

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2019.0087

许凤林,郭斌,叶贝,等. GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(4):79-86. XU F L, GUO B, YE B, et al. Applicability of GPM Satellite precipitation product in the Huang-Huai-Hai plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 79-86. (in Chinese)

# GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究

许凤林,郭斌,叶贝,叶洽,王伟娇

(山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**高时空分辨率的全球降水测量计划(Global precipitation measurement, GPM)是继热带降水观测计划(tropical rainfall measuring mission, TRMM)之后新一代的全球卫星降水产品,为全球气候变化、洪旱监测等研究工作提供了有力的数据支持。基于黄淮海平原2015年3月—2016年2月59个气象站点逐日降水数据,采用相关系数(CC)、相对误差(BIAS)、均方根误差(RMSE)3个指标在多时空尺度评估了GPM IMERG卫星降水产品在研究区的适用性。结果表明:日尺度上,GPM IMERG数据与站点数据拟合效果较好(CC=0.95),但GPM IMERG对降水高估17.90%。月尺度上,6—8月均方根误差最高,9个月的相关系数均大于0.80;季节尺度上,除秋季的相关系数小于0.90外,其余季节的相关性均较高,夏季均方根误差最大。此外,GPM IMERG还能较好地反映黄淮海平原由南到北降水量逐渐减少的空间分布格局。通过对比两种数据日降水时间序列,发现GPM IMERG降水产品与气象站点降水变化趋势较为一致。总体而言,GPM IMERG卫星降水产品与气象站点数据表现出较好的相关性,虽然存在轻微的高估现象,但能够以较高的精度和较小的误差估测降水。

**关键词:**GPM IMERG;时空变化;降水;黄淮海平原;精度验证

中图分类号:P426.6 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Applicability of GPM Satellite precipitation product in the Huang-Huai-Hai plain

XU Fenglin, GUO Bin, YE Bei, YE Qia, WANG Weijiao

(College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The Global Precipitation Measurement (GPM) with high spatial and temporal resolution, the new generation of global satellite precipitation products after Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), provides strong data support for global climate change studies, and flood and drought monitoring. The applicability of GPM IMERG product was evaluated in this study using statistical metrics including correlation coefficient (CC), relative error (BIAS) and root mean square error (RMSE), based on the daily precipitation from 59 meteorological stations in the Huang-Huai-Hai plain for the period of March 2015 to February 2016. The results showed that: GPM IMERG precipitation agreed well with observations at daily scale (CC=0.95). However it overestimated precipitation by 17.90%; At monthly scale, RMSE was the highest from June to August and CC for nine months was greater than 0.80; At seasonal scale, CC was less than 0.90 in autumn and RMSE was the largest in summer; GPM IMERG

收稿日期:2018-12-09 修回日期:2019-03-12 网络出版时间:2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190321.1531.017.html>

基金项目:国家自然科学基金(41807170);山东省自然科学基金(ZR2017BD021);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2014TDJH101);山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室开放课题基金

作者简介:许凤林(1997—),男,山东潍坊人,主要从事卫星降水评估研究。E-mail: xfl15318900939@163.com

通信作者:郭斌(1984—),男,山东济南人,副教授,博士,主要从事遥感水文等研究。E-mail: guobin121@126.com

can simulate the spatial pattern of precipitation decreasing from south to north in the Huang-Huai-Hai plain; It was also found that the trends from GPM IMERG and observations were consistent. In summary, GPM IMERG satellite precipitation presented a good correlation with the observations at meteorological stations, although there is an overestimation.

**Key words:** GPM IMERG; spatiotemporal variations; precipitation; the Huang-Huai-Hai plain

降水作为一种自然现象,具有复杂的时空变化特征,是区域天气变化和全球气候形成的重要因素<sup>[1-3]</sup>。因此,高质量的降水数据在气象、水文和农业灾害等领域起着重要作用<sup>[4]</sup>。传统的降水观测手段主要有地面站点和天气雷达观测两种,但两者在观测降水方面还存在诸多不足。地面站点观测可直接获取降水信息,对于单点的观测精度高,但存在站点分布密度小、空间上不均匀、易受人为因素干扰等局限性<sup>[5-6]</sup>。天气雷达观测可实时监测大气中的云雨状况,但易受电子信号和地形环境等因素的影响<sup>[7-8]</sup>。近年来,高分辨率遥感卫星技术发展迅速,国际上出现了多种卫星降水产品。遥感卫星观测降水具有覆盖范围大、时效性强、时空分辨率高等优点,该方法已广泛应用于水文气象等研究领域<sup>[9-10]</sup>。

