

廖荣伟,张冬斌,沈艳. 2015. 6 种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估. 气象, 41(8):970-979.

6 种卫星降水产品在中国区域的 精度特征评估^{*}

廖荣伟 张冬斌 沈 艳
国家气象信息中心, 北京 100081

提 要: 采用 2012—2013 年国家气象信息中心 2419 个国家级地面气象站格点化数据和 TRMM(3B40RT、3B41RT、3B42RT)、CMORPH、GSMaP、HYDRO 共 6 种 0.25°×0.25°卫星反演降水数据,从中国区域、中国东部区域及中国西部区域 3 种空间尺度综合验证和比较了日尺度上卫星反演降水产品的精度。结果表明:春、夏、秋季卫星反演降水产品对降水描述的准确性高于冬季。相关性、均方根误差等指标随季节变化明显,且差异较大,夏季每种降水产品的评估指标均优于冬季。不同区域之间定量评估指标差异明显,具有月尺度变化特征。卫星反演降水产品对冬季小降水及固态降水的反演能力有限。对于中国区域的大范围降水事件,每种降水产品可以较好进行再现,但均以多传感器联合后的产品质量较高,单一微波、红外或可见光的效果较差。TRMM 的 3B42RT 在夏季对降水反演的落区较好,但极值偏大,CMORPH 的综合评价较好。卫星降水产品精度的空间分布与地形有一定的关系。

关键词: 卫星反演降水, 格点降水, 评估, 精度, 时空变化

中图分类号: P413 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.08.006

Validation of Six Satellite-Derived Rainfall Estimates over China

LIAO Rongwei ZHANG Dongbin SHEN Yan
National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: Using grided data from 2419 stations of National Meteorological Information Centre during 2012—2013 and the TRMM (3B40RT, 3B41RT, 3B42RT), CMORPH, GSMaP, HYDRO satellite-derived rainfall data, this paper evaluated and discussed the validation of rainfall estimates from the six data with 0.25°×0.25° spatial resolution and the accuracy of the retrieved daily rainfall products over the whole China, Eastern China and Western China. Results show that the accuracy of satellite-derived data is higher in spring, summer and autumn than in winter. The linear correlation coefficient, mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), probability of detection (POD), and the false alarm ratio (FAR) change with seasons. Meanwhile, the index of each data is better in summer than in winter. The quantitative statistical metrics are obviously different, changing in monthly scale. The estimate ability of satellite-derived rainfall is poor when estimating solid and small-amount precipitation. For the large range of precipitation events over China, all the 6 rainfall products have better result. The better quality is realized by merging multi-sources, and the worse quality results from single-source microwave, infrared or visible light. The 3B42RT retrieves better falling area of rainfall, but extreme value is larger. The

^{*} 国家科技支撑计划项目(2012BAC22B04)、国家自然科学基金面上项目(41371093)及国家气象信息中心青年科技基金(NMIC_QJ_201212 和 NMICQJ201309)共同资助
2014 年 6 月 9 日收稿; 2015 年 4 月 1 日收修定稿
第一作者:廖荣伟,主要从事气象相关方面研究. Email:liaorw@cma.gov.cn

comprehensive evaluation of the CMORPH is better than others. The spatial distribution of accuracy of satellite-derived rainfall is related to terrains of China.

Key words: satellite-derived rainfall estimates, gridded precipitation, validation, accuracy, temporal and spatial characteristics

引言

降水是地球水循环的基本组成部分,作为一个水分通量连接着大气过程与地表过程,具有重要的气象学、气候学和水文学意义(刘元波等,2011;Kummerow et al,1998;王令等,2012)。与其他的水文、气象参数不同,降水在时间和空间上变率大,常呈现非正态的分布,所以也是目前最难测量的大气变量之一。降水的多少是决定干旱与否的关键条件。相对于气温、气压等其他气象要素,降水的时空变率要大得多,受地形和气候系统等因素的影响更为显著,这就导致单点观测降水值的代表性相对差一些,又由于受地理位置局限以及气象观测仪器设备不足的影响,获取某一区域的实测数据存在一定困难。虽然运用地面雨量计及地基雷达可以监测区域性地表降水,但是由于雨量计和地基雷达在陆地上分布不均,且在海洋上分布更加稀少,所以很难通过这些手段准确地获得大区域和全球性的降水分布。卫星微波遥感可以克服此局限,实现全球尺度降水和云的观测,而且相对于红外/可见光只能反映云厚、云高等信息而言,微波能够穿透云体,利用云内降水粒子和云粒子与微波的相互作用对云、雨进行更为直接的探测(Olson et al,1996;杨扬等,2000)。随着卫星降水遥感信息日益丰富,对降水的时空分布可以进行精准测量,这也成为近几十年来最富有挑战性的科学研究目标之一(胡庆芳等,2013)。

目前,全球有影响的卫星降水估计方法已达30余种(胡庆芳等,2013),卫星降水反演产品(Satellite Rainfall Estimation)十几种,其中比较著名的有TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)(Kummerow et al,1998;Huffman et al,2002;2007),CMORPH(Climate Prediction Centre Morphing Technique)(Joyce et al,2004),GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)(Okamoto et al,2005;Ushio et al,2009),Hydro-Estimator[National Environmental Satellite, Data,

and Information Service(NESDIS)](Vicente et al,1998;Scofield et al,2003)等。卫星降水反演产品覆盖范围广、时效性强,可以弥补地面雨量计和地基雷达的不足。国际降水工作组(International Precipitation Working Group,IPWG)从2008年开始,通过PEHRPP(Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products)计划,推动了美国(Huffman et al,2001)、澳大利亚(Weymouth et al,1999)、欧洲(Kidd et al,2003)、日本(Makihara et al,1996)、南美和南非等地区卫星降水反演产品精度的评估工作(Arkin et al,2008;Turk et al,2008)。受IPWG的邀请,2012年10月,在IPWG第六次工作组会议中,中国被确定为加入该计划,由此开始进行多种卫星反演降水产品在中国地区的检验评估工作。

