

DOI: 10.13287/j.1001-9332.201609.035

多卫星降水产品在环渤海地区的精度评价

李瑞泽^{1,2} 姜德娟^{2*} 张 华² 张安定¹

(¹鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025; ²中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

摘 要 降水是全球能量和水循环中的重要变量之一,降水资料的精度对洪旱灾害的监测与预报、水资源管理等至关重要。本文利用环渤海地区 1998—2014 年 55 个气象站点的逐日降水数据,分别从日、月尺度对 TRMM 3B42、CMORPH、PERSIANN 3 种卫星降水产品进行精度评价,并对其季节差异进行分析。结果表明:总体上,TRMM 3B42(V7)的精度最高,PERSIANN 精度最低,但 CMORPH 对日降水事件的探测成功率(0.69)最高;3B42 略高估了日降水量,其他两者则对日降水量存在低估。春、夏、秋季各卫星降水产品对降水的成功探测率高于冬季,且相关系数、均方根误差等指标随季节变化明显。3 种卫星降水产品的月尺度估算精度优于日尺度,其中,对降水量的估算精度较低,特别是明显低估了暴雨事件的实际降水量。本研究为环渤海地区卫星降水产品在降水估算及其在气候与水文模拟及预测中的应用提供了依据和支持。

关键词 TRMM;CMORPH;PERSIANN;精度评价;季节差异;环渤海地区

Accuracy evaluation of multi-satellite precipitation products over Circum-Bohai-Sea Region. LI Rui-ze^{1,2}, JIANG De-juan^{2*}, ZHANG Hua², ZHANG An-ding¹ (¹College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China; ²Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China)

Abstract: Precipitation is a key variable of the global energy and water cycle. The accuracy of precipitation data is essential for monitoring and forecasting flood and drought, as well as water resources management. Based on daily precipitation data of 55 meteorological stations over Circum-Bohai-Sea region during year 1998-2014, the accuracy were evaluated and compared among 3 satellite-based precipitation products, *i.e.*, TRMM 3B42 V7, CMORPH, and PERSIANN from daily to monthly scale. Their errors were quantified for different seasons. Results showed that generally, TRMM 3B42 V7 had the best performance while PERSIANN had the largest error. However, CMORPH had the highest detection rate of rainfall events. The rainfall was slightly overestimated by 3B42 V7 but underestimated by CMORPH and PERSIANN. Seasonally, the skill score in summer was higher than that in other seasons, and the capturing capability was much lower. Meanwhile, the correlation coefficient, and root mean square error varied with seasons. The performance of 3 satellite-based precipitation products increased from the daily to monthly scale. Larger errors still existed in the daily rainfall estimates, especially that the rainstorm was seriously underestimated. This study provided a basis for the usage of satellite precipitation products in precipitation estimation and its application in climate and hydrological simulation over Circum-Bohai-Sea region.

Key words: TRMM; CMORPH; PERSIANN; performance evaluation; seasonal variation; Circum-Bohai-Sea Region.

本文由中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)和国家自然科学基金项目(40901028)资助 This work was supported by the Key Project of the Chinese Academy of Sciences (KZZD-EW-14) and the National Natural Science Foundation of China (40901028).

2016-01-29 Received, 2016-06-21 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: djjiang@yic.ac.cn

降水是重要的水文气象变量,其在全球能量和水循环中起重要作用^[1],且降水具有较高的时空变异性,是旱涝灾害形成的重要因素。因此,降水数据的准确性对洪旱监测及预报、水资源开发利用等工作至关重要,是认识水文过程、揭示水文变化的重要基础^[2]。

目前,降水数据主要的获取手段包括地面降水观测站(如雨量计、工程雨滴计、地面雷达等)、

卫星遥感、模型模拟(如 General Circulation Models、Regional Climate Models)等。其中,地面降水观测站可以提供较准确的降水数据,但站点空间分布不均匀,且很多区域站点比较稀疏甚至空缺,致使站点降水数据具有明显的局限性;模型模拟能通过既有数据对区域降水进行估算,但该方法需要基于大量物理数据(如气温、空气湿度、水平面风等),而且只能对大尺度的降水情况进行模拟,弊端较为明显^[3]。

近年来随着遥感和卫星技术的发展,卫星遥感降水产品得到越来越广泛的应用。与其他类型降水数据相比,卫星降水产品的时空分辨率较高,能有效弥补站点降水的不足,较好地反映降水的空间变化。然而,卫星产品对降水的监测是瞬时值,容易过高或过低估算实际降水量^[4-8],因此,通常需结合实测降水数据对卫星降水产品的适用性进行评价。例如,Franchito 等^[9]基于 1997—2000 年的 ANEEL 雨量站数据验证了 TRMM 降水雷达(TRMM PR)在亚马孙平原和巴西沿海地区的适用性,发现 TRMM PR 与 ANEEL 在大多地区具有较高的相关性,但也发现卫星降水产品存在明显的系统性、随机性误差,而且对季节和地形变化十分敏感;Gosset 等^[10]对 8 种卫星降水产品(PERSIANN、CMORPH、TRMM 3B42-V6/RT、GSMaP、CPC、RFE、EPSAT、GPCP-1DD)在西非热带干旱半干旱气候区的估算精度进行检验,发现 CMORPH、GSMaP、TRMM 3B42-V6 产品对降水的估算精度相对较高,但这些卫星产品对降水稀少、降水历时短的干旱半干旱地区降水事件捕捉能力相对较差。此外,Gebremichael 等^[11]对美国、澳大利亚等地区开展的卫星降水数据精度评价及其在水文中的应用等研究进行了比较全面的综述。

