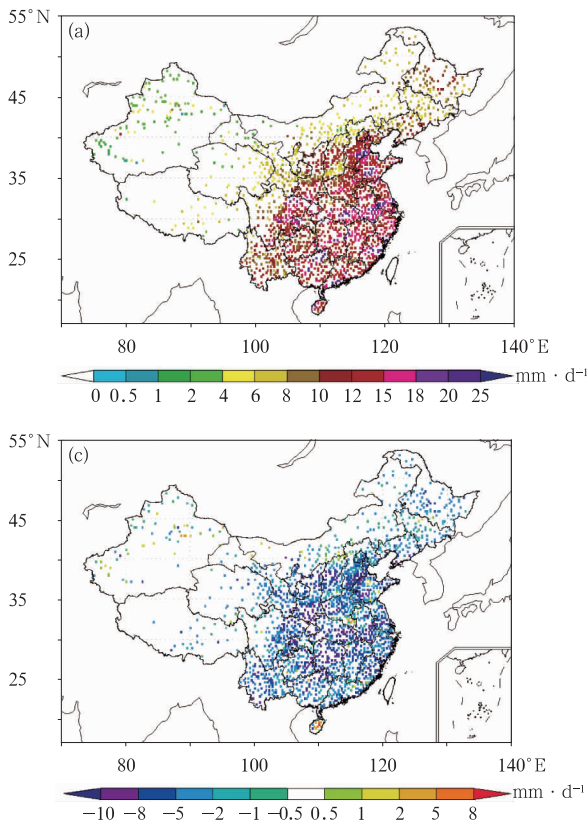


图 2 2009 年夏季中国区域平均日降水强度空间分布 (a)逐日地面观测格点资料(只显示有观测点的网格值), (b)逐日 CMORPH 卫星降水产品, (c)CMORPH 卫星降水与地面观测格点场的差异(只显示有观测点的网格值)  
Fig. 2 The spatial distributions of daily mean precipitation intensity in summer 2009 over China (a)CPA daily data(only values of grids with stations are shown), (b)CMORPH daily data, (c)differences between CPA and CMORPH daily data (only values of grids with stations are shown)

2.2 PDF 方法订正方案

①对每个格点选取时空窗口, 收集匹配的地面观测和卫星降水格点资料, 一方面要保证选取样本足够多, 以便统计上能得到稳定的累积概率密度, 另一方面, 要考虑降水概率密度分布的区域性特点, 时空范围不能过大, 否则计算的降水概率密度不准确。根据逐日、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  的资料分辨率, 且考虑实时业务需求, 选取当前日期起向前共取 30 d 作为时间窗口, 以目标格点为中心的  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  空间范围作为空间窗口。

②将上述时空窗口中有观测站点, 且地面观测和卫星降水资料均为非缺测的格点值纳入统计, 并按距目标格点的空间距离和距目标时间的的时间间隔计算每个样本的权重, 按照样本权重进行排序, 选取最有效样本。为达到统计上稳定的概率密度分布, 选取的样本数至少为 300 个, 如达不到要求, 搜索的空间范围适当扩大。

③计算每个格点卫星降水量 ( $R_s$ ) 的累积概率密度 ( $f_s$ ), 以及该概率密度所对应的地面降水量 ( $R_g$ ), 得到订正值 ( $\Delta r$ ), 则订正后的卫星降水量 ( $R_c$ ) 为  $R_c = R_s - \Delta r$ 。

2.3 订正效果检验

下面分析逐日 CMORPH 卫星降水产品经过

PDF 方法订正后的效果。图 3 给出了 2009 年夏季订正后 CMORPH 卫星降水产品降水强度的空间分布, 可以看到, 其降水强弱的空间分布与订正前(图 2b)一致, 但降水强度明显接近地面观测的降水强度(图 2a): 在华北、华中、华南地区的强降水中心, 卫星降水强度已提升到  $18 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  以上; 东北地区强降水中心则提至  $12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在站点稀疏的

