



ScienceDirect上提供的内容列表

环境遥感

期刊主页: www.elsevier.com/locate/rse



过去二十年卫星降水产品是否有所改进?GPM IMERG 与九个卫星和再分析数据集的全面比较



国强坦加,b,c, ,马丁·P·克拉克,b ,西蒙·迈克尔·帕帕莱西奥ub,d,e ,马自强 ,杨红

^a 萨斯喀彻温大学冷水实验室,加拿大艾伯塔省坎莫尔 T1W 3G1
^b 加拿大萨斯喀彻温省萨斯卡通市萨斯喀彻温大学文学中心 S7N 1K2
^c 清华大学水利水电工程系,水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084
^d 萨斯喀彻温大学土木、地质与环境工程系,加拿大萨斯喀彻温省 S7N 1K2
^e 布拉格捷克生命科学大学环境科学学院
^f 北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所,北京 100871,中国g 俄克拉荷马大学土木工程与环境科学学院,诺曼,俄克拉荷马州 73019,美国

| 文章信息 | 抽象的 |
|---|---|
| <p>Edited by Menghua Wang</p> <p>关键字: 艾默生 卫星降水 再分析降水 降雪 错误分析 昼夜循环</p> | <p>https://gpm.nasa.gov/data/imerg</p> <p>全球降水测量综合多卫星反演 (IMERG) 可生成最新一代卫星降水估计值,自 2014 年发布以来得到了广泛应用。IMERG V06 提供自 2000 年以来的全球降雨和降雪数据。本研究全面分析了 2000 年至 2018 年中国 IMERG 产品在每日和每小时尺度上的质量,特别关注降雪估计值。将 IMERG 的性能与九种卫星和再分析产品 (TRMM 3B42、CMORPH、PERSIANN-CDR、GSMaP、CHIRPS、SM2RAIN、ERA5、ERA-Interim 和 MERRA2)进行了比较。结果表明,IMERG 产品的表现优于其他数据集,但全球卫星降水测绘 (GSMaP) 除外,GSMaP 使用每日尺度的站点数据来调整卫星降水估计值。IMERG 使用的月尺度站点数据调整对日尺度和小时尺度降水发生和强度的估计影响自然有限。由于被动微波样本数量的增加,IMERG 的质量随着时间的推移而提高。SM2RAIN、ERA5 和 MERRA2 也表现出随时间推移而增加的准确性,这可能会导致其在气候研究中的表现不尽相同。即使依靠月尺度站点数据调整,IMERG 在小时尺度的准确性指标和昼夜周期的再现方面也表现出良好的性能。相比之下,尽管 ERA5 在日尺度上是可接受的,但由于在再现峰值时间、幅度和昼夜周期变化方面存在局限性,它在小时尺度上的表现会下降。</p> <p>与测量仪和再分析数据相比,IMERG 低估了降雪量。三重共置分析表明,IMERG 降雪量比再分析和测量仪数据更差,这在一定程度上导致 IMERG 在寒冷气候下的质量下降。这项研究展示了有关各种降水产品不确定性的新发现,并确定了算法改进的潜在方向。这项研究的结果将对卫星降雨产品的开发者和用户都有用。</p> |

| | |
|---|---|
| <p>1. 简介</p> <p>卫星遥感是估算全球降水的一种实用方法 (Huffman 等,2007; Hong 等,2012)。虽然雨量计、天气雷达和海洋浮标在点或区域尺度上更准确,但它们无法实现全球覆盖 (Yong 等,2015; Duan 等,2016; Beck 等,2019)。1997年 11 月 27 日发射的热带降雨测量任务 (TRMM) 为热带和亚热带地区提供了宝贵的降水数据 (Kummerow</p> | <p>et al., 1998; Kummerow et al., 2000; Kidd and Huffman, 2011),为扩展TRMM,全球降水测量 (GPM)核心观测站于2014年2月28日启动,改进了对轻降水和固体降水的估计 (Hou et al., 2014; Kirschbaum et al., 2017)。GPM的综合多卫星反演 (IMERG; Huffman et al., 2019)算法旨在使用TRMM和GPM时代所有可用的传感器,以30分钟和0.1°的分辨率生成全球降水估计值。</p> <p>本研究的目的是提供全面的评估</p> |
|---|---|

通讯作者地址:加拿大艾伯塔省坎莫尔市 Sidney 街 1151 号 116 单元。
电子邮件地址: guoqiang.tang@usask.ca (G.唐)。
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>收到日期:2019 年 9 月 11 日;修订版收到日期:2020 年 1 月 28 日;接受日期:2020 年 1 月 30 日可于 2020 年 2 月 14 日在线获取
0034-4257/© 2020 Elsevier Inc. 保留所有权利。

G.唐,等人。

环境遥感 240 (2020) 111697

长期 IMERG 降水估计值。先前的研究表明,总体而言,IMERG 产品的性能优于其他卫星降水数据集,例如 TRMM 多卫星降水分析 (TMPA) 3B42/3B42RT (例如, Asong 等人,2017; Dezfuli 等人,2017; Liu,2016; Tan 等人,2016; Tang 等人,2016a; Skofronick-Jackson 等人,2017; Wang 等人,2018; Jiang 和 Bauer-Gottwein, 2019),但这些研究仅限于 2014 年 GPM 核心观测站启动之后的时期。这个短暂的周期限制了 IMERG 产品的应用,例如在多源合并长期数据集中的应用,如多源加权集合降水 (MSWEP; Beck 等人,2019)。然而,IMERG 的最新版本采用了回顾性处理和更新的 06 版 (V06) 算法,涵盖了从 2000 年 6 月开始的时期。V06 算法包含几项重大改进,可以提高 IMERG 降水估计的质量。同时,IMERG 涵盖的更长周期使其在水文和气候学研究中更实用。IMERG 的另一个贡献是降水相位的估计(Huffman 等人,2019)。IMERG采用了Sims和Liu (2015)开发的查找表方法,并且不考虑混合相位,因为混合相位出现得很少并且缺乏可靠的观测。鉴于新的功能,本文评估了长期回顾性 IMERG 产品,重点关注降雨和降雪估计。

IMERG 提供的准全球降雪估计值可用于山区和高纬度地区的水文研究。降水分为降雨和降雪会影响许多水文过程 (Berghuijs 等人,2014 年; Harpold 等人,2017 年),包括截留、蒸发、渗透以及峰值和基流的时间和强度 (Safeeq 等人,2014 年; Wang 等人,2016 年; Behrangi 等人,2018 年)。此外,降水包括降雨和降雪,而降雨/降雪分别指液相/固相降水。降水阶段的这种变化很重要,正如最近揭示融雪径流趋势的研究所强调的那样 (Chen 等人,2017; Immerzeel 等人,2009; Immerzeel 等人,2010; Li 等人,2017)。尽管使用 CloudSat 云剖面雷达的观测结果评估了 GPM 双频雷达 (DPR) 和微波成像仪 (GMI) 的降雪数据 (Panegrossi 等人,2017; Tang 等人,2017),但由于缺乏可靠的地面观测,IMERG 降雪估计的性能仍未得到探索。

本研究的目的是三方面:(1)利用中国密集测量网络研究 IMERG 每日和每小时回顾性产品的质量;(2)将 IMERG 与九种常用卫星和再分析降水产品的性能进行比较;(3)评估基于三重配置 (TC)的 IMERG 和再分析降雪估计的准确性。展示并讨论了各种降水产品不确定性的新发现。

2. 研究领域、数据集和方法

2.1 研究区域

中国研究区位于东经73°~135°、北纬18°~53°之间 (图1a),海拔从西向东递减 (图1c)。根据地形和气候条件,中国可分为八个亚区 (Wang et al.,2018)。本文分析了三个典型亚区 (图1c):气候和地形复杂的青藏高原 (TP) (Yao et al.,2012)、天山所在的新疆 (XJ)气候干燥 (Lu et al.,2019)和冬季气候寒冷的高纬度东北地区 (NE)。卫星降水产品在这些地区容易产生较大的不确定性 (Tang et al., 2016a)。因此选择这些区域作为研究区域是合理的。雨量站主要分布在华东和华南地区 (图1a,b),受季风气候影响,降水量从华东南向西北减少 (图1d)。

2.2. 数据集

2.2.1. 雨量计数据 为了评估卫星

和再分析产品,我们使用了两套地面数据集。对于日尺度评估,我们使用了中国气象局开发的基于雨量计的日降水分析系统 (CGDPA) (Shen 和 Xiong,2016)。CGDPA使用最佳插值法 (Gandin,1965)基于大约 2400 个雨量计生成 0.25° 的连续日降水 (图1a)。CGDPA 因其高精度而被用于评估卫星降水数据集 (Li 等,2018; Tang 等,2016a)。本研究仅使用 0.25° 网格单元和至少一个雨量计来评估 2000 年至 2018 年的各种产品。对于小时尺度评估,我们使用了来自 30,000 多个雨量计的地面观测数据 (图1b)。需要注意的是,由于冬季冰冻天气,华北和西部地区的台站数据不太可靠,因此小时尺度的研究期仅限于 2013 年至 2015 年的夏季 (6 月至 8 月)。

2.2.2. 卫星和再分析降水产品 七份卫星和三份再分析降水数据集与表1 中

总结的基本信息和参考文献进行了比较。全球降水气候学计划 (GPCP; Huffman 等,1997)被排除在外,因为其 1° 分辨率低于其他卫星产品。合并数据集 (如 MSWEP)被排除在外,因为本研究侧重于独立降水数据集,以便于深入分析反演算法。此外,我们只包括测量仪调整的卫星产品 (SM2RAIN 除外),因为它们通常比仅卫星产品更准确 (例如, Tang 等,2016a; Beck 等,2017) 并且在回顾性水文应用中是首选,例如,用于过程理解和水平衡问题 (例如Adler 等,2017; Chen 等,2017)。SM2RAIN 不纳入测量观测,但之所以选择它,是因为它的估计值基于土壤湿度数据,可以补充传统的检索方法。

回顾性 IMERG V06 产品与以前的版本相比有一些重大改进。首先,使用气候预测中心 (CPC) MORPHing 技术 (CMORPH; Joyce 等,2004; Joyce 和 Xie,2011),以前的 IMERG 版本采用地球静止红外 (GEO-IR) 数据来计算降水系统的运动矢量。然而,GEO-IR 有两个主要限制,即 (1) 基于红外的云顶运动与地面降水运动不匹配,以及 (2) 视角限制导致的有限纬度覆盖 (60°N–S)。因此,V06 算法利用再分析数据中的总可降水量来驱动变形方案(Tan 和 Huffman,2019)。其次,IMERG 结合了基于 Goddard 剖面算法 (GPROF; Kidd 等人,2016; Kummerow 等人,2015)的 TRMM 微波成像仪 (TMI) 估计值和基于降水检索和剖面方案 (PRRS;Kidd,2018) 的 Megha-Tropiques 探测垂直湿度剖面 (SAPHIR) 估计值。第三,被动微波估计值在高纬度地区发生变化,以减少空间差距 (有关更多详细信息,请参阅Huffman 等人 (2019))。

IMERG 最终运行产品包括两个降水变量,即未经测量仪调整的微波红外估计值 (IMERG_uncal) 和基于全球降水气候中心 (GPCC) 月测量仪分析的校准产品 (IMERG_cal)。对 IMERG_cal 和 IMERG_uncal 的分析旨在解决两个具体问题:(1) 仅卫星估计值的当前质量如何,(2) 测量仪调整有多大用处。0.25° 和 3 小时分辨率的 TMPA 3B42 V7 (T3B42; Huffman 等人,2007; Huffman 等人,2010)是 IMERG 的前身。T3B42 也使用 GPCC 数据按月进行校正。CMORPH 和 GSMaP 结合了 CPC 每日测量仪分析。PCDR 是通过使用 GPCP 月降水量调整利用人工神经网络 (PERSIANN) 估计的遥感信息降水量估计而得出的。

CHIRPS 包含五个公共测量数据流和几个私人

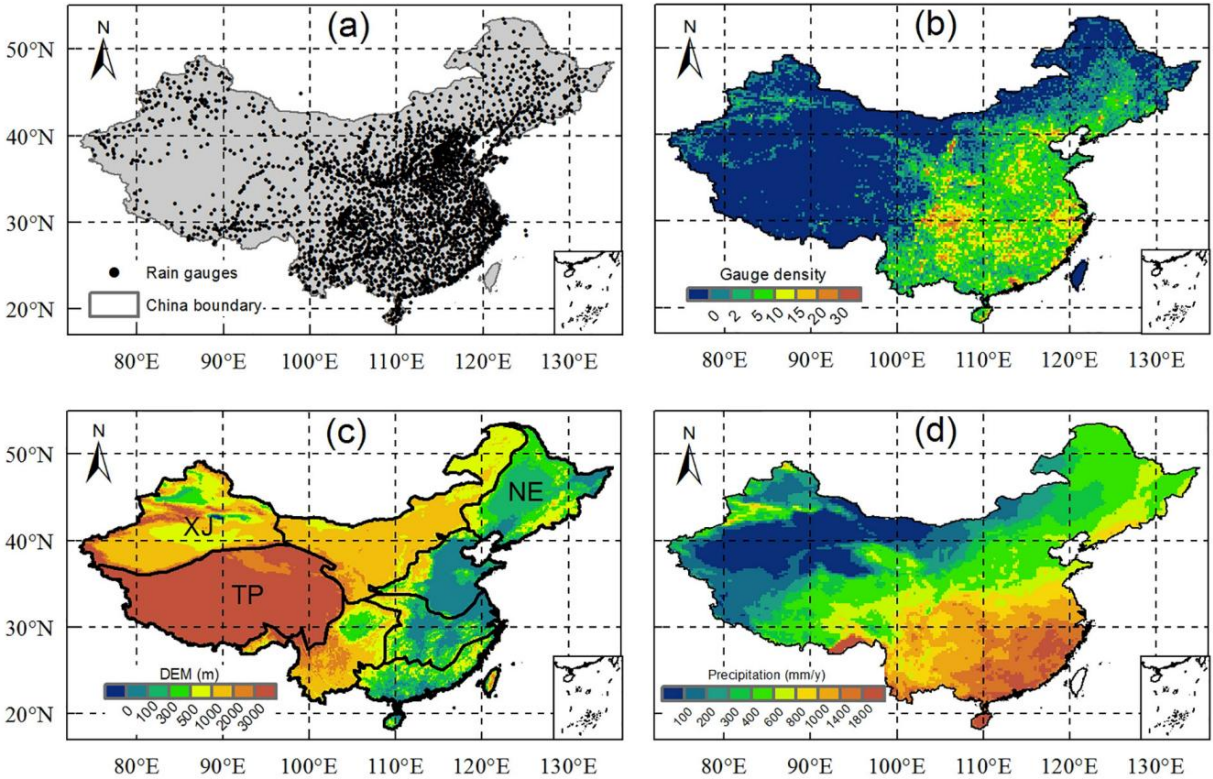


图 1. (a) 中国约 2400 个日雨量计的空间分布, (b) > 30,000 个小时雨量计的密度, 比例尺代表每 0.25° 网格单元的站点数, (c) DEM 和八个子区域的划分, 其中包括青藏高原 (TP)、新疆 (XJ) 和东北 (NE) 突出显示, (d) 基于地面观测的 2000 年至 2018 年每年平均降水量。

