

潘畅, 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[J]. 气象, 2011, 37(5): 564-570.

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^{* 1}

潘 畅 宇婧婧 廖 捷 余 予

国家气象信息中心, 北京 100081

提 要: 本文以 2009 年台风莫拉克为例, 利用分布密集的自动站观测降水资料比较分析了国家气象信息中心研发的地面降水分析产品 CPAP 和卫星反演降水产品 CMORPH、FY2C 等对强天气过程降水的监测能力。结果表明: CPAP 准确地把握了这次台风登陆过程中降水的空间分布和强度, 但由于海洋区域无站点分布, CPAP 无法展现一个完整的台风降水空间结构; CMORPH 能够合理地描述完整的台风降水空间结构及其演变特征, 但与地面观测相比, 其降水中心的位置差异较大, 且量值普遍偏低; FY2C 的降水在陆地与海洋出现了严重的结构不连续的现象, 对台风降水空间结构的描述不如 CMORPH 合理。由此可见, 选择对降水空间结构描述完整且合理的卫星降水产品与精度较高的地面观测降水融合, 结合两者的优势, 是发展高质量降水分析产品的一种有效途径。

关键词: 台风降水监测, 自动站观测, 卫星反演降水, 资料评估

Assessment on the Rainfall Monitoring of Typhoon Morakot by Ground-Gauged and Satellite Precipitation Products

PAN Yang YU Jingjing LIAO Jie YU Yu

National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the automatic weather stations (AWS) precipitation data, an assessment of multi precipitation products is conducted on the rainfall monitoring of typhoon Morakot in the August of 2009. The results show that, the CPAP (China Precipitation Analysis Product) daily grid precipitation data display an accurate spacial distribution and rain intensity on the land, but not in ocean because of the limitation of station distribution. Compared to the ground-gauged rainfall measurements, the method CMORPH can well present an exact spiral rain-belt around typhoon eye, and also its evolvement, but the location of maximal rainfall center rooted in the rain-belt deviates greatly from the actuality. And the intensity of rainfall in the CMORPH is much weaker than that in gauged. In oceans, FY2C does not perform as good as the CMORPH owing to its discontinued rainfall distribution along the coastal areas. Taking the advantages of the gauged rainfall (accuracy) and the CMORPH (pattern), we may get a high-quality precipitation product.

Key words: precipitation monitoring, automatic weather stations, satellite retrieved precipitation, data assessment

引 言

发展东亚地区高质量的多类型降水资料的融合

产品对于该地区的天气气候监测、气候变化分析、数值模式检验以及水文研究有着非常重要意义。目前, 国内外相关的科研机构 and 业务部门都发布了多种较高分辨率的卫星反演降水估计产品, 例如美国国家航

^{*} 中国气象局气候变化专项项目(CCSF-09-6)和气象行业科研专项经费(GYHY(QX)2007-6-5)共同资助
2010 年 4 月 8 日收稿; 2011 年 1 月 19 日收修定稿
第一作者: 潘畅, 从事气象资料的质量控制和融合等方面的工作. Email: pany@cma.gov.cn

空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)研制的 TMPA^[1], 美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)研制的 CMORPH^[2] 和日本宇宙航空研究研发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)地球观测研究中心(Earth Observation Research Center, EORC)研制的 GsMAP^[3] 等, 中国国家卫星气象中心(National Satellite Meteorological Centre, NSMC)也发布了 FY2C 的降水估计产品^[4-5]。同时, 中国国家气象信息中心(National Meteorological Information Centre, NMIC)基于台站观测资料也发展了较为成熟的质量控制方案, 并引进国外先进的插值方案^[6] 研发了中国区域降水的格点分析产品^[7], 这些产品的开发为发展卫星反演降水与地面观测降水的融合试验提供了良好的基础。但是, 这些资料对东亚地区降水的空间分布和演变特征的描述能力尚待评估, 迫切需要比较各种资料的差异, 了解它们的特性及内在缺陷, 才能有效地改进融合方法, 从而更好地开拓它们的应用前景。