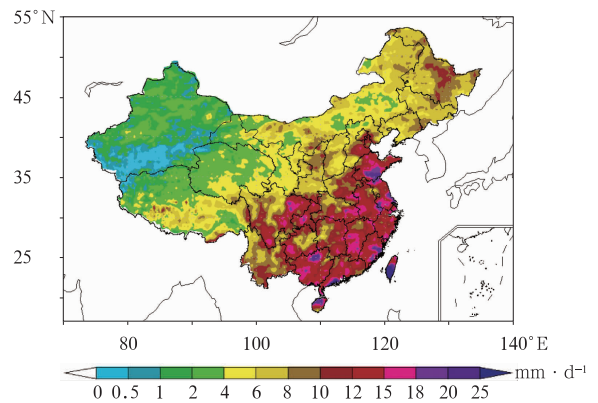


图 3 2009 年夏季中国区域订正后逐日 CMORPH 卫星降水产品平均降水强度空间分布  
Fig. 3 The spatial distributions of daily mean precipitation intensity from adjusted CMORPH daily data in summer 2009 over China

西部地区,卫星产品的降水强度也有变化:在新疆北部地区降水强度有所减小,青藏高原地区降水强度增加,即订正后的卫星降水强度与地面观测降水强度的偏差减小,说明 PDF 方法对于站点稀疏区卫星降水产品的订正也有一定效果。

利用交叉检验方法对 PDF 方法的订正效果进行统计检验(如图 4 所示)。图 4a 给出中国地区逐日 CMORPH 卫星降水产品订正前后偏差的对比,可清楚地看到,订正后卫星降水资料的平均偏差随时间变化的幅度明显减小,无明显月际差异,基本在

零线附近摆动,消除了原有的较强振荡的平均偏差,整个时段的系统偏差接近 0。对比地面观测和订正前、订正后卫星降水资料的概率密度分布(图 4b)可以看到,订正后逐日 CMORPH 卫星产品在各个降水等级的概率密度值明显接近地面观测资料的概率密度值,进一步体现了 PDF 方法订正的效果。

经 PDF 方法订正后的逐日 CMORPH 卫星降水产品,一方面保持卫星资料的降水空间分布;另一方面,其降水量接近地面观测降水量,系统误差明显减小,达到了预期的订正效果。