表 1

本研究中使用的卫星和再分析降水数据集的摘要。

| 数据集 | 数据集的全名 | 解决 | 时期 | 参考 |
|----------|------------------------------------|--------------------|------------|--------------|
| 卫星降水数据集 | | | | |
| 艾默生 | GPM 最终运行 V06B 的综合多卫星检索 | 0.1°/0.5 小 | 2006.6-至今 | 霍夫曼等人。(2019) |
| T3B42 | TRMM 多卫星降水分析 (TMPA) 3B42 V7 | 时 0.25°/3 | 今 1998-至今 | 霍夫曼等人。(2007) |
| 变形金刚 | 气候预测中心 (CPC) MORPHING 技术偏差校正 (CRT) | 小时 0.25°/ | 1983-至今 | 乔伊斯等人。(2004) |
| 聚氧乙烯 | PERSIANN-气候数据记录 | 3 小时 0.25°/ | 至今 1981-至今 | 阿苏里等人。(2015) |
| 移动地图 | 测量仪调整的全球降水卫星测绘 V6/V7 | 1 天 0.1°/ | 1998-2015 | 梅加等人。(2014) |
| 喇叭 | 气候灾害组 红外降水站 | 1 小时 0.05°/ | | 芬克等人。(2015) |
| SM2RAIN | 基于 ESA 气候变化倡议 (CCI) 的 SM2RAIN | 1 天 0.25°/1 天 | | 夏巴塔等人。(2018) |
| 再分析降水数据集 | | | | |
| 时代5 | ECMWF 第五代全球气候大气再分析 | ~0.25°/1小时 | 1979 年至今 | C3S (2017) |
| ERA-同时 | ECMWF 再分析中期 | ~0.75°/3小时 | 1979 年至今 | 迪伊等人。(2011) |
| MERRA2 | 现代研究与应用回顾分析, 第二版 | ~0.5° × 0.625°/1小时 | 1980 年至今 | 格拉罗等人。(2017) |

Funk 等人 (2015 年) 详述的档案。

使用了三种再分析产品, 因为它们是全球降水, 在寒冷天气中的表现可能优于卫星产品季节和高纬度 (Serreze 等人, 2005; Tang 等人, 2018a; Beck et al., 2019)。更重要的是, 再分析模型提供了降雪可以使用以下估计值来评估 IMERG 降雪估计值三重托管 (见第 2.3.3 节)。ERA5 是新一代欧洲中期天气中心的全球再分析具有更高分辨率的预报 (ECMWF) 与 ERA-Interim 相比, MERRA2 是另一种广泛使用的重新分析产品, 由美国国家航空航天局开发

管理局 (NASA)。再分析和卫星产品的比较有利于了解它们的误差特征

并找出需要改进的领域。

所有卫星和再分析产品均以 0.25° 分辨率重新采样, 并累积到每日尺度, 以与测量仪保持一致

观测。重采样方法是对 IMERG 进行空间平均

GSMaP 的分辨率为 0.1°, CHIRPS 的分辨率为 0.05°。

对于每个 0.25° 网格单元, 降水估计值计算为所有 0.1°/0.05° 网格单元的面积加权平均值, 这些网格单元完全/部分包含在 0.25° 单元内。对于分辨率小于 0.25° 时, 采用线性插值。尽管研究采用各种降水产品, 主要重点是揭示 IMERG 产品的误差特性并分析其优点/IMERG 算法的缺点。

2.3. 方法论

2.3.1. 统计指标

有几种指标可用于评估降水产品的性能。我们使用皮尔逊相关系数 (CC) 来描述参考 (即雨量计) 和目标之间的相关性

(即卫星和再分析) 数据集, 以及平均误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE) 来描述误差特征

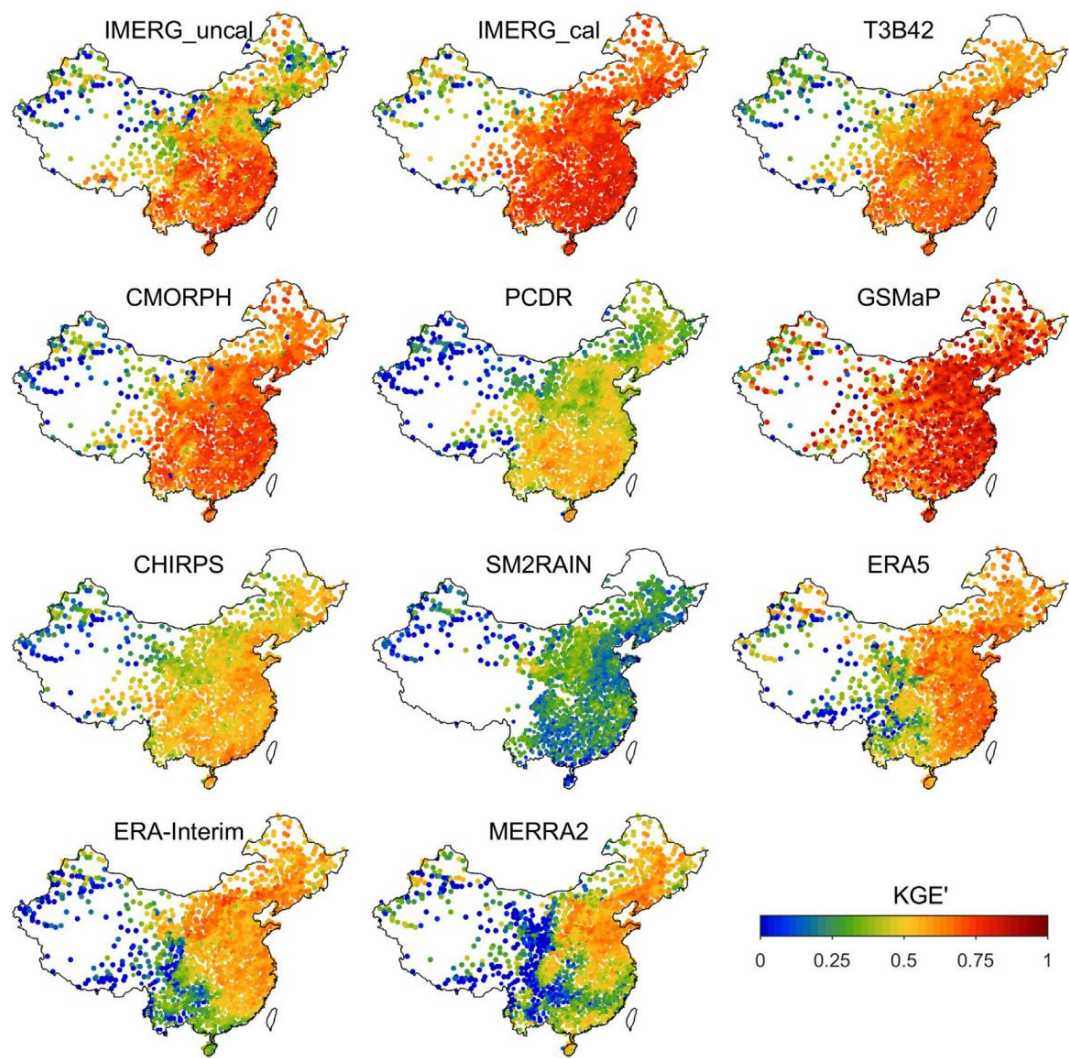


图2 2000-2018年中国各类降水产品日尺度KGE'空间分布。

目标数据集 (有关这三个数据集的更多详细信息,请参阅Tang 等人 (2016a) 指标)。我们还使用了Gupta 等人 (2009 年)提出并由Kling 等人 (2012 年)修改的Kling-Gupta 效率 (KGE')统计数据。KGE' 平衡相关性、偏差和变异性项的贡献,并且 计算如下:

凯格 1)
$$\sqrt{(1 - \beta)^2 + (1 - r)^2} \quad (1)$$

乙=米
$$\frac{\text{米}}{\text{参考}}$$

c =
$$\frac{\text{简历}_{\text{需要}}}{\text{简历}_{\text{参考}}} = \frac{\text{下午}_{\text{需要}}}{\text{下午}_{\text{参考}}}$$

其中 r 是参考 (缩写为 ref)和目标之间的 CC (缩写为 tar)数据集,β 是偏差率,γ 是变异率,μ 为平均降水量,CV 为变异系数,σ 为标准差。KGE' 的范围为 (-∞, 1],值越大,表示性能越好。

关键成功指数 (CSI) 表明产品检测降水发生的能力。CSI 表示为函数

检测概率 (POD)和误报率 (FAR) , 计算如下:

在下面 =
$$\frac{\text{赫}}{\text{HM}+}$$

远的 =
$$\frac{F}{\text{高频}}$$
 (5)

CSI =
$$\frac{\text{赫}}{\text{羟甲基醇醛}} = \frac{1}{1/(1 \text{ 远}) 1/\text{POD} 1 \rightarrow -}$$
 (6)

- (1) 其中 H 是参考和目标的命中事件数
数据集检测到正降水,M 是错过的事件数
参考数据集检测到降水,但目标
数据集不会,F 是误报数,它是
(2) 与M.CSI的计算需要一个阈值来确定降雨/
无雨事件。通常,大于零的值,例如 1 毫米/天 (田
等,2009)之所以采用,是因为测量仪器和卫星/再分析都是
(3) 容易产生较大的不确定性。然而,一个统一的
对于干燥地区来说阈值可能太大,对于潮湿地区来说阈值可能太小
地区。例如,1 毫米/天的阈值可能导致
高原、新疆和东北地区有大量轻度降水样品(图1d)。因此,
本研究采用 20% 平均日规中的较小值
降水量和 1 毫米/天,这意味着降雨/无降雨阈值
每个仪表可能不同。这确保有足够的
即使在干旱地区,也可以进行降水评估的样本,但动态
阈值可能导致空间中评估标准的不统一。
由于我们的主要目标是比较不同的数据集,因此
问题对得出的结论影响不大。
- (4) 对于每日规模的评估,指标以网格单元计算
至少有一个仪表。对于小时尺度评估,不匹配

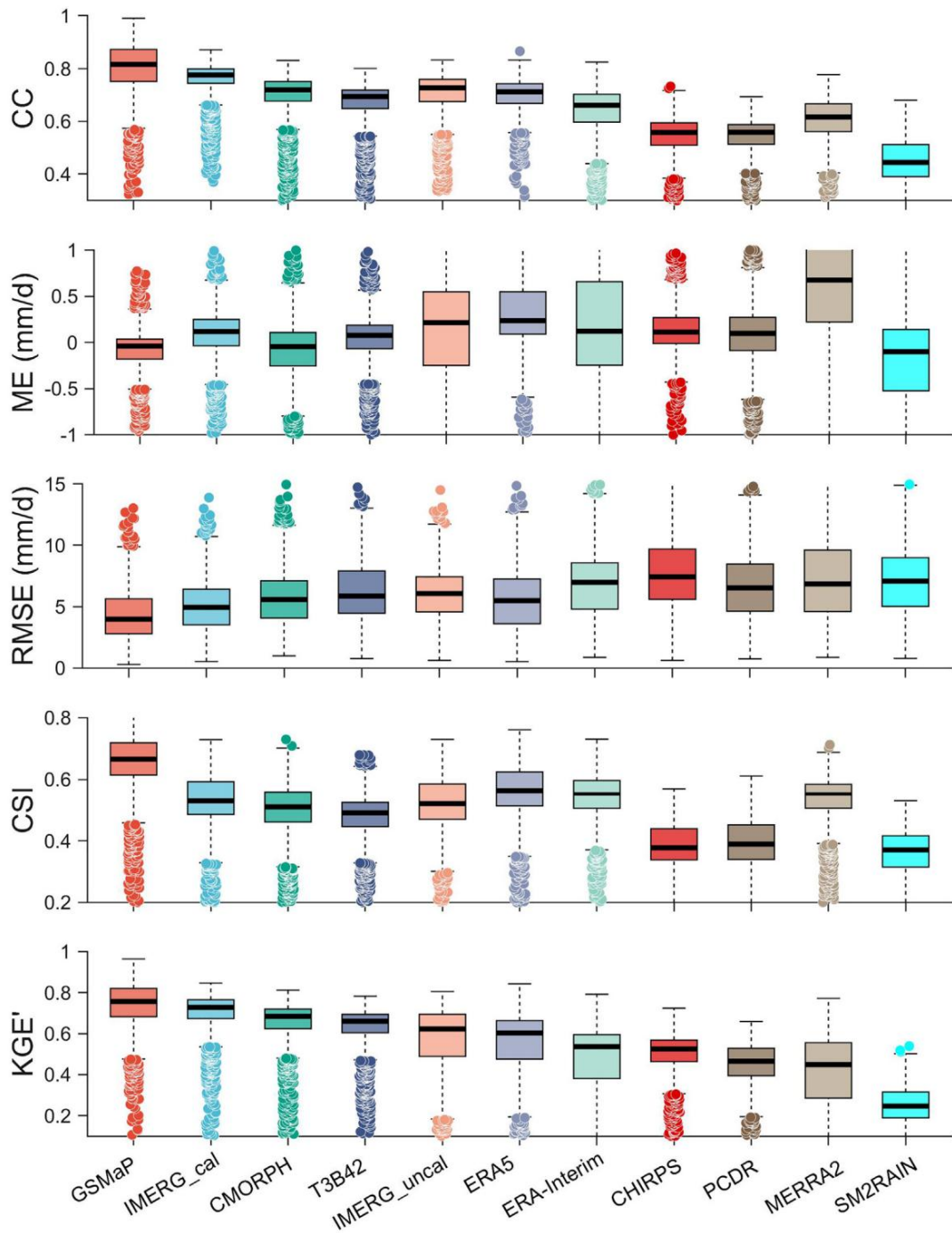


图 3. 2000 年至 2018 年每日尺度的五项指标箱线图。箱线的底部和顶部边缘分别表示第 25 和 75 百分位数。中央黑线表示中位数。虚线从四分位数延伸,长度为箱线宽度的 1.5 倍。点是代表单个 0.25° 网格单元的异常值。产品根据其中位数 KGE' 值排序。