TRMM 与 GPM 是目前应用较为广泛的降水卫星,TRMM 卫星由 NASA(National Aeronautics and Space Administration)和 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)合作开发设计,于 1997 年 11 月 28 日发射,主要用于监测和研究热带地区降水<sup>[11]</sup>。GPM 作为继 TRMM 之后的新一代全球降水观测计划,其核心观测平台(Core Observatory)于 2014 年 2 月 28 日发射。与以往的卫星降水产品相比,GPM 降水产品的观测范围更大,时空分辨率更高,能够提供全球范围基于微波反演的 3 h 降水数据产品和基于微波红外多星融合算法 IMERG 的 0.5 h 雨雪数据产品<sup>[11]</sup>。随着 GPM 卫星数据的广泛应用,其观测精度成为众多学者关注的焦点。金晓龙等<sup>[12]</sup>通过研究 GPM、TRMM 和 CMORPH 3 种卫星降水产品在天山地区的适用性,发现 GPM 在各方面都表现良好。孔宇<sup>[13]</sup>验证了 GPM 在中国大陆地区的精度,研究发现 GPM 能很好地反映出我国降水的空间分布规律。陈晓宏等<sup>[14]</sup>以北江流域为例,定量评估了 3 类 IMERG 产品的精度,发现非实时 IMERG-F 产品和准时 IMERG-E、IMERG-L 产品的观测精度都令人满意。Caracciolo 等<sup>[15]</sup>在地中海岛屿对 GPM IMERG-F 产品评估表明,GPM 卫星数据与插值后的站点数据具有较好的相关性,且略高于站点实测降水量。Li 等<sup>[16]</sup>基于小时站点数据验证了 GPM IMERG 在中

国大陆的昼夜变化,发现 IMERG 在降水量的昼夜周期方面表现良好,但在频率方面表现较差。Tan 等<sup>[17]</sup>在马来西亚通过对比 GPM IMERG、TRMM 3B42 和 PERSIANN-CDR 3 种卫星产品发现,GPM 对于轻度降水事件具有更好的探测能力。已有研究表明受海拔高度和地理位置等因素的影响,GPM IMERG 降水产品的精度和性能在不同地区差异较大。GPM IMERG 卫星降水产品在中国大陆中纬度平原地区的精度有待进一步评估,因此,本文以黄淮海平原为例,开展 GPM IMERG 卫星降水产品在该地区的适用性研究。

黄淮海平原地处中纬度,是我国第二大平原,同时也是全国气候变化敏感区之一<sup>[18]</sup>。近年来,气候变暖导致其降水变异程度加大,旱涝灾害频发严重制约了该地区的可持续发展<sup>[19]</sup>。本文基于黄淮海平原 2015—2016 年 59 个气象站点日降水数据,从多时空尺度对 IMERG 降水产品进行误差分析和精度评估,从而为黄淮海平原气候变化等研究提供一定的科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

黄淮海平原位于 32°~40°N,112°~121°E,跨越京、津、冀、鲁、豫、皖、苏 7 个省市,面积约 30 万 km<sup>2</sup>(图 1)。黄淮海平原地势西高东低,但起伏较小,大部分地区海拔位于 50 m 以下。研究区河湖众多,主要由淮河、黄河、海河带来的泥沙冲积形成,属于典型的冲积平原。淮河以南属于北亚热带湿润气候,以北则属于暖温带湿润或半湿润气候,淮河流域南部的局部地区(如高邮、东台等)年降水量可达 1 000 mm 以上,京津冀部分地区年降水量不足 500 mm。研究区四季分明,夏季高温多雨,洪涝灾害频发;冬、春季气候干燥、降水量少,旱情较重。总体来说,黄淮海平原降水量不够充沛,地区和年际差异较大。

### 1.2 数据来源

本文所采用的 GPM IMERG 卫星降水数据来源于美国 NASA(<http://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>)官方网站,其空间分辨率为 0.1°×0.1°,时间分辨率为 0.5 h,范围可覆盖全球,

覆盖时段为 2014 年 3 月至今。气象站点日降水数据来源于国家气象数据共享服务中心(<http://data.cma.cn/>),本研究选取了黄淮海平原 2015 年 3 月—2016 年 2 月 59 个站点逐日降水数据,全部观测数据均经过了严格的质量控制。黄淮海平原 59 个气象站点空间位置分布见图 1。为了消除卫星数据和站点数据之间的时区差异,处理数据时将 UTC 时间的卫星数据加上 8 h 转换成北京时间以匹配站点数据的时间,然后合成月、季节和年降水量,并将其换算为均值。

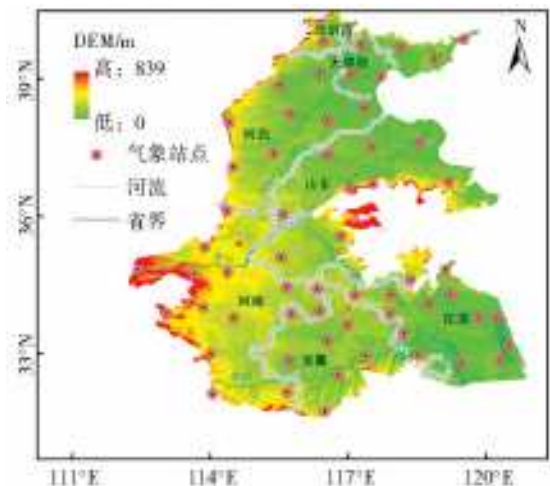


图 1 黄淮海平原地理位置、DEM 及气象站点分布  
Fig. 1 Location, DEM and meteorological stations in the Huang-Huai-Hai plain