2009 年第 8 号台风莫拉克于 8 月 4 日凌晨生成, 5 日加强为台风, 7 日 23 时在台湾花莲登陆, 9 日 17 时在福建霞浦再次登陆, 11 日 17 时进入黄海, 12 日 02 时停止编号。从生成到结束 9 天里, 与之伴随的暴雨天气引发多处山体滑坡、泥石流等地质灾害, 并造成多个城市严重内涝, 给我国东部地区多省(市)带来严重创伤, 超过 1000 万人受灾, 直接经济损失逾百亿元。本文详细介绍了国家气象信息中心收集的全国自动站逐小时降雨量资料和基于 2400 个国家级地面气象站日降水量观测资料研发制作的格点化产品, 以及 CMORPH、FY2C 等卫星反演降水产品对这次台风登陆过程的降水监测情况, 以自动站资料为基准, 从日值和小时值两个时间尺度综合比较了各种资料间降水量值及其空间分布的差异, 较详细地评估了高时空分辨率的 CMORPH、FY2C 卫星反演降水产品对台风这种强天气系统的降水精细结构的展现能力。

1 资料介绍

1.1 全国自动站逐小时降水量资料

全国自动站逐小时降水量资料由国家气象信息

中心提供, 经过了有效的质量控制^[8], 其中包括气候学界限值检查、区域界限值检查、时间一致性检查和空间一致性检查。该资料从 2006 年 1 月开始收集, 当时全国只有 1000 多个站, 至 2009 年站点数已增加到 30000 个左右(分布如图 1 所示)。该资料在我国东部地区的分布密度较高, 能够为汛期的气象预报、监测和应急响应任务提供较为精细的中小尺度信息。

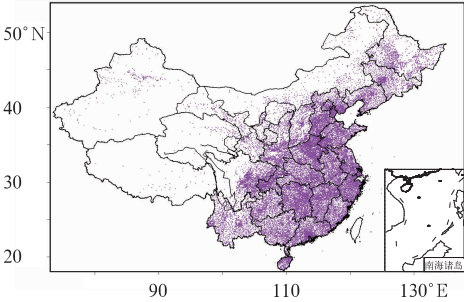


图 1 全国自动站站点分布
Fig. 1 Distribution of automatic weather stations (AWS) in China

1.2 中国逐日格点降水分析产品

国家气象信息中心和 NOAA 气候预测中心(CPC)合作开发了“中国逐日格点降水分析产品”(China Precipitation Analysis Product, CPAP)。该产品基于中国 2400 多个国家级地面气象站日降水量观测(08:00—08:00, 北京时), 采用“基于气候背景场”的最优插值(optimal interpolation, OI)方法生成 0.25°×0.25°的网格日降水分析场^[7], 由于其在建立“气候背景场”的过程中用到了考虑地形效应的 PRISM(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)方法插值的数据, 因而间接订正了地形的影响。

1.3 CMORPH 卫星降水估计产品

CMORPH 资料是 NOAA 气候预测中心(CPC)基于连续的静止卫星红外(Infrared, IR)图像采用运动矢量方法来估计被动微波(Passive Microwave, PMW)反演降水的空间传播特征, 进而做出的高质量降水估计产品^[2], 时间间隔为 30 分钟, 空间分辨率为 8 km, 覆盖了全球 60°S~60°N 之间的区域。该资料由于融合了多颗卫星的 IR 图像(Meteosat-5/Meteosat-7/GOES/GMS-5)和 PMW(NOAA 极轨业务气象卫星/美国 DMSP/TRMM)资料, 因而具有相对较高的质量和时空精度, 对东亚地区降水也有较好的描述能力^[6]。