点尺度上时间累积的雨量计观测结果与覆盖连续区域的瞬时卫星/再分析估计结果之间的差异可能会造成很大的不确定性 (Duan and Bastiaanssen,2013) 。

根据Tang 等人 (2018b)在华南河流域的研究,每个网格单元中的仪表数量应为四个,以使实际 CC、RMSE 和 CSI 在 0.25° 和小时分辨率下的低估值在 10% 以内。虽然这个数字可能因气候和地形而随空间变化,但它提供了仪表密度的基本标准。因此,这里在至少有四个仪表的网格单元中进行每小时评估。

还有其他计算统计指标的方法。例如,

可以用标准误差来衡量每个网格单元的不匹配程度,标准误差取决于地形、气候和雨量计的放置位置。这种方法的优点是可以得出评估的不确定性,而缺点是可能低估卫星和再分析产品的实际性能。然而,选择不同的方法并不会影响我们的结论,如第 4.1 节所述。

为了体现降水数据集的区域和季节误差特征,我们采用了以降水强度评估为重点的泰勒图 (Taylor,2001)和以降水发生情况评估为重点的性能图 (Roebber,2009) 。

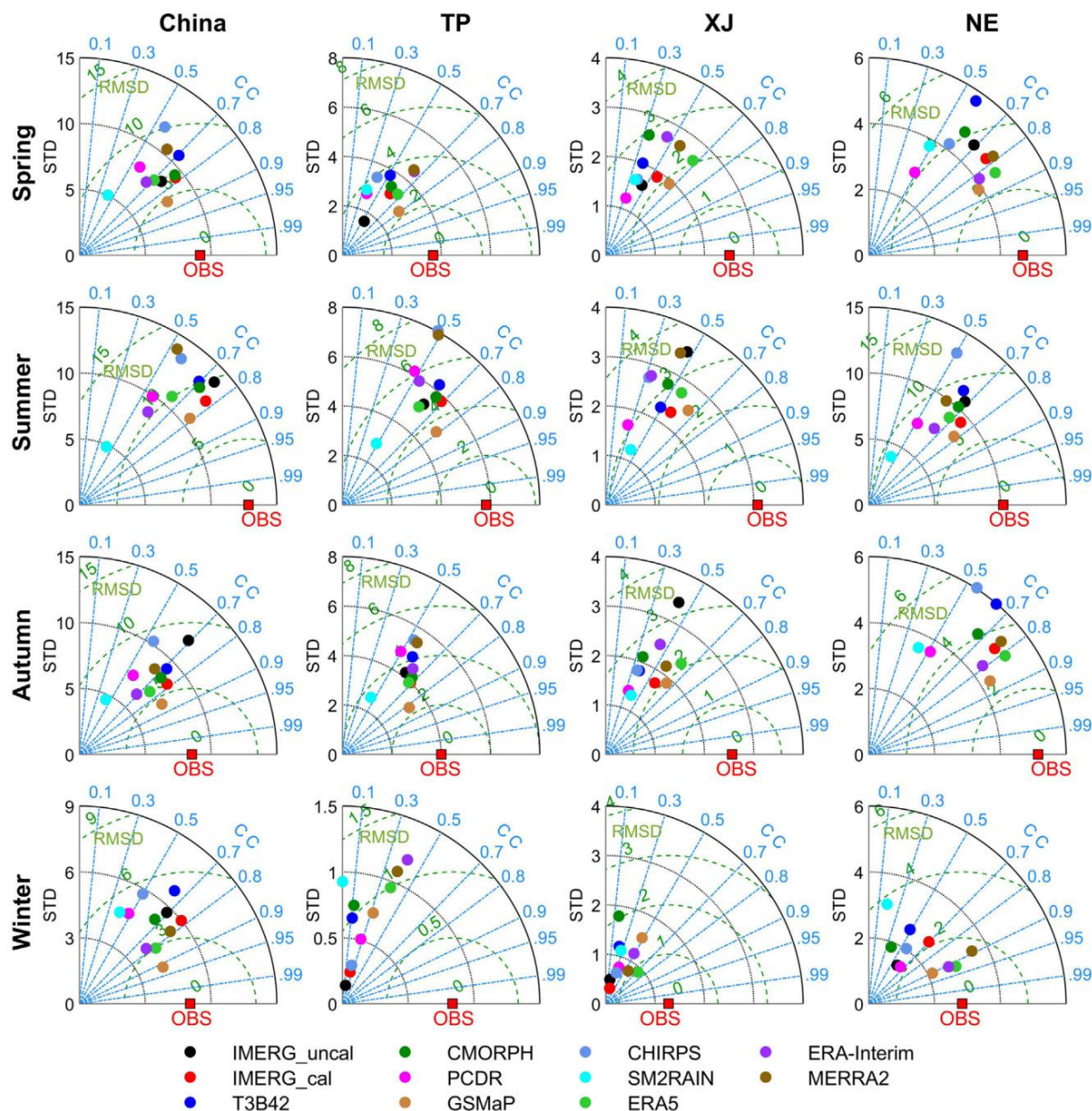


图 4. 2000 年至 2018 年不同季节和地区的每日尺度泰勒图。X 轴上的“OBS”表示测量观测值。

泰勒图整合了 CC、标准差 (STD)、以及中心均方根差 (RMSD)，而性能图则整合了 POD、CSI、成功率 (SR)；

等于一减去 FAR)，以及偏差分数 (POD 除以 SR)。

2.3.2 误差分解

除了上述统计指标外，识别误差源对于定制改进

检索算法和模型。因此，我们采用两种误差分解策略。第一种将总误差（即 ME）分解为

命中错误、漏报降水和假降水（Tian et al., 2009 年）。

这 = -PP 参考

EH = -PP 焦油参考

-E 米 = - 米 参考值

EF = PF 需要

$$Etot = \frac{EH + EF}{n} \quad (11)$$

其中 H、M、F 分别是命中事件、未命中事件和错误事件的数量

警报（见第 2.3.1 节）；Ptar 和 Pref 分别是目标和参考数据集的降水量；EH、

-EM、EF 和 Etot 分别为命中、未命中、错误和总错误（单位：mm）。其中，EH、

-EM 和 EF 以 Etot 的百分比给出。

第二种策略是分解总误差（即均方

误差）分为系统误差和随机误差（Willmott, 1981）

并被证明能有效表征卫星降水的误差（AghaKouchak 等, 2012）。

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 \quad (12)$$

$$\text{和系统} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 \quad (13)$$

$$\text{和兰德} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{ref}}{P_{ref}} \right)^2 \quad (14)$$

$$\text{Ptar} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (15)$$

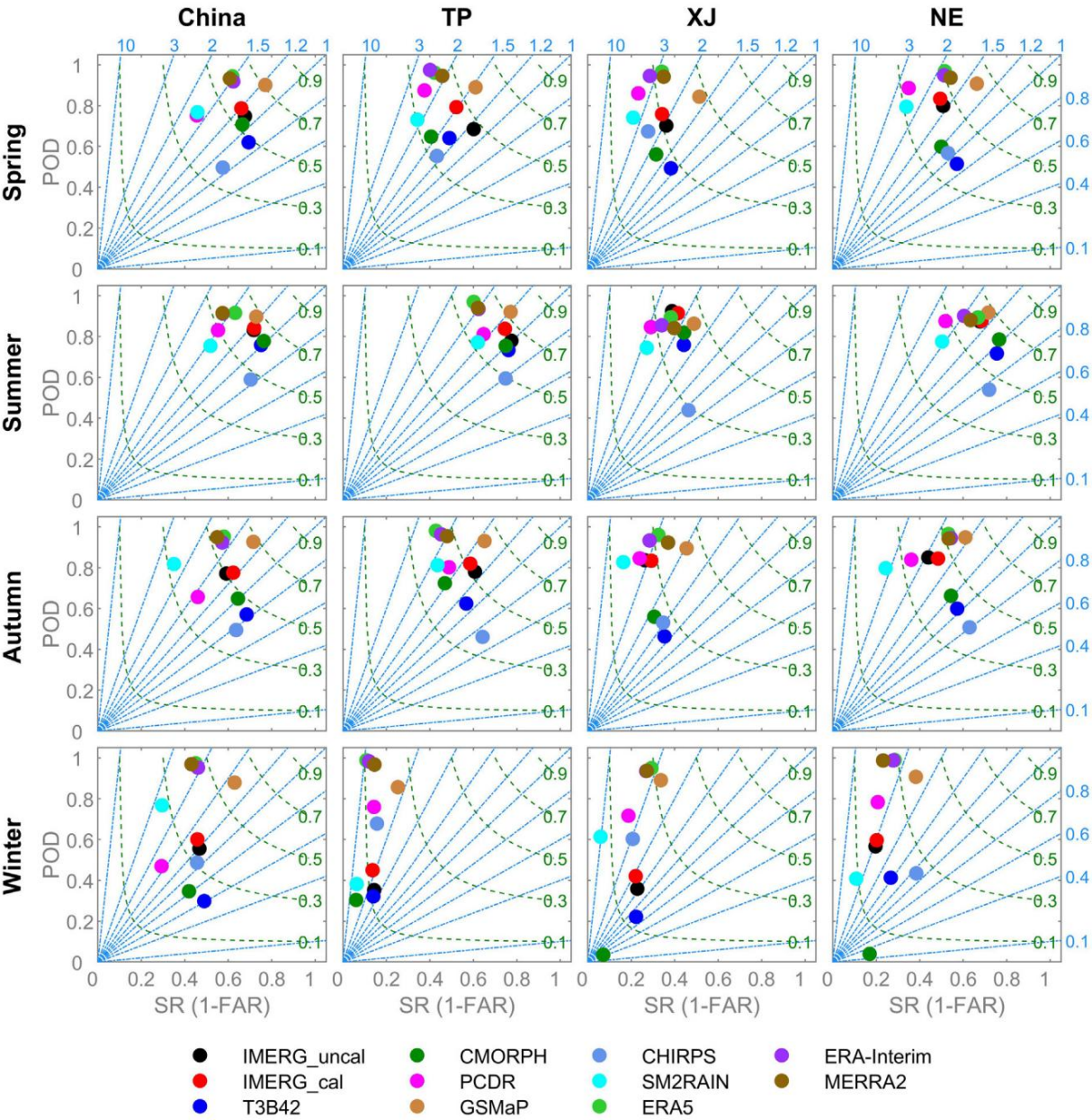


图 5. 2000 年至 2018 年不同季节和地区的日尺度表现图。蓝线代表偏差分数。绿线代表 CSI。（有关此图例中颜色引用的解释,读者可参阅本文的网络版。）

其中, ESyst和ERand分别为系统误差和随机误差 (%) ,以占总误差的百分比表示;a 和 b 是加性误差模型的无单位参数 (Tian et al.,2013) 。

2.3.3. 三重搭配

TC 方法由Stoffelen (1998)提出,用于估计三重态 (即三个独立输入)的 RMSE,无需 “地面实况” 。McColl等 (2014)对 TC 进行了扩展,可以同时导出 RMSE 和 CC。Alemohammad等 (2015)提出了乘性 TC (MTC),它比原始 TC 更适合估计降水误差。MTC 公式为:

$$p_{1,1}^2 = \frac{\text{连续}_{1,2}^2}{\text{连续}_{1,1}^2}$$
$$p_{2,2}^2 = \frac{\text{连续}_{1,2}^2}{\text{连续}_{2,2}^2}$$
$$p_{3,3}^2 = \frac{\text{连续}_{1,3}^2}{\text{连续}_{3,3}^2}$$

$$r_{1,1}^2 = \frac{\text{连续}_{1,2}^2}{\text{连续}_{1,1}^2}$$
$$r_{1,2}^2 = \frac{\text{连续}_{1,2}^2}{\text{连续}_{1,2}^2}$$
$$r_{1,3}^2 = \frac{\text{连续}_{1,3}^2}{\text{连续}_{1,3}^2}$$

(16)

(17)

其中Ci,j (i=1,2,3;j=1,2,3) 是产品 i 和 j 之间的协方差, σi是 RMSE, pt,i是 CC。Li et al. (2018)表明 MTC 提供了合理的误差估计。在这里,我们还设计了三重