### 1.3 精度验证方法

本文采用相关系数(CC)、相对误差(BIAS)和均方根误差(RMSE)来验证 GPM IMERG 卫星降水数据的精度。其中,相关系数(CC)用来衡量卫星降水数据与站点数据之间的相关性,取值范围为[0,1]。相对误差(BIAS)评价卫星降水数据相对站点数据的偏差程度,检验是否存在高估或低估现象,取值范围为[0,1]。均方根误差(RMSE)用来评价卫星降水数据误差的整体水平,取值范围为[0,+∞)<sup>[20]</sup>。CC 越趋近于 1, RB 和 RMSE 越接近于 0,说明数据精度越高<sup>[21]</sup>。

各指标计算公式为

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n$ ( $n$  为样本总量); $x$  和  $y$  分别表

示 GPM IMERG 和气象站点降水量; $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示 GPM IMERG 和气象站点降水量的平均值。

处理数据时首先通过观测站点经纬度计算出对应站点所在网格的坐标,然后利用 Matlab 编程输出该网格单元内的降水量得到  $x_i$ 。由于黄淮海平原高程差距非常小,本文选用普通克里金插值法对站点数据进行插值,然后通过可视化分析将插值结果和 GPM IMERG 栅格数据进行空间分布差异性的比较。

## 2 结果分析

### 2.1 日均降水量验证

日均降水量为年累计降水量与年总日数之比,黄淮海平原 GPM IMERG 卫星日降水数据与 59 个站点日均降水量的拟合结果见图 2。以气象站点日均降水量为自变量,对应站点所在网格内 GPM IMERG 日均降水量为因变量进行一元线性回归分析,结果表明,两种降水数据的相关性较好,相关系数达到 0.95。大部分点分布在 1:1 线之上,表明 GPM IMERG 估测的降水量高于气象站点实测降水量,同时,相对误差也反映出 GPM IMERG 对降水存在轻微高估现象(BIAS=17.90%),这可能与 GPM IMERG 产品自身系统误差有关。均方根误差反映出 GPM IMERG 估测的降水值与实测降水量较为接近。

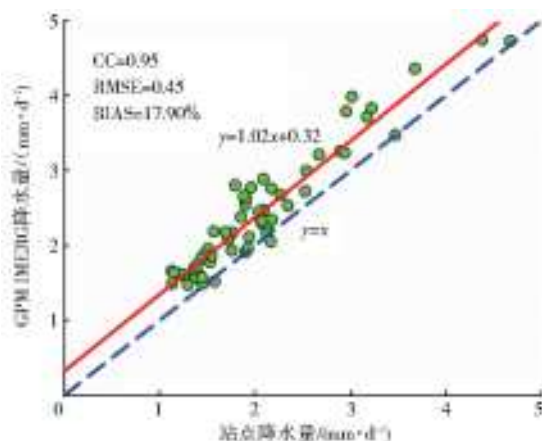


图 2 GPM IMERG 与气象站点日均降水量散点图  
Fig. 2 Scatter plot of daily average precipitation from GPM IMERG and meteorological stations

图 3 为 GPM IMERG 与气象站点日均降水量的空间分布。从图中可以看出,GPM IMERG 卫星降水可以捕捉到降水的空间变化,能够较好地反映黄淮海平原由南到北降水量逐渐减少的空间分布格局,但在江苏等地区 GPM IMERG 表现出明显的高估。

### 2.2 月均降水量验证

图 4 为 GPM IMERG 月均降水量的精度验证结

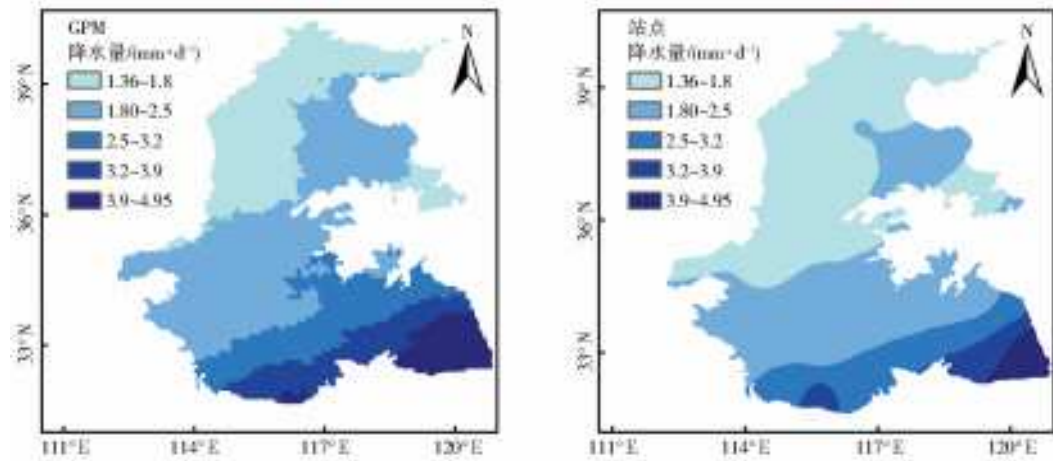


图 3 GPM IMERG 与气象站点日均降水量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of daily average precipitation from GPM IMERG and meteorological stations