关于卫星反演降水产品精度的评估工作,国外研究较多,例如:Sapiano等(2009)对多种高分辨率产品进行评估比较,其结果表明卫星反演降水产品均可以再现降水的空间分布及昼夜变化特征。Kubota等(2009)通过检验多种产品的反演精度,发现GSMaP和CMORPH产品的精度比其他产品要高,所有产品对温暖地区的弱降水和极强降水反演较差。McCollum等(2002)、Romilly等(2011)指出不同类型卫星降水产品的源数据和反演算法不一,其精度与性能各异;而同一数据,在不同地区的精度可能相差很大;在同一区域,精度又具有时空变化特征。Ebert等(2007)、Laurent等(1998)研究多种卫星降水产品的时空尺度特征,指出采用单一的评估方法不足以表现不同产品的精度,需采用不同的方法进行综合比较。Tian等(2010)研究发现多种卫星降水产品在美国地区均存在冬季低估和夏季高估降水量,而GSMaP产品的精度较高。近些年,国内对卫星降水产品的评估工作,有了长足进步,针对典型卫星降水产品的精度,进行了一定的分析。例如:刘元波等(2011)对国际及国内的卫星反演降水研究进行了综述,结合问题给出研究的发展趋势。胡庆芳等(2013)、Shen等(2010)对多种卫星产品在中国特定区域的精度进行评估,对时空变化特征进行分析。此外,更多的研究人员采用TRMM卫星反演

降水产品,探寻中国不同地区的精度情况,例如:吴庆梅(2003)、白爱娟等(2008)、穆振侠等(2010)、刘俊峰等(2010)、骆三等(2011)、李相虎等(2013)、吴雪娇等(2013)和吕洋等(2013)利用 TRMM 卫星反演降水产品探寻中国不同地区的精度特征及降水的时空变化规律,分析其在旱涝监测方面的适用性状况,评估 TMPA(the TRMM multisatellite precipitation analysis)对冬、夏季节降水的反演能力。

以往有关卫星降水反演产品的分析多以 TMPA 资料分析为主,偏重于局部地区或某次大的降水过程,针对中国区域、中国东部区域和中国西部区域的精度分析尚欠缺,因此,本文针对上述研究区域,采用国际标准(WCRP)的验证评估方法,在日时间尺度上,选取 2012—2013 年的地面站格点和卫星反演降水数据,对 TRMM、CMORPH、GSMaP、HYDRO 等 6 种高分辨率卫星反演降水产品的精度

进行综合分析,以期对中国区域降水分布特点有更加全面的认识,也对卫星反演降水产品的空间估测能力有更准确的评价。

1 资料与方法

1.1 资料和研究区域

本文采用卫星反演降水产品包括:2012—2013 年 TRMMv7 版本(3B40RT、3B41RT、3B42RT),CMORPH、GSMaP、HYDRO 共 6 种 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ 降水数据。各类数据基本情况见表 1。6 种数据时间分辨率分别为 1 h、3 h 和 1 d,计算时将 1 和 3 h 的降水量累加得到日降水量。HYDRO 的空间分辨率为 4 km,经过空间中央插值统一调整为 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ 分辨率进行评估。

表 1 卫星反演降水产品介绍
Table 1 Products of satellite-derived rainfall estimates

产品名称	来源	使用的卫星名称	输入数据	空间分辨率	时间分辨率
3B40RT	NASA	TRMM 卫星	微波(PMW)	$0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$	3 h
3B41RT	NASA	TRMM 卫星	红外(IR)	$0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$	1 h
3B42RT	NASA	TRMM 卫星	红外/微波(IR/PMW)	$0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$	3 h
CMORPH	NOAA	DMSP 系列卫星、NOAA 系列卫星、AQUA 卫星、TRMM 卫星	红外/微波(IR/PMW)	$0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$	逐日
HYDRO	NOAA	NOAA 系列卫星	红外/可见光(IR/VIS)	4 km	1 h
GSMaP	JAXA	DMSP 系列卫星、TRMM 卫星、NOAA 系列卫星、Metop 系列卫星、GPM 卫星、GCOM-W 卫星、GOES 卫星	红外/微波(IR/PMW)	$0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$	逐日

本文采用的基准降水资料是国家气象信息中心于 2010 年开始制作的 2012—2013 年 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ 逐日格点降水分析场(沈艳等,2010;2012;2013;潘旸等,2011;2013)。该降水分析场使用基于气候学界限值、区域界限值、空间一致性等检查后有超过 2400 个国家级地面气象站的站点。图 1 给出了中国区域地面气象站的网格点分布情况,该降水分析场数据在制作过程中,考虑了地形对降水的影响。

中国区域的站点呈现非常明显的东部多、西部少的特点。由于站点东西分布不均,根据中国地面站点的密集程度(图 1),将中国区域以 100°E 为分界线,划分为东、西两区域,其中 100°E 以东的中国区域定义为中国东部区域,格点数为 143×144 , 100°E 以西的中国区域定义为中国西部区域,格点数为 113×144 ,西部区域网格中的降水量充分考虑

站点信息,格点中有台站信息则参与评估,格点中无台站信息则不参与评估。评估前,所有卫星反演降水数据均转化为中国区域、中国东部区域和中国西

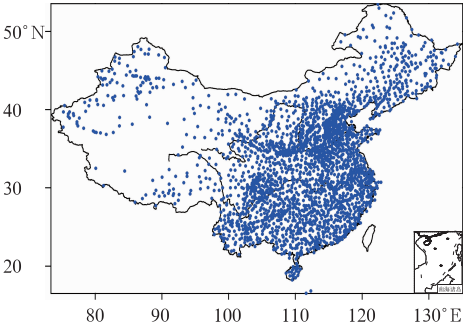


图 1 国家级地面气象站的站点分布
Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in China

部区域,且范围大小一致,时间尺度为日值。对比评估均为相同区域格点与格点之间的比较,如果格点降水场或是反演降水场在某格点无降水信息,则对应格点不参与评估。

为便于表述,根据 6 种卫星反演降水数据的降水反演算法以及输入数据(红外/可见光、主/被动微波、多传感器联合)的不同(刘元波等,2011),将其分为四类。第 I 类为 3B40RT(微波),第 II 类为 3B41RT(红外),第 III 类包括 3B42RT、CMORPH 和 GSMaP(多传感器联合),第 IV 为 HYDRO(红外/可见光)。本文分析结果为 2012 年 12 月至 2013 年 11 月的数据,2012 年冬季系指 2012 年 12 月至 2013 年 2 月,2013 年夏季系指 2013 年 6—8 月。

