

GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度在云南复杂地形区域的评估检验

赵平伟 李斌 王佳妮 杨宏庆 郭萍 龚丽军

(云南省临沧市气象局, 临沧 677099)

摘要 为评估和对比 GPM IMERG、ERA5 降水数据在云南的适用性, 利用 2014 年 4 月至 2018 年 6 月的地面气象观测数据、GPM IMERG 卫星遥感降水产品和 ERA5 再分析降水数据, 采用定量和分类评分 7 项指标评估 GPM IMERG 和 ERA5 日降水产品在云南的适用性。结果表明: 2 种数据存在小雨日雨量高估, 中雨及以上量级雨日雨量低估的问题, ERA5 数据更为突出, 小雨日居多导致降水整体高估; GPM IMERG 数据空、漏报并存, ERA5 则高空报、低漏报严重; 小雨日较多(较少)的区域 2 种数据易出现高漏报(空报); 不同雨强区间 GPM IMERG 秋季降水数据精度最高, 冬季存在低雨强低估, 高雨强高估的不同表现; 20 mm/d 以下中低雨强段上 2 种降水数据与地面站点数据误差较小, 雨强变大, 误差增大, 雨强大于 20 mm/d 时, 2 种数据随雨强增大与站点偏差差异更为显著; 随坡度和起伏度增大 2 种降水数据精度呈变差趋势; 多项指标评估表明 GPM IMERG 降水数据在云南具有更高精度。研究结果为应用和开展农业、水利、水文、气象等相关学科研究提供参考依据。

关键词 GPM IMERG; ERA5; 不同量级雨日; 精度评估; 云南

中图分类号: P412 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190514 **文献标识码:** A

引言

精确降水时空分布的获取对农业生产、水资源管理、旱涝灾害监测等领域起着至关重要的作用, 地面雨量站点观测是传统的降水数据来源, 但在偏远地区和地形复杂地区存在观测站点分布稀疏, 高海拔地区观测站点较少, 资料匮乏, 且后期观测维护费较高等保障困难。加之复杂地形地区往往存在立体型气候明显, 降水分布明显不均, 现有站点数据难以提供精确的时空降水分布数据。

随着卫星遥感技术和数据反演算法的发展和同化了卫星资料及地面、高空等常规观测资料及气象再分析资料的深入应用, 利用卫星观测和再分析资料获取地表降水空间分布已成为新的降水数据来源。其中, 由美国国家宇航局(NASA)开展的全球降水观测(GPM, Global Precipitation Measurement Mission)是热带降水观测计划(TRMM, Tropical Rainfall Measurement Mission)的后续卫星降水计划, 在传承了 TRMM 探测大中型降水的能力外, 提

高了对弱降水(< 0.5 mm/h)和固态降水的探测能力, 更大程度上提高其时空分辨率、观测精度和准确性, 真正实现了全球降水(含雨雪)产品^[1-2]的功能。目前该数据已在中国不同流域和地区^[3-8]、青藏高原^[9]、全国^[10-13]甚至全球尺度^[14]得到了大量的评价和验证。此外, 已有的卫星降水产品精度检验研究中, 较多学者已认识到地形地貌特征对卫星降水产品的精度存在较大影响, 并围绕高程、坡向对卫星降水产品的影响进行了分析^[4, 15-16]。2017 年 7 月发布的 ERA5 再分析资料是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的全球气候第 5 代产品, 在上一代 ERA-Interim 的基础上实现了很大升级^[17-18]。其中降水数据被众多学者应用于气象、水文等方面并取得了众多有意义的研究成果: 例如 Mostafa Tarek 等^[18]发现使用 ERA5 降水数据构建的水文模型能较好反映出北美大部地区的观测结果, 降水偏差较上一代产品有所降低; Caixin Wang 等^[19]研究表明, 与 ERA-Interim 相比, ERA5 降水数据在北极体现出更高的降水量; Ehsan Sharifi 等^[20]研究提出,

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金项目(41165004)、云南省临沧市气象局“短平快”科研项目资助

作者简介: 赵平伟, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要研究方向为气象环境, Email: 7203956@qq.com

收稿日期: 2019 年 12 月 2 日; 定稿日期: 2020 年 9 月 7 日

GPM IMERG 和 ERA5 月降水产品在奥地利都存在高估的问题,当日雨量 >10 mm 时,二者表现出更低的探测率;Xiaoyong Xu 等^[21]研究发现,在阿西尼博因河流域极端水文气候事件的监测中,ERA5 整体要优于 ERA-Interim。综上诸多研究表明:GPM 和 ERA5 降水产品精度整体优于上一代降水产品,GPM 在我国西部,复杂地形和高程地区表现仍旧不佳,雨季(夏季和秋季)降水精度明显高于干季(冬季和春季),两种降水数据在地形复杂的区域对降水的探测能力有限^[8,16,20]。然而,由于发布时间较短,现有的中国大陆 GPM 卫星降水数据精度验证所使用的时间序列大都不超过 2 年,ERA5 降水数据的研究多集中在国外;检验空间尺度多为大区域,掩盖了小的时空尺度的数据差异;对下垫面较复杂的高山峡谷区域检验不足。

本文以低纬复杂地理环境下的云南省为研究对象,以具有更长时序的气象观测站数据为参照标准,采用定量和分类评分指标对 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据进行分析,验证并对比二者在云南的可靠性和代表性。以期应用开展其农业、水利、水文、气象等相关学科研究提供基础和必要的支撑。

1 数据与方法

1.1 研究数据

研究使用的 GPM 卫星降水数据为 GPM 典型代表产品 3 级 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 产品中经过地面雨量站点逐月观测数据的偏差校准的滞时产品“Final-Run”,其精度最接近于实际降水数据^[22-24],使用数据版本为 IMERG-V05(以下简称 GPM IMERG)。数据空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为 1 d,覆盖范围为 $90^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{S}, 180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$ 。使用的 ERA5 降水数据,原始数据空间分辨率为 $0.28125^\circ (31 \text{ km})$,但在下载数据时,可通过双线性插值重采样数据到更高的空间分辨率^[25],为与 GPM IMERG 数据保持一致,本文使用 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率的 ERA5 降水数据,时间分辨率为 1 h,将其进行累计得到逐日降水数据。

为更科学地体现出研究区地貌特征,在 Arcgis 软件中基于 Aster G-DEM (UTM/WGS84, $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 分辨率) DEM 数据采用移动窗口分析法和均值变点法^[26]确定出云南省唯一的最佳统计单元面