我国幅员辽阔,经度、纬度跨度较大,气候类型丰富。国内学者针对卫星降水数据在不同区域的精度评价开展了许多研究。例如,Li 等^[12]对 TRMM 3B42-V7、TRMM 3B42-RT、PERSIANN、CMORPH 等卫星降水产品在长江流域的适用性进行评价,发现 TRMM 3B42-V7 对降水估算的偏差最低、整体上优于其他数据,TRMM 3B42-RT 过高估算降水,CMORPH 和 PERSIANN 则过低估算降水量,该研究也表明大多数卫星降水产品不能有效捕捉冬季降水量;Yin 等^[13]对 TRMM 3B42、SSM/I 数据在青藏高原的降水估算精度进行了评价,发现 SSM/I 数据与雨量站实测数据存在显著相关,而 TRMM 3B42 在地形复杂区域存在较大局限性;齐文文等^[14]基于气象站点的实测数据对 TRMM3B43 数据进行精度修正,并在此基础上分析了青藏高原降水的空间格局和季节分布特征;朱国峰等^[15]对 TRMM 3B43 数据在横断山区的估算精度进行检验,发现 3B43 数据的估算误差在不同季节的空间分布存在较大差异,主要原因在于高海拔地区气象站点稀少、下垫面比较复杂;Hu 等^[16]基于赣江流域 2003—2009 年雨量站降水数据,对 TRMM 3B42、TRMM 3B42RT、CMORPH、GSMaP MWR⁺和 GSMaP MVK⁺6 种卫星降水数据进行评价,结果表明卫星降水产品的精度随时间尺度的扩展呈不同程度提高,其中,卫星降水产品在汛期的精度高于非汛期,在丘陵、高地的精度高于地形复杂山区。

受数据源和反演算法等因素的影响,不同卫星降水产品的精度表现各异;受气候类型、时间尺度和地形等因素的影响,同一卫星降水产品在不同区域的精度也存在差异。因此,为全面认识和比较卫星降水产品的精度特征和时间变化规律,本文以东亚季风气候典型区——环渤海地区为研究对象,对多种卫星产品及其在不同时间尺度和季节的精度特征进行评价,从而为其在气候研究、水文过程模拟等方面应用提供依据和支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

环渤海地区位于我国沿太平洋西岸的北部,由北至南依次包括辽宁省、河北省、北京市、天津市以及山东省,陆域面积约 $53 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。该区域属于温带季风大陆性气候,降水年际变化大且年内分配不均,多年平均降水量约 623 mm,主要集中在汛期(6—9 月)。环渤海地区属于我国“三大经济圈”之一,是我国的政治、经济、文化中心。自 20 世纪 80 年代以来,该区域温度显著上升,水资源匮乏,干旱问题日益突出^[17],已对环渤海地区的经济和社会发展产生严重影响。因此,准确的降

水数据是该区域干旱监测、生态环境建设及水资源科学管理的重要基础。

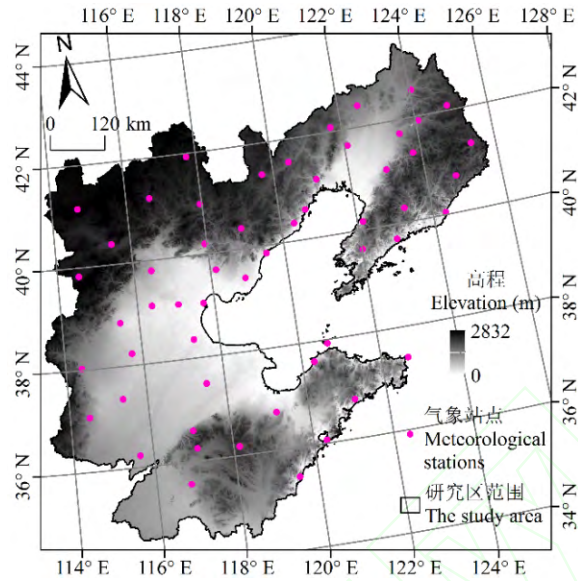


图1 环渤海地区位置及气象站点的分布

Fig.1 Locations of Circum-Bohai-Sea region and distribution of 55 meteorological stations.

1.2 基准降水数据

基准降水数据主要用于评价卫星降水产品对环渤海地区降水的估算精度。数据来自国家气候信息中心提供的逐日降水数据。为避免台站迁移、观测仪器变更、观测规范变化等因素对基准降水资料产生的影响,本研究在环渤海地区现有 85 个气象站点中,选取环渤海地区 1998 年以前建站、且 1998—2014 年数据连续性好的气象站点,对每个站点的日降水时间序列进行非均一性检验,最终选用 55 个气象站点的逐日降水资料作为本研究的基准降水数据(图 1)。

1.3 卫星降水数据

目前,常用且较具代表性的卫星降水产品主要包括 TMPA(Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis)、CMORPH(Climat Prediction Center MORPHing Technique)、PERSIANN(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks)^[18]。本文选取以上 3 种降水产品的最新版本——TRMM3B42V7、CMORPHV1.0 和 PERSIANN 开展精度评价研究。

TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)与日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency,JAXA)联合开发用于天气和气候降水研究的卫星。该卫星于 1997 年 11 月发射,提供了 17 年的降水连续监测资料。TRMM 卫星载有 5 种仪器,包括 3 种传感器(PR、TMI 和 VIRS)组成的测雨套件和其他两种与降水事件相关的传感器(LIS、CERES)^[19]。3B42 数据集是由 Huffman 等^[20]提出的 TMPA 算法反演得到,该算法主要联合 TRMM 卫星的 TMI、DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)卫星的 SSM/I、Aqua 卫星的 AMSR-E 和 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)卫星的 AMSU-B 传感器获得被动微波数据反演得到全球 50° N—50° S 范围内、时间间隔为 3 h 的被动微波瞬时降水估值;其次,使用红外降水估值数据对被动微波数据的降水估值进行校正;最终,应用 TRMM 卫星的 TCI(TRMM Combined Instrument)估值以及 GPCP(Global Precipitation Climatology Project)和 CAMS(Climat Assessment and Monitoring System)提供的逐月雨量站数据进行校正,得到 TMPA 降水产品。

CMORPH 算法是由美国 NOAA 气候预测中心(Climat Prediction Center,CPC)的 Joyce 等^[21]于 2004 年提出,该算法主要使用 CPC 人机交互数据处理系统(Man-computer Interactive Data Access

System,McIDAS)^[22]选取的地球静止轨道卫星红外辐射(IR)数据探测云系和明确云系运动特性,进而反演出云系统平流矢量(cloud system advection vectors,CSAVs),并利用云矢量对被动微波估算的瞬时降水进行推演得到连续的空间降水分布。

PERSIANN 是由美国亚利桑那大学^[23]应用神经网络方法(artificial neural network , ANN)对 TRMM 卫星的 VIRS、TMI 和 PR 数据反演得到 30 min 的空间降水数据,然后再进行累加得到的降水产品。

以上 3 种卫星降水产品的空间分辨率均为 0.25,时间分辨率均为 3 h(表 1)。本研究通过累加日内各时次的降水量得到日降水量,再由日降水量累加得到月降水量,最后分别提取出与气象站点位置对应的栅格降水量,进行比较分析。

表 1 3 种卫星降水产品信息

Table 1 Information for three satellite precipitation products

卫星降水产品	源数据	反演算法	时、空分辨率	空间、时间范围
Satellite-based precipitation product	Source data	Retrieval algorithm	Temporal and spatial resolution	Spatial and temporal range
TRMM 3B42 V7	TMI,SSM/I,AMSR-E,AMSU-B,GEO-IR(CPC),LEO-GPI, GPCP(CPC)-IR	TMPA	3 h 0.25° × 25252	50° N—50° S; 1998—2014
CMORPH V1.0	TMI,SSM/I,AMSU-B, GEO-IR, CPC-IR	CPC cloud moving vector morphing	3 h 0.25cloud m	60° N—60° S; 1998—2014
PERSIANN	VIRS, TMI, PR	ANN	3 h 0.25, TMI,m	50° N—50° S; 2000—2014

TMI: TRMM Microwave Imager; SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager; AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System; AMSU-B: Advanced Microwave Sounding Unit-B; Geo-IR: Geosynchronous Earth Orbit satellite Infrared dataset; LEO-GPI: LEO GOES precipitation index; GPCP-IR: Global Precipitation Climatology Project Infrared dataset; CPC-IR: Climate Prediction Center Infrared dataset; VIRS: TRMM Visible Infrared Remote Imager; PR: TRMM Precipitation Radar.

1.4 评价指标

本文采用相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)、偏差(BIAS)3 个定量指标对卫星降水产品的精度进行检验。其中,CC 能够表明卫星降水数据与基准降水数据的线性相关程度;RMSE 反映卫星降水数据的标准误差,可有效判定卫星降水数据的可靠性;BIAS 直观反映了卫星降水数据存在的系统误差大小及相对程度。公式^[16]分别如下:

$$CC = [\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(G_i - \bar{G})] / [\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 (G_i - \bar{G})^2], i=1,2,\dots,n(1)$$

$$RMSE = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2] / n}, i=1,2,\dots,n(2)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^n (S_i - G_i) / \sum_{i=1}^n G_i \times 100\%, i=1,2,\dots,n(3)$$

式中: S_i 为卫星降水估计值(mm); G_i 为台站基准降水值(mm); i 为待评价数据所对应的时间段; \bar{S} 和 \bar{G} 分别表示卫星降水和台站降水的均值(mm); n 为评价的总个数。

另外,应用探测率(POD)、错报率(FAR)、临界成功系数(CSI)^[24]和公正先兆评分(ETS)^[25]等分类指标评价各卫星降水数据对降水事件的探测能力。POD 越高,说明卫星降水产品对降水事件的漏报程度越小;FAR 越高,表示卫星降水产品对降水事件的错报程度越高;CSI 用于诊断卫星降水产品成功观测到降水事件的比例;ETS 用于评价随机因素下卫星降水产品对降水事件的探测能力,ETS 越高表示探测能力越强。根据以往的研究,本文将降水事件是否发生的阈值设置为 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[26]。公式分别如下:

$$POD = \frac{H}{H+M} \quad (4)$$

$$FAR = \frac{H}{H+F} \quad (5)$$

$$CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (6)$$

$$H_{random} = (H + M)(H + F)/N \quad (7)$$

$$ETS = \frac{H - H_{random}}{H + M + F - H_{random}} \quad (8)$$

式中: H 为卫星产品准确探测到的降水事件; F 为卫星产品对降水事件的误报; M 为卫星产品对降水事件的漏报; N 为降水事件发生总数。

2 结果与分析

2.1 不同卫星产品对降水估算的精度比较

2.1.1 日尺度 由图 2 可以看出,在日尺度上,环渤海地区 3 种卫星降水数据与基准降水数据的整体趋势较一致,但相对比较分散。其中,3B42、CMORPH 与基准值之间的 CC 分别为 0.67 和 0.65(表 2),均大于 PERSIANN(0.49)。对比 3 种卫星数据的 RMSE 发现,CMORPH 数据的 RMSE 在 3 种卫星数据中最低,其值为 5.97 mm;3B42 的 RMSE 略高于 CMORPH;相对而言,PERSIANN 数据的 RMSE 最大,说明其对日降水的估算精度较差。