1.4 FY2C 卫星降水估计产品

FY-2C 是我国第一颗业务型地球静止轨道气象卫星,于 2004 年 10 月 19 日发射升空,通过其搭载的可见光和红外自旋扫描辐射计(VISSR),提供多通道的全圆盘图像^[4]。其降水估计产品是先以 FY-2C 静止气象卫星资料为主,选用云顶温度梯度、云体相对于云团中心的偏移量、云团移动速度作为影响因子回归得到卫星降水估计,再以常规地面观测资料为辅,通过卫星估计结果与地面常规雨量观测结果的融合技术产生覆盖中国及周边地区的定量雨量估计结果^[5]。该资料提供了 1 小时、3 小时、6 小时和 24 小时累积降水等多个时间分辨率版本,空间分辨率均为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

2 评估方法和资料处理

本文以自动站观测为基准,从日值降水和逐小时降水两个方面,对比分析了各类降水产品所展现的莫拉克台风降水空间分布特征的差异。特别针对降水大值中心区域,比较了自动站观测和 CMORPH、FY2C 降水的时间序列的相关,以考察两种卫星降水产品对降水时间演变特征的描述差异。

在小时降水的比较中,30 分钟间隔的 CMORPH 原始资料被累加成小时降水值,而 FY2C 采用的是国家卫星气象中心提供的 1 小时时间分辨率版本。空间上,由于 CMORPH 和 FY2C 的分辨率分别约为 8 km 和 10 km,两者比较接近,不另作处理。

在日降水量比较中,自动站的逐小时降水量资料按每日 24 个时次被逐一累加成日降水量(08:00—08:00,北京时)。为了方便与 CPAP 比较,被处理成逐小时的 8 km 空间分辨率 CMORPH 资料先逐时累加成日值资料,再通过 Cressman 方法插值成 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (约 25 km)的粗空间分辨率版本。FY2C 则采用的是 24 小时累积降水量的时间分辨率版本,只是空间上 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的资料同样被插值成 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的粗分辨率版本。

3 “莫拉克”登陆过程降水监测对比分析

3.1 日值降水的比较

3.1.1 各种降水产品监测结果的对比分析

从自动站观测日降水量的监测情况来看,在“莫

拉克”登陆之前,我国东南沿海地区已经受到台风外围降水云系的影响,在闽浙等地出现了大风和暴雨天气。至 8 月 9 日 17 时,台风在福建霞浦登陆,9 日 19 时减弱为强热带风暴,闽浙沿海地区出现了 100 mm 以上的大暴雨。伴随“莫拉克”北上,福建、浙江、安徽、江苏、上海等地陆续出现强降水,其中福建中东部、浙江大部、江苏中南部及安徽东南部局地区的过程累积降水量普遍超过 100 mm,福建中东部和浙江东南沿海地区还出现 250 mm 以上的强降水中心(图 2a)。

CPAP、CMORPH 和 FY2C 三种格点降水资料对“莫拉克”登陆过程的降水空间分布的描述比较相似,与自动站观测的结果也很一致(图 2b、2c 和 2d)。其中,CPAP 和 FY2C 都呈现出与自动站观测非常接近的降水中心分布和强度,东南沿海地区最大降水中心强度均超过了 250 mm。相比之下,CMORPH 虽然抓住了闽中、皖西南、浙东和苏南等地区的强降水中心,但没有体现出浙东南沿海地区的强降水中心,且皖西南、浙西北降水中心的位置也存在偏差。另外,CMORPH 降水中心的强度与其他资料的相比要明显偏小,均没有超过 150 mm。考虑到 CPAP 和 FY2C 的降水产品的制作过程都用到了台站观测的降水信息,所以它们有着与自动站观测更为接近的结果,而作为完全与台站观测相独立的卫星反演降水估计产品,CMORPH 虽然对降水的空间分布具有一定的描述能力,但量值偏差较大。

3.1.2 地面与卫星日降水量的融合试验分析

从第 3.1.1 节的分析结果来看,地面和卫星降水产品各有优劣:一方面,CPAP 能够较真实地反映陆地降水的空间分布,但是由于海洋区域无站点分布,降水结构空间覆盖不连续。另一方面,CMORPH 虽然能够把握降水系统大体的空间结构,但是受到观测方式和反演算法的限制,对降水精细结构的描述能力较差。如果结合两者的优势,则可能得到一种空间覆盖既完整而精度又高的降水产品。

