

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.007

# 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析

沈哲辉<sup>1,2</sup>, 韩静妍<sup>1</sup>, 桂敬聪<sup>1</sup>, 那嘉明<sup>1,3</sup>

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 为评估再分析和卫星反演降水数据在长江流域的适用性, 以气象站点观测数据为地面参考, 采用相关系数、均方根误差、相对偏差、命中率、误报率、关键成功率等评价指标, 在日尺度上比较了再分析降水数据 ERA5-Land 和卫星反演降水数据 IMERG-Final 在长江流域的适用性。结果表明: 相比 IMERG-Final, ERA5-Land 在长江上游高原地形区的适用性较差, 主要表现为对降水强度的严重高估及较高的误报率; 在长江中下游地区, ERA5-Land 和 IMERG-Final 具有各自的优势和缺点, 虽然 ERA5-Land 对降水事件的综合捕捉能力总体上强于 IMERG-Final, 但其对降水强度的模拟能力弱于 IMERG-Final; 在冬季 ERA5-Land 对降水事件的探测能力显著强于 IMERG-Final, 且与地面气象站点观测值的相关程度也高于 IMERG-Final; IMERG-Final 在夏季的精度则远高于 ERA5-Land, 表明在降水强度高的季节, 卫星反演方法对降水的估算比气象模式再分析方法更加可靠。

**关键词:** 降水数据; ERA5-Land; IMERG-Final; 误差分析; 探测能力; 地形影响; 长江流域

中图分类号: P332 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)01-0050-12

## Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin

SHEN Zhehui<sup>1,2</sup>, HAN Jingyan<sup>1</sup>, GUI Jingcong<sup>1</sup>, NA Jiaming<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** To evaluate the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin, ground-based meteorological station observations were used as a reference. This study employed evaluation metrics such as correlation coefficient, root mean square error, relative bias, probability of detection, false alarm rate, and critical success index to compare the daily-scale applicability of ERA5-Land reanalysis precipitation data and IMERG-Final satellite-derived precipitation data in the region. The results indicate that compared to IMERG-Final, ERA5-Land performs poorly in the upstream plateau areas of the Yangtze River Basin, primarily due to significant overestimation of precipitation intensity and a higher false alarm rate. In the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, both ERA5-Land and IMERG-Final have their respective strengths and weaknesses. While ERA5-Land generally exhibits superior overall capability in capturing precipitation events, its ability to simulate precipitation intensity is weaker than that of IMERG-Final. During winter, ERA5-Land significantly outperforms IMERG-Final in detecting precipitation events and shows stronger correlation with ground-based meteorological observations. Conversely, IMERG-Final demonstrates much higher accuracy than ERA5-Land in summer, indicating that satellite-derived methods are more reliable than reanalysis-based methods for estimating precipitation during seasons with higher precipitation intensity.

**Key words:** precipitation data; ERA5-Land; IMERG-Final; error analysis; detection capability; terrain influence; the Yangtze River Basin

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42301385);“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2023491211)

**作者简介:** 沈哲辉(1991—),男,讲师,博士,主要从事卫星遥感降水研究。E-mail:shenzhehui@njfu.edu.cn

**通信作者:** 那嘉明(1992—),男,讲师,博士,主要从事数字地形分析研究。E-mail:jiaming.na@njfu.edu.cn

**引用本文:** 沈哲辉,韩静妍,桂敬聪,等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):50-61.

SHEN Zhehui, HAN Jingyan, GUI Jingcong, et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 50-61.

降水作为一种常见的自然现象,其时空分布直接或间接地影响着地表径流、土壤湿度、地下水动态、蒸散发等陆地水文过程,因此是水文学、气象学和生态学的重要参数之一<sup>[1-2]</sup>。同时,降水使大气中的水分能够重返地面,为地球上的生物提供了赖以生存的淡水资源<sup>[3]</sup>。长江流域覆盖我国19个省(自治区、直辖市),流域面积占国土面积的18.8%,是中国第一及世界第三大流域<sup>[4]</sup>。在全球气候变暖的大背景下,长江流域部分地区降水显著增加,再加上不均匀的降水时空分布格局,导致长江流域洪涝灾害发生频率增大<sup>[5-6]</sup>。因此,及时且精确地获取降水信息对长江流域的水文预报、水资源管理乃至生态环境和社会经济发展都至关重要。

