

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.001

CMORPH 融合降水产品与地面观测雨量资料估算 淮河流域面雨量对比分析

王 皓¹, 罗 静¹, 叶金印^{1,2}, 李致家²

(1. 淮河流域气象中心, 安徽 蚌埠 233040; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于 CMORPH 融合降水产品与地面观测雨量资料, 分别采用网格算术平均法与泰森多边形法估算淮河流域 15 个子单元 2008—2011 年汛期(6—9 月)逐日面雨量, 并对 2 种面雨量估算结果进行对比统计分析。结果表明: 15 个子单元 2 种面雨量估算结果具有系统性差异, 两者之间存在显著线性关系; 逐日面雨量估算结果也存在系统性差异, 利用地面观测雨量资料估算的面雨量普遍大于利用 CMORPH 融合降水产品的估算结果; 2 种面雨量估算结果在降水量级上有很好的对应关系, 各降水量级完全对应的总体比例为 78.8%, 相差 1 个量级的比例为 20.5%, 其中小雨量级完全对应的比例高达 91.4%。

关键词: CMORPH 融合降水产品; 面雨量估算; 网格算术平均法; 泰森多边形法

中图分类号: TV125; P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)03-0189-06

Comparative analysis of area rainfall in Huaihe River Basin estimated by CMORPH-Gauge merged data and observed rain gauge data

WANG Hao¹, LUO Jing¹, YE Jinyin^{1,2}, LI Zhijia²

(1. Huaihe River Basin Meteorological Center, Bengbu 233040, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the CMORPH-Gauge merged data and observed rain gauge data, the daily area rainfall of 15 sub-catchments in the Huaihe River Basin was calculated during flood seasons (June to September) from 2008 to 2011, using the Thiessen polygon method and the grid arithmetic average method. Comparative statistical analysis was conducted on the results of the two methods. The results show that the two sets of area rainfall of the 15 sub-catchments exhibited systematic differences and a significant linear correlation. The daily area rainfall also showed systematic difference. The area rainfall based on rain gauge data was generally greater than that based on the CMORPH-Gauge merged data. There was a strong correspondence for the magnitude between the two sets of area rainfall. The overall correspondence ratio was 78.8%, with the ratio of rainfall values that differed by an order of magnitude being 20.5%. The correspondence ratio for the light-rainfall magnitude reached 91.4%.

Key words: CMORPH-Gauge merged data; area rainfall estimation; grid arithmetic average method; Thiessen polygon method

流域面平均降雨量(面雨量)是洪水预报和防汛抗洪决策的重要依据^[1-3]。面雨量的估算直接关系到洪水预报精度和洪水调度决策的科学性。传统的面雨量估算方法是基于常规降水观测资料进行估算的, 主要包括适用于高空间分辨率降水数据的算术平均法和网格算术平均法、适用于空间分辨率不高且分布不规则降水资料的泰森多边形法^[4]。传统的面雨量估算方法除算法本身的局限性之外, 其误差主要来源于采样误

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(41101017); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006037); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201205)

作者简介: 王皓(1987—), 男, 安徽滁州人, 助理工程师, 主要从事 GIS 技术应用研究。E-mail: dibazhang@qq.com

通信作者: 叶金印, 高级工程师。E-mail: yejinyin@sina.com

差;观测网密度低或测站布局不合理导致观测数据空间代表性差,不能反映降水空间分布的不均匀性,因而传统的面雨量估算方法不能单纯地通过优化面雨量计算方法提高估算精度^[5]。

雷达、卫星可估算出高时空分辨率的降水场,且具有无缝隙、全天候、高时空分辨率的独特优势,能为无资料或缺资料流域的洪水预报和水文过程模拟提供有力的降水依据,这是传统的雨量计观测无法比拟的^[6-9]。国内外相关的科研机构开发了多种较高分辨率的卫星反演降水估测产品^[10-12],主要有 GPCP(global precipitation climatology project)数据集、CMAP(center merged analysis of precipitation)数据集、TRMM(tropical rainfall measuring mission satellite)3B42 产品、CMORPH(CPC MORPHing technique)产品等^[13-15]。卫星降水产品具有准确反映降水空间分布的独特优势,但其本质是间接观测手段,必须用地面资料修正来提高产品质量。将地面观测降水量与卫星降水产品融合逐渐成为国际社会研制高质量降水产品的主流趋势^[16-20]。