为了方便,我们以 CPAP 这个较为准确的分析结果作为地面观测降水,将之与 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 CMORPH 日降水做了一个初步的融合试验。融合采用最优插值(Optimum Interpolation,OI)方法,即以空间覆盖完整的 CMORPH 卫星降水作为背景场 F_k ,利用一定范围内搜索到的格点上的背景值 F_i 与观测值 O_i 的偏差,按照一定权重 W_i 来估计分析点上背景值的偏差,再用这个偏差来修正分析点上的

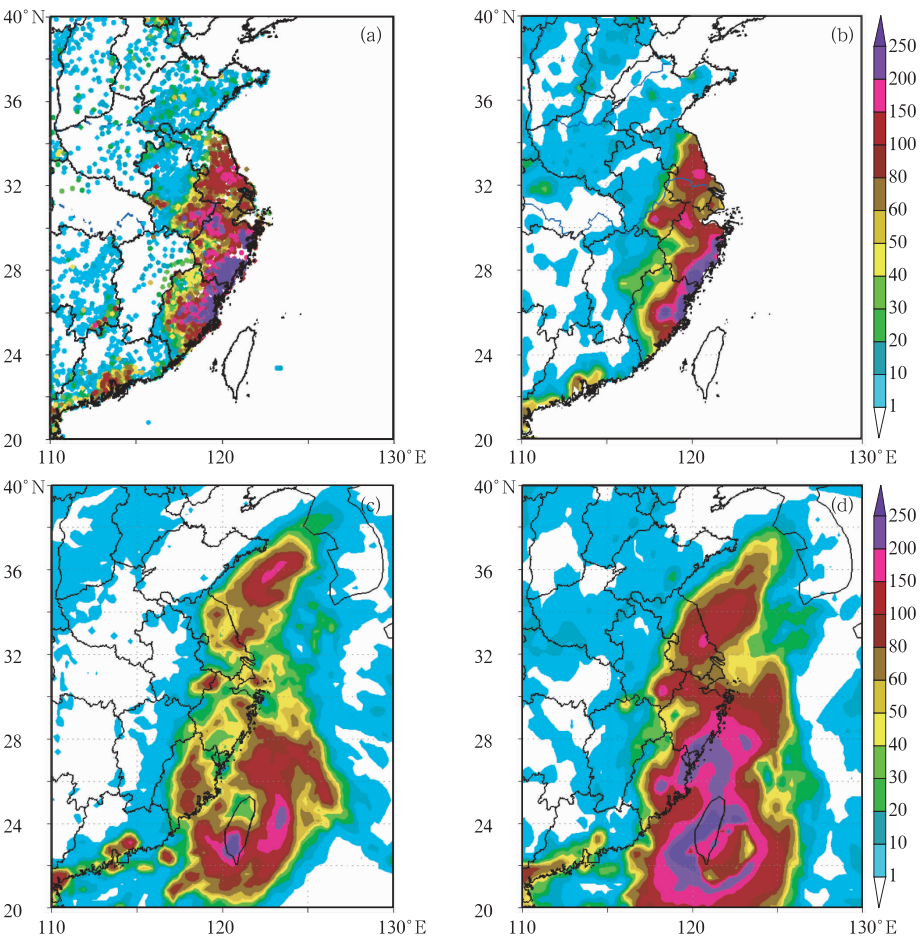


图 2 2009 年 8 月 8 日 08 时至 2009 年 8 月 11 日 08 时 3 天累积降水量(单位:mm)
(a)自动站观测;(b)CPAP;(c)CMORPH;(d)FY2C
Fig. 2 Rainfall amounts (unit: mm) accumulated from 08 BT 8 to 08 BT 11 August 2009
(a) AWS, (b) CPAP, (c) CMORPH, and (d) FY2C