积 (0.92 km^2),在此基础上基于高程和地形起伏度根据中国 1:100 万数字地貌图制图规范^[27]制作云南地貌图(图 1),中国陆地 28 类基本地貌形态云南省含 23 类,可见云南具有较复杂的地形地貌特征,是研究山地气候的理想区域。考虑到使用插值方法尤其是在地形复杂区域获得的空间降水数据与实际降水存在较大误差^[7,24],本文以云南省 125 个气象站点降水观测数据为基准(图 1),直接对比空间对应的卫星数据栅格格点值, $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率降水产品下 125 个站点对应了不同的降水格点。受 GPM 数据的限制,研究使用的地面气象观测数据和 2 种降水数据均选用 2014 年 4 月至 2018 年 6 月共 1552 d 的数据集。同时,为使二者时间上相匹配,气象站点逐日降水数据的观测时段为北京时间 (UTC+8) 当日 08:00 至次日 08:00。地面降水数据来源于云南气象信息中心,观测精度为 0.1 mm/d ,各站点降水数据时序完整。

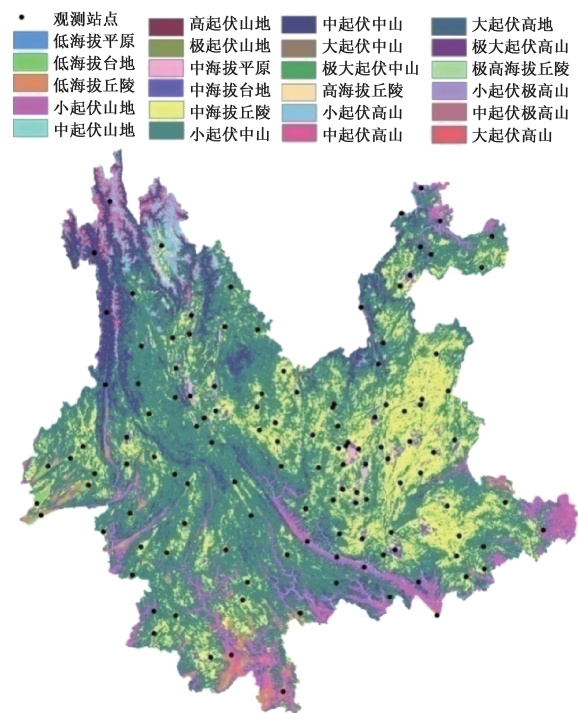


图 1 气象站点及基于高程和地形起伏度的云南地貌分布

1.2 研究方法

为对 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度进行定量评估,本文采用相关系数(CC)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和相对偏差(BIAS)4 个指标^[10]评估降水数据观测精度。其中,CC 用于衡

量降水数据的精度及其与站点观测数据的线性相关程度;MAE 可反映降水数据和站点观测数据的平均绝对偏差程度;RMSE 能反映出降水数据的标准误差,可有效判定降水数据的可靠性;BIAS 直观反映出降水数据存在的系统误差大小及相对程度。

$$CC: C_c = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

$$MAE: M_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |G_i - S_i| \quad (2)$$

$$RMSE: R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_i - S_i)^2} \quad (3)$$

$$BIAS: B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中, n 为样本总数, G_i 为降水产品估计值, S_i 为台站降水值, \bar{G} 和 \bar{S} 为卫星和台站降水值序列均值。

采用探测率(POD)、空报率(FAR)和临界成功指数(CSI)3 个分类指标^[11]评估 2 种降水数据对不同量级降水事件发生的辨识和捕捉能力。其中,POD 表示降水数据准确捕捉实际降水事件的能力,最优值为 1;FAR 表示降水数据对降水事件的空报情况,最优值为 0;CSI 综合考虑了命中与误报情况,反映出降水数据真实监测实际降水事件的能力,最优值为 1。各分类指标计算公式如下:

$$POD: P_{OD} = H/(H + M) \quad (5)$$

$$FAR: F_{AR} = F/(H + F) \quad (6)$$

$$CSI: C_{SI} = H/(H + M + F) \quad (7)$$

式中, H 代表命中降水数量, F 代表空报降水数量, M 代表漏报降水数量。

本文根据气象学中对降水等级的划分规定,选取 0.1~10 mm/d、10~25 mm/d、25~50 mm/d、 ≥ 50 mm/d 作为发生小雨、中雨、大雨、暴雨及以上量级降水的判定标准。

2 结果和讨论

2.1 GPM IMERG 和 ERA5 日降水数据精度和准确性空间分布特征

图 2 为 GPM IMERG 和 ERA5 逐日降水数据

在云南各气象站点评估指标的空间分布和箱形统计图。观察发现,GPM IMERG 降水数据在云南省大部站点呈现出较高的相关性($CC > 0.65$),相关性相对较低($CC < 0.65$)的站点主要分布在边缘地区;ERA5 降水数据与站点降水相关性稍差,均小于 0.65,站点相关性优劣空间分布与 GPM IMERG 存在较大差异,其中相关性稍好($CC > 0.53$)的站点主要集中在中部及以西(2 种数据与所有站点相关系数均通过 0.01 显著性水平)。2 种降水数据 MAE 和 RMSE 的精度空间分布则较为相似,误差较小的区域主要集中在滇西北,而误差较大的区域则出现在滇西、滇南部边缘区域,这一情况与降水量空间分布紧密相关,也就是说降水少的区域,由于降水量总体变化较小,从而导致误差值也相对较低;MAE 和 RMSE 评估指标值 ERA5 均大于 GPM IMERG。从 BIAS 的分布来看,2 种降水产品在云南绝大多数的站点 BIAS 都大于 0,说明 2 种降水数据相对实际降水整体处于高估状态,且 ERA5 高估更为明显。高估严重($BIAS > 25\%$)的点均集中在滇西北,原因可能是该区处于横断山脉,图 1 也表明该区域海拔高度多在中海拔至高海拔(1000~5000 m),起伏度为小起伏至大起伏(200~2500 m)^[27],区内山高谷深,复杂的地形一定程度上限制了卫星传感器有效反演出该区域的降水,增加了再分析资料的优化处理难度。