从 BIAS 的结果来看(表 2),3B42 数据的 BIAS 绝对值(0.8%)在 3 种卫星降水数据中最小,其对日降水的估值大于基准值,说明 3B42 数据对环渤海地区日降水量存在一定程度的高估。相反,CMORPH 和 PERSIANN 则低估了日降水量,其中,PERSIANN 的低估现象尤为明显。

因此,3 种卫星降水产品中,3B42 对日降水量的估算误差最小,而 PERSIANN 的误差最大。

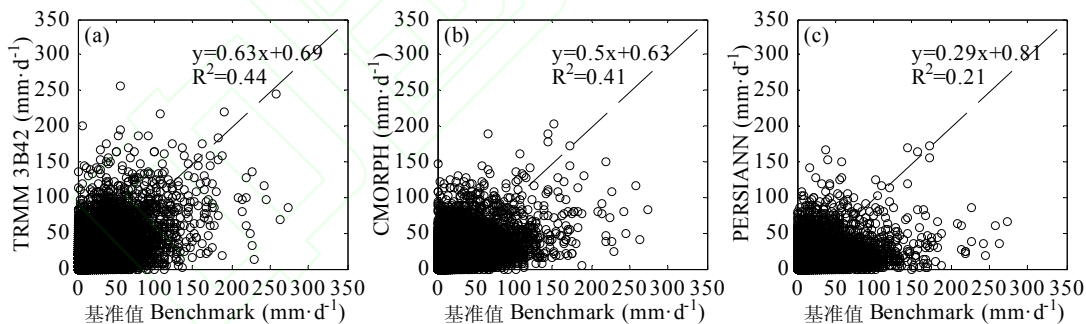


图2 3种卫星产品与基准日降水量的散点图

Fig.2 Scatter plots of 3 satellite products versus the benchmark daily rainfall.

关于分类指标(表 2),3 种卫星数据的 POD 评分介于 0.62~0.67 之间,说明各卫星数据对降水事件存在不同程度的漏报。其中,CMORPH 数据的 POD、CSI 和 ETS 评分均高于其他 2 种卫星数据,且 FAR 最低,说明 CMORPH 数据对降水事件的探测成功率相对较高,这也是其 RMSE 低于其他 2 种卫星数据的主要原因。比较而言,PERSIANN 数据的 POD、CSI 和 ETS 评分在 3 种卫星数据中均最低,FAR 则最高,说明该数据对降水事件的探测能力较低。另外,3 种卫星产品的 RMSE 值分别与其 POD、CSI 和 ETS 评分呈反比,而与 FAR 呈正比,说明卫星产品对降水事件的漏报、错报是其误差形成的重要因素。

表 2 日尺度下各卫星降水产品精度指标

Table 2 Accuracy indices of satellite products at the daily scale

数据类别 Data type	CC	RMSE (mm·d ⁻¹)	BIAS (%)	POD	FAR	CSI	ETS
3B42	0.67	6.18	0.8	0.67	0.37	0.48	0.41
CMORPH	0.65	5.97	-15.3	0.69	0.36	0.50	0.44
PERSIANN	0.49	6.85	-26.9	0.62	0.55	0.35	0.27

CC: 相关系数 Correlation coefficient; RMSE: 均方根误差 Root mean-square error; BIAS: 偏差 Bias; POD: 探测率 Probability of detection; FAR: 错报率 False alarm ratio; CSI: 临界成功系数 Critical success index; ETS: 公正先兆评分 Equitable threat score. 下同 The same below.

暴雨所带来的渍涝、洪涝等灾害严重危害着环渤海地区人民生命财产等方面的安全。因此,对 3 种卫星降水产品在环渤海地区暴雨的估算精度进行评价。由图 3 可看出,在对暴雨估算的精度方面,尽管 3 种卫星降水产品与基准值整体趋势一致,但离散程度较高。

由表 3 可见,各卫星降水产品的 POD、CSI 均大于 0.9,说明其对暴雨事件具有较强的捕捉能力。然而,3 种卫星降水产品对暴雨的估算精度均较差,显著低估了暴雨的实际降水量。比较而言,3B42 数据对暴雨的估算精度优于其他 2 种数据。