背景值,最后得到引入观测信息的融合分析值 A_k 。
具体公式如下:

$$A_k = F_k + \sum_{i=1}^n W_i (O_i - F_i)$$

其中, k 表示分析格点, i 和 j 为网格内有观测的CPAP格点值, W_i 为权重函数。需要说明的是,这里仅取CPAP网格内有观测的格点分析值作为地面观测值,而不是所有CPAP网格点的值,尽可能地减小了地面观测降水中由插值带来的误差。

图 3 给出 CMORPH 和 CPAP 融合后的 3 天累积降水量空间分布。可以看到,融合后的降水产品对 CMORPH 陆地区域的降水空间结构有很大改进,特别是 CMORPH 中丢失的浙东南沿海的强降水中心,安徽至浙江北部以及福建东部的降水中心位置和强度都被很好地修正;而在海洋区域,它依然保持着 CMORPH 原有的空间结构。由此可见,融合结果能够更加真实地反映台风降水的空间结构。

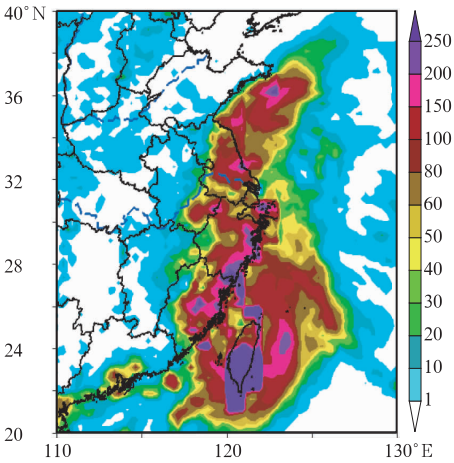


图 3 2009 年 8 月 8 日 08 时至 2009 年 8 月 11 日 08 时 3 天累积降水量(单位:mm):
CMORPH 与 CPAP 融合结果
Fig. 3 Rainfall amounts (unit: mm) accumulated from 08 BT 8 to 08 BT 11 August 2009; CMORPH combined CPAP

3.2 小时降水量的比较

3.2.1 台风降水的空间结构

高时空分辨率的降水资料不仅能够加强对台风等强天气系统的监测能力,更能为研究其系统的演变机理和改进数值模式提供更好的分析基础。自动站在我国华东地区的密集度达到 6800 多个,能够较为真实地反映台风登陆过程中降水精细的空间结构。

图 4a 是分布密集的自动站监测的 2009 年 8 月

9 日 08 时的降水情况,此时,台风尚未登陆,中心位于 26.5°N、119.9°E。结合 FY2 红外卫星云图可以看到,台风西北部外围的螺旋云系在浙江东南部和福建东部沿海地区造成 8~10 mm·h⁻¹ 的强降水,局部地区出现超过 20 mm·h⁻¹ 的大值中心,这个强降水中心正对应着台风外围螺旋云系中发展的 MCS 云团。经过逐小时降水分布演变与台风登陆后路径的比较发现(图略),强降水区域主要集中在台风中心北侧的外围云系中。