结合云南 125 个站点 GPM IMERG、ERA5 和实测日降水量数据散点图(图 3)分布来看,随日雨强增大,2 种降水数据散点集中于 1:1 对角线之下的趋势愈为明显。进一步统计发现,125 个站点中 2 种降水数据小雨量级雨日对应的 BIAS 均大于 0,且大于 50%的站点 GPM IMERG(ERA5)多达 67%(100%);中雨量级雨日 BIAS 值小于 0 的站点 GPM IMERG(ERA5)为 83%(93%),其中小于 -25%的分别为 8%、37%;大雨及以上量级雨日仅 GPM IMERG 有 2 个站点 BIAS 值大于 0,小于 -25%的站点 GPM IMERG 增至 56%,ERA5 达 100%。可见,2 种降水数据在小雨量级降水上存在严重的高估现象,当实测日降水量达到中雨及以上量级时,二者则存在低估问题,且随着日雨强的增大低估愈为严重,此现象在 ERA5 中更为突出。

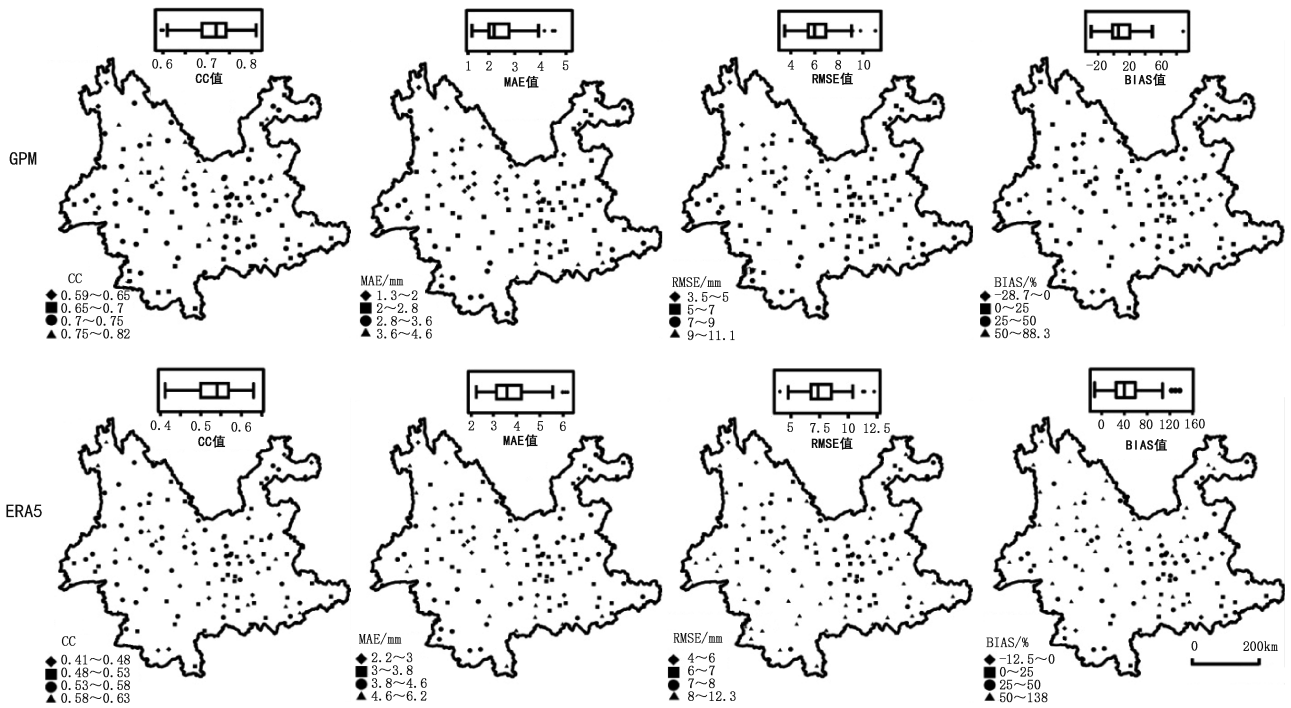


图 2 GPM IMERG 和 ERA5 相关系数(CC)、平均相对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和相对偏差(BIAS)的空间分布及箱形图

(箱形图从做左到右 5 条线依次为下边缘、下四分位数、中位数、上四分位数、上边缘,上下边缘外的点为异常值)

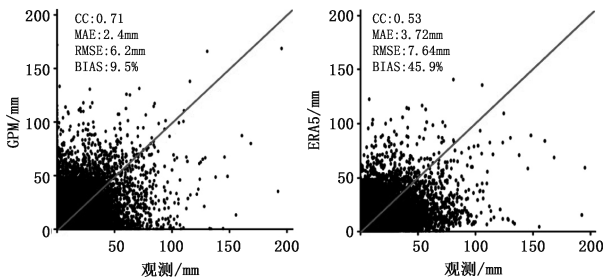


图 3 GPM IMERG 和 ERA5 逐日降水量与观测数据对比散点图

(图中对角线斜率为 1)

从各分类指标的空间分布(图 4)来看,就 GPM IMERG 而言,滇中及以西区域 POD 大都在 0.8 以上,POD 小于 0.75 的站点较为集中,基本分布在滇东的昭通至文山一带,表明该区域 GPM IMERG 数据日降水可能漏报率较大。统计表明,研究时段内各站点 GPM IMERG 数据平均出现漏报 199 d,漏报天数中小雨日数占 98.4%,漏报微量降水(0.1~1 mm)日占漏报小雨日的 71.7%。而滇东地区易受昆明准静止锋天气系统影响,小雨日较多,尤其在

冬季多微量降水,微量降水日基本为 250~500 d(研究时段全省站点平均微量降水日 237 d),其中大关、镇雄两站多达 520 d 以上(POD 均为 0.51,为 POD 值最小站点),较弱的日雨强造成 GPM IMERG 数据漏报情况突出。可见,GPM 传感器虽提高了对弱降水($<0.5\text{mm/h}$)和固态降水的探测能力,但其对云南弱降水尤其是滇东地区弱降水的探测能力仍显不足。从 ERA5 来看,同一站点 POD 明显高于 GPM IMERG 数据,站点 POD 值均大于 0.95,这归因于研究时段 125 个站点 ERA5 数据低漏报率(站点平均 0.038)保证了高的探测率,较漏报为 199 d 的 GPM IMERG,ERA5 仅出现漏报 10 d(小雨日占 97%),漏报率稍高(>0.05)的 25 个站点仍集中在小雨日较多(研究时段站点平均小雨日 608 d)的滇东地区。FAR 值的高值区(>0.25)GPM IMERG 主要出现在滇西北丽江到滇东南文山一带,表明这一带 GPM IMERG 数据日降水空报率较大。这与研究区小雨日数低值区分布高度吻合(研究时段此区域站点实测小雨日多在 460 d 以下,全省站点平均小雨日 501 d)。ERA5 数据中 FAR 高值区(>0.48)与 GPM