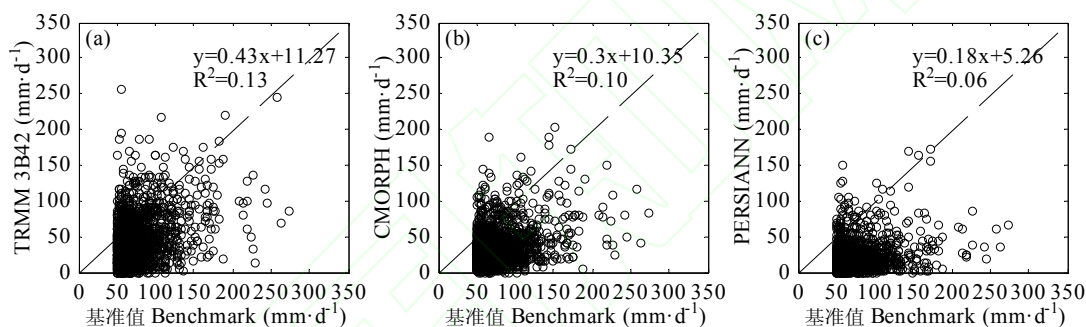


图 3 3 种不同卫星产品与基准暴雨事件的散点图

Fig.3 Scatter plots of 3 satellite products versus the benchmark of the rainstorm.

表 3 各卫星降水产品对暴雨估算的精度指标

Table 3 Accuracy indices of satellite products in rainstorm estimates

数据类别 Data type	CC	RMSE (mm·d ⁻¹)	BIAS (%)	POD	CSI
3B42	0.37	48.01	-42.2	0.98	0.98
CMORPH	0.34	53.17	-56.1	0.98	0.98
PERSIANN	0.26	64.40	-74.7	0.92	0.92

2.1.2 月尺度 由图 4 可以看出,环渤海地区 3 种卫星降水数据在月尺度与基准值之间的分布显著收敛。随时间尺度的变化,卫星产品对降水估算的精度也随之变化。由日尺度到月尺度,各卫星降水产品与基准值之间的相关性均得到显著提高。对照而言,3B42 数据的各精度指标均优于其他 2 种数据,其中,CC 为 0.94,明显高于 CMORPH(0.82)和 PERSIANN(0.72),说明 3B42 与基准值之间存在较好的一致性;而其误差指标值(RMSE、BIAS)均低于 CMORPH 和 PERSIANN(表 4),说明 3B42 数据对月降水的估算误差相对较低。PERSIANN 数据的精度虽由日尺度到月尺度有所提高,但其整体误差明显高于其他 2 种卫星数据。

BIAS 的结果与日尺度类似,3B42 数据的 BIAS 绝对值(5.9%)均低于其他 2 种卫星数据,且略高

估算了环渤海地区的月降水量,CMORPH 和 PERSIANN 对月降水量则存在不同程度的低估。

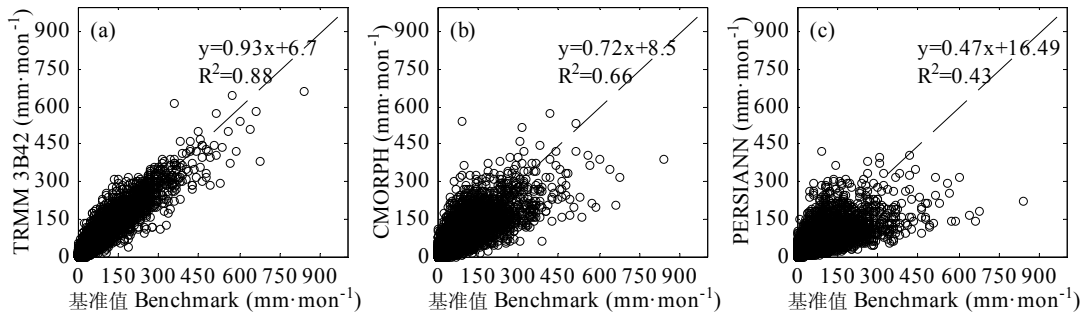


图 4 3 种不同卫星产品与基准月降水量的散点图

Fig.4 Scatter plots of 3 satellite products versus the benchmark monthly rainfall.

表 4 月尺度下各卫星降水产品精度指标

Table 4 Accuracy indices of satellite products at the monthly scale

数据类别 Data type	CC	RMSE (mm·mon ⁻¹)	BIAS (%)
3B42	0.94	23.27	5.92
CMORPH	0.82	39.49	-11.03
PERSIANN	0.72	49.04	-20.91

总的来说,3 种卫星产品中,3B42 对环渤海地区降水量的估算精度相对较高,误差整体较低,具有更好的应用前景。然而,值得注意的是,3 种卫星降水产品对日降水量的估算精度均较低,仍存在较大的提升空间,特别是误差较高的 PERSIANN 产品。

2.2 卫星产品对降水估算精度的季节差异

由于环渤海地区降水主要集中于夏季,季节性差异大。为直观了解卫星降水产品估算精度的季节差异,本文对降水数据进行季节性划分,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,1、2、12 月为冬季,分别在日尺度和月尺度下对卫星降水产品精度的季节性差异进行评估。

2.2.1 日尺度下的季节性差异 由图 5 可以看出,日尺度下 3 种卫星降水数据的 CC 均在冬季最低,特别是 PERSIANN 数据,其冬季各月的 CC 仅 0.20,说明各卫星数据对冬季日降水量的估算均较差。在 3 种卫星产品中,3B42 的 CC 在各季均最高,说明 3B42 数据对各季日降水量的估算相对较好。

3 种卫星产品的 RMSE 均在夏季达到最高、冬季最小,这是由于受东亚季风气候的影响,环渤海地区夏季降水量最高,而冬季最低。对照而言,CMORPH 数据各季 RMSE 最低,PERSIANN 则最高。BIAS 方面,冬季的偏零程度最大,说明 3 种卫星数据对冬季日降水量的估算均存在较大误差。在 3 种卫星产品中,3B42 各季的 BIAS 绝对值均最低,PERSIANN 均最高,其高估了冬季日降水,但低估了其他季节降水,CMORPH 对各季降水的估算均存在不同程度的低估。