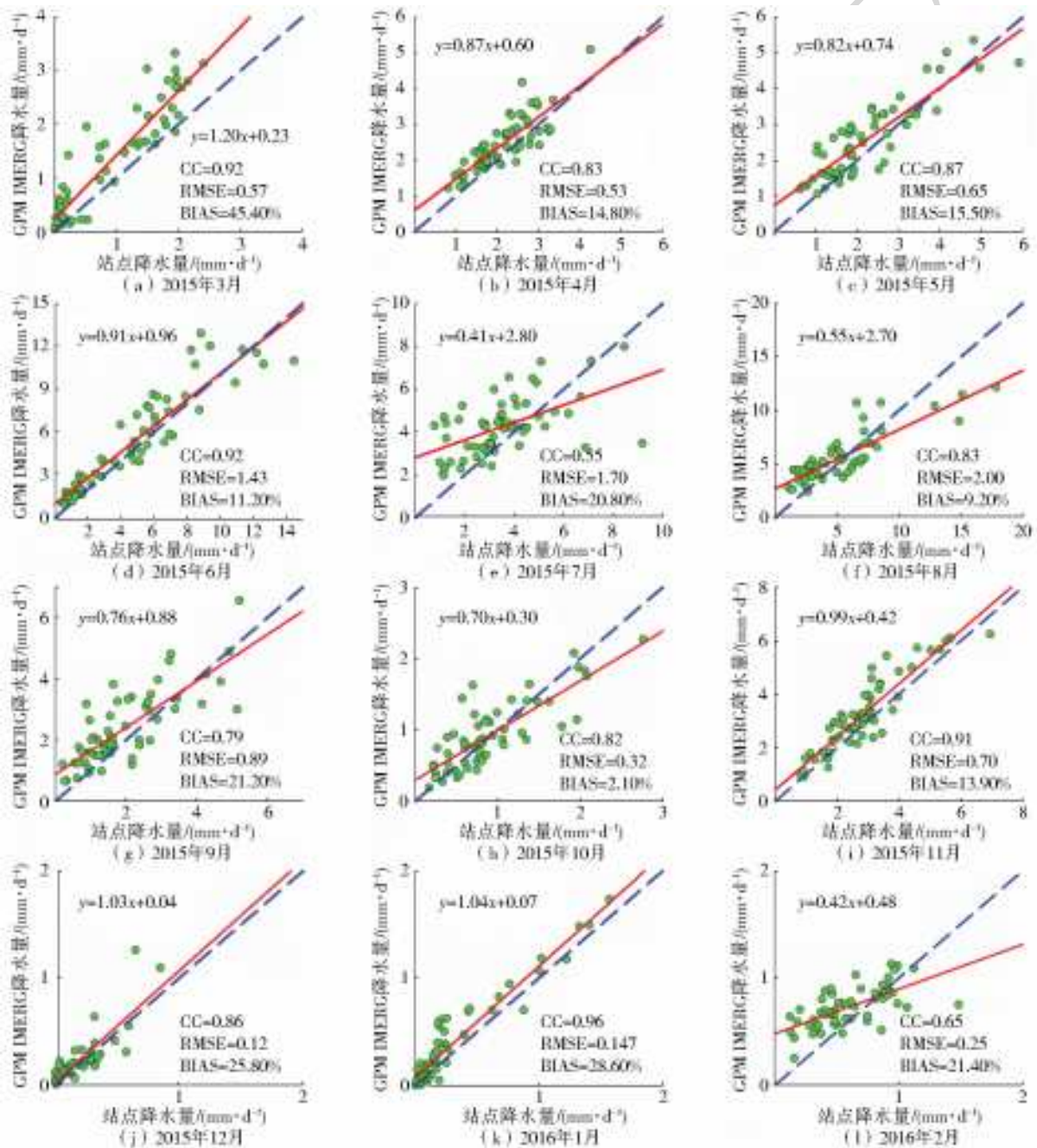


图 4 GPM IMERG 与气象站点月均降水量散点图

Fig. 4 Scatter plots of monthly average precipitation from GPM IMERG and meteorological stations

果。从图中可以看出,GPM 和站点月均降水量总体相关性较好,其中,1、3、6 和 11 月相关系数大于 0.90,而 7 月相关系数最低,仅为 0.55。均方根误差在 6—8 月最高,这主要是由于受降水量异常值的影响比较大。相对误差在 10 月最小,仅为 2.10%,3 月最大,高达 45.40%,总体在 10%~20%,且均为正值,表明 GPM IMERG 对降水量的估测存在一定程度的高估现象。综合 GPM IMERG 的各类统计指标值发现,GPM IMERG 数据与站点数据具有较好的相关性和较低的误差。