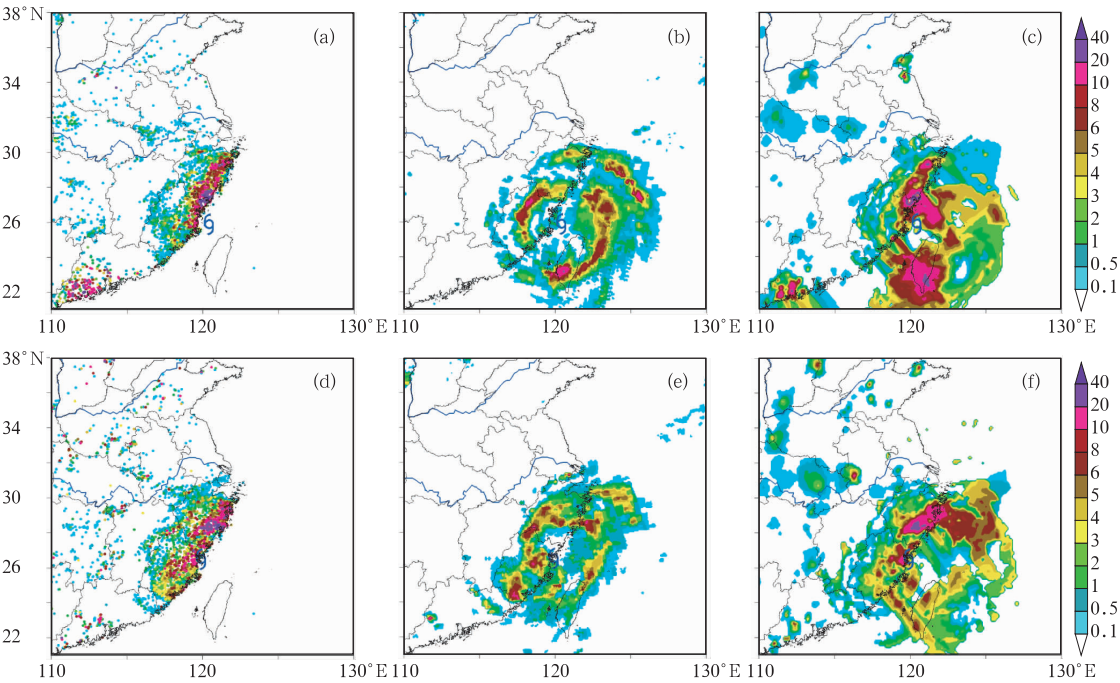


图 4 2009 年 8 月 9 日 08 时小时降水量(单位: mm·h⁻¹):(a) 自动站, (b) CMORPH 和 (c) FY2C; 2009 年 8 月 9 日 16 时小时降水量(单位: mm·h⁻¹): (d) 自动站, (e) CMORPH 和 (f) FY2C

Fig. 4 Hourly precipitation (unit: mm·h⁻¹) at 08 BT 9 August 2009 for (a) AWS, (b) CMORPH, and (c) FY2C; and hourly precipitation (unit: mm·h⁻¹) at 16 BT 9 August 2009 for (d) AWS, (e) CMORPH, and (f) FY2C

CMORPH 高分辨率的降水产品较好地呈现了台风螺旋雨带的空间结构,并捕捉到了雨带上的强降水中心(图 4b),但是对台风西北部强降水中心位置的描述与自动站观测的差异很大。自动站观测中强降水集中在闽浙东南部沿海地区(图 4a),这可能与台风环流和大陆地形抬升的相互作用有关^[9-10],CMORPH 没有反映出台风登陆前降水的这种分布特征。而 FY2C 似乎结合了前两者的特点,既有台风外围的螺旋雨带,又抓住了沿海岸线的强降水特征,只是台风眼附近的降水强度要比 CMORPH 显著偏强(图 4c)。

在“莫拉克”登陆过程中,CMORPH 能抓住地面观测中位于台风中心西南侧闽中、闽东和西北侧闽北、浙西的强降水中心(图 4b 和 4e),但与自动站观测降水相比仍存在一些明显差异:闽中、闽东的降水中心分裂成两个;闽北、浙西的降水中心量值过于偏大;未能体现地面观测中位于浙东南的强降水中心等。另外,除了闽北、浙西的降水中心,CMORPH 中其他降水中心的强度较自动站观测偏小。可见,CMORPH 在描述降水中心的精细结构和量值上都还存在很大的问题。

由于融合了地面降水的信息,FY2C 在陆地上

保持了与自动站观测非常一致的降水分布特征,但在海洋上的降水分布和量值仍与 CMORPH 的差异较大(图 4f),这主要因为两者采用的是完全不同的资料来源、反演思路和算法。CMORPH 描述的台风降水结构与 GsMAP 描述的非常相似(图略),它们都融合了多颗卫星多种遥感手段获取的资料的信息(IR 和 PMW),且多数资料来源于相同的卫星,并根据不同资料的特性建立了各自的反演融合方法。与之相比,FY2C 仅采用单一的遥感资料(IR)通过经验公式估计而成,在有些条件下,云和降水间的关系不能够被稳定地在公式中体现出来,因而在描述台风降水空间结构时,稳定性要差很多,常常会出现降水奇值点或者海陆降水结构不连续的情况(图 4c 和 4f)。