IMERG 数据 FAR 高值区较为统一,仍较好对应了站点实测小雨日在 460 d 以下的区域。可见,小雨日较少区域,2 种数据均易出现 FAR 的偏高。研究时段各站点平均空报日数 GPM IMERG 为 177 d(空报为小雨日占 98%),ERA5 高达 588 d(空报为小雨日占 96%),后者空报日数为前者 3.3 倍。2 种降水数据中,GPM IMERG 数据 CSI 高值区($CSI > 0.65$)的分布主要位于滇西北怒江州和滇西南地区,ERA5 数据

CSI 相对大值区($CSI > 0.52$)也集中于此;结合研究时段雨强分布来看,CSI 高值区与雨强高值区重合。而怒江州特有的双雨季造成了这一带多强降水天气的出现^[28];滇西南地区则处于孟加拉湾西南暖湿气流影响的前沿,且云南境内呈西北至东南分布,北起楚雄市,南抵绿春县的哀牢山在西南暖湿气流东进时,因山体阻挡,形成哀牢山以西、以南降水多于东部,故该区域雨强较大。

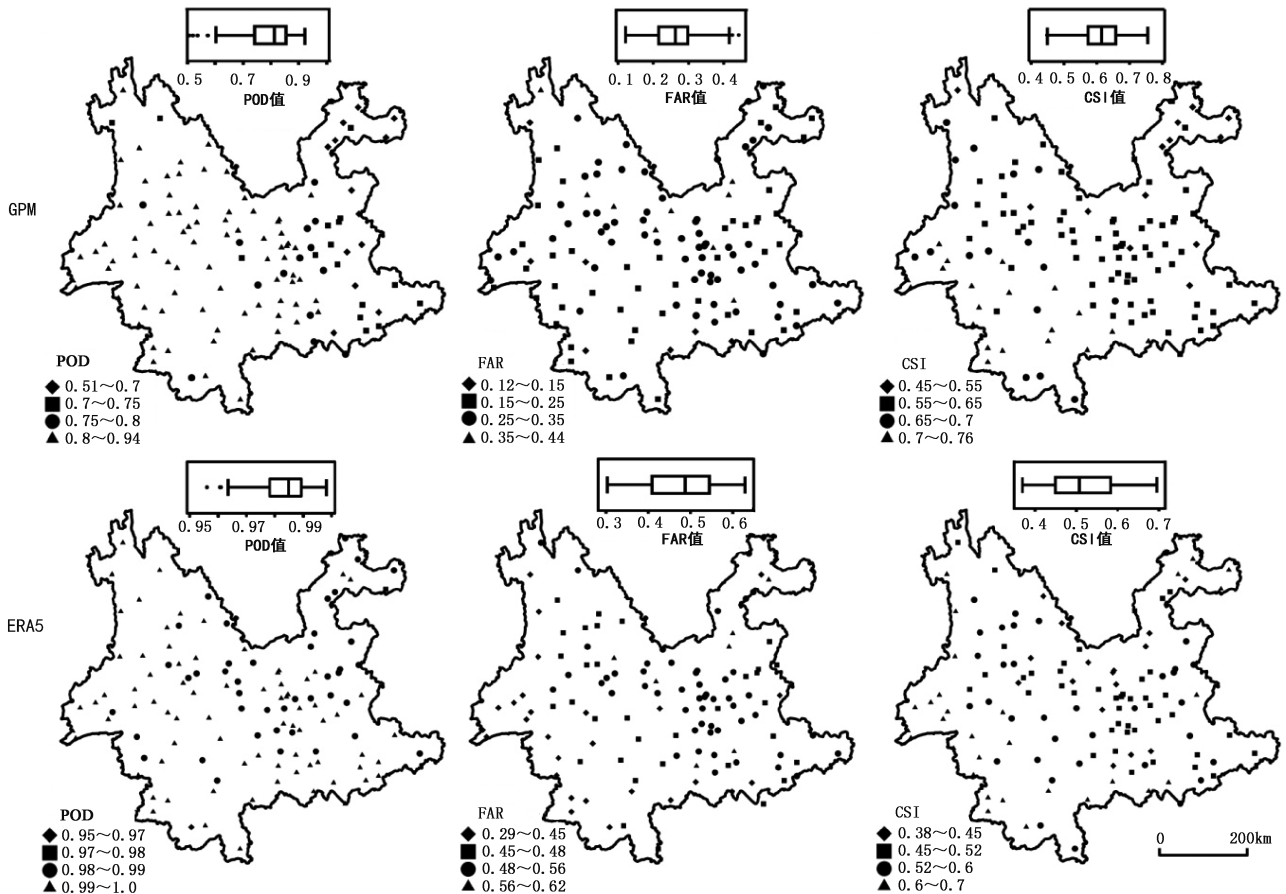


图 4 GPM IMERG 和 ERA5 探测率(POD)、空报率(FAR)和临界成功指数(CSI)的空间分布及箱形图
(箱形图分布同图 2)

从上述分类指标的分析结果来看,当站点实测日雨量达中雨及以上量级降水时,极少有漏报出现,2 种降水数据对较大雨强的辨识和捕捉能力较高。这与任英杰等^[10]使用 GPM IMERG 数据以全国为研究对象,Ehsan Sharifi 等^[20]使用 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据在奥地利进行研究,得到 2 种数据对小雨量级降水事件的捕捉能力较强,随后随着降水量级的增大,捕捉能力逐渐下降的结论截然不同。这说明空间尺度为大区域时,研究结论容易将

小时空尺度的数据差异掩盖,可见开展降水产品在云南的精度检验是有必要的。

2.2 GPM IMERG 和 ERA5 误差时间分布特征

将 GPM IMERG、ERA5 日数据累计得到的月降水和地面站点数据日降水量的误差逐月平均,分析 2 种降水数据月降水估算差异和 MAE、RMSE 随时间的变化特征(图 5)。从图 5 可以看出,由 ERA5 计算得到的月平均 MAE 和 RMSE 均大于 GPM IMERG,2 种降水数据对应的 MAE 和 RMSE