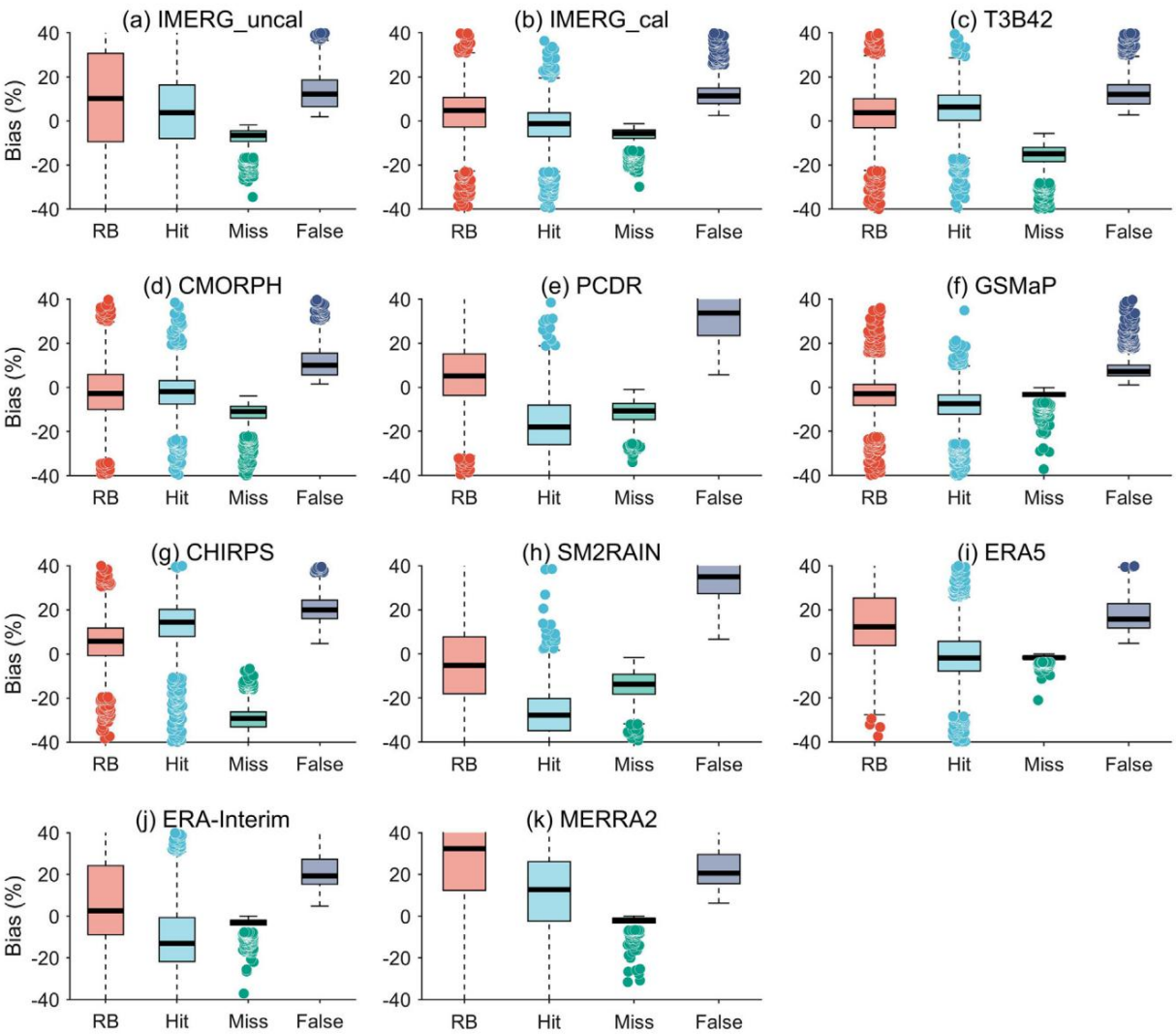


图 6. 2000 年至 2018 年不同降水产品的相对偏差 (RB)、命中误差、漏报降水和误报箱线图。箱线的底部和顶部边缘分别表示第 25 和第 75 百分位数。中央黑线表示中位数。虚线从四分位数延伸,长度为箱线宽度的 1.5 倍。点是代表单个 0.25° 网格单元的异常值。由于范围明显较大,一些箱线图未完全显示。

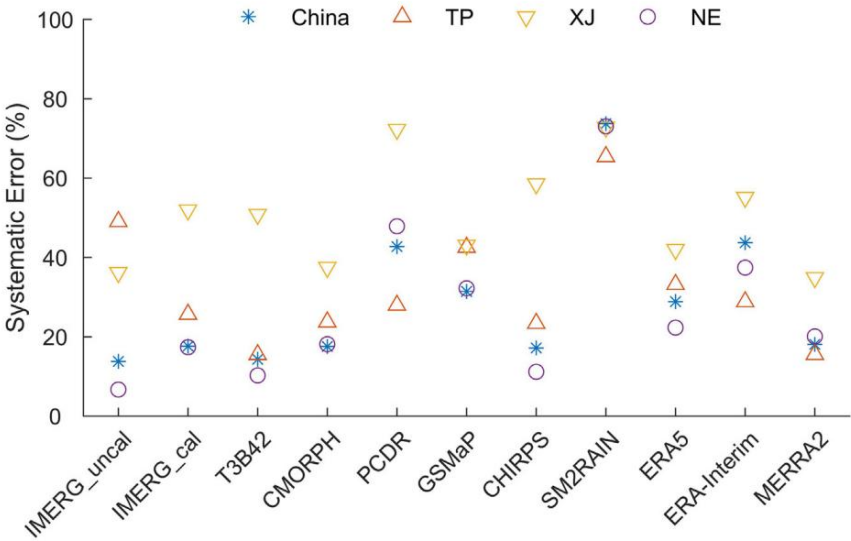


图7 中国及各区域不同降水产品的系统误差占比。

G.唐,等人。

环境遥感 240 (2020) 111697

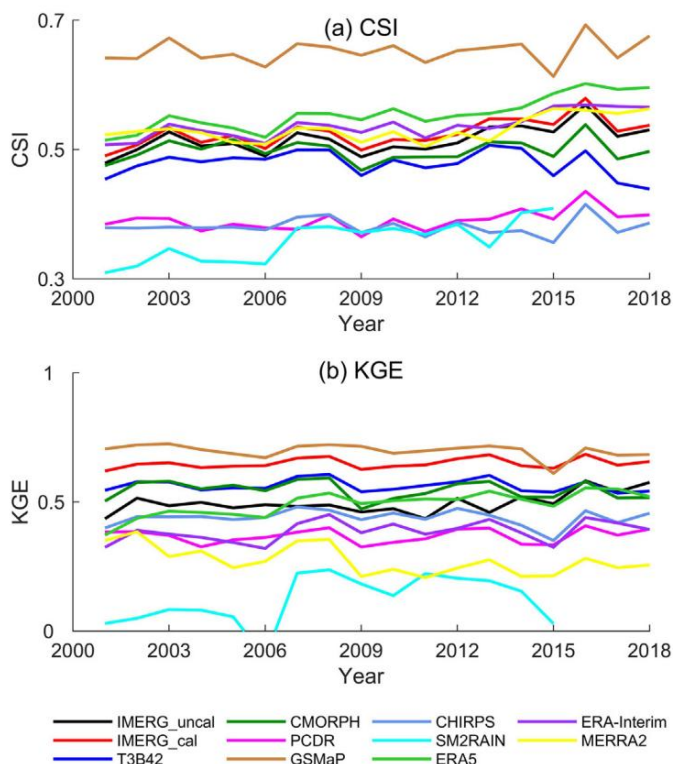


图 8 2001 年至 2018 年不同降水产品的年 CSI 和 KGE'
2018 年。

输入 (即测量、再分析和 IMERG 降雪数据集)来保证
确保我们的结果是可靠的。

请注意,TC 更多地揭示了三元组输入之间的相似性,而不是与“基本事实”的差异,因此,TC
可以在某些情况下会失败。此外,虽然 TC 已成功应用于许多
降水相关的研究,它还没有被用来评估
降雪准确度。这里以 TC 为基础的降雪评估作为
对不同产品的准确性的初步看法,以及结果
可能包含无法量化的不确定性,因为缺乏
可靠的降雪测量。出于同样的原因,MTC 不用于
评估总降水量。

3. 结果

3.1. 2000 年至 2018 年日规模评估

3.1.1. 总体表现

中国不同产品的KGE'空间分布为
如图 2所示。在 7 个卫星产品中,SM2RAIN 是
最差的产品,约 90% 的仪表显示 KGE' 小于
0.6;出现这些不良结果是因为 SM2RAIN 基于不稳定的
土壤水分和降水之间的联系,不包含测量信息。SM2RAIN 实际上实现了最高的

内蒙古的KGE'位于中国中部,降水较少,而在降水较多的东南部地区,KGE'表现较差,这是可以预料的,因为湿润地区土壤往往处于饱和状态,不能很好地反映降水的变化。

相比之下,IMERG_uncal、PCDR 和 CHIRPS 等卫星产品

在东南部地区表现最佳。此外,SM2RAIN
由于积雪和冻土的影响,高原缺乏数据。

基于红外的产品 (PCDR 和 CHIRPS)明显更差
高于基于KGE'的微波红外组合产品。
IMERG_cal 和 GSMaP 在中国大部分地区表现最佳,其中 TP 和 XJ 表现最佳。

产品面临挑战。CMORPH 的表现不如 IMERG_cal

和 GSMaP 比其他卫星降水产品更佳,其次是 T3B42。测量仪调整有助于提高

IMERG_cal 比 IMERG_uncal 有显著的改善,
在TP、XJ和NE地区明显。

在三种再分析产品中,ERA5 的 KGE' 最高,
其次是 ERA-Interim 和 MERRA2。
ERA5 相对于 ERA-Interim 和 MERRA2 可能是其
性能更好。所有重新分析产品都表现出更差的性能
由于地形崎岖,中国西部的 MERRA2 表现尤其糟糕
比 ERA5 和 ERA-Interim 沿 TP 边界
坡度陡峭,而地势低洼的四川盆地 (约 260,000 平方公里)
29°-32°N 和 103°-108°E) 至青藏高原东部,MERRA2 表现正常。这意味着剧烈的海拔抬升强烈
影响了
MERRA2 准确度。

五项指标 (CC、ME、RMSE、CSI 和 KGE')的箱线图如下

如图 3所示。IMERG_cal的指标显示出更好的性能

与 IMERG_uncal 相比,然而,改进是
对 CSI 的影响较小,表明量调整在
改进强度估计而不是发生检测;IMERG_cal 是
在所有产品中仅次于GSMaP。

由于 CHIRPS 略优于 PCDR (图3),因此它可能是
在中国,PCDR 是气候研究的更好选择 (注意
CHIRPS 和 PCDR 都是长期气候数据记录)。对于
再分析产品中,CSI值仅次于GSMaP,表明在降水发生检测方面具有稳健的性能,但

与卫星产品相比,这些产品显示出高估。基于 KGE',再分析产品表现优于

基于红外的 CHIRPS 和 PCDR 以及基于土壤水分的
SM2RAIN 产品,但比微波和红外线加起来还要差
包括IMERG_uncal在内的产品。

3.1.2. 区域和季节特征

在泰勒图中 (图4),靠近“观测点”的点
X 轴上的点表现出更好的精度,而在性能
图 (图5)中,越靠近右上角的点越具有更好的发生检测能力。

根据泰勒图 (图4),除冬季外,GSMaP在高原、新疆和东北地区表现最佳。IMERG在估计寒
冷气候下的降水方面相对较弱。例如,在东北地区,IMERG在夏季表现明显更好,因为

气温比其他季节高,降水也多,

在 TP 冬季,它比其他产品更好。SM2RAIN 是
在全国、高原和东北地区,其精度最差,但在新疆,由于土壤湿度对土壤湿度更敏感,其精度相对较
高。

干旱地区降水量很少,由于缺乏
强降水。再分析产品在冬季表现更好,
除了 TP 中表现出较大的 STD 和 RMSD。在 NE,重新分析
除夏季外,产品也能很好地捕获降水
因为它们比
对流降水。

如性能图 (图5)所示,GSMaP 在
检测所有季节和各分区的降水发生情况。三
再分析产品表现出类似的性能,仅次于
在大多数情况下,GSMaP 表明存在强大的发生检测机制。IMERG 在春季、夏季和秋季表现良好,
但在冬季表现明显较差,这与结果一致

泰勒图。IMERG_cal 和 IMERG_uncal 的点始终
重叠,表明它们的出现检测相似 (图3)。

PCDR 和 CHIRPS 在高原、新疆和东北地区冬季降水探测中优于其他卫星产品,这是因为

红外数据在寒冷季节的优势。相比之下,CMORPH
冬季表现最差,尤其是在 XJ 和 NE,
显示非常小的 POD 和很大的 FAR。CMORPH V1.0 依赖于被动
微波数据获取无缝降水估计,红外数据仅用于计算云运动矢量 (Xie et al.,

2017)。相比之下,IMERG、GSMaP 和 T3B42 使用红外数据来填充

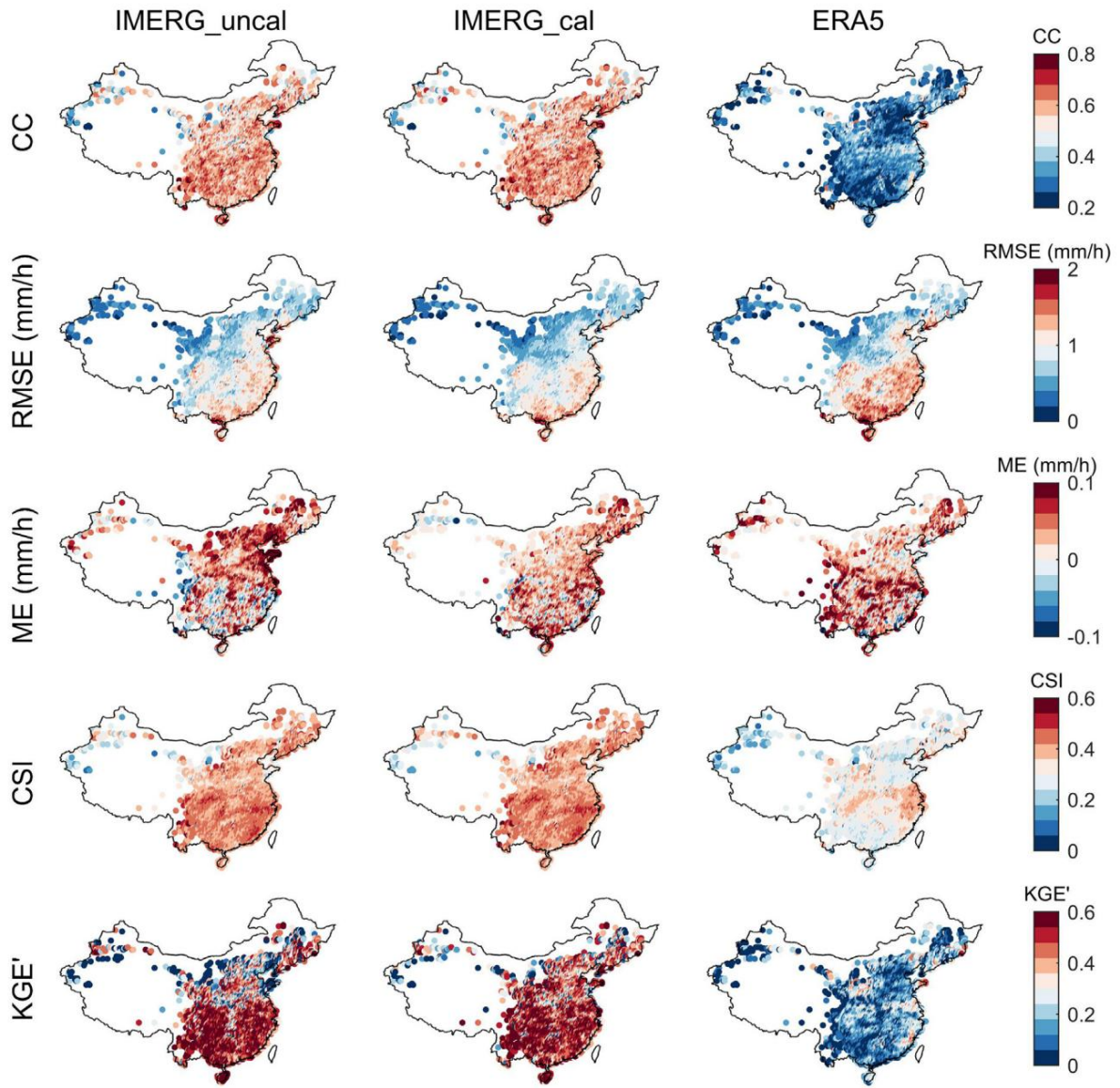


图 9. 2013 年至 2015 年夏季 (6 月、7 月、8 月) 每小时尺度上的 IMERG_uncal (第一列)、IMERG_cal (第二列) 和 ERA5 (第三列) 指标的空间分布。