3.2.2 降水的时间演变特征

比较自动站、CMORPH 和 FY2C 三种高时空分辨率资料对这次过程闽中、浙北、苏南等强降水中心地区区域平均的逐小时降水序列(图 5),可以发现,三者有着非常一致时间演变特征,闽中、浙北和苏南等地区的强降水主要发生在台风登陆之前和初期,台风外围强大的气旋性环流带来充沛的水汽和动力性辐合上升运动,有利于暴雨的发展,区域的小时降水量都在 8~12 mm 左右,随着台风中心的靠近,区域小时降水逐渐减弱,当台风中心经过时,则只有 2~4 mm。

在台风登陆北上的过程中,CMORPH 与自动站的逐小时降水序列的相关系数在三个地区分别为 0.84、0.81 和 0.75,但 CMORPH 的强度则明显偏低,与站点观测的相对误差百分比分别为 42%、74%和 46%,这可能与 CMORPH 卫星反演降水的系统误差有关。由于采用了地面站点观测降水的订正,FY2C 与自动站观测逐小时降水演变在三个区域内都非常相似,相关系数均达到 0.96 以上,且降水量值的相对误差百分比仅在 4%左右。在台风登陆过程中,这三个地区 CMORPH 与自动站观测的 3 天累积降水差值分别为 75、97 和 65 mm,FY2C 则为 32、6 和 5 mm,这种偏差的累积对天气尺度的降水监测影响非常严重,而融合产品能够较好地避免这个问题。

总的来说,CMORPH 高分辨产品能够较好地体现台风登陆前的螺旋雨带结构,并能够捕捉到登陆后螺旋雨带中强降水中心的分布和强降水区域的时间演变的主要特征,只是对更精细的空间结构的

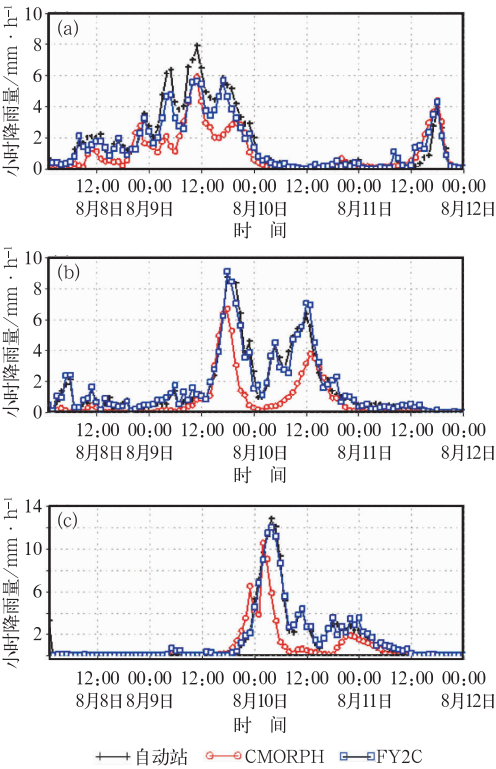


图 5 (a)闽中(25.5°~26.5°N、118°~119°E)、(b)浙北(30°~31°N、119°~120°E)和(c)苏南(32°~33°N、120°~121°E)三个强降水区面降水量(单位: mm · h⁻¹)的时间序列
Fig. 5 Time series of hourly precipitation (unit: mm · h⁻¹) averaged in three storm center regions respectively from AWS, CMORPH and FY2C: (a) (25.5°-26.5°N, 118°-119°E), (b) (30°-31°N, 119°-120°E), and (c) (32°-33°N, 120°-121°E)