均存在明显的周期性变化,表现为 11 月至次年 3 月误差最小,从 4 月误差开始逐渐增大,到 7 月误差达到最大,随后随时间逐渐减小。这种误差周期性的变化与研究区降水季节性分布密切相关,6、7、8 月为云南主汛期,为一年中降水强度和降水量最大时期,9 月逐渐进入雨季结束期,随着降水量的减少误差随之变小,在冬季达到最低。但在冬季的 2015 年 1 月、2017 年 1 月、2018 年 1 月误差有增大现

象,这是由于近几年来云南冬季受南支槽和冷空气影响明显,月内出现了全省性或区域性强降水天气过程,尤其是 2015 年 1 月 8—9 日,云南省出现强降雨雪天气过程,过程降水强度大,多地破极值,导致 2015 年 1 月 MAE、RMSE 值的突增。整体上 2 种降水数据的月降水大于站点月实测降水,但 GPM IMERG 月降水数据更接近实际降水值。

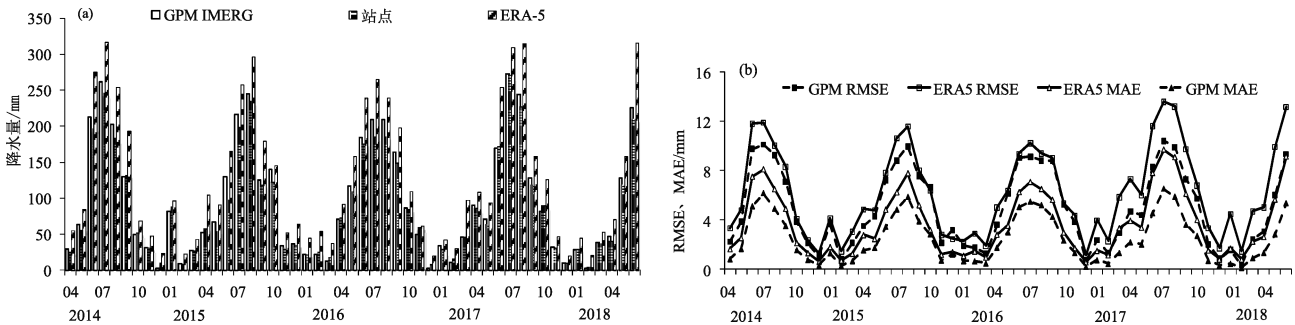


图 5 2014 年 4 月至 2018 年 6 月 GPM IMERG、ERA5、站点月平均降水量(a) 及其绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)(b)

为深入了解 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据的精度季节性变化特征,从研究时段选取自 2014 年 12 月到 2017 年 11 月共 3 年的数据将 2 种降水数据和站点实测数据按春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月至次年 2 月)分季计算,根据统计得到的季节性误差指标(表 1)来看,GPM IMERG 数据对应的精度评估指标中,除夏季外,其余 3 个季节 CC 值均在 0.7 以上;MAE 和 RMSE 仍表现出与降水量在时间上的分布紧密相关,降水较为集中的夏季(降水量占年降水量 52.9%)二者误差最大;在 BIAS 上,GPM IMERG 数据在四季中除冬季整体表现出低估外,其余 3 季都呈高估状态。分析各季节全省 125 个站点平均各量级雨日占平均雨日的比率来看,冬季小雨日占降水日的 89.6%,其次是春季,占 82.4%,降水集中的夏季小雨日所占比率最小,为 69.4%。冬季小雨日占降水日比率最大,但 GPM

IMERG 数据冬季低估的现象显然与前文研究得到“GPM IMERG 数据在小雨量级降水上存在严重高估”的结论相悖。分析发现,与其余 3 季不同,冬季 GPM IMERG 数据小雨日降水量表现出低估,这就造成冬季小雨日所占比率越高,日降水偏差负累计越大;春、夏、秋 3 个季节小雨日占降水日比率虽较冬季低,但仍在各季降水日中占有主导地位,加之有空报日的存在,故 GPM IMERG 数据在春、夏、秋 3 季均表现出了高估。此外,冬季大雨、暴雨及以上降水日 GPM IMERG 数据略呈高估,这也是与其余 3 季低估表现不同之处。ERA5 数据对应的各项精度评估指标在不同季节的优劣表现与 GPM IMERG 数据基本一致。2 种降水数据对应的 POD、FAR 和 CSI 在冬季均表现最差,夏季表现最好,造成这一情况的原因上文已有解释,最主要的因素还是与雨强、雨日在各季节的分布特征密切相关。

表 1 各季节 GPM-IMERG/ERA5 各指标统计

	CC	MAE/mm	RMSE/mm	BIAS/%	POD	FAR	CSI
春季	0.7/0.51	1.63/2.69	4.18/5.56	12.39/65.39	0.82/0.99	0.34/0.54	0.58/0.45
夏季	0.64/0.4	5.21/7.24	9.56/11.37	11.57/45.74	0.91/0.99	0.2/0.29	0.74/0.71
秋季	0.72/0.57	2.49/3.49	6.28/7.03	11.47/44.12	0.72/0.99	0.26/0.47	0.57/0.53
冬季	0.79/0.72	0.64/1.14	2.38/2.88	-8.08/115.3	0.49/0.98	0.37/0.63	0.37/0.36

2.3 不同雨强 GPM IMERG 和 ERA5 探测雨量可靠性分析

为详细研究 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据在不同雨强下的表现,以 X 轴表示超过降水判断阈值的雨强区间分布(取值范围为 1~256 mm/d),并使用指数分布的形式划分区间,Y 轴上的降水量代表研究时段各雨强区间 125 个站点及其相对应的 GPM IMERG(ERA5)格点数据平均日降水量(图 6)。可见,各季节 GPM IMERG 降水数据与地面站点数据在 20 mm/d 以下中低雨强段上拟合较好,表现较为一致。不同之处在于:春季和夏季以 12 mm/d 为界,日雨量小于该雨强时 GPM IMERG 数据表现为高估,反之则低估,但夏季雨强在 80~224 mm/d 区间 GPM IMERG 走向表现为锯齿状分布,表明这个雨强区间 GPM IMERG 数据表现时好时坏;秋季 GPM IMERG 降水数据与地面站点数据在出现的雨强区间(1~160 mm/d)误差最小,二者图上的走