### 2.3 季均降水量验证

黄淮海平原不同季节降水量差异较大,通常夏季降水较多,冬季降水较少,因此,GPM 产品在干湿季的精度有待研究。本文将 3—5 月、6—8 月、9—11 月和 12 月一次年 2 月依次划分为春、夏、秋和冬

季,并定义季节平均降水量为季节累计降水量与季节总日数之比<sup>[13]</sup>。以气象站点季均降水量按照四个季节与同期 GPM IMERG 季均降水量进行拟合(图 5),结果表明:两者的相关系数除秋季外均大于 0.90。均方根误差在夏季最大,这是因为夏季降水量相对较高,受异常值的影响较大,而降水量较少的季节总降水量变化不大,均方根误差较小。就相对误差而言,夏季最小(RB=13.00%),冬季最大(RB=23.40%),这与董国涛等<sup>[22]</sup>在黄河流域的研究结果一致。夏季和冬季降水探测精度存在季节差异,可能是由于夏季降水强度大,也可能由于夏季以液态降水为主,而冬季主要以固态降水为主。总体而言,GPM IMERG 对降水的估测表现出轻微的高估,与日均降水量验证结果一致。

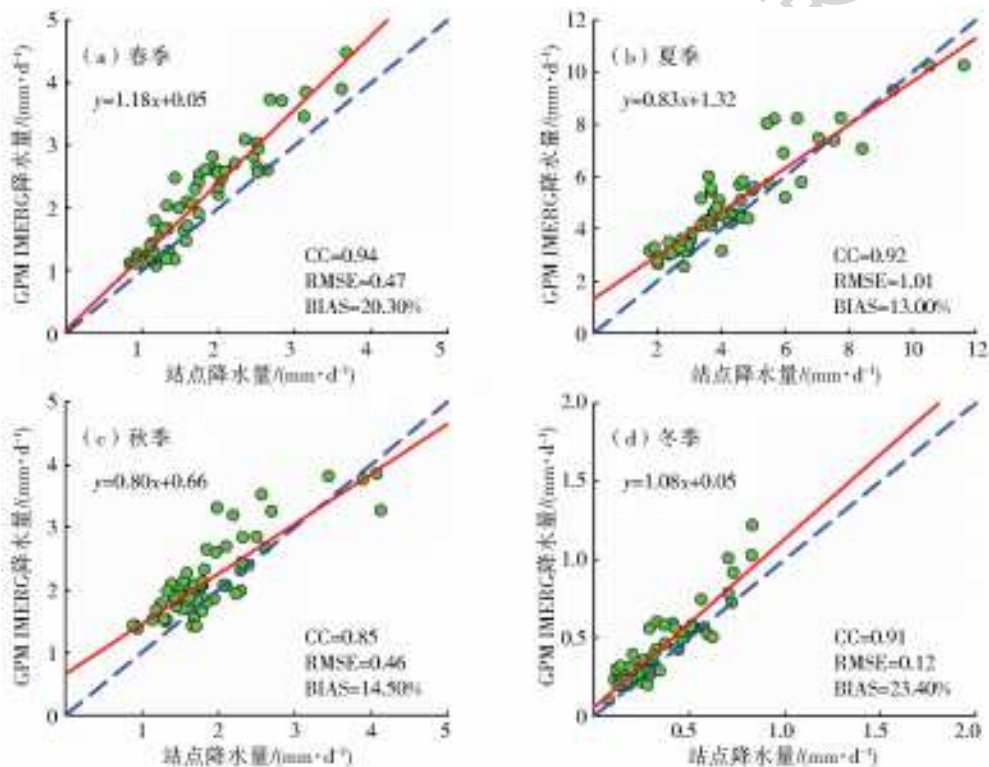


图 5 GPM IMERG 与气象站点季均降水量散点图

Fig. 5 Scatter plots of seasonal average precipitation from GPM IMERG and meteorological stations

图 6 为 GPM IMERG 卫星降水与气象站点季均降水量的空间分布图,从图中可以看出,春季日均降水量介于 0.82~4.82 mm/d,夏季日均降水量介于 1.77~11.61 mm/d,秋季日均降水量介于 1.03~4.00 mm/d,冬季日均降水量介于 0.10~1.51 mm/d,能够反映出夏季降水多、冬季降水少的季节降水分布特征。GPM IMERG 在春、夏和冬季均能较好地反映出黄淮海平原降水量由南到北逐渐减少的空间分布规律,在局部地区出现略微高估或低估现象。而在秋季,可以明显地看出 GPM IMERG 出现大范