CMORPH 产品是由美国环境预测中心(NCEP)下属的气候预测中心开发的全球降水产品^[16]。该产品采用“运动矢量”方法,将各种微波反演降水资料充分融合,并能灵活地加入新增资料。美国学者在美国区域检验了 CMORPH 和 TRMM 产品的精度,表明 CMORPH 产品具有最高的空间相关性和较小的误差分布^[17]。Shen 等^[13]对比了中国地区的 6 种高分辨率卫星资料,证实 CMORPH 产品的相关性好于其他产品。潘旻等^[20]以 CMORPH 卫星反演降水为背景场,以基于自动气象站观测数据的中国降水格点分析(Chinese precipitation analyses,CPA)产品作为地面观测场,采用最优插值方法对二者进行融合试验,结果表明与单纯的卫星反演降水相比,融合产品在降水量值和空间分布上均与地面资料更为接近,各项指标也优于同类融合产品。国家气象信息中心基于质量控制后的全国自动气象站小时降水观测数据^[21],用概率密度匹配法对 CMORPH 卫星降水产品误差进行订正,利用最优插值方法生成了地面和卫星资料融合的 1 h、0.1°×0.1°分辨率的降水融合产品(简称 CMORPH 融合降水产品)^[20]。该融合降水产品有效发挥了地面观测和卫星反演降水各自的优势,在量值和空间分布上更合理;融合产品平均偏差和均方根误差均减小,随时间的变化幅度较小且区域性分布特征减弱^[22]。相关数据产品已通过“中国气象科学数据共享服务网”实时对外服务。

笔者将高时空分辨率的 CMORPH 融合降水产品应用于淮河流域 15 个子单元的面雨量估算,并与基于地面观测雨量资料的面雨量估算结果进行对比统计分析,以评估 CMORPH 融合降水产品在淮河流域面雨量估算中的应用能力。

1 研究资料与方法

1.1 淮河流域子单元划分

淮河流域地处东经 111°55′~121°25′、北纬 30°55′~36°36′,跨河南省、安徽省、江苏省、山东省,流域面积 27 万 km²。淮河可分为上游、中游、下游 3 段,上游为山区,地面落差大;中下游以平原为主,地面落差较小。流域处于南北气候过渡带,降水多集中在每年的 6—9 月,且年际变化大,地区分布不均匀。受特殊的地理位置和复杂的气候条件影响,淮河流域水旱灾害发生频繁。根据淮河流域暴雨洪水的汇流特点,结合流域防汛抗旱服务需求,将淮河流域划分为 15 个子单元(图 1),各子单元包含区域见表 1。

1.2 资料

CMORPH 融合降水产品资料来源于国家气象信息中心,时空分辨率分别为 1 h、0.1°×0.1°。地面观测雨量资料采用淮河流域 172 个地面气象站降水观测整编资料。

1.3 面雨量计算

对于 CMORPH 融合降水产品,由于空间分辨率高,采用网格算术平均法估算流域面雨量;对于地面观测雨量资料,由于空间分布相对稀疏且不规则,采用泰森多边形法估算流域面雨量^[5]。

1.3.1 网格算术平均法

网格算术平均法的基本思路是将有一定密度的 1 个固定网格覆盖在流域面上,通过计算网格点上的雨量,计算流域面上的降雨量。在网格间距较小、流域面积较大的情况下,整个流域的面雨量可以用流域内各个网格点雨量的平均值来表示。