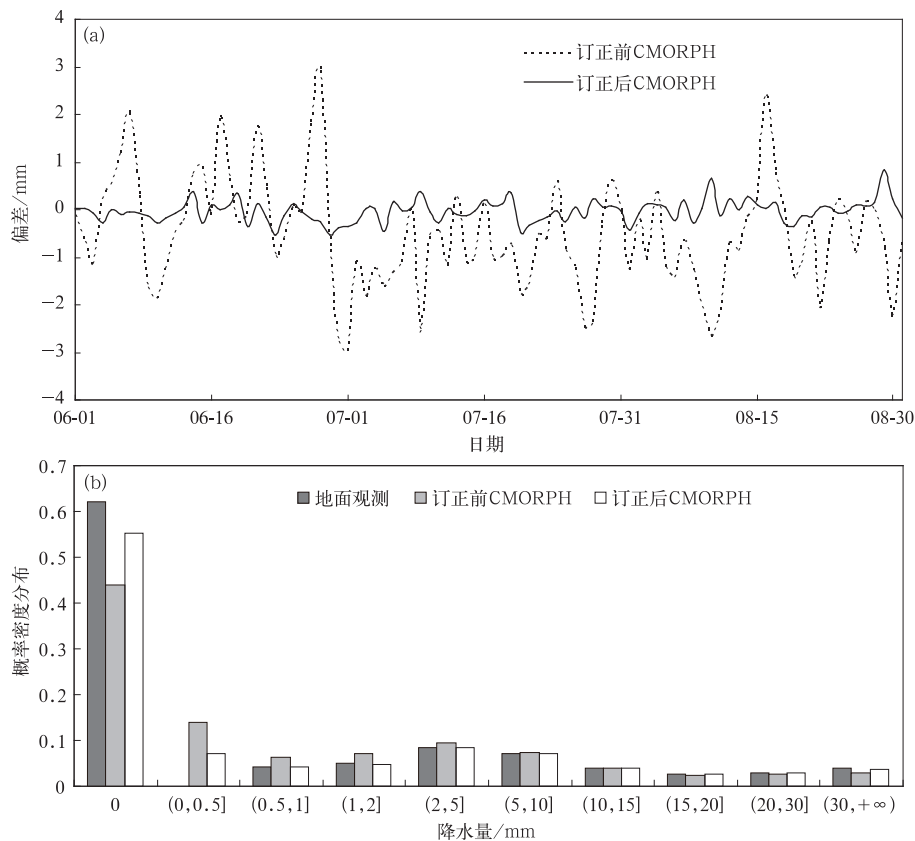


图 4 2009 年夏季中国区域订正前、订正后逐日 CMORPH 卫星降水产品平均偏差及降水概率密度的对比

(a) 平均偏差随时间演变, (b) 降水概率密度分布

Fig. 4 The contrast of mean biases and probability density function between original CMORPH and adjusted CMORPH daily data in summer 2009 over China

(a) time series of mean bias, (b) distributions of probability density function

### 3 逐时 CMORPH 卫星降水产品系统误差订正

#### 3.1 逐时卫星降水资料的误差特征及 PDF 方法订正方案的调整

与逐日资料相比,逐时 CMORPH 卫星降水产

品的偏差(图 5)除月际变化之外,还存在明显的日变化,由于资料时间尺度更小,其偏差随时间变化幅度更大。逐时 CMORPH 卫星降水产品的平均偏差随降水量的变化(图略)与逐日资料一致,其系统误差依赖于降水量,有高估低值降水、低估高值降水的特点,即存在明显的非独立系统误差特征。



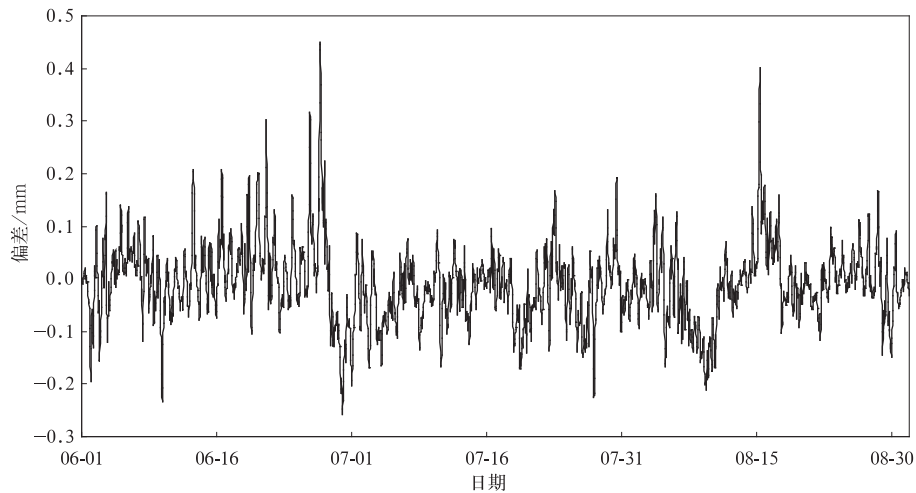


图 5 2009 年夏季中国区域逐时 CMORPH 卫星降水产品的平均偏差随时间演变

Fig. 5 The time series of mean bias from CMORPH hourly data in summer 2009 over China