围的高估,尤其在江苏地区,这可能由于海陆位置的差异性,同时插值方法也存在一定的误差。

### 2.4 日降水时间序列对比

图 7(a)为黄淮海平原 2015 年 3 月—2016 年 2 月 GPM IMERG 卫星降水产品与气象站点日降水时间变化趋势。从图中可以看出,GPM IMERG 降水产品与气象站点日降水变化趋势较为一致,能够较好地反映出研究区夏季降水充沛、冬季降水较少的季节性降水变化规律。其中,2015 年 10 月上旬和 2015 年 11 月下旬等时段 GPM IMERG 出现轻

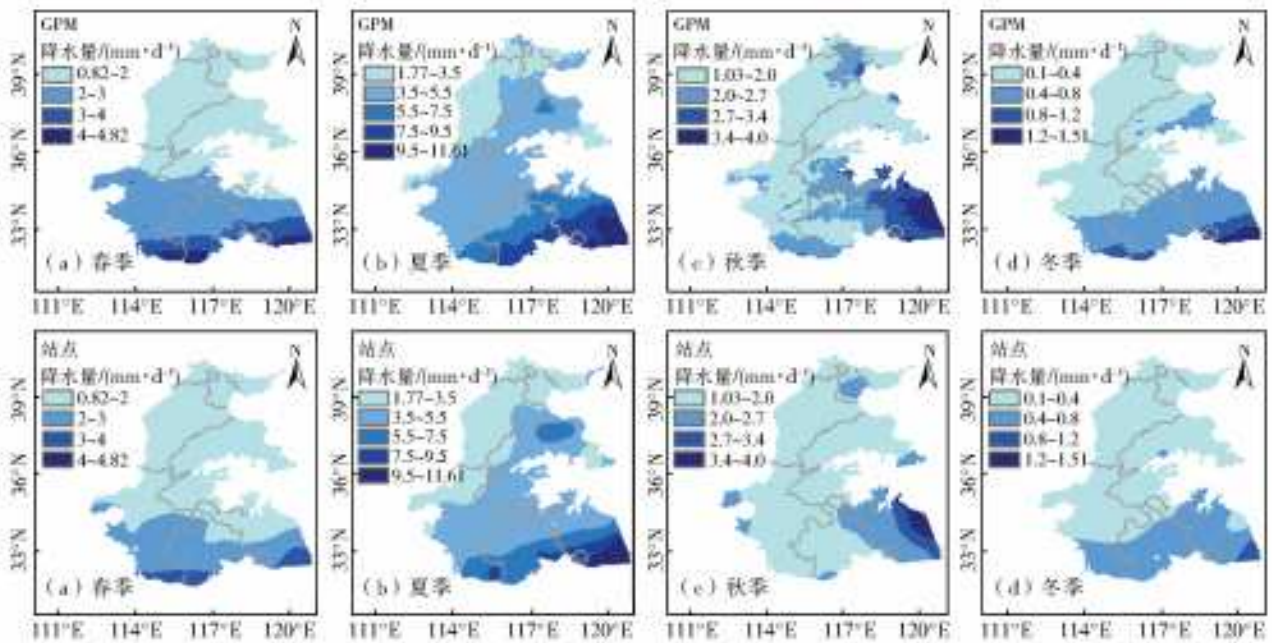


图 6 GPM IMERG 与气象站点季均降水量空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of seasonal average precipitation from GPM IMERG and meteorological stations