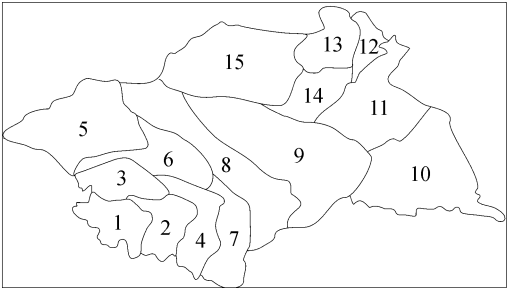


图 1 淮河流域 15 个子单元划分

Fig. 1 Fifteen sub-catchments in Huaihe River Basin

表 1 15 个子单元 2 种面雨量估算结果统计

Table 1 Statistical results of two sets of area rainfall in 15 sub-catchments

子单元编号	子单元包含区域	G 平均值/mm	C 平均值/mm	误差/mm	相对误差/%	相关系数
1	淮河上游大坡岭至息县	4.7	3.5	1.2	25.53	0.908
2	淮河上游息县到王家坝	4.4	3.1	1.3	29.55	0.928
3	汝河及洪河上游	3.7	3.2	0.5	13.51	0.957
4	史河流域	4.6	4.0	0.6	13.04	0.913
5	颍河上游、周口以上	4.1	3.4	0.7	17.07	0.969
6	颍河中游、周口至阜阳段	3.8	3.1	0.7	18.42	0.965
7	淝河及颍河下游、淮河干流	5.5	4.9	0.6	10.91	0.908
8	涡河及淮河中游淮河干流	4.2	3.5	0.7	16.67	0.974
9	蚌埠至洪泽湖	4.6	3.9	0.7	15.22	0.977
10	洪泽湖以下淮河下游	5.5	4.3	1.2	21.82	0.985
11	沂河和沭河下游	5.0	4.2	0.8	16.00	0.989
12	沭河上游	5.0	4.3	0.7	14.00	0.931
13	沂河上游	5.0	4.4	0.6	12.00	0.974
14	枣庄和徐州地区	4.8	4.1	0.7	14.58	0.982
15	南四湖地区	4.4	3.7	0.7	15.91	0.993

1.3.2 泰森多边形法

泰森多边形法的基本原理是将小流域内各相邻雨量站相连,绘制各连线的垂直平分线,将小流域分成若干个单元面积,每个单元面积内只包含 1 个测站。首先计算流域各站的时段降雨量,然后根据每个雨量站所占流域面积权重,采用加权法对流域各雨量站的时段降雨量进行叠加求和。流域平均降雨量的计算公式为

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i P_i$$
 (1)

式中: ω_i ——流域内各雨量站权重; P_i ——流域内各雨量站的时段降雨量,mm; n ——流域内雨量站个数。

2 面雨量估算结果分析

利用 2008—2011 年 6—9 月 CMORPH 融合降水产品和淮河流域逐日降水观测资料分别进行淮河流域 15 个子单元的面雨量估算,进而对 2 种面雨量估算结果进行对比分析。

2.1 2 种面雨量估算结果的整体差异

CMORPH 融合降水产品的面雨量估算结果用 C 表示,基于地面观测雨量资料的面雨量估算结果用 G 表示。以 G 作为“真值”,分别计算 15 个子单元的 C 、 G 平均值、误差、相对误差和相关系数(表 1)。2 种面雨量估算结果存在系统性差异, C 值在 15 个子单元整体表现为低估,雨日面雨量平均值最大偏差在第 2 子单元(1.3 mm),最小偏差在第 3 子单元(0.5 mm),平均误差为 0.8 mm。相对误差最大值在第 2 子单元(29.55%),最小值在第 7 子单元(10.91%)。2 种面雨量估算结果存在很好的相关性,相关系数最低为 0.908,最高可达 0.993,均通过了 0.001 的显著性水平检验。

为进一步研究 2 种面雨量估算结果之间的线性相关问题,以 C 为自变量(x), G 为因变量(y),对 C 和 G 这 2 组样本做 15 个子单元的整体回归分析(图 2)。2 种面雨量估算结果存在显著的线性关系,样本基本集中在回归线附近,特别是面雨量较小的区域最为集中,仅在大值区,样本分布相对离散,这可能与大值样本个数较少有关。总体来说, C 较 G 略低估,斜率为 1.164。

2.2 2 种面雨量估算结果的量级差异

根据我国江河面雨量等级划分标准^[23],对 C 和 G 分小雨[0.1 mm,6 mm)、中雨[6 mm,15 mm)、大雨[15 mm,30 mm)、暴雨[30 mm,60 mm)、大暴雨[60 mm,150 mm) 5 个量级进行统计分析。小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨情况下 C 与 G 的平均误差分别为 0.86 mm、2.89 mm、5.33 mm、9.86 mm、18.65 mm,平均相对误差分别为