1.2 精度评估方法

本文采用的精度评估指标均按照(WCRP)国际统一标准编制,同时采用定量和分类评分指标(表 2)对各卫星反演降水产品进行评价,以全面反映日时间尺度上的精度特征。定量指标反映了卫星反演降水产品与基准降水在数量上的一致性,包括:均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数(correlation coefficient, CC)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE);分类评分指标反映卫星反演降水产品对日降水事件发生可能性的估计能力,包括:ETS(equitable threat score)评分、HKS(Hanssen and Kuipers score)评分、探测率(probability of false detection, POD)评分和空报率(false alarm ratio, FAR)评分。

表 2 降水估计列表
Table 2 Classification of satellite-derived rainfall estimates and gauge rainfall

	格点降水/mm	
	≥1	< 1
	≥1 mm	< 1 mm
卫星反演降水产品	N_a	N_b
	N_c	N_d

注: N_a 表示卫星反演降水和实况降水都出现在某一降水等级内的站点数,即反演命中的站数; N_b 表示反演降水量出现而实况未出现的站点数,即空报站数; N_c 表示反演降水未出现而实况出现降水的站点数,即漏报站数; N_d 表示实况和卫星都未出现降水的站点数。

(1) 相关系数(Rakhmat et al, 2013; Feidas, 2010; Kendall et al, 1963):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2 \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}}$$

(1)

式中, r 的范围为:−1~1,完全相关为 1,完全相反为 −1。

(2) 均方根误差(Murphy, 1995):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - g_i)^2}$$

(2)

式中, RMSE 的范围为:0~∞,完全无差别为 0。

(3) 平均绝对误差(Feidas et al, 2010; Kendall et al, 1963):

$$AME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |s_i - g_i|$$

(3)

式中, MAE 的范围为:0~∞,完全无差别为 0。

对于上述公式,其中 g_i 和 s_i 分别表示某评价网格第 i 时段对应的基准降水量和卫星反演降水量; \bar{g} 和 \bar{s} 分别表示基准降水量和卫星反演降水量的均值。

(4) ETS 评分(equitable threat score), ETS 的范围为:−1/3~1,完全正确分数为 1(黄伟等, 2009)。

$$ETS = \frac{N_a - N_{RANDOM}}{N_a + N_b + N_c - N_{RANDOM}}$$

(4)

$$N_{RANDOM} = \frac{(N_a + N_c)(N_a + N_b)}{N_a + N_b + N_c + N_d}$$

(5)

(5) HKS 评分(Hanssen and Kuipers score),在 −1~1 之间, $HKS=1$,反演完全正确; $HKS=-1$,反演完全错误(Woodcock, 1976):

$$HKS = \frac{N_a}{N_a + N_c} - \frac{N_b}{N_b + N_d}$$

(6)

(6) POD 评分(probability of detection)衡量的是准确反演了多少观测为“是”的事件,从而了解某次反演的命中率。POD 的范围在 0~1, $POD=0$,反演完全错误; $POD=1$,反演完全正确:

$$POD = \frac{N_a}{N_a + N_c}$$

(7)

(7) FAR 评分(false alarm ratio)衡量的是没有出现的事件被误反演为出现的概率,即空报率。FAR 在 0~1 之间, $FAR=0$,反演完全正确; $FAR=1$,反演完全错误:

$$FAR = \frac{N_b}{N_a + N_b}$$

(8)

2 冬季降水场分析与讨论

从冬季逐日平均的降水分布图和散点图上

(图 2)可知,在 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 格点空间尺度上,6 种卫星降水产品对中国区域降水分布的刻画有所区别,降水估计误差大量存在。

在中国东部,3B42RT 雨区与基准降水场较为接近,而另外 5 种产品的最大降水区与基准降水场不一致,量级出现低估,其中 3B40RT 低估最严重。在中国西部,GSMaP 高估严重,特别是在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 的山地、高原区域,散点图上对于小降水高估较大,其次为 HYDRO, 35°N 以北、 95°E 以西的区域高估,3B42RT 在青藏高原南部 $27^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 的区域存在高估。对于出现的高估情况,其原因可能与制作降水产品时使用的反演算法和对固态降水反演不准确有关(Huffman et al,2007)。

对冬季平均的评估指标进行分析(表 3),可以发现,整个中国区域,第 I 类产品 3B40RT 的

RMSE、MAE 小于其他三类产品,区域平均降水量为 $0.14\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,小于基准降水。第 II 类产品 3B41RT 的区域平均降水量为 $0.57\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,与基准降水量值一致。第 III 类产品中 3B42RT 的相关系数最高且大于其他产品,区域平均降水量比基准降水量高 $0.29\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。GSMaP 反演降水量级高估较大,相关系数为负值。第 IV 类产品 HYDRO 的区域平均降水为 $0.62\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,仅比基准降水量值高 $0.05\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。四类产品的 r 在 0.5 以下,对基准降水量的解释能力均不强。分类评分指标方面,四类产品 ETS 评分在 $0.03\sim 0.08$ 。HKS 评分中 3B42RT 最高,6 种产品的数值在 $0.04\sim 0.14$ 。POD 评分中 3B42RT 最高,与 3B41RT 差 0.01,水平相当。FAR 评分中 HYDRO 较好,量值为 0.68,其余产品均在 0.7 以上。