把握与站点观测比还存在明显差异。另外,它与逐日的 CMORPH 降水结果一样,高时空分辨率版本的 CMORPH 中也出现部分降水中心的强度较自动站观测、FY2C 偏弱的问题,但通过系统误差订正后在台站稀疏的地方仍不失为一种很好的替代资料。

4 结论和讨论

为了提高降水资料在短时临近预报和防灾减灾中的应用,为重大气象灾害天气过程提供更好的监测产品,国家气象信息中心整理制作和收集了多种降水资料产品,本文利用自动站降水量资料评估了这些产品对 2009 年台风莫拉克登陆过程的降水监测能力。结果表明:

(1) 自动站观测降水资料在我国东部地区具有

较高的密度,能够反映出比较精细的中小尺度降水结构。与之相比,仅由 2400 个国家级地面站日降水量资料插值而成的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 CPAP 产品,也能够较真实地反映这次过程的降水空间分布和强度。但是由于站点仅分布在陆地区域,自动站观测降水以及基于台站观测发展的格点产品 CPAP,它们所描述的降水空间覆盖都不完整,都不能完全涵括降水系统的迁移路径和演变过程。

(2) 与分布密集的自动站观测相比,CMORPH 较好地呈现了台风螺旋雨带的空间结构,合理展现了台风登陆后降水空间结构的变化,以及在部分强降水区得到了与自动站观测类似的时间演变特征。但是,CMORPH 对强降水中心的空间位置和强度都有失真的描述,且存在显著的系统性误差,降水量明显偏小。

(3) FY2C 由于采用了地面观测降水订正,因而在陆地上呈现出与自动站观测更为接近的降水分布、强度和演变特征,但是它在描述海洋上台风系统精细的降水结构时,不论是降水的整体空间型还是分布的连续性,与 CMORPH 相比都有很大的差距。这说明只有融合多种遥感手段获取的卫星资料,才能够有效地增加卫星降水产品的精度和稳定性。

综上所述,选择对降水空间结构把握较好的卫星反演降水产品(如 CMORPH)与精度较高的地面观测降水融合,能够得到一种空间覆盖更完整而精度又较高的降水分析产品。文中给出该个例的融合试验结果,的确结合了地面和卫星降水产品的优势,不过依然存在问题,在站点密度分布不均匀的区域,例如在与东南沿岸交接的海域,有时会出现降水形态订正前后差异较大的问题。类似地,在我国

西北和青藏高原站点稀疏与东部站点密集的交界地区也会面临降水订正失真的问题。如何优化站点密度变化较大区域的融合效果,将是下一步发展质量稳定性较高的融合产品重点需要解决的问题。

参考文献

- [1] Huffman G J, Adler R F, Bolvin A D, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. J Hydro, 2007(8):38-55.
- [2] Joyce R J, Janowiak J E, Arbin 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]. J Hydro, 2004(5):487-503.
- [3] Okamoto K, Iguchi T, Takahashi N, et al. The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project[R]. 25th IGARSS Proceedings, 2005: 3414-3416.
- [4] 杨国弘,白云. 我国第一颗业务型地球静止气象卫星 FY-2C[J]. 气象,2004,30(12):36-38.
- [5] 卢乃锰,吴晓,游然. 卫星中心降水估计业务产品的原理与方法[R]. 2001 年全国重大灾害性天气过程总结和预报技术经验交流会,2001.
- [6] Xie Pingping, Chen Mingyue, Yang Song, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia[J]. J Hydro, 2007(8):607-626.
- [7] 沈艳,冯明农,张洪政,等. 中国逐日格点降水量格点化方法[J]. 应用气象学报,2010,21(3):1-21.
- [8] 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[J]. 气象,2010,36(7):123-132.
- [9] 黄奕武,端义宏,余晖. 地形对超强台风罗莎降水影响的初步分析[J]. 气象,2009,35(9):3-10.
- [10] Zhao Leigang, Zhou Yi, Li Yunying, et al. Numerical simulation and mesoscale analysis of a torrential rain caused by typhoon[J]. J Tropical Metero, 2008, 14(1):49-52.