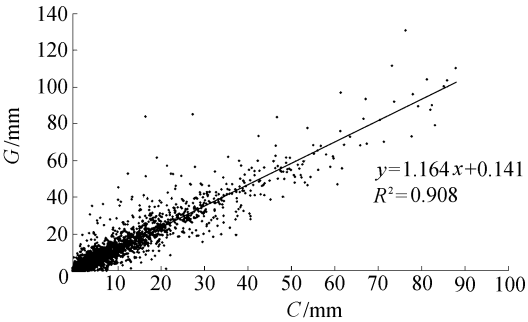


图 2 2 种面雨量估算结果的线性拟合

Fig. 2 Linear fitting for two sets of area rainfall

87.8%、30.5%、24.9%、24.3%、22.6%。2种面雨量结果的平均误差随着降水量级的增大而增大,而平均相对误差则相反,除小雨量级外,其余量级均在20%~30%,且随着量级的增大而减小。这与潘旸等^[20]得出的“观测误差近似与降水强度成正比,初估场误差随降水强度增大近似成幂指数增加”结论相类似。

表2给出2种面雨量估算结果按照不同降雨量级日数分布的统计结果。由表2可知,2种面雨量估算结果在量级上对应较好,剔除无降水日,所有降水量级估算相同的比例为78.75%,低估的比例为17.40%,高估的比例为3.85%,*C*相对于*G*存在一定的低估现象,这与2.1节的分析结果一致。相差1个量级的比例为20.51%,相差2个量级的比例为0.69%,相差3个量级的比例为0.05%。在各量级对应比例上,最高为小雨量级(91.4%),最低为暴雨量级(53.0%),次低为大暴雨量级(56.1%);除小雨量级外,其余量级的对应率都在50%~60%之间。

2.3 一次强降水过程逐日面雨量的对比分析

2010年7月15—20日,受高空槽和中低层低涡切变线共同影响,淮河流域出现了持续性大范围强降水天气。对15个子单元2种逐日面雨量估算结果做回归分析得出,2种估算结果存在显著的线性相关性(图3),相关系数为0.954,回归方程的斜率为1.139,*C*比*G*整体上有一定程度的低估。

表3给出本次强降水过程2种逐日面雨量的估算结果及相对误差,平均相对误差为31.3%(小雨52.6%,中雨25.2%,大雨21.5%,暴雨19.6%,大暴雨21.2%);*C*比*G*低估的样本占有所有样本的56.7%。分析结果与2.1节的统计分析结果相符合。

2种面雨量估算结果总体上比较一致,但也出现了5个相对误差异常偏高的样本,其中4个样本是*C*大于*G*的情况,且除1个样本是中到大雨的量级外,其余都发生在此次强降雨过程的弱降雨区域和时段。从面雨量绝对值看,2种估算结果没有产生大的偏差,但从相对误差计算方法分析,由于弱降水量级数值较小,微小的偏差也可能造成较大的相对误差。

表3 一次强降水过程15个子单元的逐日面雨量计算结果

Table 3 Daily area rainfall in 15 sub-catchments during a heavy rainfall process																		
子单元	7月15日			7月16日			7月17日			7月18日			7月19日			7月20日		
	G/ mm	C/ mm	相对 误差/ %	G/ mm	C/ mm	相对 误差/ %	G/ mm	C/ mm	相对 误差/ %	G/ mm	C/ mm	相对 误差/ %	G/ mm	C/ mm	相对 误差/ %	G/ mm	C/ mm	相对 误差/ %
1	12.8	9.4	26.6	28.8	27.8	3.5	92.2	73.8	20.0	25.3	30.8	21.7	11.4	14.9	30.7	12.5	15.5	24.0
2	5.9	4.6	22.0	39.2	32.4	17.4	16.7	16.0	4.2	25.4	16.8	33.9	13.1	9.4	28.2	54.3	41.7	23.2
3	0.5	0.8	60.0	28.0	37.4	33.6	19.0	28.5	50.0	25.5	20.8	18.4	23.6	15.8	33.1	2.4	1.1	54.2
4	0.7	1.0	42.9	62.1	35.7	42.5	2.9	4.7	62.1	8.5	10.6	24.7	3.2	8.8	175.0	28.9	32.3	11.8
5	8.3	7.9	4.8	4.6	4.5	2.2	44.1	35.9	18.6	2.1	2.9	38.1	69.2	67.5	2.5	0	0.2	
6	0.8	0.5	37.5	5.0	6.1	22.0	18.2	17.6	3.3	30.3	26.6	12.2	27.5	18.5	32.7	6.2	5.6	9.7
7	0	0.6		32.1	37.5	16.8	1.8	2.7	50.0	6.6	8.1	22.7	12.6	7.3	42.1	8.7	16.7	92.0
8	0.7	0.4	42.9	0.9	4.2	366.7	30.4	22.3	26.6	8.5	8.7	2.4	18.8	17.1	9.0	6.5	5.2	20.0
9	0.1	0.1	0.0	0.9	0.8	11.1	20.5	17.5	14.6	5.5	6.5	18.2	14.3	13.0	9.1	5.7	6.9	21.1
10	0.3	0.2	33.3	7.9	9.4	19.0	7.7	8.9	15.6	4.6	2.9	37.0	0.2	0.3	50.0	13.5	9.6	28.9
11	0	0		0.2	0.1	50.0	24.6	16.1	34.6	7.7	7.0	9.1	1.9	1.8	5.3	22.2	21.7	2.3
12	0	0		0	0		13.8	10.9	21.0	19.4	37.5	93.3	13.7	16.5	20.4	59.9	38.2	36.2
13	10.3	1.9	81.6	0	0		29.3	26.4	9.9	82.8	66.4	19.8	20.4	23.1	13.2	6.8	6.0	11.8
14	0	0		0	0		21.6	20.3	6.0	11.7	13.3	13.7	22.8	22.1	3.1	14.8	11.6	21.6
15	0	0.1		0	0		39.1	34.0	13.0	29.8	24.1	19.1	41.9	36.6	12.7	1.2	1.1	8.3