表 3 卫星反演降水评估结果(冬季平均)
Table 3 Validation of satellite-derived rainfall estimates (winter mean)

区域	名称	RMSE / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	r	MAE	ETS	FAR	HKS	POD	卫星降水 / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	基准降水 / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$
中国区域	3B40RT	2.19	0.10	0.64	0.03	0.80	0.04	0.07	0.14	0.57
	3B41RT	2.72	0.12	0.94	0.06	0.79	0.13	0.21	0.57	
	3B42RT	3.73	0.16	1.11	0.07	0.79	0.14	0.22	0.86	
	CMORPH	2.37	0.08	0.78	0.03	0.85	0.06	0.15	0.37	
	GSMaP	20.61	-0.0001	3.12	0.03	0.87	0.05	0.17	4.35	
	HYDRO	5.47	0.13	1.05	0.08	0.68	0.12	0.16	0.62	
中国东部区域	3B40RT	2.20	0.13	0.82	0.04	0.69	0.05	0.07	0.11	0.82
	3B41RT	2.54	0.13	1.04	0.06	0.70	0.09	0.17	0.48	
	3B42RT	3.14	0.17	1.15	0.08	0.69	0.12	0.17	0.75	
	CMORPH	2.21	0.17	0.86	0.05	0.75	0.09	0.15	0.28	
	GSMaP	11.71	0.06	1.52	0.06	0.73	0.09	0.14	0.96	
	HYDRO	3.42	0.14	1.18	0.06	0.58	0.08	0.12	0.53	
中国西部区域	3B40RT	1.26	0.04	0.28	0.01	0.92	0.01	0.04	0.13	0.17
	3B41RT	2.50	0.19	0.82	0.05	0.90	0.25	0.37	0.77	
	3B42RT	3.26	0.17	0.92	0.05	0.89	0.25	0.35	0.87	
	CMORPH	1.73	0.05	0.50	0.01	0.95	-0.02	0.09	0.38	
	GSMaP	17.05	0.02	2.53	0.03	0.93	0.11	0.23	2.45	
	HYDRO	4.51	0.28	1.02	0.17	0.71	0.38	0.44	0.97	

中国东部区域,第 I 类产品 3B40RT 的 RMSE、MAE 小于其他三类产品。区域平均降水量为 $0.11\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,小于其他三类产品,比基准降水小 $0.71\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,表明第 I 类产品对中国东部区域冬季降水的反演精度较差。第 III 类产品中 3B42RT 和 CMORPH 的相关系数最高,且大于其他产品,3B42RT 的区域平均降水量比基准降水量小 $0.07\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。GSMaP 的区域平均降水量比基准降水量大 $0.14\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,为唯一偏大的产品。四类产

品的 r 仍然在 0.5 以下,对基准降水量的解释能力不强,但好于中国区域的量值。分类评分指标方面,四类产品 ETS 评分均不高,在 $0.04\sim 0.08$ 。HKS 评分在 $0.05\sim 0.12$ 。POD 评分在 $0.07\sim 0.17$ 。FAR 评分中 HYDRO 较好,量值为 0.58,其余产品均在 0.6 以上。

中国西部区域,第 I 类产品 3B40RT 的 RMSE、MAE、BIAS 小于其他三类产品。区域平均降水量为 $0.13\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,最接近基准降水量。第 III 类产