关于分类指标,3 种卫星数据的 POD、CSI 和 ETS 评分均在夏季最高,说明各卫星数据对夏季降水事件具有较好的探测能力。相反,冬季的 POD、CSI 和 ETS 评分最低,而 FAR 评分最高,说明各卫星数据对环渤海地区冬季降水事件的探测能力也较差。对照而言,CMORPH 的 POD、CSI 和 ETS 评分在春、夏、秋季均最高,说明 CMORPH 数据对这 3 个季节降水事件的探测成功率相对较高。然而,值得注意的是,CMORPH 对冬季降水事件的探测率在 3 种卫星产品中最低。PERSIANN 各季(除冬季)的 POD、CSI 和 ETS 评分均最低,FAR 则最高,说明 PERSIANN 数据对各季(除冬季)降水事件的探测能力均较低。此外,3B42 除秋季 FAR 略高于 CMORPH 外,其他季节均最低,说明 3B42 数据对降水事件有较低的错报率。

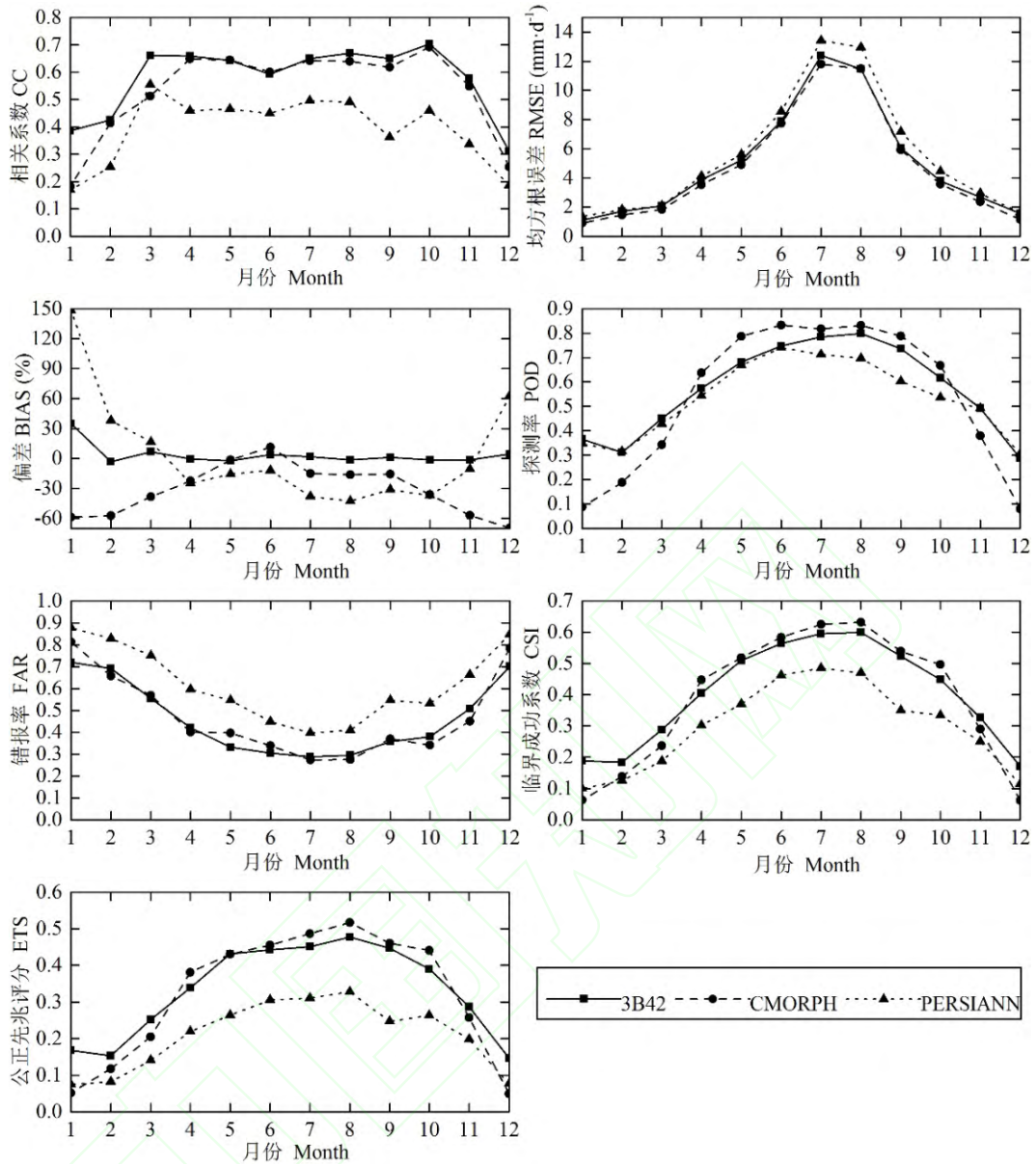


图 5 日尺度下卫星降水数据精度指标的季节变化

Fig.5 Seasonal variations of accuracy indices for satellite-derived daily rainfall.