Table 2 Distributions of two sets of area rainfall of different magnitudes					
CMORPH 融合 降水产品	地面观测雨量资料				
	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
无雨	108	0	0	0	0
小雨	2 117	275	12	2	0
中雨	88	459	138	9	0
大雨	2	33	260	97	3
暴雨	0	0	21	124	15
大暴雨	0	0	0	2	23

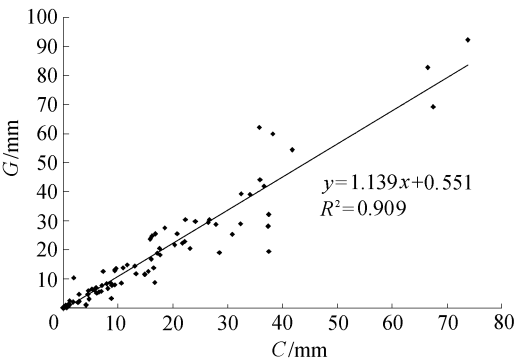


图3 一次强降水过程2种面雨量计算结果整体样本的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting for two sets of area rainfall during a heavy rainfall process

3 结 语

基于 CMORPH 融合降水产品,采用网格算术平均法估算淮河流域 15 个子单元 2008—2011 年汛期(6—9 月)逐日面雨量,并与地面观测雨量资料估算的面雨量结果进行对比统计分析。得出如下结论:

- a. 15 个子单元 2 种面雨量估算结果有系统性差异,利用 CMORPH 融合降水产品估算的面雨量普遍小于利用地面降水观测资料的估算结果;2 种面雨量估算结果之间存在显著的线性相关,线性拟合效果较好。
- b. 15 个子单元 2 种面雨量估算结果在降水量级上有很好的对应关系,各降水量级完全对应的总体比例为 78.75%,相差 1 个量级的比例为 20.51%。小雨量级完全对应的比例达 91.4%。
- c. 一次强降水过程的面雨量估算结果的对比分析结论与整体分析的结论一致,也存在同样的系统性差异,且具有很好的相关性。

CMORPH 融合降水产品因其具有较高的时空分辨率,具有很好的应用前景,尤其是在地面雨量观测站分布比较稀疏的地区,为面雨量估算提供了一种新的途径。笔者对 CMORPH 融合降水产品与地面降水观测资料估算淮河流域 15 个子单元面雨量的差异进行了初步分析,由于资料的时间序列不长,在利用 CMORPH 融合降水产品估算面雨量方面得到的还是一些初步结论,对于 2 种估算结果差异的原因以及如何更好地利用 CMORPH 融合降水产品还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 徐晶,林建,姚学祥,等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用[J]. 气象,2001,27(11):13-16. (XU Jing, LIN Jian, YAO Xuexiang, et al. Calculating method of area rainfall over seven river valleys and its application[J]. Meteorological Monthly, 2001,27(11):13-16. (in Chinese))