在对逐日卫星资料误差订正的基础上,针对小时资料具有更小的时空尺度特征和零降水发生概率较大的特点,调整 PDF 方法的部分订正方案:在选取时空窗口,收集匹配的地面观测和卫星降水格点资料时,一方面考虑逐时资料具有日变化特征,自当前日期起向前取 20 d,每日取当前时刻起向前 6 个时次,即共 120 个时次作为时间窗口。另一方面,空间窗口缩小,以目标格点为中心的  $4^{\circ} \times 4^{\circ}$  为空间范围。由于小时降水资料的零降水发生概率较大(逐时地面观测资料零降水发生概率接近 90%),为使选取的非零降水样本数目具有统计意义,能达到稳定的概率密度分布,则扩大样本数,选取的样本数至少为 1200 个,且非零降水样本数达到 120 以上,如达不到要求,搜索的空间范围适当扩大。

### 3.2 订正效果检验

首先以一个例来分析 PDF 方法订正的效果。图 6 给出 2009 年 6 月 30 日 23:00—7 月 1 日 00:00 (世界时,下同)华南地区一次强降水过程,CMORPH 卫星降水产品订正前、订正后与地面观测格点降水场空间分布的对比。由图 6 可以看到,订正前卫星降水资料,在华南地区的强降水带出现断裂,且降水量明显低于地面观测降水量,经过 PDF 方法订正后的卫星降水产品(图 6c)显示的强降水中心降水量则明显增强,接近地面观测降水量。另一方面,由于站点过于稀疏,地面观测插值的降水分析场存在一些不合理分布。例如,东北北部存在一虚假降水区,此时卫星降水产品能较为合理地反映出降水分布空间特征,体现了卫星资料应用上的优越性,而

订正后资料则保留了卫星降水产品的这一降水空间分布特点。

进一步给出 2009 年夏季降水的统计结果。图 7 为地面观测格点资料、CMORPH 卫星降水产品订正前、订正后逐时降水强度(总降水量除以总降水时次,逐时降水量大于 0.1 mm 的时次为降水时次)的空间分布。对比显示,在站点稠密的我国中东部大部分地区,卫星资料的降水强度(图 7b)空间分布与地面观测格点降水(图 7a)基本一致,但从降水量来看,在江西、福建、广西、江苏南部、山东大部等这些东部降水强度较大地区,卫星资料的降水量明显低于地面观测格点产品,且强降水区范围偏小;而订正后的 CMORPH 卫星降水资料(图 7c)在东部地区的降水量增加,强降水区扩大,即降水强度值和降水范围都明显接近于地面观测格点降水,而降水空间型仍然保持卫星降水产品特征。此外,在我国西部,新疆北部地区订正后卫星降水强度有所减小,接近地面观测格点降水强度值。说明 PDF 方法在站点稀疏区对卫星降水资料的改进也有一定效果。

图 8 给出交叉检验的统计结果,进一步比较订正前、订正后逐时 CMORPH 卫星产品的平均偏差。可以看到,订正前,2009 年 6—8 月全国逐时 CMORPH 卫星降水产品的平均偏差随着时间有较大幅度的摆动,最大平均偏差超过 0.4 mm。订正后平均偏差明显减小,在 0 附近摆动,消除了原有较强振荡的平均偏差和明显的月际差异,整个时段的系统误差基本为 0。