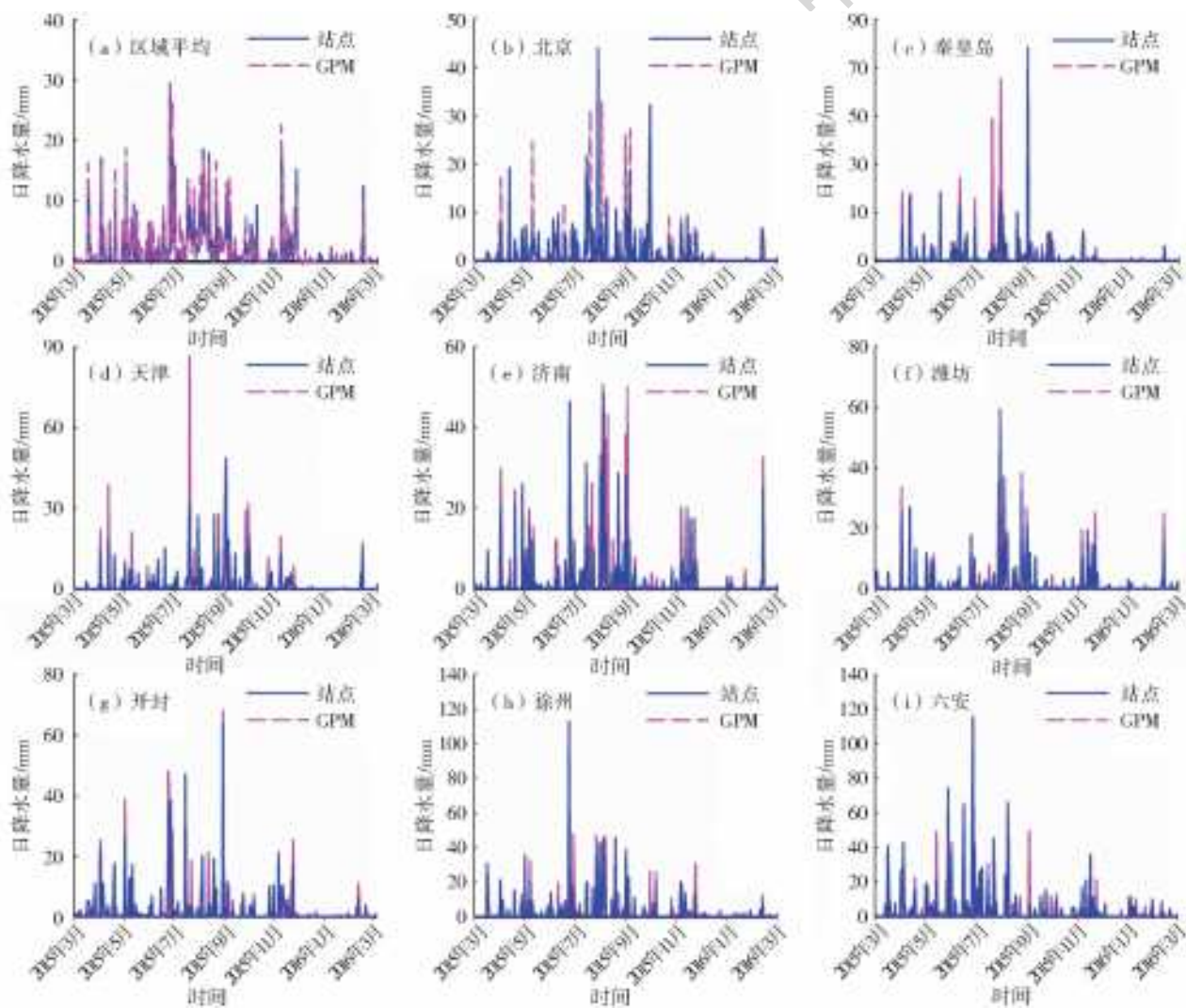


图 7 研究区和典型站点 GPM IMERG 卫星降水与气象站点日降水时间变化趋势

Fig. 7 Comparisons of daily precipitation trends from GPM IMERG and meteorological stations at typical stations

度的高估现象。图 7(b)至 7(i)为 8 个具有代表性且均匀分布的气象站点日降水与对应格网的 GPM

IMERG 日降水时间变化趋势。GPM IMERG 降水产品在北京、秦皇岛、济南等气象站较多时段出现高估现象,尤其在夏季更为明显,而在同时期降水量较多的六安站表现较好。总体而言,GPM IMERG 在选取的 8 个代表性站点均对降水具有不同程度的高估,只有在少数时段对降水存在低估现象,并且 GPM IMERG 与气象站点的月降水量的随时间变化趋势一致。

### 3 结 论

本文基于黄淮海平原 2015 年 3 月 1 日—2016 年 2 月 29 日 59 个气象站点日降水数据,利用 3 个评价指标对 GPM IMERG 卫星降水产品进行了多尺度精度验证,并分析了降水的空间分布特征,主要结论如下。

(1)GPM IMERG 卫星降水产品与气象站点降水数据在日、月和季节尺度上均表现出较好的相关性。GPM IMERG 对降水量的估测表现出轻微的高估现象( $RB>0$ )。

(2)夏季均方根误差最大( $RMSE=1.01$  mm/d),而在降水量较少的冬季均方根误差较小( $RMSE=0.12$  mm/d)。夏季相对偏差最小( $RB=13.00\%$ ),表明 GPM IMERG 在检测强降水方面具有更好的表现。

(3)GPM IMERG 卫星降水数据在日和季节尺度上均能较好地反映出黄淮海平原由南到北降水量逐渐减少的空间分布规律,但在沿海地区会出现明显的高估现象。

(4)GPM IMERG 降水产品与气象站点日降水变化趋势较为一致,能够反映出研究区夏季降水充沛,冬季降水较少的季节性降水变化规律。

总体来说,GPM IMERG 卫星降水产品的精度较高,虽然存在一定的误差,但凭借其较高的时空分辨率能够应用于黄淮海平原的水文气象等方面的研究。研究结果可以为该地区干旱灾害监测和水资源可持续利用提供一定的科学依据。

#### 参考文献(References):

[1] BAGUIS P, ROULIN E, WILLEMS P, et al. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(3-4): 273-286. DOI:10.1007/s00704-009-0146-5.

[2] JIA S F, ZHU W B, LÜ A F, et al. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam basin of China[J].

Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3069-79. DOI:10.1016/j.rse.2011.06.009.

[3] ZHU G, HE Y, PU T, et al. Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration over Hengduan Mountains region from 1960 to 2009[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 71-85. DOI:10.1007/s11442-012-0912-7.