传统获取降水信息的方式是利用地面雨量计,但在海洋、高海拔地区以及沙漠无人区等,只分布着少量甚至没有雨量站,所以这种点式的雨量计数据不足以代表高时空变异性的降水。随着雷达技术的发展,气象雷达逐渐应用到降水测量中。然而气象雷达易受周围环境影响,其信号在地形复杂的山区容易被阻塞<sup>[7-9]</sup>。长江流域地形地貌复杂,从源头至河口流经高原、山地、盆地、丘陵和平原,导致雨量计在长江流域的分布不均,复杂的地形也限制了气象雷达的应用。卫星反演是获取降水信息的重要手段,1997年11月搭载了全球第一台星载主动微波降水雷达的TRMM(tropical rainfall measurement mission)卫星发射,代表正式进入卫星观测降水的时代<sup>[10]</sup>。随着TRMM主卫星的陨落,全球降水观测计划GPM(global precipitation measurement)应运而生,搭载了双频星载降水雷达的GPM主卫星于2014年2月发射,旨在提供新一代全球降雨和降雪观测数据<sup>[11]</sup>。卫星反演降水提升了人类对地球水和能量循环的理解,提高了预测准确、及时的降水信息的能力。除了卫星反演外,利用数值天气模式和资料同化方法重建全球历史气象资料的“再分析”方式是另外一种获得全球连续降水信息的手段<sup>[12]</sup>。目前国际上应用较广的再分析降水数据有欧洲中期天气预报中心ECMWF的ERA(ECMWF re-analysis)系列再分析数据、美国国家环境预测中心NCEP的气候预测系统再分析CFSR(climate forecast system reanalysis)、美国国家航空航天局NASA全球模式与同化办公室GMAO开发的新一代数值产品MERRA(modern-era retrospective analysis for research and applications)等<sup>[13-15]</sup>。

当前,已有一些研究对卫星反演降水数据和再分析降水数据的表现进行了对比分析。如Xu等<sup>[16]</sup>对比分析了卫星降水数据(ERA5、ERA5-Land)和再分析降水数据(IMERG-Final、GSMaP-Gauge)在中国大陆的适用性,发现卫星降水数据总体优于再分析降水数据,但再分析降水数据在高纬度地区和冬季的表现明显优于卫星降水数据;胡文韬等<sup>[17]</sup>对比分析了卫星降水数据(IMERG-Final和GSMaP-Gauge)与再分析降水数据(ERA5-Land)长江流域上游地区的应用精度,结果显示两套卫星降水数据在长江上游适用性高于再分析降水数据;欧阳琳<sup>[18]</sup>发现卫星降水数据IMERG-Final能很好地反映喜马拉雅中部河谷季风期降水的日变化,而再分析降水数据ERA5-Interim缺乏反映降水日变化海拔依赖性的能力;Zhou等<sup>[19]</sup>对比了IMERG-Final、GSMaP-Gauge、ERA5-Land在中国大陆的表现,发现再分析降水数据在平原地区总体精度更高,而卫星降水数据在地形复杂的山地地形区更准确。

基于再分析和卫星的定量降水估算普遍存在“低雨强高估,高雨强低估”的现象<sup>[20-22]</sup>,并且再分析降水数据在高海拔地区易于产生严重高估<sup>[23-24]</sup>。因此,对再分析和卫星反演降水数据在不同降水强度及不同海拔上的表现进行对比,可直观地分析两种降水数据在不同雨强上产生低/高估的原因,并对再分析降水数据在高海拔地区显著高估的现象给出解释。目前,对再分析和卫星反演降水数据的精度随降雨强度和高程的变化研究较少。长江流域上游高原地形区海拔超过2000m,中游为海拔在500~2000m的山地地形区,在这样地形复杂的流域尤其应关注再分析和卫星反演降水数据的精度跟地形之间的关系,探究这两种降水数据在长江流域不同时空下尺度的适用性。GPM时代最具代表性的卫星反演降水数据为IMERG和GSMaP,尽管两者的表现在不同时空尺度下存在区别,但这种区别远没有再分析和卫星反演间的差异大<sup>[16]</sup>。因此,本文选择最具代表性的卫星反演降水数据IMERG和再分析降水数据ERA5进行对比分析,探究这两种降水数据在长江流域应用的优劣性,以期对长江流域的降水数据研究提供一定的参考。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

长江流域位于24°N~36°N、90°E~123°E之间,流域面积约为180万km<sup>2</sup>,是中国第一大流域。长江流域的地形地貌多样,从上游至下游依次经过青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地、江南丘陵、长江中下游平原,复杂的地形导致长江流域降水的时空分布差异较大。为分析降水数据在不同地形条件下的误差特征,

本文按高程信息将长江流域划分为3个地形区(图1):①海拔在500m以下的长江中下游平原地形(I区);②海拔在500~2000m的中游山地地形(II区);③海拔在2000m以上的上游高原地形(III区)。

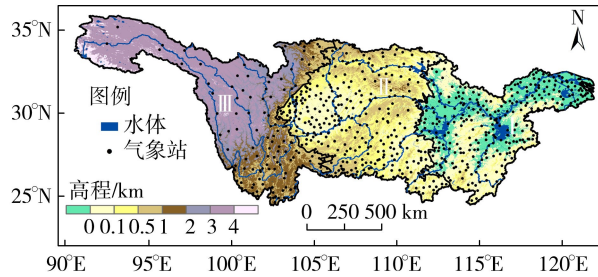


图1 长江流域地形、区域划分及地面气象站分布

Fig.1 Topography, regional division, and distribution of meteorological stations in the Yangtze River Basin