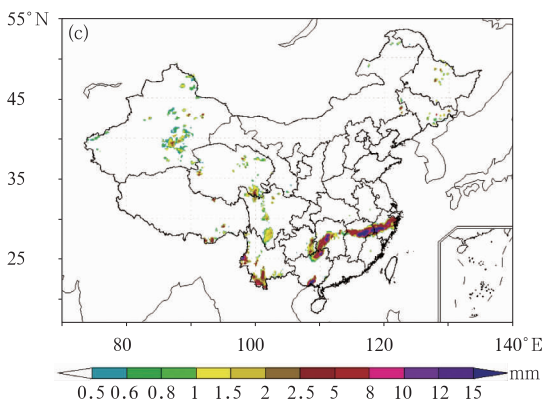
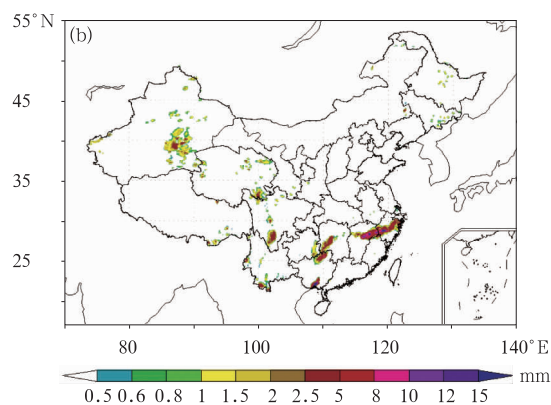
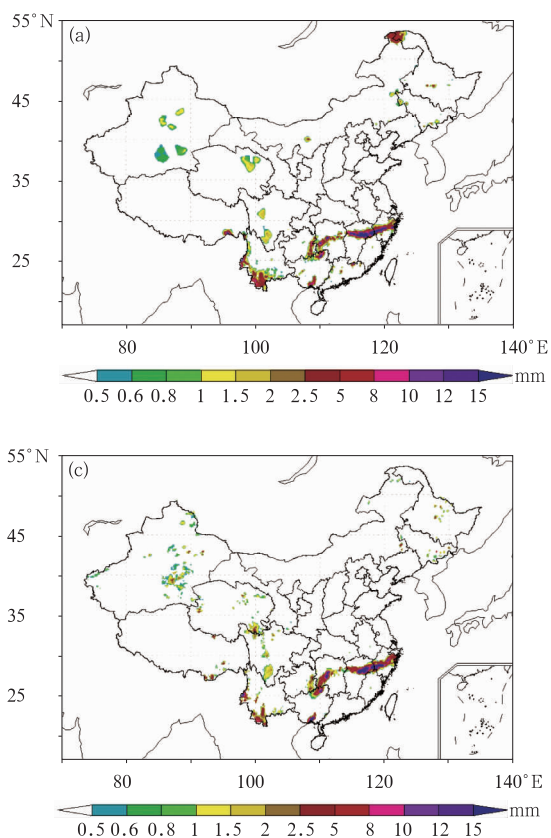


图6 2009年6月30日23:00—7月1日00:00  
降水量空间分布

(a)逐时地面观测格点资料,(b)订正前逐时CMORPH  
卫星降水产品,(c)订正后逐时CMORPH卫星降水产品

Fig.6 The spatial distributions of precipitation from  
2300 UTC 30 June to 0000 UTC 1 July in 2009 over China  
(a)CPA hourly data, (b)original CMORPH  
hourly data, (c) adjusted CMORPH hourly data

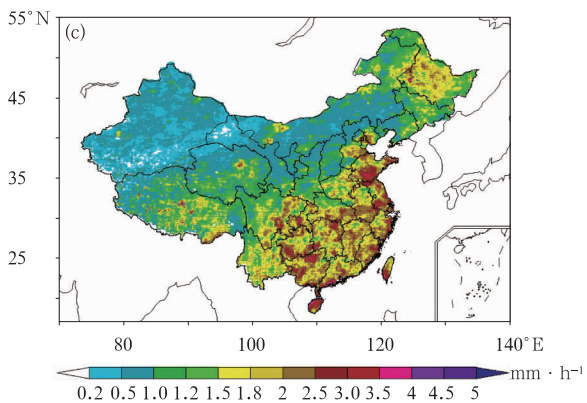
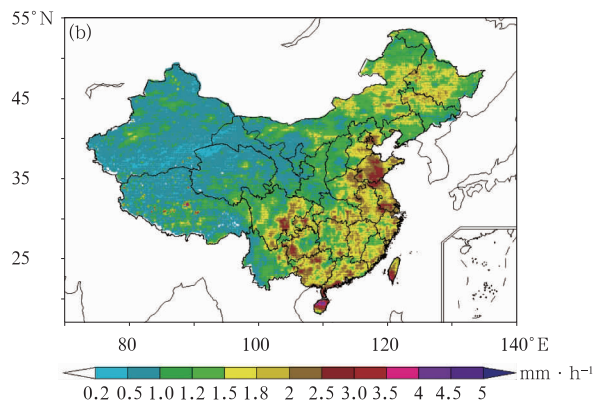
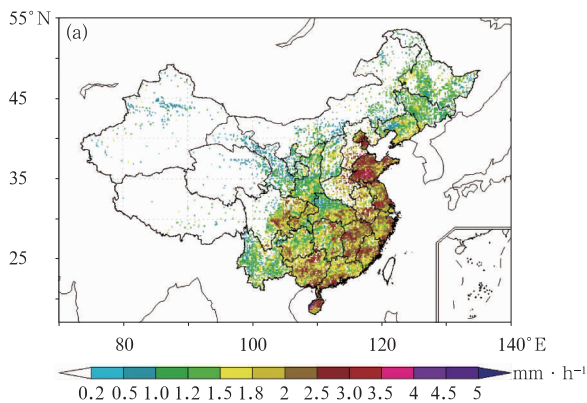