被动微波传感器之间的差距,有时取代雪地和冰面类型的被动微波估计值。被动微波数据的局限性导致冬季 CMORPH 的质量下降。

再分析产品的漏报误差接近于零,变化范围可以忽略不计,而假误差却很大。这是因为 (1) 再分析模型产生了太多的弱降水,(2) 点尺度测量可能会漏掉 0.25° 网格单元上的一些降水。

3.1.3 误差分量分解 相对偏差 (RB) 和 ME 可能会

产生误导,因为它们平均了来自不同来源的误差;即使绝对偏差很大,这也会导致较小的值。因此,误差分解提供了更客观的误差分析。各种产品的命中率、遗漏率和假误差如图6所示。对于六种经测量调整的卫星产品,RB 通常较小,平均值在 ± 10% 之间。例如,IMERG_cal 的平均 RB 仅为 5.09%。

图7显示了降水数据集的系统误差,这些误差来源于反演算法或再分析模型。随机误差没有显示出来,因为它们与系统误差成反比 (2.3.2节)。新疆的系统误差比其他地区大,说明干旱地区还有很大的改进空间。中国、青藏高原和新疆的系统误差差异不明显。PCDR、SM2RAIN和ERA-Interim 的系统误差最大,而ERA5与ERA-Interim相比系统误差有所降低。总体而言,IMERG、T3B42、CMORPH和CHIRPS的系统误差最小。

这是由于遗漏错误和错误错误与逆

迹象。PCDR、CHIRPS 和 SM2RAIN 的三个误差分量的幅度明显大于其他卫星产品。

误报是主要误差源 (图6)。除 GSMaP 外,所有卫星产品都表现出相当大的误报,PCDR 和 SM2RAIN 的误报率分别高达 37% 和 39%。再分析产品的高估程度远高于卫星产品。

3.1.4. 精度指标的年度变化趋势 对于一个时间跨度

较长的产品,了解其是否表现出稳定性非常重要。图 8 显示了 2001 年至 2018 年不同降水产品的 CSI 和 KGE'。我们排除了

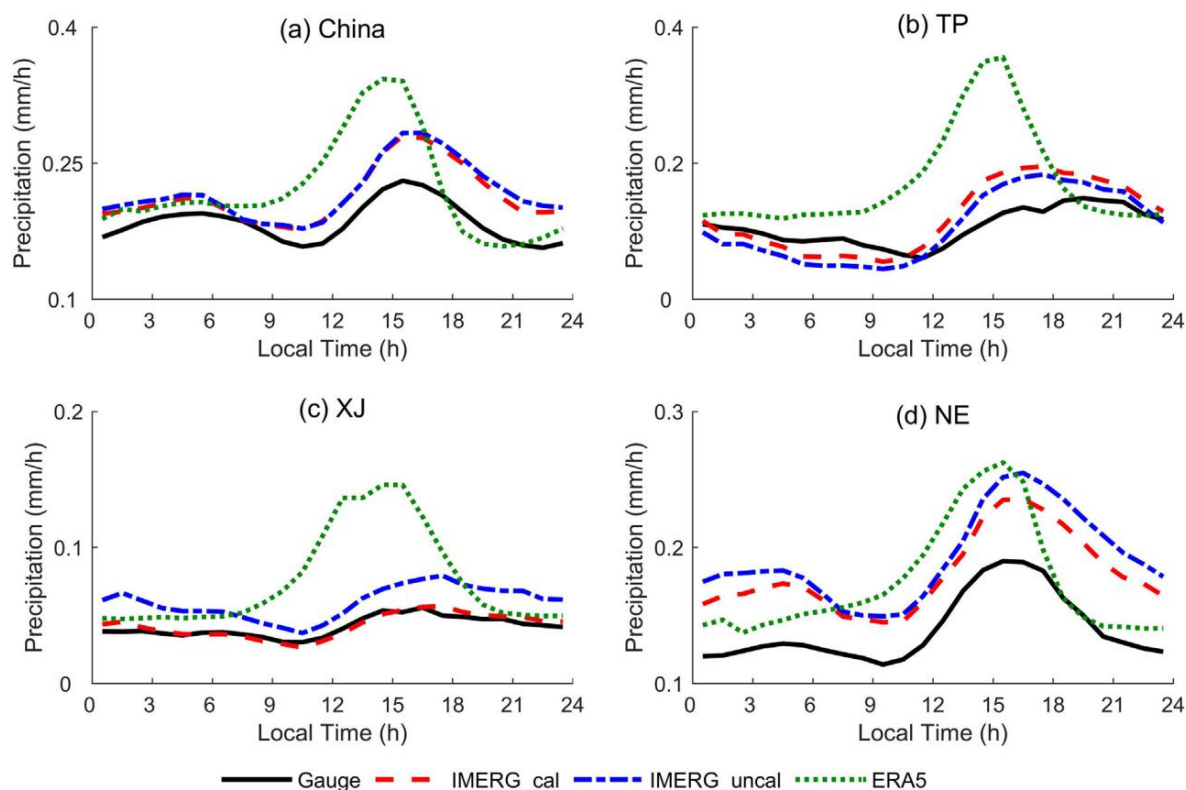


图 10. 基于测量仪、IMERG_uncal、IMERG_cal 和 ERA5 数据的 2013 年至 2015 年夏季 (6 月、7 月、8 月) 各地区的昼夜循环: (a) 中国、(b) 高原、(c) 新疆和 (d) 东北地区。

2000 年,IMERG 部分不可用。IMERG、PCDR、SM2RAIN、ERA5、ERA-Interim 和 MERRA2 均通过了 CSI 的显著性检验 (F 检验, $p < 0.05$), 表明降水检测性能随时间而提高。对于 KGE', 只有 IMERG_uncal、ERA5 和 MERRA2 通过了显著性检验。因此, 根据 CSI 和 KGE', 从 2001 年到 2018 年, IMERG 的准确性每年都在提高。IMERG_uncal 的趋势比 IMERG_cal 更显著, 表明由于测量仪调整而带来的改进大于由于卫星传感器而带来的改进。

PCDR 和 CHIRPS 的 CSI 多年来一直呈上升趋势, 这可能是由于近年来地红外数据质量提高和 GPCP 精度提高所致。然而, KGE' 的趋势并不显著, 这表明云顶红外数据与地面降水之间的间接联系对强度估计的影响大于对发生检测的影响。

SM2RAIN 的指标在 2007 年出现了一个转折点, 此后其准确度大幅提升, 这可能与 ESA CCI 土壤湿度数据质量的提高有关。

ERA5 的 CSI 和 KGE' 增幅在所有数据集中最为显著。然而, MERRA2 的表现好坏参半。CSI 的上升趋势表明 MERRA2 在检测降水发生方面的性能不断提高, 而 KGE' 的下降趋势意味着 MERRA2 在估计降水强度方面的表现变差。基于 IMERG、SM2RAIN、ERA5 和 MERRA2 的长期趋势分析需要谨慎, 因为它们的性能多年来各不相同。然而, IMERG 属于追求最佳快照质量的高分辨率降水产品 (HRPP) 的范围, 而不是强调时间同质性的气候数据记录 (CDR) (Huffman 等, 2019)。因此, 长期降水估计的不均匀性并不是 IMERG 产品的主要关注点。

3.2. 2013 年至 2015 年按小时规模评估

进一步在小时尺度上对 IMERG 和 ERA5 进行了比较。图 9

显示了 2013 年至 2015 年夏季以 3 万多个雨量计为基准的五种指标的分布情况。总体而言, 这些指标比日尺度的指标更差 (Tang 等, 2016a)。IMERG 在中国整个地区表现良好, 尤其是在南方地区。IMERG_uncal 的平均 KGE' 为 0.35, IMERG_cal 的平均 KGE' 增加到 0.42。

根据 CC、RMSE 和 CSI, IM-ERG_cal 和 IMERG_uncal 之间的差异很小。相比之下, IMERG_cal 在每日尺度上的所有指标都明显优于 IMERG_uncal (图 3)。这表明月度仪表调整对每日数据的影响比每小时数据更显著。

然而, 根据 ME 和 KGE', 在华北地区, IMERG_cal 比 IMERG_uncal 好得多。这是因为 KGE' 对目标和参考数据集之间的相对差异很敏感 (见公式 (1)), 并且会放大 IMERG_cal 和 IM-ERG_uncal 之间的差异。此外, 在华南部分地区, IMERG_cal 似乎被过度修正了, 那里的 ME 值对 IMERG_uncal 为负, 而对 IMERG_cal 为正。特别是, 对于存在过度修正问题的 30°N 以南的仪表, 对于 37.4% 的仪表, IMERG_cal 显示的 ME 幅度大于 IMERG_uncal。

ERA5 在估算小时降水发生率和强度方面表现较差, 其中国地区 CC、CSI 和 KGE' 平均值分别为 0.32、0.31 和 0.06, 明显差于 IMERG_cal 和 IMERG_uncal。考虑到 ERA5 在日尺度上的表现与 IMERG_uncal 相近 (图 3), ERA5 在小时尺度上的退化还有待进一步研究。

降水的日变化与水与能量通量相关的热力学和动力学过程密切相关 (Zhou and Wang, 2017), 对地表水文有较大影响 (Dai et al., 1999)。因此, 降水产品能否捕捉到日变化是其精度的重要指标 (Chen et al., 2018)。图 10 给出了 IM-ERG_uncal、IMERG_cal 和 ERA5 雨量计的日变化。观测时间已转换为地方时 (LT)。

根据 2013–2015 年夏季雨量计数据, 有两个

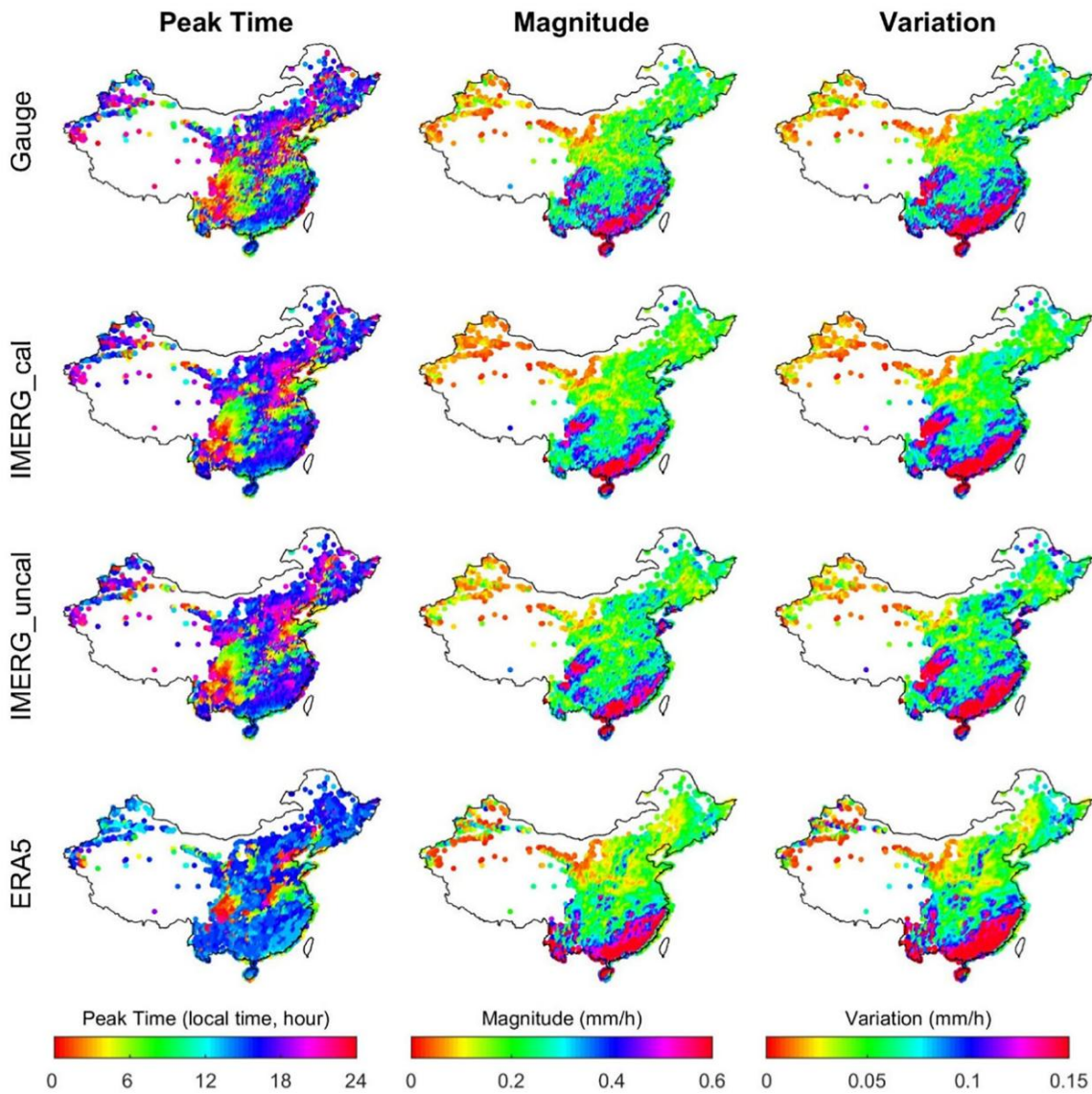


图 11. 根据 2013 年至 2015 年夏季 (6 月、7 月、8 月)雨量计 (第一行)、IMERG_cal (第二行)、IMERG_uncal (第三行)和 ERA5 (第四行)的峰值时间 (第一列)、幅度 (第二列)和昼夜循环变化 (第三列)的空间分布。