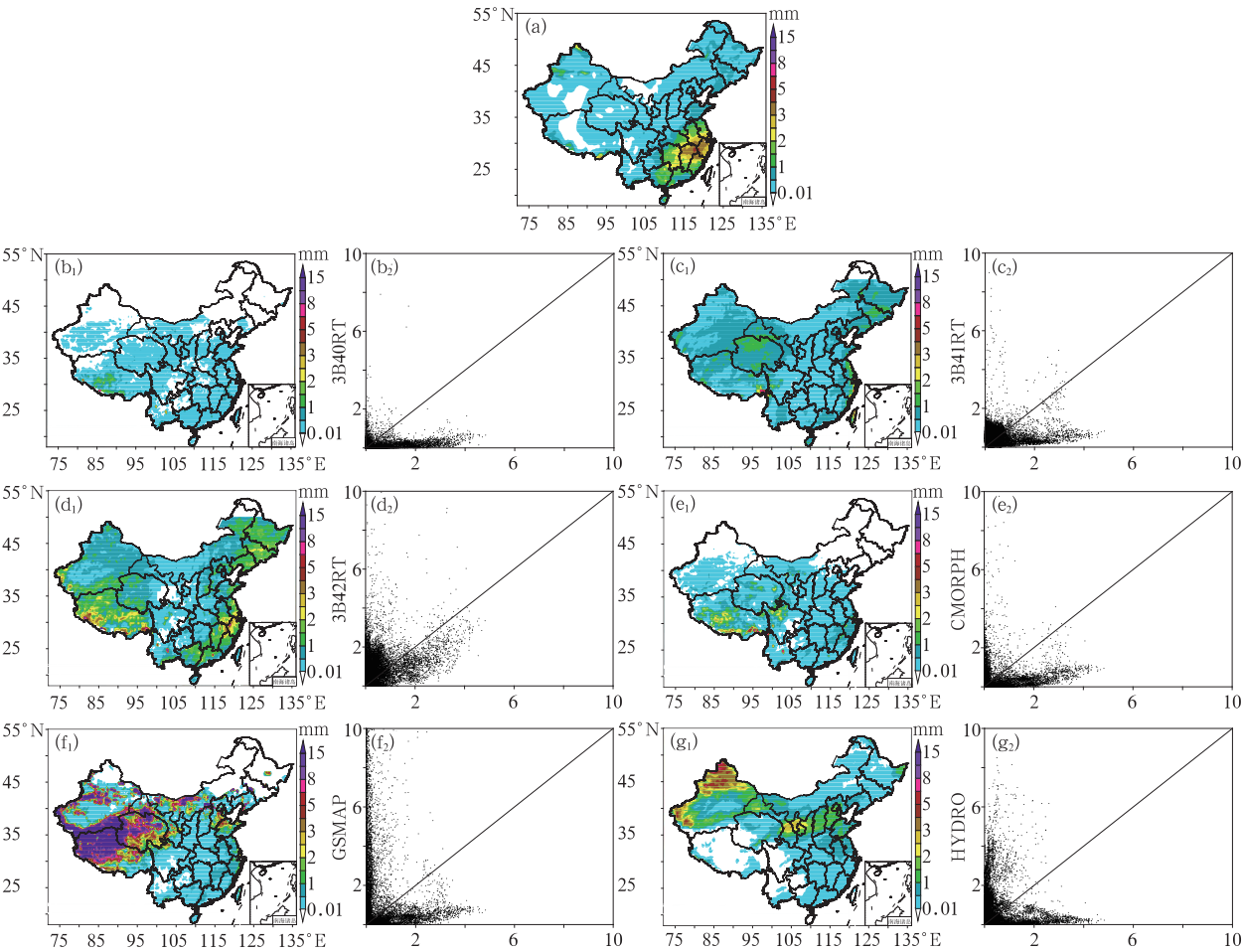


图 2 冬季逐日平均的降水(b₁, c₁, d₁, e₁, f₁, g₁)和散点(b₂, c₂, d₂, e₂, f₂, g₂)分布
(a)基准降水,(b₁,b₂) 3B40RT,(c₁, c₂) 3B41RT,(d₁, d₂) 3B42RT,(e₁, e₂)
CMORPH,(f₁, f₂) GSMaP,(g₁, g₂) HYDRO

Fig. 2 Spatial distribution and scatter of daily average precipitation in winter 2012 over China
(a) Gauge,(b₁,b₂) 3B40RT,(c₁, c₂) 3B41RT,(d₁, d₂) 3B42RT,(e₁, e₂)
CMORPH,(f₁, f₂) GSMaP,(g₁, g₂) HYDRO

品中 GSMaP 的反演精度差异较大。第 IV 类产品 HYDRO 的相关系数大于其他产品。分类评分指标方面,四类产品 ETS 评分在 0.01~0.17。HKS 评分在 -0.02~0.38。POD 评分在 0.04~0.44。FAR 评分在 0.71~0.95,其中 HYDRO 的各项评分指标好于其他几类产品。

3 夏季降水场分析与讨论

从夏季逐日平均的降水分布图和散点图上(图 3)可知,6 种卫星降水产品对中国区域降水分布刻画准确性较高,反演降水落区优于冬季,能将中国区域内如东南部沿海、四川地区、华北、东北的雨区

进行较好的再现,但每种产品的降水量级与落区范围的估计有所区别。

第 I 类产品 3B40RT 和第 III 类产品中 CMORPH 最大降水中心的量级较其他产品小。第 II 类产品 3B41RT 在西部山地、高原等地区存在高估。第 III 类产品中 3B42RT 降水区中心量级偏大,在西部山地、高原等地区高估较大。整体而言,卫星反演降水产品在中国东部平原、地势低洼等地区的分布形态优于西部地区。散点图上,第 III 类产品中 3B42RT 对小于 10 mm 的降水存在高估,3B40RT、3B41RT、CMORPH、GSMaP 则相反。第 IV 类产品 HYDRO 对 10~20 mm 的降水高估的格点多于低估。

对夏季平均的评估指标进行分析(表 4),可以发现,不同区域,第 III 类产品中 CMORPH 的 r 、 $RMSE$ 、 MAE 指标均优于其他产品。中国区域,第 II 类产品 3B41RT 的区域平均降水量最接近基准降水量,其量值为 $3.55 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,与基准降水量值相差 $0.03 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。3B42RT 的区域平均降水量为 $5.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,比基准降水量高 $1.57 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。除第 II 类产品的 r 在 0.5 以下,其余几类均在 0.5 以上,且夏季所有产品的相关系数显著高于冬季。分类评分指标方面,四类产品 ETS 评分在 0.26~0.38, HKS 评分在 0.42~0.55。第 III 类产品中 GSMaP 的 ETS 、 HKS 评分为最高,3B42RT 的 POD 评分最高,其值为 0.72。HYDRO 的 FAR 评分最优,为 0.28,其余产品均在 0.3 以上。

中国东部区域,第 III 类产品中 GSMaP 的精度仅次于 CMORPH。第 II 类产品 3B41RT 的区域平

均降水量为 $3.94 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最接近基准降水量,比基准降水少 $0.65 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。分类评分指标方面,四类产品 ETS 评分在 0.27~0.43。 HKS 评分在 0.42~0.60, POD 评分在 0.60~0.75, FAR 评分在 0.25~0.33。第 III 类产品中 CMORPH 的 ETS 、 HKS 和 FAR 的评分为所有产品中最优, GSMaP 的 POD 评分最优。

中国西部区域, GSMaP 的区域平均降水量为 $2.37 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最接近基准降水。四类产品的 r 在 0.41~0.57,低于中国区域及东部区域的相关系数。分类评分指标方面,四类产品 ETS 评分在 0.26~0.38, HKS 评分在 0.42~0.56, POD 评分在 0.48~0.80, FAR 评分在 0.28~0.42,第 IV 类产品 HYDRO 的 FAR 评分最优, GSMaP 的 ETS 和 HKS 评分最高,3B42RT 的 POD 评分最优。