图7 2009年夏季中国区域平均逐时降水强度空间分布

(a)逐时地面观测格点资料(只显示有观测点的网格值),  
(b)订正前逐时CMORPH卫星降水产品,  
(c)订正后逐时CMORPH卫星降水产品

Fig.7 The spatial distributions of hourly mean  
precipitation intensity in summer 2009 over China  
(a)CPA hourly data(only values of grids with stations are shown),  
(b)original CMORPH hourly data,  
(c)adjusted CMORPH hourly data

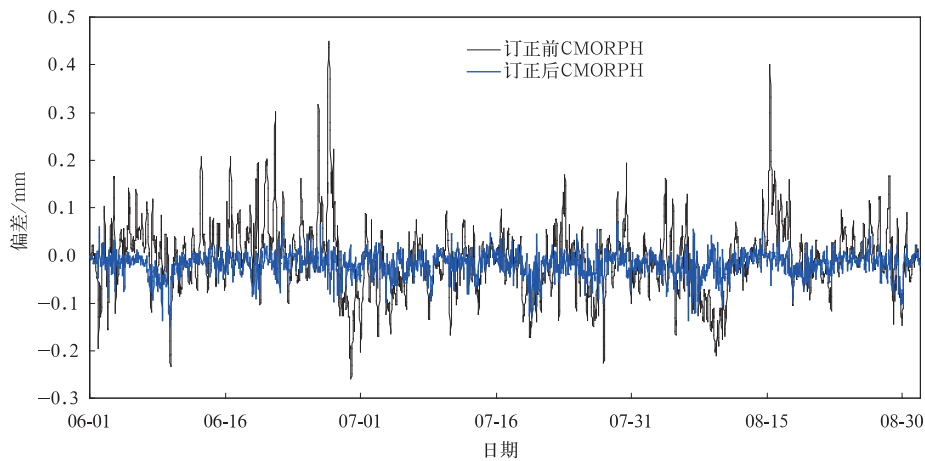


图 8 2009 年夏季中国区域订正前、订正后逐时 CMORPH 卫星降水产品平均偏差对比

Fig. 8 The contrast of time series of mean bias between original CMORPH and adjusted CMORPH hourly data in summer 2009 over China

可见,PDF 方法在逐日卫星资料订正方案的基础上经过适当调整,订正逐时 CMORPH 卫星降水产品的系统误差也达到了预期的订正效果,即订正后逐时卫星降水资料在中国区域的降水量接近于地面观测降水量,卫星降水产品的平均偏差明显减小。

#### 4 小 结

本文以 2009 年夏季为例,基于我国地面观测格点降水资料,设计 PDF 方法的订正方案,分别对不同时空分辨率的 CMORPH 卫星降水产品进行了系统误差订正。分析结果表明:

1) 逐日和逐时 CMORPH 卫星降水产品均存在明显的非独立系统误差,即系统误差随着降水量不同而变化,存在高估低值降水、低估高值降水的特点,且误差随地域和时间变化较大,简单的订正方法无法实现其系统误差订正。