高原、新疆和东北地区的日变化均表现为单峰型,主要峰值分别出现在20:00、17:00和16:00。新疆的日变化尾部 (17:00-24:00)的下降速率低于其他地区。IMERG_uncal和IMERG_cal 正确地捕捉到了中国、新疆和东北地区降水峰值的时间。特别是IMERG_cal与新疆的雨量计数据非常吻合,这是一个很大的进步,因为Tang等 (2016a)表明IMERG V04不能再现新疆的日变化。但在高原地区,IMERG的峰值时间(18:00 LT)比雨量计的峰值时间早2小时(IMERG V04 (Tang等,2016a)也有发现); ERA5的日变化为单峰型,中国及3个分区的峰值出现在 16:00 LT左右,其余时段ERA5降水强度基本均匀。

空间变化明显,如东南部降水峰值出现在清晨,中部出现在上午,华南出现在下午;华北大兴安岭和太行山东界,降水峰值出现在午夜,这可能与地形影响有关;新疆和内蒙古由于气候干燥,日变化幅度最小,东南沿海和四川盆地日变化幅度最大。空间变化模式与幅度变化模式相似。

ERA5的峰值时间在中国大部分地区 (四川盆地和华北平原部分地区除外) 均出现在下午。这与仪表和IMERG的峰值时间不同。此外,ERA5日循环的幅度和变化与四川盆地的仪表和IMERG相比较小,但在东南沿海较大。ERA5在再现日循环方面的局限性导致其在小时尺度上降水估计的质量下降 (图9)。

此外,我们分析了日变化的三个特征变量 (图11),包括峰值时间 (一天中最大降水量的时间)、幅度 (一天中最大降水量与最小降水量的差值)和方差 (一天中降水量的标准差)。IMERG_uncal、IMERG_cal和雨量计在这三个变量上表现出相似的分。峰值时间的特征是

3.3 降雪评估及其时空变化

图 12显示了

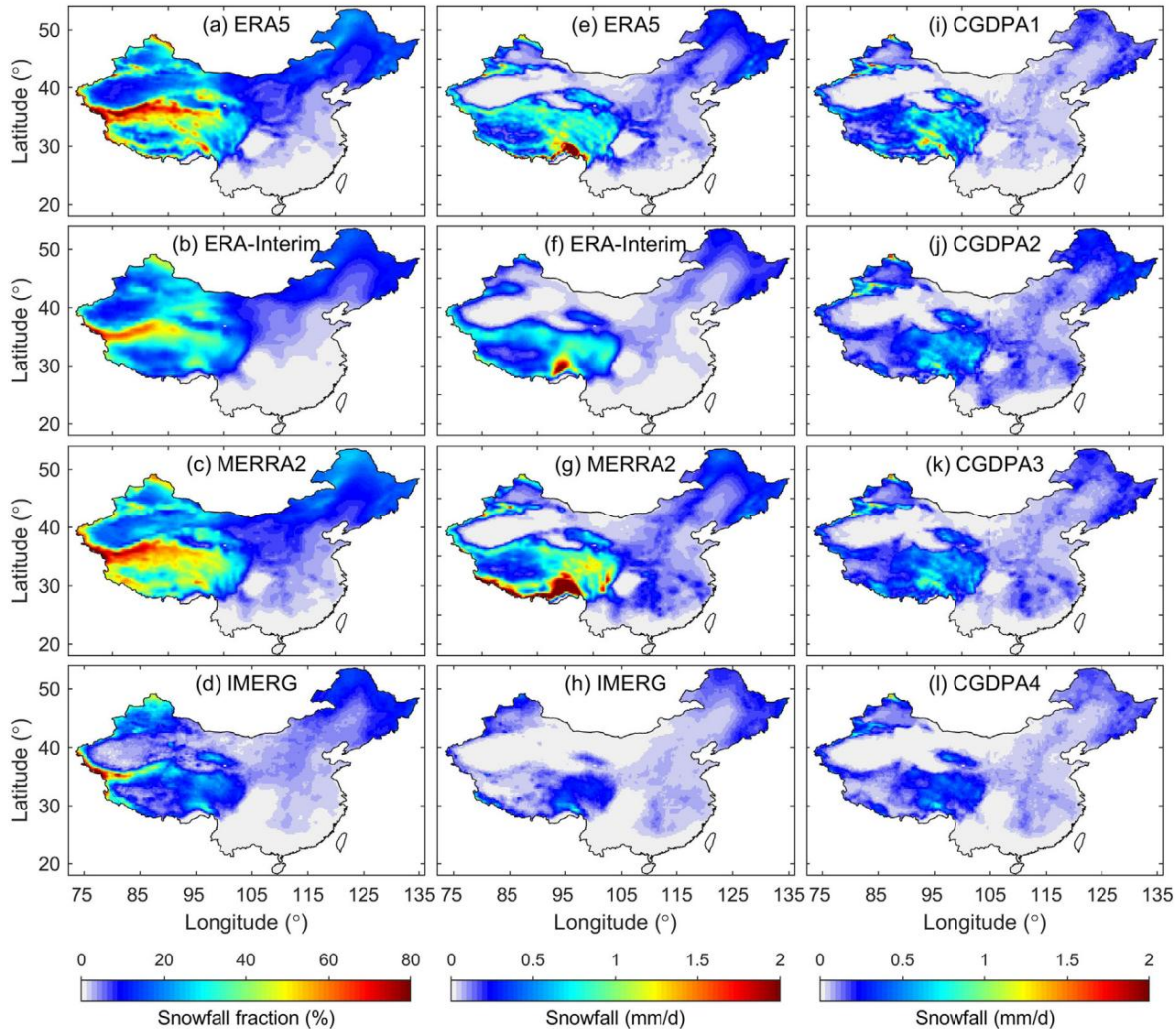


图 12. 2000 年至 2018 年降雪量 (第一列)和降雪强度 (第二列和第三列)的空间分布。(i)中的 CGDPA1-4 分别采用了 ERA5、ERA-Interim、MERRA2 和 IMERG 提供的降雨-降雪分类数据。

CGDPA、ERA5、ERA-Interim、MERRA2 和 IMERG。CGDPA 降雪量利用三种再分析产品和 IMERG 提供的雨雪比计算得出。降雪主要分布在山地地区,包括高原、新疆的天山和阿尔泰山。高原羌塘盆地 (30°35'N, 80°90'E) 气候干燥,降雪量和强度远低于周边地区 (Tang et al., 2018c)。以 30°N 和 95°E 为中心的雅鲁藏布江大峡谷是中国降雪量最大的地区,因为该峡谷地形变化剧烈,在西南季风的补充下,降水量极高 (Tang et al., 2018c)。高纬度地区降雪强度与高原相比较小。

再分析产品产生的降雪量远高于 CGDPA 和 IMERG。ERA-Interim 无法再现中国南方的轻度降雪,而 MERRA2 产生的喜马拉雅山脉沿线降雪量远高于其他产品。CGDPA 的降雪强度小于再分析产品,尤其是在高原北部和西部。IMERG 产生的中国全境降雪量较弱,部分原因是其降雪量低于再分析产品。

采用 MTC 方法来评估降雪估计数 (图 13)。ERA-Interim 与 ERA5 相似,因此不予纳入 (图 12)。只有 ERA5、MERRA2 和 IMERG 报告的降雪概率均大于 50% 的样本才被视为有效降雪事件,并且只有包含 > 200 个有效样本的网格单元才被视为

包括降雪分类标准。该标准旨在: (1)降低不同降雨-降雪分类方案的影响; (2)排除零降雪样本,因为零降雪样本在数量上占主导地位,会极大地影响 MTC 评估结果。设计了两个三元组。第一个由 IMERG、ERA5 和采用 MERRA2 降雪-降雨分类的 CGDPA 组成。第二个由 IMERG、MERRA2 和采用 ERA5 降雪-降雨分类的 CGDPA 组成。两个三元组对两个重叠产品产生相似的 CC 和 RMSE 估计,这部分验证了 MTC 的有效性。图 13 中 CGDPA 和 IMERG 的度量图由第一个三元组提供。

根据 TC 评估,ERA5 在中国大部分地区 CC 值最高,但在高原地区比 MERRA2 差。高原以东没有指标的区域是四川盆地,降雪量

ERA5 和 MERRA2 在降雪量较少的地区表现出较大的 RMSE,这可能是由于它们高估了降水频率所致;而 CGDPA 在降雪量较多的地区表现出较大的 RMSE,这是由于它们低估了降雪量,说明目前的雨量计设计不能完全满足降雪测量的要求。与 CGDPA 和再分析产品相比,IMERG 在大多数地区的 CC 小于其

2001 年至 2018 年年降雪趋势由线性

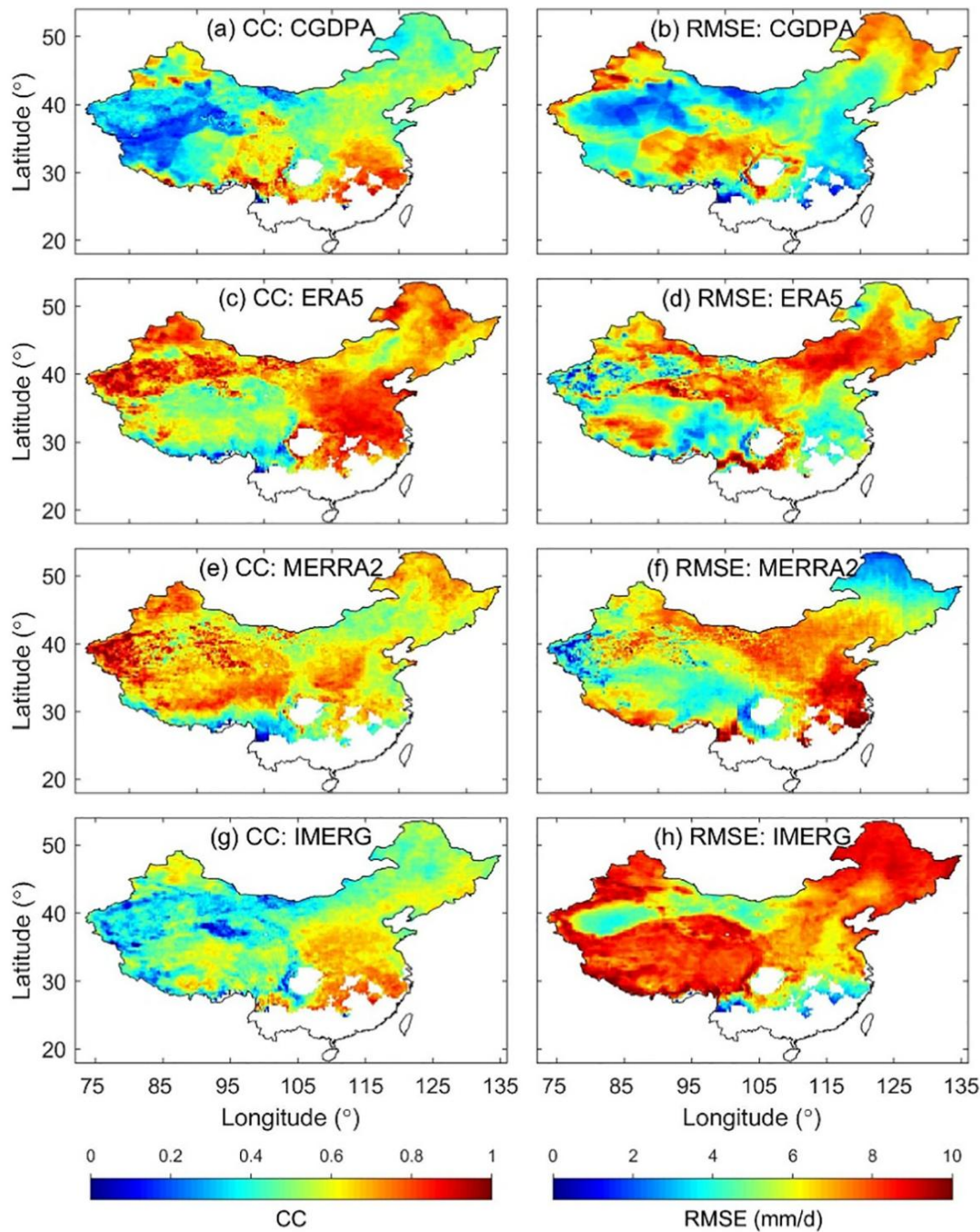


图 13. 基于 MTC 的 CGDPA、ERA5、MERRA2 和 IMERG 的 CC 和 RMSE,使用 2000 年至 2018 年的数据。仅包括具有 > 200 个有效降雪样本的网格单元。第一个三元组由 CGDPA、IMERG 和 ERA5 组成,第二个三元组由 CGDPA、IMERG 和 MERRA2 组成。CGDPA 和 IMERG 的指标来自第一个三元组。