2.2.2 月尺度下的季节性差异 与日尺度相似,3种卫星数据的CC均在冬季最低,特别是CMORPH和PERSIANN,二者冬季各月的CC平均值仅为0.29(图6)。对比3种卫星数据,3B42数据各季的CC均高于CMORPH和PERSIANN,特别是冬季的CC显著高于其他2种卫星数据。PERSIANN数据除冬季的CC与CMORPH几近,其他季节均最低。

3种卫星数据的RMSE在4个季节大致呈“三角形”分布,且均在夏季最高。其中,3B42数据各季RMSE在3种卫星产品中均最小,而PERSIANN数据最大,说明3B42对各季月降水量的估算精度最高,而PERSIANN的精度最低。

从BIAS结果来看,3种卫星数据的BIAS绝对值均在冬季最高,说明各卫星数据对冬季月降水的估算均存在较明显偏差。在3种卫星产品中,3B42数据各季的BIAS绝对值均最低,其对各季月降水均存在不同程度的低估;CMORPH数据低估了各季的月降水量;PERSIANN数据低估春、夏、秋季的降水量,而高估冬季降水量,且冬季各月平均BIAS达100%。

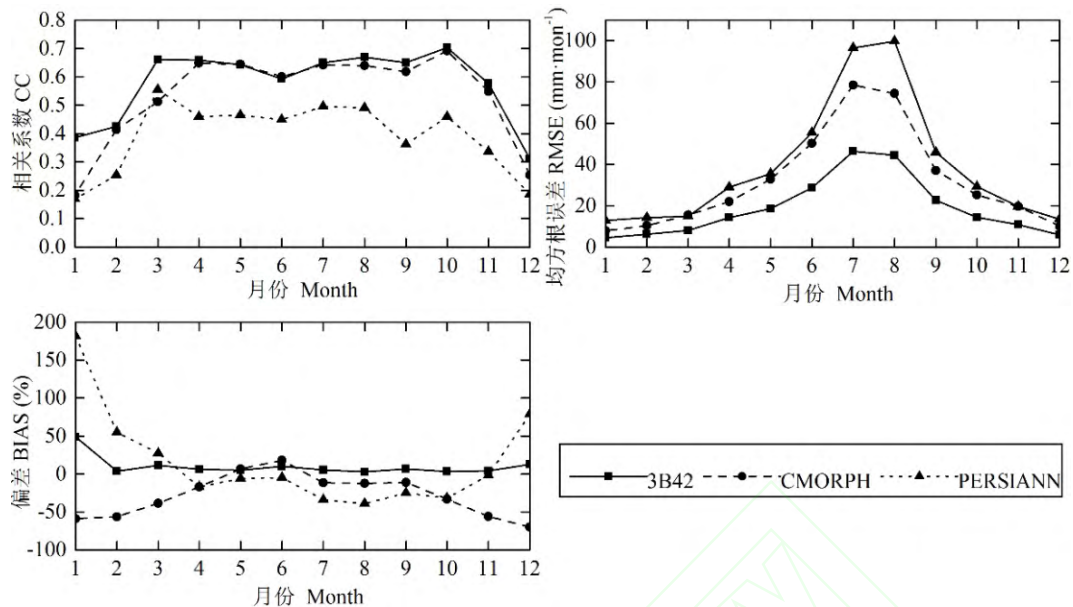


图 6 月尺度下卫星降水数据精度指标的季节变化

Fig.6 Seasonal variations of accuracy indices for satellite-derived monthly rainfall.

总的来说,3B42 数据对研究区各季月降水量的估算精度最高、误差最低,而 PERSIANN 数据的精度最低、误差最大。另外,3 种卫星数据对夏季降水量的估算精度较高,而对冬季降水量的估算较差,说明卫星降水产品对夏季降水的探测能力较强,而对冬季降水的捕捉能力较差。

3 结论

针对环渤海地区,本文利用 55 个国家气象站点的日降水量资料,从日尺度和月尺度比较分析了 1998—2014 年来 TRMM 3B42V7、CMORPHV1.0 和 PERSIANN 3 种高分辨率卫星降水数据的精度特征,并阐明了各精度指标在不同时间尺度和不同季节的规律,主要结论如下:1)在日尺度,TRMM 3B42 数据的精度总体较高,CMORPH 数据对降水事件的探测能力最高,但与 3B42 相差较小,PERSIANN 数据对日降水的估算精度最低。3 种卫星降水数据均可有效捕捉暴雨事件的发生,但对暴雨的估算精度均存在明显偏差。2)在月尺度,TRMM 3B42 的各项精度指标均优于其他 2 种卫星降水产品,其次为 CMORPH 数据,PERSIANN 数据的精度最低。总体上,3 种卫星降水产品对月降水的估算精度高于日尺度。3)3 种高分辨率卫星降水数据在夏季的精度显著高于其他季节,而冬季最差。另外,从对降水事件的探测能力来看,夏季 POD 评分最高、FAR 最低,冬季 POD 评分最低、FAR 最高,表明 3 种卫星降水数据对夏季降水事件的探测能力较高,而对冬季降水事件的抓捕能力较差。4)TRMM 3B42 数据对环渤海地区各季降水量存在一定程度的高估,CMORPH 数据则低估了各季的降水量,PERSIANN 数据高估冬季降水量,而低估其他季节降水量。