2) 在使用 PDF 方法订正不同分辨率降水资料时,需根据资料的时空尺度和误差特点,调整概率密度匹配时选取样本的时空范围及样本数,设计其订正方案。例如,在小时降水产品订正过程中,考虑其误差存在日变化,则需调整样本选取的时间范围。考虑小时降水产品降水概率分布特点,选取样本时需考虑非零降水的样本数量。

3) 经过 PDF 方法订正后的两种分辨率卫星反演降水产品仍然保持卫星观测的降水空间分布,且订正后产品的降水量均明显接近地面观测降水量,卫星降水产品的系统误差明显减小。即使在中国站

点稀疏地区,该方法对改进卫星降水产品的降水量质量也有作用。

**致 谢:**美国国家大气海洋局(NOAA)气候预测中心(CPC)的谢平平博士为方案设计提供了许多宝贵的建议与程序支持;中国气象局预报与网络司张洪政副处长对原方案的进一步完善提出了许多合理性建议,中国科学院大气物理研究所李晓峰博士对本文提出有益的意见,在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Morrissey M L, Maliekal J A, Greene J S, et al. The uncertainty of simple spatial averages using rain gauge networks. *Water Resour Res*, 1995, 31(8): 2011-2017.
- [2] Villarini G, Krajewski W F. Empirically-based modeling of spatial sampling uncertainties associated with rainfall measurements by rain gauges. *Adv Water Resour*, 2008, 31(7): 1015-1023.
- [3] Xie P P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analyses based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [4] Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-Present). *J Hydrometeor*, 2003, 4(6): 1147-1167.
- [5] Lu N M, You R, Zhang W J. A fusing technique with satellite precipitation estimate and rain-gauge data. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 18(2): 141-146.
- [6] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeor*, 2007, 8(1): 38-55.
- [7] Yang S, Smith E A. Convective-stratiform precipitation variability at seasonal scale from 8-year of TRMM observations;



- Implications for multiple modes of diurnal variability. *J Climate*, 2008, 21: 4087-4114.
- [8] 师春香, 谢正辉. 基于静止气象卫星观测的降水时间降尺度研究. *地理科学进展*, 2008, 27(4): 15-22.
- [9] 徐海明, 何金海, 谢尚平. 卫星资料揭示的中尺度地形对南海夏季气候的影响. *大气科学*, 2007, 31(5): 1021-1031.
- [10] 刘还珠. 台风暴雨天气预报的现状和展望. *气象*, 1998, 24(7): 5-10.
- [11] 赵妹慧, 周毓荃. 利用多种卫星研究台风“艾云尼”宏微观结构特征. *高原气象*, 2010, 29(5): 1254-1260.
- [12] 师春香, 刘玉洁. 国外部分卫星产品质量评价和质量控制方法. *应用气象学报*, 2004, 15(增刊): 142-151.
- [13] Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China. *J Geophys Res*, 2010, 115, D02114, doi:10.1029/2009JD012097.
- [14] 潘昶, 宇婧婧, 廖捷, 等. 地面和卫星降水产品对台风莫拉克降水监测能力的对比分析. *气象*, 2011, 37(5): 564-570.
- [15] Eugenia K. 大气模式、资料同化和可预报性. 蒲朝霞, 杨福泉, 译. 北京: 气象出版社, 2005: 120-127.
- [16] 任芝花, 王改利, 邹凤玲, 等. 中国降水测量误差的研究. *气象学报*, 2003, 61(5): 621-627.
- [17] 任芝花, 熊安元, 邹凤玲. 中国地面月气候资料质量控制方法的研究. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 516-523.
- [18] 李庆祥, 江志红, 黄群, 等. 长江三角洲地区降水资料的均一性检验与订正试验. *应用气象学报*, 2008, 19(2): 219-226.
- [19] Wang W Q, Xie P P. A multiplatform-merged (MPM) SST analysis. *J Climate*, 2007, 20(9): 1662-1679.
- [20] 江志红, 丁裕国, 宋桂英. 黄淮流域夏半年旱涝概率时空分布的研究. *自然灾害学报*, 1998, 7(1): 94-104.
- [21] Xie P P, Xiong A Y. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses. *J Geophys Res*, 2011, 116, D21106, doi: 10.1029/2011JD016118.
- [22] Turk F J, Ebert E E, Oh H J, et al. Validation of an Operational Global Precipitation Analysis at Short Time Scales. 12th Conf on Satellite Meteorology and Oceanography, Amer Meteor Soc, 2003.
- [23] Huffman G J, Adler R F, Stocker E F, et al. Analysis of TRMM 3-hourly Multi-satellite Precipitation Estimates Computed in Both Real Time and Post-real Time. 12th Conf on Satellite Meteorology and Oceanography, Amer Meteor Soc, 2003.
- [24] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeor*, 2004, 5(3): 487-503.
- [25] 李春晖, 梁建茵. 基于 shepard 和 OI 方法对雨量计逐时资料的分析. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 416-422.
- [26] Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *J Hydrometeor*, 2007, 8(3): 607-626.
- [27] 沈艳, 冯明农, 张洪政, 等. 我国逐日降水量格点化方法. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 279-286.
- [28] 任芝花, 赵平, 张强, 等. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法. *气象*, 2010, 36(7): 123-132.
- [29] 沈艳, 潘昶, 徐宾, 等. 最优插值在对降水量空间分析中的参数优化. *成都信息工程学院学报*, 2012, 27(2): 219-224.
- [30] 李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用. *地理研究*, 2001, 20(4): 446-452.