回归结果如图14所示。3种再分析产品均通过了95%置信水平的显著性检验(图14a)。ERA5和ERA-Interim显示中国地区降雪量分别减少-2.90和-2.29 mm/十年,大于CGDPA的-1.27 mm/十年,而MERRA2和IMERG分别显示增加趋势为6.53和1.13 mm/十年。在青藏高原,IMERG和3种再分析产品均表现出显著的趋势。

降雪。由于IMERG采用基于温度的查表法区分降雨和降雪,降雪量的增加、区域温度变化、查表精度等多种因素都可能导致其增加趋势。此前的研究尝试通过直接或间接的降雪估计来研究高原降雪趋势(邓等,2017;柯等,2009),但结论并不一致。

而MERRA2和IMERG的降雪趋势与CGDPA、ERA5和ERA-Interim的降雪趋势相反,其中MERRA2降雪量的增加速率高达55.63 mm/十年。

这些数据在降雪趋势分析中的差异要求开发更准确的降雪产品。

CGDPA 降雪量不能作为基准,因为其降水相位信息来自再分析和卫星数据,而测量仪器在测量方面也存在很大的不确定性

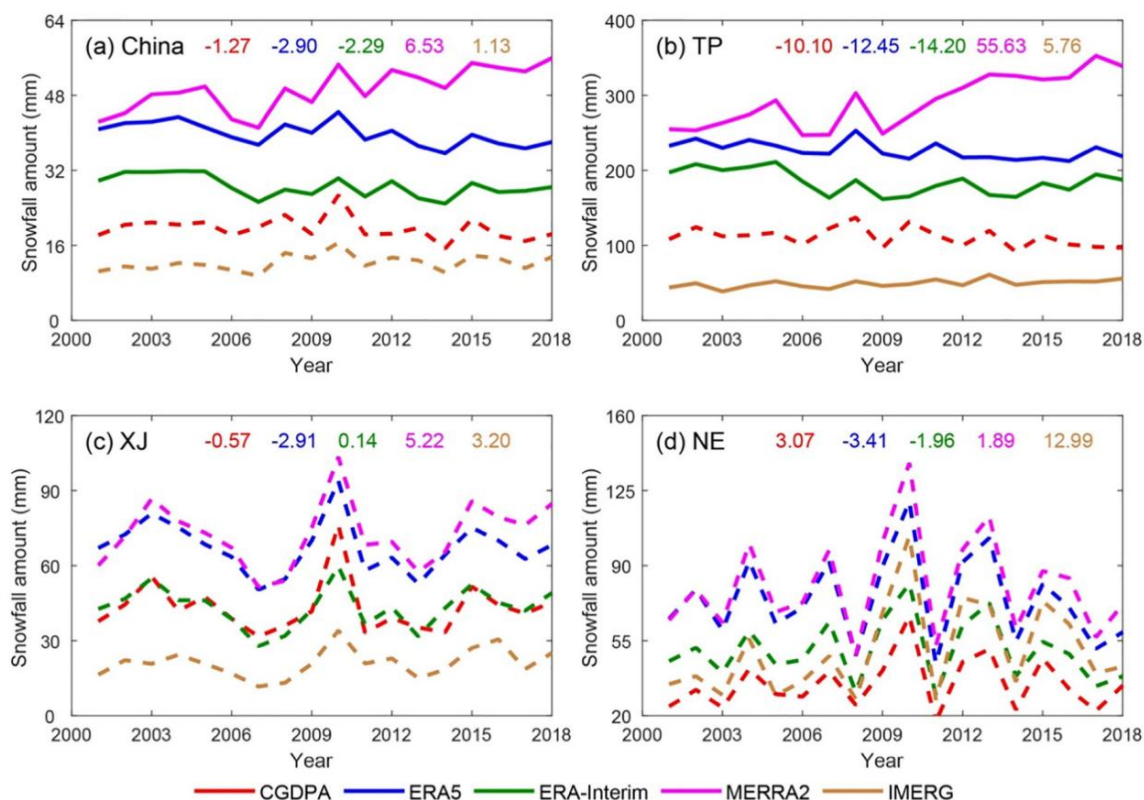


图 14. 根据 CGDPA、ERA-Interim、MERRA2 和 IMERG 计算的 2001 年至 2018 年中国年降雪趋势。实线表示趋势显著，置信度为 95%。图上数字为趋势率（毫米/十年）。

4. 讨论

4.1. 基于测量的评价的不确定性

本研究使用测量数据评估卫星和再分析产品。然而，测量数据与卫星/再分析数据之间的时空不匹配可能会影响评估结果。在至少有四个测量仪的网格单元中进行每小时评估，以尽量减少不匹配问题的影响。与大多数先前的研究相比，密度要高得多（见补充表 S1）。然而，卫星和再分析产品的实际精度应该比本研究中的结果更好，这适用于所有基于测量仪的评估研究。

解决现场数据和卫星/再分析数据之间的尺度不匹配的一种方法是将它们用作水文模型强迫，并根据观察到的流量记录评估其性能。

为此，我们在华南地区面积为 81258 km² 的赣江流域建立了耦合调蓄（CREST）分布式水文模型（王等，2011），并利用 310 个站的逐日降水量对模型参数进行了率定。

有关模型校准和验证的详细信息，请参阅 Tang 等人（2016b）。这种产品用于驱动 CREST 模型，从 2010 年到 2015 年（见补充图 S1）。CGDPA 在所有指标方面表现最佳，其次是 GSMaP 和 IMERG_cal。ERA5 比 ERA-Interim 和 MERRA2 好得多，并且与 T3B42 和 CMORPH 表现出相似的性能。PCDR、CHIRPS 和 ERA-Interim 彼此获得了相似的技能得分。MERRA2 对降水的大量高估导致其对径流的高估，RB 达到 98%。总体而言，水文建模的结果与统计评估一致。

4.2. IMERG 的连续性和质量指标

IMERG V06 在小时尺度上表现出色，即使在干旱地区（例如 XJ）也能很好地再现昼夜循环，与旧版本相比有了很大的改进（Tang et al., 2016a; Wang et al., 2018）。我们还比较了 IMERG 在 TRMM 时代（2013 年）和 GPM 时代（2014-2015 年）的表现，发现差别不大，表明 IMERG 在两个时代之间的过渡中非常稳健。

IMERG 质量指数旨在为降水估算的准确性提供一些指导。为了验证质量指数的有效性，我们计算了平均半小时质量指数与小时尺度上的 CC、RMSE、CSI 和 KGE' 等精度指标之间的 CC（称为 CC'）（见补充图 S2）。结果表明，质量指数对 IMERG_uncal 的精度指标优于 IMERG_cal，但总体而言，质量指数与指标之间的 CC' 不是很高，这意味着质量指数不能全面代表中国 IMERG 估算的准确性。

4.3. IMERG 的改进空间

尽管根据本研究的结果，IMERG 表现良好，但仍有改进空间。首先，GSMaP 降水估计值几乎在中国每个地区和季节都优于 IMERG 估计值（图 4 和 5）。为了探究原因，我们比较了 CPC 和 GPCC 分析的测量仪器数量，发现在中国，CPC 使用的测量仪器数量并不比 GPCC 多。此外，我们还比较了未包含测量仪器观测的 IMERG_uncal、IMERG Late run 和 GSMaP MVK 的性能（见补充表 S2）。IMERG_uncal 和 IMERG Late run 的表现优于 GSMaP MVK。例如，IMERG_uncal、IMERG Late run 和 GSMaP MVK 的平均 KGE' 值分别为 0.55、0.57 和 0.31。

| | |
|---|--|
| G.唐,等人。 | 环境遥感 240 (2020) 111697 |
| 因此,对于洪水模拟和监测等近实时应用,IMERG 后期运行优于 GSMaP MVK。GSMaP 的更好性能归功于日尺度调整的优势,这是 IMERG 未来潜在的改进方向。 | 利益竞争声明 |
| | 作者声明他们没有已知的竞争性经济利益或个人关系,这些利益或关系可能会影响本文所报告的工作。 |
| 其次,IMERG 等卫星产品的降雪估计精度较差。这一问题在一定程度上导致了它们在冬季的表现不佳。目前,IMERG 使用湿球温度对降雨和降雪进行分类,全球温度阈值统一。为了更精确地区分降雨和降雪,需要获取温度阈值的空间分布图 (Jennings 等,2018)。此外,也有一些基于高频被动微波数据的降雪反演算法。 | 致谢 |
| | 我们感谢地面、卫星和再分析降水数据集的开发者们为提供他们的产品而做出的巨大努力。这项研究由加拿大全球水资源未来 (GWF) 计划和中国国家自然科学基金 (拨款 71461010701) 资助。我们感谢编辑团队和三位匿名审稿人为改进这份手稿所做的努力。 |
| 值得尝试采用这些算法直接检索 2 级降雪估计值,这有助于改进 3 级 IMERG 数据。 | 附录 A. 补充数据 |
| | 本文的补充数据可在线查阅: https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697 。 |
| 第三,IMERG 降水估计的准确度在 2001 年至 2018 年的时间段内不断提高 (图8)。为了解释这一趋势,我们计算了2001 年至 2018 年年度准确度指标 (即 CC、CSI 和 KGE')与被动微波样本数量之间的CC (称为 CC)。对于 CC、CSI 和 KGE',CC值分别为 0.84、0.73 和 0.55。因此,可以合理地得出结论,被动微波样本数量的增加主要是 IMERG 准确度提高的主要原因。此外,微波传感器的分辨率越来越高,频道越来越多,这也有助于 IMERG 的改进。旨在纳入更多被动微波传感器的国际合作有利于提高 IMERG 产品的质量。 | 参考 |
| | Adler, RF,Gu, G.J.,Sapiano, M.,Wang, J.J.,Huffman, GJ,2017.全球降水:卫星时代的平均值、变化和趋势 (1979-2014 年)。地球物理学报, 38, 679-699。 |
| | AghaKouchak, A.,Mehran, A.,Norouzi, H. and Behrangi, A.,2012 年。卫星降水数据集中的系统误差和随机误差成分。地球物理研究快报 39。 |
| | Alemohammad, SH,McColl, KA,Konings, AG,Entekhabi, D.,Stoffelen, A.,2015 年。使用乘法三重配置表征美国各地降水产品误差。水文地球系统科学。19,3489-3503。 |
| | Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, DK, Knapp, KR, Cecil, LD, Nelson, BR, Prat, OP, 2015. PERSIANN-CDR:用于水文和气候研究的多卫星观测的每日降水气候数据记录。Bull. Am. Meteorol. |
| | 社会 96,69-83。 |
| | Asong, ZE, Razavi, S., Wheeler, HS, Wong, JS, 2017. 评估加拿大南部 GPM (IMERG)综合多卫星反演与地面降水观测结果:初步评估。J. Hydrometeorol. 18, 1033-1050。 |
| | Beck, HE, Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, AIJM, Weedon, G., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G.J, Wood, EF, 2017. 使用测量站观测和水文模型对 23 个降水数据集进行全球尺度评估。水文。 |
| | 地球系统科学。1-23。 |
| | Beck, HE, Wood, EF, Pan, M., Fisher, CK, Miralles, DG, Van Dijk, AI, McVicar, TR, Adler, RF, 2019. MSWEP V2 全球 3 小时 0.1° 降水:方法论和定量评估。美国气象学会通报 100,473-500。 |
| | Behrangi, A., Yin, X., Rajagopal, S., Stampoulis, D., Ye, H., 2018.使用近地面大气信息区分降雪和降雨:比较分析、不确定性和水文重要性。QJR Meteorol. Soc. 144, 89-102。 |
| | Berghuis, WR, Woods, RA, Hrachowitz, M.,2014.降水从雪转为雨导致径流量减少。Nat. Clim. Chang. 4 (7), 583。 |
| | Chen, X., Long, D., Hong, Y., Zeng, C., Yan, DH, 2017.通过采用 GRACE 和多源数据的渐进式两阶段校准策略改进积雪和冰川融化模型:积雪和冰川融化如何影响上布拉马普特拉河流域的径流?《水资源研究》53,2431-2466。 |
| | Chen, GX, Lan, RY, Zeng, WX, Pan, H., Li, WB, 2018.季风海岸 (华南)地面和卫星观测中降雨的日变化。J. Clim. 31, 1703-1724。 |
| | Ciabatta, L.,Massari, C.,Brocca, L.,Gruber, A.,Reimer, C.,Hahn, S.,Paulik, C.,Dorigo, W.,Kidd, R.,Wagner, W.,2018 年。SM2RAIN-CCI:基于 ESA CCI 土壤湿度的全新全球长期降雨数据集。地球系统科学数据 10,267-280。 |
| | 哥白尼气候变化服务 (C3S),2017 年。ERA5:第五代 ECMWF 全球气候的大气再分析。哥白尼气候变化服务气候数据存储 (CDS) 2019 年 7 月。https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home。 |
| | Dai, A., Giorgi, F., Trenberth, KE, 1999.美国本土降水的观测和模型模拟日变化。《地球物理研究杂志:大气》104,6377-6402。 |
| | Dee, DP,Uppala, SM,Simmons, AJ,Berrisford, P.,Poli, P.,Kobayashi, S.,Andrae, U., Balmaseda, MA, Balsamo, G.,Bauer, P.,Bechtold, P., Beljaars, ACM, van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, AJ, Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H.,Hólm, E.V.,Isaksen, I.,Kållberg, P., Köhler, M.,Matricardi, M.,McNally, A.P.,Monge-Sanz, B.M.,Morcrette, J.J.,Park, B.K.,Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, JN, Vitart, F., 2011。ERA-中期再分析:数据同化系统的配置和性能。问。 |
| | JR气象学协会137, 553-597。 |
| | Deng, H., Pepin, N., Chen, Y.,2017.变暖条件下青藏高原降雪的变化。地球物理研究杂志:大气 122,7323-7341。 |
| | Dezfuli, AK,Ichoku, CM,Huffman, GJ,Mohr, KI,Selker, JS,van de Giesen, N., |