势基本重合;冬季表现则较为不同,GPM IMERG 降水数据大多雨强区间表现出低估,仅在 28~40 mm/d、56~80 mm/d、96~112 mm/d 几个雨强区间略为高估。而整个研究时段上 GPM IMERG 降水数据与地面站点数据的拟合(图略)与春季和夏季最为相似,也表现为在 20 mm/d 以下中低雨强段上拟合较好,以 12 mm/d 为界,当雨强小于 12 mm/d 时,GPM IMERG 数据表现出高估,雨强大于 12 mm/d 时表现为低估,且随着雨强的增大低估愈为严重。对比 GPM IMERG,研究时段和四季 ERA5 降水数据在不同雨强区间主要不同表现为:日雨量小于 10 mm 时 ERA5 数据表现为高估,反之则低估;除冬季 6~14 mm/d 雨强区间外,其余季节和整体时段同一雨强区间高估和低估程度均强于 GPM IMERG。此外,当雨强>20 mm/d 后,ERA5 与站点的差值随雨强增大较 GPM IMERG 更为明显。

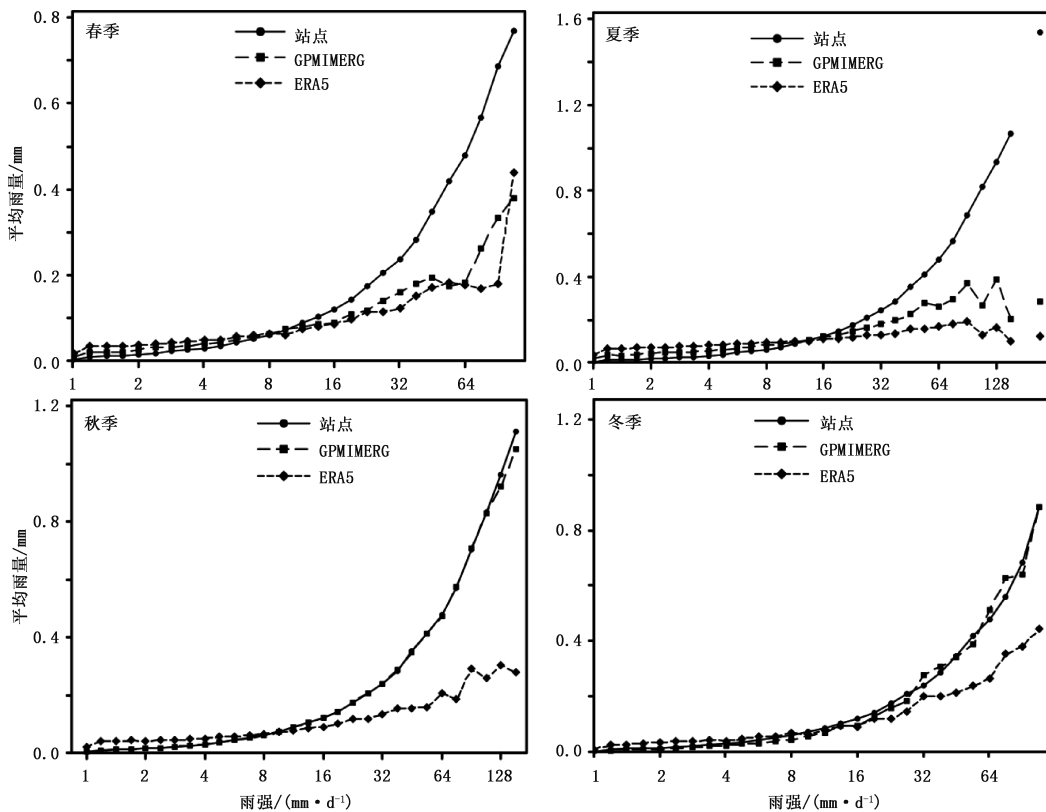


图 6 四季 GPM IMERG 降水数据及地面观测数据不同雨强上平均雨量的分布

2.4 地形对 GPM IMERG 和 ERA5 精度影响分析

为分析地形对 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度造成的影响,在最佳统计单元面积基础上,提

取站点地形起伏度和海拔高度、坡度和坡向 4 个地形指标对 2 种降水数据的 7 类评估指标进行分析,其中坡度、坡向的划分参考文献[29]完成。由表 2

可得,2 种降水数据 BIAS 值在北坡较小;不同坡向上西南坡 MAE 和 RMSE 略高,GPM IMERG 中北坡和西北坡因漏测率稍大(>0.23),导致 POD 和 CSI 稍低。从坡度来看,2 种降水数据 BIAS 值在斜坡最小,MAE 和 RMSE 随坡度增加而变大。除 CC 外,2 种降水数据 MAE、RMSE 和 BIAS 整体呈随海拔升高数值减小的趋势;POD 等 3 项分类指标随海拔变化则差异不大。2 种降水数据各项评估指标中 CC 随起伏度增大略有减小,这与罗布坚参等^[30]在西藏高原对 TRMM 估测降水一致性评估

时,得到相关系数在海拔高度差较小的区域较海拔高度差大的区域偏大的结论基本一致,但又不如其表现明显。这可能因为云南大部地区起伏度较西藏地区变化小,对降水产品与实际降水的相关性影响也相对较小。此外,MAE 和 RMSE 则表现出先增后减的趋势,起伏度大于 400 m 时 BIAS 最大,说明此地形下 2 种数据存在的系统误差相对较大。整体来看,地形变化对 2 种降水数据的精度影响差异不显著,但仍表现出随坡度和起伏度变大精度变差的趋势,随海拔升高精度却有所提升。