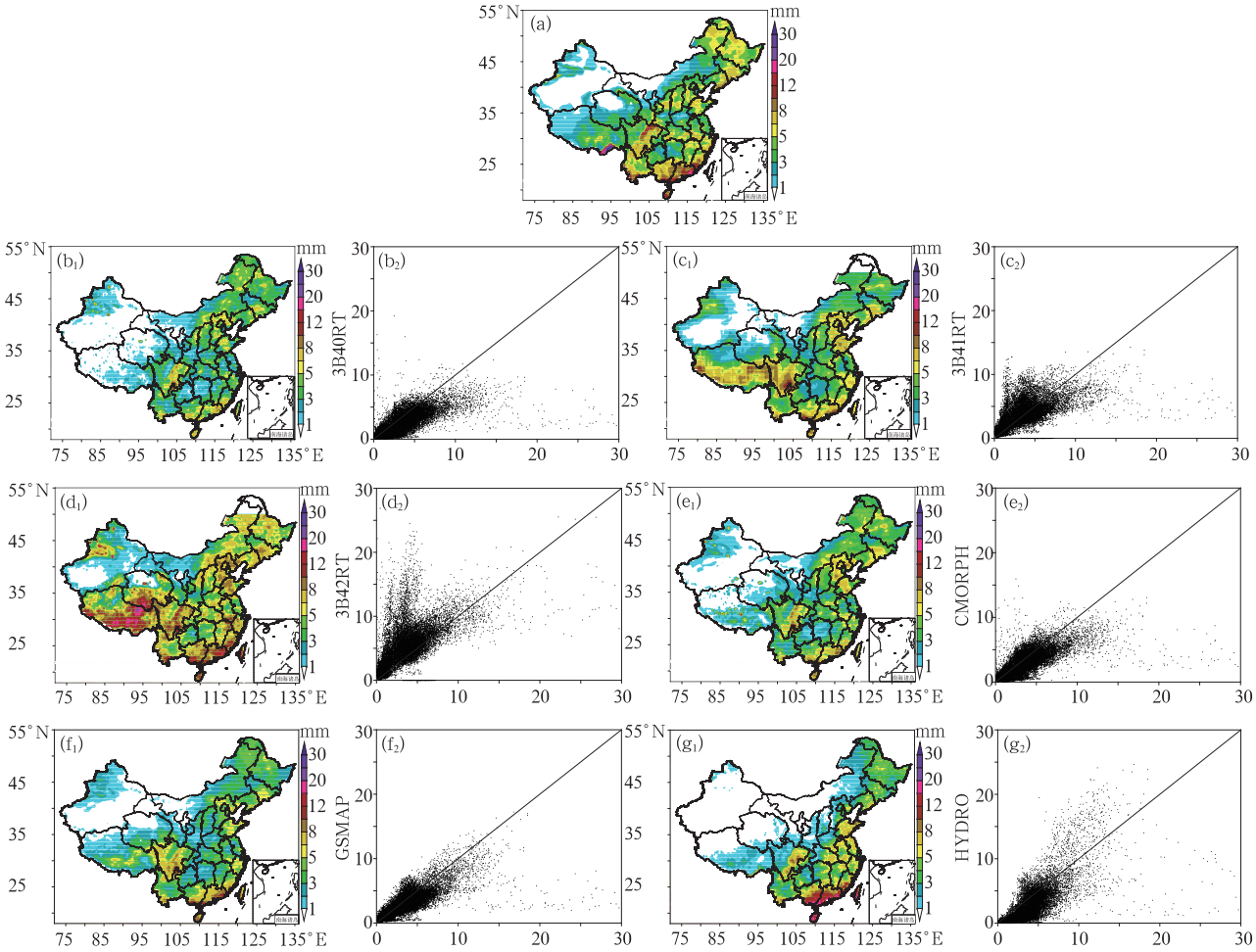


图 3 同图 2,但为夏季
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for summer

表 4 卫星反演降水评估结果(夏季平均)

Table 4 Validation of satellite-derived rainfall estimates (summer mean)

区域	名称	RMSE /mm·d ⁻¹	<i>r</i>	MAE	ETS	FAR	HKS	POD	卫星降水 /mm·d ⁻¹	基准降水 /mm·d ⁻¹
中国区域	3B40RT	8.31	0.54	3.15	0.31	0.32	0.46	0.59	2.49	3.58
	3B41RT	10.12	0.45	4.13	0.26	0.39	0.42	0.61	3.55	
	3B42RT	11.22	0.52	4.52	0.32	0.38	0.51	0.72	5.15	
	CMORPH	7.84	0.60	3.00	0.35	0.32	0.52	0.68	2.80	
	GSMaP	7.96	0.57	3.03	0.38	0.31	0.55	0.71	2.90	
	HYDRO	8.65	0.51	3.26	0.30	0.28	0.42	0.53	2.46	
中国东部区域	3B40RT	9.14	0.59	3.77	0.39	0.25	0.55	0.69	3.48	4.59
	3B41RT	10.83	0.50	4.70	0.27	0.33	0.42	0.60	3.94	
	3B42RT	10.47	0.62	4.47	0.37	0.30	0.55	0.72	5.37	
	CMORPH	8.52	0.66	3.55	0.43	0.25	0.60	0.74	3.84	
	GSMaP	8.61	0.64	3.56	0.42	0.26	0.60	0.75	3.71	
	HYDRO	9.73	0.54	4.13	0.31	0.27	0.45	0.59	3.60	
中国西部区域	3B40RT	5.59	0.46	2.44	0.27	0.35	0.42	0.55	1.63	2.71
	3B41RT	7.79	0.41	3.72	0.26	0.42	0.43	0.68	3.50	
	3B42RT	10.55	0.51	4.52	0.33	0.41	0.54	0.80	5.41	
	CMORPH	5.06	0.57	2.22	0.36	0.33	0.54	0.70	1.91	
	GSMaP	5.41	0.55	2.36	0.38	0.34	0.56	0.74	2.37	
	HYDRO	5.68	0.45	2.39	0.28	0.28	0.39	0.48	1.32	

4 评估指标年循环变化分析

从 2012—2013 年逐月相关系数变化时间序列(图 4a₁~4a₃)可见,四类产品在中国区域和西部区域全年相关系数的变化范围均在−0.01~0.7,中国东部区域在 0.05~0.8。冬季数值较小,春、夏、秋季数值较大,其中 5—10 月不同区域的相关系数平均值均超过 0.4,表明四类卫星反演降水产品在 5—