[2] 林开平,孙涌智,陈冰廉,等. 广西主要江河流域的面雨量合成分析与洪涝关系[J]. 热带地理,2003,23(3):222-226. (LIN Kaiping, SUN Yongzhi, CHENG Binglian, et al. Synthetic analysis of area rainfall in the main river basins in Guangxi[J]. Tropical Geography, 2003,23(3):222-226. (in Chinese))

[3] 李武阶,王仁乔,郑启松. 几种面雨量的计算方法在气象和水文上的应用比较[J]. 暴雨·灾害,2000,4(1):62-67. (LI Wujie, WANG Renqiao, ZHENG Qisong. Comparison between the computational modes of area rainfall in meteorology and the ones in hydrology[J]. Torrential Rain·Disaster, 2000,4(1):62-67. (in Chinese))

[4] 方慈安,潘志祥,叶成志,等. 几种面雨量计算方法的比较[J]. 气象,2003,29(7):23-26. (FANG Ci'an, PAN Zhixiang, YE Chengzhi, et al. Comparison of calculation of methods river valley area rainfall[J]. Meteorological Monthly, 2003,29(7):23-26. (in Chinese))

[5] 徐晶,姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象,2007,33(7):15-21. (XU Jing, YAO Xuexiang. Watershed areal precipitation estimation technology: a review[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(7): 15-21. (in Chinese))

[6] 李致家,刘金涛,葛文忠,等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(6):601-606. (LI Zhijia, LIU Jintao, GE Wenzhong, et al. Coupling of weather radar rainfall data with hydrological model and its application to flood forecasting[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2004, 32(6):601-606. (in Chinese))

[7] 刘金涛,李致家. 基于雷达测雨的实时洪水预报模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(5):488-491. (LIU Jintao, LI Zhijia. Weather radar rainfall data-based flood forecasting model[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2004, 32(5):488-491. (in Chinese))

[8] JIANG Shanhu,REN Liliang,YONG Bin,et al. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe Basin in northern China[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(4): 405-417.

[9] SAPIANO M R P,ARKIN P A. An intercomparison and validation of high-resolution satellite precipitation estimates with 3-hourly gauge data[J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(1): 149-166.

[10] ARKIN P A, XIE P P. The global precipitation climatology project: first algorithm intercomparison project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1994, 75(3): 401-419.

[11] HUFFMAN G J, ADLER R F, BOLUIN A D, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38-55.

[12] XIE P P. ARKIN P. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(11): 2539-2558.

- [13] SHEN Y, XIONG A, WANG Y, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D02114.
- [14] 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]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 487-503.
- [15] TIAN Y D, PETERS-LIDARD C D, CHOUDHURY B J, et al. Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(6): 1165-1183.
- [16] HSU K L, GAO X, SOROOSHIAN S, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(9): 1176-1190.
- [17] SOROOSHIAN S, HSU K L, GAO X, et al. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(9): 2035-2046.
- [18] 旷达, 沈艳, 牛铮, 等. 卫星反演降水产品误差随时空分辨率和雨强的变化特征分析[J]. *遥感信息*, 2012, 27(4): 75-81. (KUANG Da, SHEN Yan, NIU Zheng, et al. Analysis on uncertainty of satellite retrieved precipitation products at various temporal & spatial resolutions an rain rate level[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(4): 75-81. (in Chinese))
- [19] 潘旸, 宇婧婧, 廖婕, 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. (PAN Yang, YU Jingjing, LIAO Jie, et al. Assessment on the rainfall monitoring of typhoon Morakot by ground-gauged and satellite precipitation products[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(5): 564-570. (in Chinese))
- [20] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 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[J]. *气象学报*, 2012, 70(6): 1381-1389. (PAN Yang, SHENG Yan, YU Jingjing, et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(6): 1381-1389. (in Chinese))
- [21] 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. (REN Zhihua, ZHAO Ping, ZHANG Qiang, et al. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 123-132. (in Chinese))
- [22] 沈艳, 潘旸, 宇婧婧, 等. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. *大气科学学报*, 2013, 36(1): 37-46. (SHENG Yan, PAN Yang, YU Jingjing, et al. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, 36(1): 37-46. (in Chinese))
- [23] GB/T 20486—2006 江河流域面雨量等级[S].