表 2 GPM IMERG/ERA5 各指标不同地形统计

	CC	MAE/mm	RMSE/mm	BIAS/%	POD	FAR	CSI	
坡向	北坡 $0\pm 22.5^\circ$	0.69/0.49	2.54/3.91	6.69/7.9	6.06/28.49	0.66/0.99	0.23/0.43	0.55/0.56
	东坡 $90\pm 22.5^\circ$	0.73/0.52	2.33/3.87	6.03/7.87	11.65/54.04	0.82/0.99	0.27/0.48	0.63/0.51
	东北 $45\pm 22.5^\circ$	0.73/0.52	2.47/3.82	6.35/7.82	17.41/53.51	0.79/0.99	0.26/0.47	0.61/0.52
	东南 $135\pm 22.5^\circ$	0.72/0.53	2.38/3.59	6.19/7.45	16.83/48.56	0.78/0.99	0.26/0.48	0.61/0.52
	南 $180\pm 22.5^\circ$	0.71/0.52	2.36/3.45	6.01/7.21	15.72/42.79	0.81/0.99	0.26/0.46	0.63/0.54
	西 $270\pm 22.5^\circ$	0.72/0.53	2.26/3.55	5.86/7.44	12.15/48.76	0.8/0.99	0.27/0.49	0.61/0.51
	西北 $315\pm 22.5^\circ$	0.71/0.56	2.66/3.78	6.58/7.66	13.96/31.32	0.73/0.99	0.24/0.45	0.58/0.55
西南 $225\pm 22.5^\circ$	0.7/0.54	2.75/4.05	6.71/7.97	14.05/42.79	0.82/0.99	0.24/0.43	0.65/0.57	
坡度	平坡 $\leq 5^\circ$	0.72/0.53	2.34/3.49	5.98/7.31	15.4/45.33	0.79/0.99	0.26/0.46	0.62/0.54
	缓坡 $5\sim 15^\circ$	0.72/0.53	2.39/3.68	6.13/7.57	13.75/47.82	0.81/0.99	0.27/0.48	0.62/0.52
	斜坡 $15\sim 25^\circ$	0.72/0.54	2.42/3.58	6.28/7.47	12.24/38.28	0.75/0.99	0.23/0.46	0.61/0.54
	陡坡以上 $>25^\circ$	0.68/0.52	3.13/4.78	7.52/9.16	15.84/46.19	0.76/0.99	0.2/0.4	0.63/0.6
海拔	≤ 1000 m	0.71/0.49	2.76/4.38	6.75/8.54	20.3/61.21	0.81/0.99	0.26/0.45	0.63/0.55
	1000~1250 m	0.71/0.53	2.84/4.11	6.93/8.41	19.56/44.56	0.82/0.99	0.26/0.44	0.63/0.56
	1250~1500 m	0.7/0.53	2.77/4.04	6.78/8.04	14.96/37.9	0.79/0.99	0.23/0.44	0.63/0.56
	1500~1750 m	0.72/0.54	2.34/3.48	6.08/7.29	11.84/36.96	0.79/0.99	0.25/0.47	0.62/0.53
	1750~2000 m	0.73/0.54	2.09/3.29	5.7/7.17	9.1/41.5	0.77/0.99	0.28/0.5	0.59/0.49
	≥ 2000 m	0.71/0.53	1.97/3.25	5.26/6.61	12.33/66.77	0.8/0.99	0.27/0.48	0.61/0.52
起伏度	≤ 100 m	0.73/0.53	2.27/3.52	5.84/7.4	14.86/48.5	0.82/0.99	0.27/0.48	0.63/0.52
	100~200 m	0.71/0.53	2.43/3.64	6.34/7.59	11.48/39.04	0.76/0.99	0.26/0.47	0.6/0.53
	200~300 m	0.7/0.53	2.95/4.22	7.17/8.36	15.6/35.19	0.77/0.99	0.22/0.44	0.63/0.56
	300~400 m	0.71/0.55	2.63/3.97	6.79/8.01	10.61/45.47	0.74/0.99	0.25/0.46	0.59/0.53
	≥ 400 m	0.68/0.53	2.59/4.14	6.37/7.78	17.76/67.5	0.78/0.99	0.25/0.42	0.61/0.58

综上,低雨强高估,高雨强低估是 GPM IMERG 降水数据存在的共性问题^[7,14,31],此问题在 ERA5 降水数据中表现更为突出;较 ERA5 降水数据,除 POD 外,其余各项评估指标均表明 GPM IMERG 降水数据在云南具有更高的精度。文中的研究表明 GPM IMERG 降水数据在云南存在冬季低雨强低估,高雨强高估的问题。前人的研究中尚未得到类似结论,较大的可能仍为研究的尺度较大,导致研究结论将小时空尺度的数据差异掩盖。GPM IMERG 降水数据在云南冬季反映出的问题可能是研究区具有多种气候类型^[32]、受不同天

气系统影响^[33]以及复杂的地理环境共同作用所致,造成同样的降水反演算法在冬季出现不同的反演结果。今后 GPM IMERG 数据矫正算法的改进上应将这一问题考虑进去,以更好提高 GPM IMERG 数据在一些地形复杂区域的估算精度。此外,2 种降水数据的精度随海拔升高有一定提升,在地面站点数据质量得到保证的前提下,应加密站点数据进行深入研究。

3 结论

本文基于云南 2014 年 4 月至 2018 年 6 月的

GPM IMERG、ERA5 降水产品和地面气象观测数据,采用定量和分类评分指标评估了 2 种日降水数据在云南的适用性,得到如下主要结论:

(1)较 ERA5,GPM IMERG 降水数据在云南具有更好的适用性,日尺度上 GPM IMERG(ERA5)数据与站点数据相关系数为 0.71(0.53),平均绝对误差为 2.4 mm(3.7 mm),均方根误差为 6.2 mm(7.6 mm),相对偏差为 9.5%(45.9%);降水探测率为 79%(99%),空报率为 26%(46%),临界成功指数为 62%(53%)。

(2)整体来看,2 种降水数据在云南均存在小雨日高估,中雨及以上量级雨日低估的问题,且随着雨强的增大,低估愈为严重,这一问题在 ERA5 上尤为突出。小雨日在总雨日的主导地位决定了 2 种降水数据在云南呈现降水高估的问题。

(3)2 种数据对小雨量级降水事件的监测能力较差,小雨日较多(较少)的区域容易出现降水的漏报(空报);ERA5 数据高空报、低漏报导致 POD 较高,CSI 较低;雨强、雨日在四季的不同分布特征造成 2 种数据在四季的估计精度表现不一。

(4)2 种降水数据在 20 mm/d 以下中低雨强段上与地面站点数据误差较小,雨强大于 20 mm/d 时,二者与站点的降水趋势偏离随雨强的增加差异变大;GPM IMERG(ERA5)数据在雨强小于 12 mm/d(10 mm/d)时呈高估,反之低估;不同雨强上 GPM IMERG 降水数据在秋季精度表现最好;与其余 3 季不同,GPM IMERG 降水数据在云南存在冬季低雨强低估,高雨强高估的问题。