[4] TAN M, DUAN Z. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore [J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 720. DOI:10.3390/rs9070720.

[5] FEIDAS H. Validation of satellite rainfall products over Greece[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(1): 193-216. DOI:10.1007/s00704-009-0135-8.

[6] HAILE A, YAN F, HABIB E. Accuracy of the CMORPH satellite-rainfall product over Lake Tana basin in eastern Africa[J]. Atmospheric Research, 2015, 163: 177-87. DOI:10.1016/j.atmosres.2014.11.011.

[7] 范科科,段利民,张强,等.基于多种高分辨率卫星数据的 TRMM 降水数据降尺度研究——以内蒙古地区为例[J].地理科学,2017,37(9):1411-1421. (FAN K K, DUAN L M, ZHANG Q, et al. Downscaling analysis of TRMM precipitation based on multiple high-resolution satellite data in the Inner Mongolia, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1411-1421. (in Chinese)) DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2017.09.014.

[8] 吴雪娇,杨梅学,吴洪波,等. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用[J].冰川冻土,2013, 35(2):310-319. (WU X J, YANG M X, WU H B, et al. Verifying and applying TRMM TMPA in the Heihe River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 310-319. (in Chinese)) DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0037.

[9] 费明哲,张增信,原立峰,等. TRMM 降水产品在鄱阳湖流域的精度评价[J].长江流域资源与环境,2015, 24(8):1322-1330. (FEI M Z, ZHANG Z X, YUAN L F, et al. Accuracy assessment for TRMM in the Poyang Lake basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2015, 24(8): 1322-1330. (in Chinese)) DOI:10.11870/cjlyzyyhj201508009.

[10] 李琼,杨梅学,万国宁,等. TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的适用性评价[J].冰川冻土,2016, 38(3): 620-633. (LI Q, YANG M X, WAN G N, et al. Analysis of the accuracy of TRMM 3B43 precipitation data in the source region of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 620-633. (in Chinese)) DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0069.

[11] 唐国强,万玮,曾子悦,等.全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J].遥感技术与应用,2015, 30

- (4): 607-15. (TANG G Q, WAN W, ZENG Z Y, et al. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and it's latest development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30 (4): 607-615. (in Chinese)) DOI: 10. 11873/j. issn. 1004-0323. 2015. 4. 0607.
- [12] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31 (12): 2074-85. (JIN X L, SHAO H, ZHANG C, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains [J]. Journal of Nature Resources, 2016, 31 (12): 2074-2085. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 20160057.
- [13] 孔宇. 中国大陆 GPM/IMERG 产品的精度评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017. (KONG Y. Evaluation of the accuracy of GPM/IMERG over the mainland of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017. (in Chinese))
- [14] 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 等. 新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1147-1156. (CHEN X H, ZHONG R D, WANG Z L, et al. Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over south China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (10): 1147-1156. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170202.
- [15] CARACCILO D, FRANCIPANE A, VIOLA F, et al. Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands[J]. Atmospheric Research, 2018, 213: 309-322. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2018. 06. 010.
- [16] LI R, WANG K, QI D. Validating the integrated multisatellite retrievals for Global Precipitation Measurement in terms of diurnal variability with hourly gauge observations collected at 50,000 stations in China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123 (18): 10,423-10,442. DOI: 10. 1029/2018JD028991.
- [17] TAN M L, SANTO H. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia [J]. Atmospheric Research, 2018, 202: 63-76. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2017. 11. 006.
- [18] 李翔翔, 居辉, 刘勤, 等. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J]. 生态学报, 2017, 37 (6): 2054-2066. (LI X X, JU H, LIU Q, et al. Analysis of drought characteristics of Huang-Huai-Hai plain based on SPEI-PM index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (6): 2054-2066. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201511102274.
- [19] 陈诚, 赵书河. 基于 TRMM 降雨数据的中国黄淮海地区干旱监测分析[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 122-129. (CHEN C, ZHAO S H. Drought monitoring and analysis of Huang-Huai-Hai plain based data[J]. Remote Sensing for land and Resources, 2016, 28(1): 122-129. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 01. 18.
- [20] 魏文寿, 胡汝骥. 中国天山的降水与气候效应[J]. 干旱区地理, 1990, 13(1): 29-36. (WEI W S, HU R J. Precipitation and climate conditions of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 1990, 13(1): 29-36. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 1990. 01. 005.
- [21] WEI G, LÜ H, CROW W, et al. Evaluation of satellite-based precipitation products from IMERG V04A and V03D, CMORPH and TMPA with gauged rainfall in three climatologic zones in China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 30. DOI: 10. 3390/rs10010030.
- [22] 董国涛, 樊东, 杨胜天, 等. GPM 与 TRMM 降雨数据在黄河流域适用性分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (3): 81-87. (DONG G T, FAN D, YANG S T, et al. Analysis on the applicability of GPM and TRMM precipitation data in the Yellow River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (3): 81-87. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2018. 03. 013.