总体上,TRMM 3B42(V7)数据在环渤海地区具有相对较高的精度,而 PERSIANN 的精度较低。在月尺度上,3 种卫星降水产品(特别是 3B42)可较为准确地反映降水空间分布情况。相对于通过地面降水资料的插值结果,卫星降水产品覆盖范围广、时效性强等特性能够弥补地面台站所存在的不足。另外,各卫星降水数据对日降水量的估算误差均较大,特别是对暴雨的估算方面。因此,今后应当在此评估与分析基础上采用有效措施进一步提高卫星降水数据对日降水量的估算精度和性能,提高其科学与应用价值,从而使卫星降水数据能更好的应用于水资源管理、水文过程模拟、天气预报等方面的研究。

参考文献

- [1] Wanders N, Pan M, Wood EF. Correction of real-time satellite precipitation with multi-sensor satellite observations of land surface variables. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **160**: 206-221
- [2] Gebregiorgis A, Hossain F. How much can a priori hydrologic model predictability help in optimal merging of satellite precipitation products? *Journal of Hydrometeorology*, 2011, **12**: 1287-1298
- [3] Tapiador FJ, Turk FJ, Petersen W, *et al.* Global precipitation measurement: methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, 2012, **104/105**: 70-97
- [4] Tang L, Tian YD, Yan F, *et al.* An improved procedure for the validation of satellite-based precipitation estimates. *Atmospheric Research*, 2015, **163**: 61-73
- [5] Bai A-J (白爱娟), Fang J-G (方建刚), Zhang K-X (张科翔). Summer rainfall in Shaanxi and its neighborhood regions observed by TRMM satellite. *Journal of Catastrophology (灾害学)*, 2008, **23**(2): 41-45 (in Chinese)
- [6] Sun L-Q (孙乐强), Hao Z-C (郝振纯), Wang J-H (王加虎), *et al.* Assessment and correction of TMPA products 3B42RT and 3B42V6. *Journal of Hydraulic Engineering (水利学报)*, 2014, **46**(10): 1135-1146 (in Chinese)
- [7] Zhao TB, Akiyo Y. Evaluation of TRMM 3B42 product using a new gauge-based analysis of daily precipitation over China. *International Journal of Climatology*, 2014, **34**: 2749-2762
- [8] Cai Y-C (蔡研聪), Jin C-J (金昌杰), Wang A-Z (王安志), *et al.* Accuracy evaluation of the TRMM satellite-based precipitation data over the mid-high latitudes. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2014, **25**(11): 3296-3306 (in Chinese)
- [9] Franchito SH, Rao VB, Vasques AC, *et al.* Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**: D02105
- [10] Gosset M, Viarre J, Quantin G, *et al.* Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, **139**: 923-940
- [11] Gebremichael M, Hossain F. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Berlin: Springer Verlag, 2010
- [12] Li Z, Yang D, Hong Y. Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2013, **500**: 157-169
- [13] Yin ZY, Zhang X, Liu X, *et al.* An assessment of the biases of satellite rainfall estimates over the Tibetan Plateau and correction methods based on topographic analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, **9**: 301-326
- [14] Qi W-W (齐文文), Zhang B-P (张百平), Pang Y (庞宇), *et al.* TRMM-data-based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 2013, **33**(8): 999-1005 (in Chinese)
- [15] Zhu G-F (朱国峰), Pu T (蒲焱), Zhang T (张涛), *et al.* The accuracy of TRMM precipitation data in Hengduan Mountainous Region, China. *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 2013, **33**(9): 1125-1131 (in Chinese)
- [16] Hu QF, Yang DW, Wang YT, *et al.* Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin. *Science China Technological Sciences*, 2013, **56**: 853-865
- [17] Guo J (郭军), Ren G-Y (任国玉), Li M-C (李明财). Variations of precipitation of different categories in the Bohai Rim area in recent 47 years. *Geographical Research (地理研究)*, 2010, **29**(12): 2271-2280 (in Chinese)
- [18] Guo R-F (郭瑞芳), Liu Y-B (刘元波). Multi-satellite retrieval of high resolution precipitation: An overview. *Advances in Earth Science (地球科学进展)*, 2015, **30**(8): 894-903 (in Chinese)
- [19] Goddard Space Flight Center. Tropical Rainfall Measuring Mission [EB/OL]. (2015-09-20) [2015-10-15]. <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>.
- [20] Huffman GJ, Bolvin DT, Nelkin EJ, *et al.* The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-Global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8**: 38-55
- [21] Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, **5**: 487-503
- [22] Lazzara MA, Benson JM, Fox RJ, *et al.* The man computer interactive data access system: 25 years of interactive processing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, **80**: 271-284
- [23] Soroosh S, Kuo LH, Gao XG, *et al.* Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American*

Meteorological Society, 2000, **81**: 2035–2046

- [24] Yong b, Ren LL, Hong Y, *et al.* Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe basin, China. *Water Resources Research*, 2010, **46**: W07542
- [25] Elizabeth EE. Methods for verifying satellite precipitation estimates. *Advances in Global Change Research*, 2007, **28**: 345-356
- [26] Ebert EE, John EJ, Chris K. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, **88**: 47–64

作者简介 李瑞泽,男,1991年生,硕士研究生。主要从事土地利用与遥感监测研究。E-mail: ruizelee@163.com
责任编辑 杨 弘

李瑞泽, 姜德娟, 张华, 等. 多卫星降水产品在环渤海地区的精度评价. *应用生态学报*, 2016, **27**(9):
Li R-Z, Jiang D-J, Zhang H, *et al.* Accuracy evaluation of multi-satellite precipitation products over Circum-Bohai-Sea Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(9): (in Chinese)