## Improvement of Satellite-based Precipitation Estimates over China Based on Probability Density Function Matching Method

Yu Jingjing<sup>1)</sup> Shen Yan<sup>1)</sup> Pan Yang<sup>1)</sup> Zhao Ping<sup>2)</sup> Zhou Zijiang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

In the evaluation and adjustment of satellite-based precipitation estimates, the gauge-based precipitation data is usually taken as the objective criteria. Assuming gauge-based analysis at grid boxes with station reports as the true value, the satellite precipitation data are corrected after adjusting probability density function (PDF), which makes the PDF distribution of the corrected measurements the same as that of the station observation. One advantage of the PDF method is that it can remove the range dependent bias effectively, which is also the main cause for its recent popularity in correcting the error of satellite-based precipitation estimations.

Aiming to investigate the applicability of the PDF method, and then to adjust the systematic bias of the high resolution satellite-based precipitation estimations over China, the daily satellite precipitation data with the resolution of  $0.25^\circ$  by  $0.25^\circ$  and hourly data of  $0.1^\circ$  by  $0.1^\circ$  from CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique) are adjusted, based on grid precipitation data interpolating stations collected and quality controlled by NMIC (National Meteorological Information Center) of China Meteorological Administration. Although CMORPH data has good performance on the space structure of rainfall over China in summer time, it has obvious systematic errors. CMORPH data underestimate large precipitation values while overrate small ones.

After analyzing the bias characteristic of CMORPH precipitation data, different matching schemes are designed by adjusting PDF matching samples of spatial and temporal scale separately. The generalized cross-validation (GCV) statistical tests are used in evaluating the quality of correcting data. The evaluation results suggest that the PDF distribution and precipitation values of corrected precipitation products are close to those of the gauge-based precipitation. Both adjusted daily and hourly satellite precipitation data over China get a less systematic bias than the original ones. Even in the area of sparse observations, such as the Western China, the improvement is also remarkable. The adjusted rainfall data over the Western China not only maintain the basic spatial construction of original satellite products, but also improves their quantity value through closing them to the gauge observations. So the research demonstrates that the PDF method is an effective way in correcting systematic bias of satellite-based precipitation estimates over China.

**Key words:** satellite-based precipitation estimates; gauge-based precipitation; systematic bias; probability density function matching method