G.唐,等人。

环境遥感 240 (2020) 111697

Hochreutener, R., Annor, FO, 2017. 非洲 IMERG 降水的验证。J. 水文气象学 18, 2817–2825。
Duan, Z., Bastiaanssen, WGM, 2013. TRMM 3B43 7 版观测系统的首批结果
降水产品与新的降尺度校准程序相结合。
遥感环境 131, 1–13。
Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., Disse, M., 2016. 在多个时间和空间尺度上评估意大利阿迪杰盆地的八种高分辨率网
格降水产品。Sci. Total Environ. 573, 1536–1553。

Funk, J., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G.,
Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015 年。利用红外降水观测站监测气候灾害 极端天气监测的新环
境记录。《科学数据》2, 150066。

Gandin, LS, 1965. 气象场的客观分析。收录于：以色列科学翻译计划, 第 242 页。

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, MJ, Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, CA, Darmenov, A., Bosilovich, MG,
Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, AM,
Gu, W., Kim, G.-K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, JE, Partyka, G., Pawson, S., Putman, W.,
Rienecker, M., Schubert, SD, Sienkiewicz, M., Zhao, B., 2017. 现代回顾性分析研究与应用版本 2 (MERRA-2). J. Clim.
30, 5419–5454。

Gupta, HV, Kling, H., Yilmaz, KK, Martinez, GF, 2009 年。均方误差分解和 NSE 性能标准：对改进水文建模的影响。J. Hydrol.
377, 80–91。

Harpold, AA, Kaplan, ML, Klos, PZ, Link, T., McNamara, JP, Rajagopal, S., Schumer, R. and Steele, CM, 2017 年。《雨或雪：水
文过程、观测、预测和研究需求》。《水文地球系统科学》21, 1–22。

Hong, Y., Chen, S., Xue, X., Hodges, G., 2012. 全球降水估计与应用
应用。在：多尺度水文遥感：前景和应用。
CRC Press, 第 371–386 页。

Hou, AY, Kakar, RK, Neeck, S., Azarbarzin, AA, Kummerow, CD, Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K. and Iguchi, T., 2014. 全
球降水测量任务。Bull.
Am. Meteorol. Soc. 95, 701–722。

Huffman, GJ, Adler, RF, Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B., Schneider,
U., 1997. 全球降水气候学项目 (GPCP) 组合降水数据集。美国气象学会通报 78, 5–20。

霍夫曼, GJ, 博尔文, DT, 内尔金, EJ, 沃尔夫, DB, 阿德勒, RF, 顾, G., 洪, Y.,
Bowman, KP, Stocker, EF, 2007. TRMM 多卫星降水分析 (TMPA)：准全球、多年、组合传感器精细尺度降水估计。J.
Hydrometeorol. 8, 38–55。

Huffman, GJ, Adler, RF, Bolvin, DT, Nelkin, EJ, 2010 年。TRMM 多卫星降水分析 (TMPA)。《卫星降雨在地表水文学中的应
用》, 第 3–22 页。

霍夫曼, GJ, 博尔文, DT, 布雷斯特, D., 许, K., 乔伊斯, R., 基德, C., 内尔金, EJ,
Sorooshian, S., Tan, J., Xie, P., 2019. NASA 全球降水测量 (GPM)
综合多卫星 E 检索 GPM (IMERG)：在：算法理论基础文档 (ATBD)。NASA/GSFC, 美国马里兰州格林贝特。https://
pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V5.1b.pdf。

Immerzeel, WW, Droogers, P., de Jong, SM, Bierkens, MFP, 2009. 利用遥感技术对喜马拉雅河流域积雪覆盖进行大规模监测
并模拟径流。遥感环境 113, 40–49。

Immerzeel, WW, van Beek, LP, Bierkens, MF, 2010. 气候变化将影响
亚洲水塔。《科学》第 328 卷, 1382–1385 年。

Jennings, KS, Winchell, TS, Livneh, B. and Molotch, NP, 2018. 北半球降雪温度阈值的空间变化。自然通讯 9, 1148。

Jiang, L., Bauer-Gottwein, P., 2019. GPM IMERG 降水估计值作为水文模型强迫如何发挥作用？对中国大陆 300 个集水区的评估。
J. Hydrol. 572, 486–500。

Joyce, RJ, Xie, P., 2011. 基于卡尔曼滤波器的 CMORPH。J. Hydrometeorol. 12,
1547–1563 年。

Joyce, RJ, Janowiak, JE, Arkin, PA, Xie, PP, 2004. CMORPH：一种利用高空间和时间分辨率的被动微波和红外数据估算全球
降水量的方法。J. Hydrometeorol. 5, 487–503。

Ke, C.-Q., Yu, T., Yu, K., Tang, G.-D. and King, L., 2009. 中国青海降雪趋势及变化。理论与应用气候学, 98, 251–258。

Kidd, C., 2018. 算法理论基础文档 (ATBD) 版本 01-02
NASA 全球降水测量 (GPM) 降水检索和分析方案 (PRPS)。GPM 项目, 马里兰州格林贝特, 16 页。https://
pps.gsfc.nasa.gov/Documents/20180203_SAPHIR-ATBD.pdf。

Kidd, C., Huffman, G., 2011. 全球降水测量。Meteorol. Appl. 18,
334–353。

Kidd, C., Matsui, T., Chern, J., Mohr, K., Kummerow, C., Randel, D., 2016. 使用基于物理的反演方案通过跨轨被动
微波观测估算全球降水量。J. Hydrometeorol. 17, 383–400。

Kirschbaum, DB, Huffman, GJ, Adler, RF, Braun, S., Garrett, K., Jones, E., McNally, A., Skofronick-Jackson, G., Stocker, E., Wu, H.,
Zaitchik, BF, 2017 年。NASA 遥感降水：应用用户的存储库。美国气象学会通报 98, 1169–1184。

Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M., 2012 年。气候变化情景组合下多瑙河上游流域的径流条件。J. Hydrol. 424, 264–277。

Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., Simpson, J., 1998. 热带降雨测量任务 (TRMM) 传感器组件。J. Atmos.
Ocean. Technol. 15, 809–817。

Kummerow, C., Simpson, J., Thiele, O., Barnes, W., Chang, ATC, Stocker, E., Adler, RF, Hou, A.,
Kakar, R., Wentz, F., Ashcroft, P., Kozu, T., Hong, Y., Okamoto, K., Iguchi, T., Kuroiwa, H., Im,
E., Haddad, Z., Huffman, G., Ferrier, B., Olson, WS, Zipser, E.,

Smith, EA, Wilhelm, TT, North, G., Krishnamurti, T., Nakamura, K., 2000. 热带降雨测量任务 (TRMM) 在轨运行两
年后的状况。J.
Appl. Meteorol. 39, 1965–1982。
Kummerow, CD, Randel, DL, Kulie, M., Wang, NY, Ferraro, R., Munchak, SJ, Petkovic, V., 2015 年。《戈达德剖析
算法向全参数方案的演变》。《大气海洋技术杂志》32, 2265–2280。

Li, DY, Wrzesien, ML, Durand, M., Adam, J., Lettenmaier, DP, 2017. 美国西部有多少径流源自雪，未来将如何变化？ Geophys.
Res. Lett. 44, 6163–6172。

Li, C., Tang, G., Hong, Y., 2018. 地基、多卫星和
再分析降水产品：三重配置法在中国大陆的适用性。水文水地质科学杂志 562, 71–83。

Liu, Z., 2016. GPM (IMERG) 和 TRMM 多卫星降水分析 (TMPA) 降水产品的综合多卫星反演比较：初步结果。J. Hydrometeorol.
17, 777–790。

卢鑫, 唐光, 王鑫, 刘艳, 贾玲, 谢光, 李莎, 张燕, 2019. 中国天山地区 GPM IMERG 降水数据的校正。水文地质科学, 2019, 575, 1239–1252。

McColl, K. A., Vogelzang, J., Konings, A. G., Entekhabi, D., Piles, M., Stoffelen, A., 2014 年。
扩展三重配置：估计与未知目标相关的误差和相关系数。地球物理研究快报 41, 6229–6236。

Mega, T., Ushio, T., Kubota, T., Kachi, M., Aonashi, K., Shige, S., 2014. 测量仪调整的全球卫星降水测验 (GSMaP-Gauge)。
见：2014 年第 31 届 URSI 大会和科学研讨会 (URSI GASS)。IEEE, 第 1–4 页。

Panegrossi, G., Rysman, J.-F., Casella, D., Marra, A., Sanò, P., Kulie, M., 2017. 基于 CloudSat 的 GPM 微波成像仪降雪观测
能力评估。
传感器 9,

Roebber, PJ, 2009. 《可视化多种预测质量指标》。《天气预报》。
24, 601–608。
Safeeq, M., Mauger, GS, Grant, GE, Arismendi, I., Hamlet, AF, Lee, S.-Y., 2014 年。
将大规模水文模型预测与太平洋西北部观测到的径流量进行比较：“气候和地下水的影响”。水文气象学杂志, 15, 2501–2521。

Serreze, MC, Barrett, AP, Lo, F., 2005. 大气再分析和卫星反演描绘的北半球高纬度降水。周一天气预报 133, 3407–3430。

Shen, Y., Xiong, A., 2016. 中国大陆新型测量仪降水分析方法的验证与比较。国际气候学杂志, 36, 252–265。

Sims, EM, Liu, G., 2015. 雪雨转变概率的参数化。J.
水文气象学, 16, 1466–1477。
Skofronick-Jackson, G., Petersen, WA, Berg, W., Kidd, C., Stocker, EF, Kirschbaum,
D.B., Kakar, R., Braun, S.A., Huffman, G.J., Iguchi, T., Kirstetter, P.E., Kummerow, C.,
Meneghini, R., Oki, R., Olson, W.S., Takayabu, Y.N., Furukawa, K., 威尔海特, J., 2017。
全球降水测量 (GPM) 对科学和社会的使命。公报。
Am. Meteorol. Soc. 98, 1679–1695。
Stoffelen, A., 1998. 向真正的近地表风速迈进：使用三重共置进行误差建模和校准。地球物理研究杂志：海洋 103, 7755–7766。

Tan, J., Huffman, GJ, 2019 年。计算 IMERG 06 版的变形矢量。

Tan, J., Petersen, WA, Tokay, A., 2016. 一种识别 IMERG 误差源以进行 GPM 地面验证的新方法。J. Hydrometeorol. 17, 2477–
2491。

Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., Hong, Y., 2016a. 在多个时空尺度上对中国大陆地区 GPM Day-1 IMERG 和 TMPA
Version-7 旧版产品的评估。J. Hydrol. 533, 152–167。

Tang, G., Zeng, Z., Long, D., Guo, X., Yong, B., Zhang, W., Hong, Y., 2016b. 中纬度流域 TRMM 和 GPM 3 级产品的统计和文
本比较：第一天 IMERG 是否是 TMPA 3B42V7 的良好继任者？J.

水文气象学 17 (1), 121–137。
唐刚, 温燕, 高建军, 龙丹, 马燕, 万伟, 洪燕, 2017. 三种共存星载雷达在全球降雨和降雪估算中的异同。水资源研究, 53, 3835–3853。

Tang, G., Long, D., Behrangi, A., Wang, C., Hong, Y., 2018a. 探索深度神经网络
网络利用多传感器和再分析数据检索高纬度地区的雨雪。水资源研究, 54, 8253–8278。

Tang, G., Behrangi, A., Long, D., Li, C., Hong, Y., 2018b. 考虑测量仪的时空误差：评估网格化降水产品的关键步骤。J.
Hydrol. 559, 294–306。

Tang, G., Long, D., Hong, Y., Gao, J., Wan, W., 2018c. 利用星载降水雷达记录青藏高原降水与地形之间的多因素关系。遥
感环境, 208, 82–96。

Taylor, KE, 2001. 在一张图中概括模型性能的多个方面。地球物理研究杂志：大气 106, 7183–7192。

Tian, Y., Peters-Lidard, CD, Eylander, JB, Joyce, RJ, Huffman, GJ, Adler, RF, Hsu, K., Turk, FJ, Garcia, M., Zeng,
J., 2009. 卫星降水估计误差成分分析。J. Geophys. Res. 114。

田, Y., 霍夫曼, GJ, 阿德勒, RF, 唐, L., 萨皮亚诺, M., 马焦尼, V., 吴, H., 2013。
每日降水量测量中的建模误差：加法还是乘法？
地球物理研究快报 40, 2060–2065。

Wang, J., Hong, Y., Li, L., Gourley, JJ, Khan, SI, Yilmaz, KK, Limaye, AS, 2011。
耦合路由和过剩存储 (CREST) 分布式水文模型。
水文科学杂志 56(1), 84–98。

Wang, R., Kumar, M., Link, TE, 2016. 气候变暖条件下融雪产生的峰值径流的潜在趋势。地球物理研究快报 43, 5052–
5059。

王晨, 唐光, 韩哲, 郭晓玲, 洪燕, 2018. GPM IMERG Version-03, Version-04 及其最新 Version-05 降水产品的全球比对与
区域评估：相似性、差异性与改进点。J. Hydrol. 564,

G.唐,等人。

环境遥感 240 (2020) 111697

342–356。
Willmott, J.,1981. 论模型的验证。Phys. Geogr. 2,184–194。
Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, SH, Yarosh, Y., Sun, F., Lin, R., 2017. 重新处理并经过偏差校正的 1998 年 CMORPH 全球高分辨率降水估计值。J. 水文气象学 18 (6) ,1617–1641。
姚 T.、汤普森 LG、莫斯布鲁格 V.、张 F.、马英、罗 T.、徐 B.、杨 X.、 Joswiak, DR, Wang, W., Joswiak, ME, Devkota, LP, Tayal, S., Jilani, R., Fayziev, R., 2012。《第三极环境 (TPE)》。《环境发展》3,52–64。

Yong, B., Liu, D., Gourley, JJ, Tian, Y., Huffman, GJ, Ren, L., Hong, Y., 2015.实时 Tmm 多卫星降水分析的全球视野 对其后续全球降水测量任务的影响。美国气象学会通报 96,283–296 。
Zhou, C., Wang, K., 2017. 对比白天和夜间降水变化 19792014年中国地区观测与8种再分析产品之间的差异分析. J. Clim. 30, 6443–6464。