(5)整体上看 2 种降水数据精度受地形影响的差异并不显著,但仍表现出随坡度和地形起伏度变大精度变差的趋势,随海拔升高精度却有所提升。

参考文献

- [1] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The global precipitation measurement mission [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(5): 701-722.
- [2] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J. Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) technical documentation [DB/OL]. NASA Goddard Space Flight Center and Science System Application. [2019-12-02]. https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_doc.pdf, 2015.
- [3] 李媛媛,宁少尉,丁伟,等.最新 GPM 降水数据在黄河流域的精度评估[J].*国土资源遥感*,2019,31(1):164-170.
- [4] 王思梦,王大钊,黄昌.GPM 卫星降水数据在黑河流域的实用性评估[J].*自然资源学报*,2018,33(10):1847-1860.
- [5] Lu X Y, Wei M, Tang G Q, et al. Evaluation and correction of the TRMM 3B43V7 and GPM 3IMERGM satellite precipitation products by use of ground-based data over Xinjiang, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(5): 209.
- [6] 陈茜,官莉.GPM 卫星反演降水产品在江苏地区的适用性[J].*气象科技*,2018,46(6):1103-1110.
- [7] 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.
- [8] 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):2074-2085.
- [9] Xu R, Tian F Q, Yang L, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42 V7 rainfall products over southern Tibetanplateau based on a high-density rain gauge network [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(2):910-924.
- [10] 任英杰,雍斌,鹿德凯,等.全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估[J].*湖泊科学*,2019,31(2):560-572.
- [11] 陈爱军,孔宇,陆大春.应用 CGDPA 评估中国大陆地区 IMERG 的降水估计精度[J].*大气科学学报*,2018,41(6):797-806.
- [12] 李麒麟,张万昌,易路,等.GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J].*水科学进展*,2018,29(3):303-313.
- [13] Tang G Q, Ma Y Z, Long D, et al. Evaluation of GPM day-1 IMERG AND TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 152-167.
- [14] Liu Z. Comparison of integrated multi-satellite retrievals for GPM(IMERG) and TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) monthly precipitation products: initial results [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(3): 777-790.
- [15] 刘俊峰,陈仁升,卿文武,等.基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征[J].*水科学进展*,2011,22(4):447-453.
- [16] 杨云川,程根伟,范继辉,等.卫星降雨数据在高山峡谷地区的代表性和可靠性[J].*水科学进展*,2013,24(2):24-33.
- [17] 朱景,袁慧珍.ERA 再分析陆面温度资料在浙江省的适用性[J].*气象科技*,2019,47(2):289-298.
- [18] Tarek M, Brissette F P, Arsenaault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(5): 2527-2544.
- [19] Wang C, Graham R M, Wang Kegu, et al. Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(6): 1661-1679.
- [20] Sharifi E, Eitzinger J, Dorigo W. Performance of the State-of-the-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1-20.
- [21] Xu Xiaoyong, Frey S K, Boluwade A, et al. Edward Sudicky. Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, 24(8): 1-18.
- [22] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al. Developing

- the integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) [J]. *Acta Paulista De Enfermagem*, 2012, 25(1): 146-150.
- [23] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J. Intergrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) [R]. Technical Documentation NASA, 2018.
- [24] Tan M, Ibrahim A, Duan Z, et al. Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 1504-1528.
- [25] Skok G, Žagar N, Honzak L, et al. Precipitation intercomparison of a set of satellite- and raingauge-derived datasets, ERA Interim reanalysis, and a single WRF regional climate simulation over Europe and the North Atlantic [J]. *Theor Appl Climatol*, 2016, 123: 217-232.
- [26] 王玲, 同小娟. 基于变点分析的地形起伏度研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2008, 13(6): 65-67.
- [27] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1 : 100 万数字地貌分类体系研究[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 707-724.
- [28] 赵平伟, 郭萍. 1980—2013 年滇西北地区降雨侵蚀力变化特征[J]. *地理科学*, 2015, 35(10): 1306-1311.
- [29] 刘爱利. 基于 1 : 100 万 DEM 的我国地形地貌特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2004.
- [30] 罗布坚参, 翟盘茂, 假拉, 等. 西藏高原测站降水与 TRMM 估测降水一致性评估[J]. *气象*, 2015, 41(9): 1119-1125.
- [31] Tan J, Petersen W A, Tokay A. A novel approach to identify sources of errors in IMERG FOR GPM ground validation [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(9): 2477-2491.
- [32] 段旭, 陶云, 段长春. 云南省细网格气候区划及气候代表站选取[J]. *大气科学学报*, 2011, 34(3): 336-342.
- [33] 许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 云南省天气预报员手册[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 10-97.

Accuracy Evaluation and Comparison of GPM IMERG and ERA5 Precipitation Products over Complex Terrain of Yunnan

ZHAO Pingwei LI Bin WANG Jiani YANG Hongqing GUO Ping GONG Lijun
(Lincang Meteorologica Service, Yunnan, Lincang 677099)

Abstract: The uncertainty of the satellite precipitation products limits their applicability in complex terrain areas. This paper evaluates the applicability of the new rainfall products, GPM (Global Precipitation Measurement) IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) and ERA5 precipitation in Yunnan Province area based on the meteorological data. The data of a total of 125 weather stations from April 2014 to June 2018 are used to evaluate and compare the accuracies of GPM IMERG and ERA5. The correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), relative bias (BIAS), Mean Absolute Error (MAE) and the classification statistical analysis indexes (POD, FAR, CIS) are used to assess the applicability of GPM IMERG and ERA5. The result shows that: The two kinds of data have the problems of overestimation of daily precipitation of light rainfall and underestimation of daily precipitation of moderate and above rainfall, and ERA5 data is more prominent in this respect. GPM IMERG data have both higher false and missing alarm rates, while ERA5 data have seriously higher and lower missing rate, especially in light rain days. The areas with more (less) light rain days are in good agreement with the two areas with higher missing (false) rates. In autumn, the precipitation data accuracy of GPM IMERG is the highest in different rain intensity ranges. In winter, there are different performances: underestimation of low rain intensity and overestimation of high rain intensity. For the medium and low rainfall intensity of below 20 mm/d, the errors between the two precipitation data and ground station data are relatively small, and the errors increase with the increasing rain intensity. When the rain intensity is greater than 20 mm/d, the difference between the two data and the station increases more significantly with the increasing rain intensity. With the increase of slope and fluctuation, the accuracy of two kinds of precipitation data presents a trend of deterioration. The evaluation indexes show that GPM IMERG precipitation data have higher accuracy in Yunnan. The research results provide a reference for the application and development of agriculture, water conservancy, hydrology, meteorology and other related disciplines.

Keywords: GPM IMERG; ERA5; precipitation product; accuracy evaluation; Yunnan