10 月对降水刻画精度较高。第 III 类产品中 CMORPH 在中国区域和东部区域 3—7 月的相关系数远大于其他产品,其中,中国区域和西部区域 7 月,东部区域 5 月的相关系数为全年最高,可达 0.66、0.62 和 0.71。GSMaP 在中国区域和东部区域 8 月,西部区域 5 月的量值超过 CMORPH,为全部产品最高,量值为 0.65、0.70 和 0.59。从 2012—2013 年逐月 RMSE 变化时间序列(图 4b₁~4b₃)可见,2012 年 12 月至 2013 年 4 月在中国区域和东部

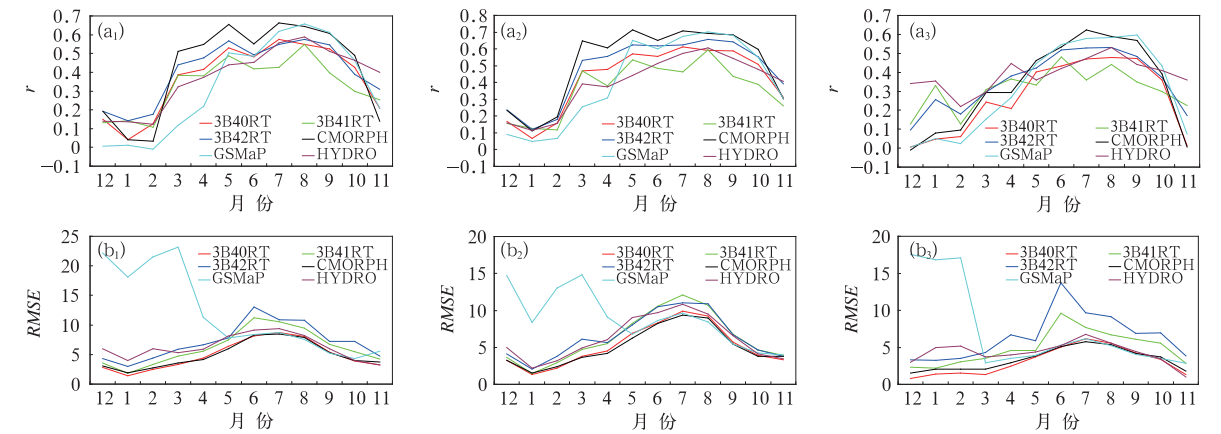


图 4 2012 年 12 月至 2013 年 11 月的相关系数(a)和 RMSE(b)评估指标时间序列

(a₁, b₁)中国区域,(a₂, b₂)中国东部区域,(a₃, b₃)中国西部区域

Fig. 4 Time series of *r* (a) and RMSE (b) validation index from December 2012 to November 2013 over China

(a₁, b₁) China, (a₂, b₂) Eastern China, (a₃, b₃) Western China

区域,2012年12月至2013年2月在西部区域,第III类产品中GSMaP的RMSE显著高于其他产品,表明在该时间段内与基准降水偏差较大。不同区域5—10月,第I类产品3B40RT和第III类产品中CMORPH和GSMaP的RMSE较小,表明此类产品在该时间段内与基准降水偏差较小,精度较高。

综合以上分析,6种卫星反演降水产品在雨季和干季与基准降水的 r 、RMSE明显不同,且差异较大。在年内的基本分布规律为汛期显著高于非汛期。

5 结 论

本文利用TRMM(3B40RT、3B41RT、3B42RT)、CMORPH、GSMaP、HYDRO共6种 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 卫星反演降水数据,在中国区域,东部区域和西部区域3种空间尺度上,综合分析了2012—2013年6种卫星降水产品的精度特征,阐明了精度指标的时间变化规律,得出如下结论:

(1) 在冬季,6种卫星降水产品对中国区域的降水分布刻画有所区别,降水估计误差大量存在。6种产品反演降水的精度在东部区域好于西部区域。

(2) 在夏季,6种卫星降水产品对中国区域降水的反演准确性较高,均能将中国区域内如东南部沿海、四川地区、华北、东北雨区的分布进行较好的再现,但降水量级与落区范围的估计有所区别。6种产品反演降水精度在东部区域均好于西部区域。

(3) 6种卫星降水产品在春、夏、秋季的精度高于冬季,在雨季和干季与基准降水的相关系数、均方根误差明显不同。卫星降水产品在冬季容易漏估日降水事件,这是导致低估降水量的重要原因(胡庆芳等,2013)。出现高估的原因可能与制作降水产品时使用的反演算法和对固态降水反演不准有关。

(4) 6种卫星降水产品精度的空间分布与地形有一定的关系,中国区域的总体特征为中国西部高原、山地及山前地带反演精度较低,而中国东部区域的平原、河谷等地势较低的地区精度较高(胡庆芳等,2013)。

本文所做的研究作为中国加入国际降水工作组(IPWG),进行卫星反演降水产品在世界不同区域验证精度工作的一部分。目前,国家气象信息中

心正承担建设一套完整的用于评估卫星降水产品的业务系统,展示世界上已有的卫星降水产品在中国的质量情况。

参考文献

- 白爱娟,方建刚,张科翔. 2008. TRMM 卫星资料对陕西及周边地区夏季降水的探测. 灾害学, 23(2): 41-45.
- 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. 2013. 赣江流域高分辨率卫星降水数据的精度特征与时空变化规律. 中国科学:技术科学, 43(4): 447-459.
- 黄伟,余晖,梁旭东. 2009. GRAPES-TCM 对登陆热带气旋降水的预报及其性能评估. 气象学报, 67(5): 892-901.
- 李相虎,张奇,李云良. 2013. 基于卫星降水的鄱阳湖流域旱涝分析及其可靠性检验. 长江流域资源与环境, 22(9): 1188-1194.
- 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等. 2010. 多卫星遥感降水数据精度评价. 水科学进展, 21(3): 343-348.
- 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 2011. 卫星遥感反演降水研究综述. 地球科学进展, 26(11): 1162-1172.
- 骆三,苗峻峰,牛涛,等. 2011. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析. 气象, 37(9): 1081-1090.
- 吕洋,杨胜天,蔡明勇,等. 2013. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析. 自然资源学报, 28(8): 1414-1425.
- 穆振侠,姜卉芳. 2010. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水研究. 干旱区资源与环境, 24(7): 115-119.
- 潘畅,沈艳,宇婧婧,等. 2013. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. 气象学报, 70(6): 1381-1389.
- 潘畅,宇婧婧,廖捷,等. 2011. 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, 37(5): 564-570.
- 沈艳,冯明农,张洪政,等. 2010. 我国逐日降水量格点化方法. 应用气象学报, 21(3): 279-286.
- 沈艳,潘畅,徐宾,等. 2012. 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, 27(2): 219-224.
- 沈艳,潘畅,宇婧婧,等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估. 大气科学学报, 36(1): 37-46.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比两次突发性局地强降水. 气象, 38(3): 281-290.
- 吴庆梅. 2003. 利用 TRMM 卫星资料研究我国的降水的微波特征. 应用气象学报, 14(2): 206-214.
- 吴雪娇,杨梅学,吴洪波,等. 2013. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用. 冰川冻土, 35(2): 310-319.
- 杨扬,张建云,戚建国,等. 2000. 雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望. 水科学进展, 11(1): 92-981.
- Arkin P A, Turk J, Ebert E. 2008. Pilot Evaluation of High Resolution Precipitation Products (PEHRPP): A contribution to GPM planning. <http://www.radar.aero.osakafu-u.ac.jp/~GSMaP/IPWG/PEHRPP.pdf>.
- Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. 2007. Comparison of near-real-

- time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bull Amer Meteor Soc*, 88:47-64.
- Feidas H. 2010. Validation of satellite rainfall products over Greece. *Theor Appl Clima*, 99:193-216.
- Huffman G J, Adler R F, Morrissey M M, et al. 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J Hydrometeor*, 2:36-50.
- Huffman G J, Adler R F, Stocker E F, et al. 2002. A TRMM-based system for real-time quasi-global merged precipitation estimates. *TRMM International Science Conference*, Honolulu, 22—26 July 2002.
- Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeor*, 8:38-55.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeor*, 5:487-503.
- Kendall M A, Stuart A. 1963. *The advanced theory of statistics*. Griffin education, 1730.
- Kidd C, Kniveton D R, Todd M C, et al. 2003. Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. *J Hydrometeor*, 4:1088-1104.
- Kubota T, Ushio T, Shige S, et al. 2009. Verification of high-resolution satellite-Based rainfall estimates around Japan using a gauge-calibrated ground-radar dataset. *J Meteor Soc Japan*, 87A:203-222.
- Kummerow C, Barnes W. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J Atmos Ocea Tech*, 15(3): 809-817.
- Laurent H, Jobard I, Toma A. 1998. Validation of satellite and ground-based estimates of precipitation over the Sahel. *Atmos Res*, 48:651-670.
- Makihara Y. 1996. A method for improving radar estimates of precipitation by comparing data from radars and raingauges. *J Meteor Soc Japan*, 74:459-480.
- McCollum J R, Krajewski W F, Ferraro R R, et al. 2002. Evaluation of biases of satellite rainfall estimation algorithms over the continental United States. *J Appl Meteor Clima*, 41:1065-1080.
- Murphy A H. 1995. The coefficients of correlation and determination as measures of performance in forecast verification. *Wea Forecasting*, 10:681-688.
- Okamoto K, Iguchi T, Takahashi N, et al. 2005. The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project // *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS Proceedings*, 2005 IEEE International, 3414-3416.
- Olson W S, Kummerow C D, H Eymfield G M, et al. 1996. A method for combined passive-active microwave retrievals of cloud and precipitation profiles. *J Appl Meteor Clima*, 35:1763-1789.
- Rakhmat P, Abd. Rahman A, Takahiro O. 2013. Validation of TRMM Precipitation Radar satellite data over Indonesian region. *Theor Appl Clima*, 112:575-587.
- Romilly T, Gebremichael M. 2011. Evaluation of satellite rainfall estimates over Ethiopian river basins. *Hydrol Earth Sys Sci*, 15:1505-1514.
- Sapiano M, Arkin P A. 2009. An intercomparison and validation of high-resolution satellite precipitation estimates with 3-hourly gauge data. *J Hydrometeor*, 10(1):149-166.
- Scofield R A, Kuligowski R J. 2003. Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme precipitation events. *Wea Forecasting*, 18:1037-1051.
- Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China. *J Geophys Res: Atmospheres*, 115(D2). doi: 10.1029/2009JD012097.
- Tian Yudong, Christa D, Lidard P, et al. 2010. Evaluation of GSMaP precipitation estimates over the contiguous United States. *J Hydrometeor*, 11:566-574.
- Turk J, Arkin P, Ebert, Sapiano M. 2008. Evaluating high resolution precipitation products. *Bull Amer Meteor Soc*, 89:1911-1916.
- Ushio T, Sasashige K, Kubata T, et al. 2009. A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation(GSMaP) from combined passive microwave and infrared radio metric data. *J Meteor Soc Japan*, 87A:137-151.
- Vicente G, Scofield R A, Menzel W P. 1998. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bull Amer Meteor Soc*, 79:1883-1898.
- Weymouth G, Mills G A, Jones D, et al. 1999. A continental-scale daily rainfall analysis system. *Australian Meteor Magazine*, 48: 169-179.
- Woodcock F. 1976. The evaluation of yes/no forecasts for scientific and administrative purposes. *Mon Wea Rev*, 104:1209-1214.