## 1.2 研究数据

### 1.2.1 地面参考数据

地面参考采用长江流域分布的718个气象站(包括国家气候观测台,国家气象观测一级站、二级站)的降水信息。由于气象站直接观测降水数据难以获取,采用中国逐日网格降水量实时分析系统CGDPA(the gridded china gauge-based daily precipitation analysis)数据作为气象站点的观测数据。CGDPA数据是中国基于雨量计的日降水分析产品,以中国大陆2400多个地面气象站(长江流域站点分布如图1所示)的日降水数据为基础,采用“基于气候背景场”的最优插值法制作的格点化日降水量资料。CGDPA数据的精度较高,可用于定量分析天气实况、检验天气气候模式和评估卫星降水数据的应用精度<sup>[25-26]</sup>。受CGDPA数据的时间限制,本文对2008年4月至2019年12月的再分析及卫星反演降水数据进行对比分析。

### 1.2.2 再分析与卫星反演降水数据

ERA5是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)全球气候再分析的第五代产品。ERA5降水数据采用四维变分数据同化技术(4D-Var),降水观测数据进入同化系统进行分析,比ERA-Interim有了巨大的提升<sup>[12]</sup>。ERA5通过4D-Var同化系统将地表和上层大气的气象观测数据以及卫星遥感数据融合到大气模型中。ERA5在进行大气数值模拟中,降水过程模拟由积云参数化方案和微物理方案主导,而对流降水模拟主要由微物理方案生成<sup>[21]</sup>。ERA5-Land(以下简称ERA5-L)是ERA5在陆地部分的重演,由ERA5的气象强迫驱动的ECMWF陆面模式的全球高分辨率数值积分实现,是目前全球陆面应用中最先进的再分析数据<sup>[27]</sup>。对于降水资料而言,ERA5-L是通过基于三角网格的线性插值方法从ERA5降水插值得到<sup>[28]</sup>,从而提升了ERA5-L降水产品的空间分辨率(0.1°×0.1°)。ERA5-L降水数据来自哥白尼气候变化服务(C3S)气候数据库。

IMERG是专门为全球降水计划GPM开发的最新一代多卫星联合反演降水算法,IMERG降水数据属于GPM的三级产品,也是GPM时代最具代表性且最先进的卫星降水数据之一<sup>[29]</sup>。IMERG以GPM主卫星搭载的双频降水雷达(DPR)和锥形扫描多通道微波成像仪(GMI)为基础,对其他合作卫星上传传感器的微波及红外数据进行校准和融合,实现多传感器之间的优势互补,拓展和提高了降水的时空覆盖范围和采样精度。IMERG包含了两种近实时产品(Early和Late)和一种滞时产品(Final)。本文采用的是经过全球降水气候中心(GPCC)地面台站数据校正的滞时产品IMERG-Final(以下简称IMERG-F),空间分辨率为0.1°×0.1°,来自NASA官方网站。

## 1.3 评价指标

### 1.3.1 一致性指标

为评价再分析及卫星反演降水数据与地面观测降水在降水量上的一致性,采用3个被广泛使用的精度指标:相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)、相对偏差(RB)。CC衡量降水数据的降水量与地面观测降水量之间线性相关程度,最优值为1;RMSE用于描述降水数据的降水量相对地面观测降水量误差的整体水平,最优值为0;RB表示降水数据降水量相对于地面观测降水量的系统偏差程度,最优值为0。

### 1.3.2 分类指标

采用命中率(POD)、误报率(FAR)和关键成功率(CSI)衡量降水数据对降水事件的探测能力。POD表

示正确探测到的降水事件的比例,最优值为 1; FAR 为降水数据探测到的实际没有发生的降水事件的比例,最优值为 0; CSI 结合了误报和漏报降水事件从而给出了更均衡的评分,最优值为 1。为判断是否发生降水,需设置一个判断是否发生降水的阈值,考虑到雨量计观测和降水数据易在微量降水事件中产生较大的误差<sup>[30-31]</sup>,本文选择 1 mm/d 作为判断降水是否发生的阈值<sup>[32-33]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 误差时空分布

由图 2 可知,整体上 ERA5-L 的表现较差,具有较高的 RB、RMSE,较低的 CC。ERA5-L 在高原地形区接近一半站点上的 RB 超过了 50%,在山地地形区的大部分站点也超过了 20%,说明 ERA5-L 与地面参考的一致性与地形有关,高原地形区和山地地形区的精度低于平原地形区。由于降水在我国呈现从东南沿海到西北内陆逐级递减的空间格局,而 RMSE 与降水强度分布密切相关,两种降水数据的 RMSE 呈现从平坦地形区到复杂地形区逐渐减小的趋势。虽然两种降水数据的 RMSE 在长江流域呈现相同的变化趋势,但整体上 IMERG-F 比 ERA5-L 表现好,说明 IMERG-F 的随机误差比 ERA5-L 小。IMERG-F 的 CC 整体比 ERA5-L 高,尤其是在山地地形区和平原地形区,表明 IMERG-F 比 ERA5-L 具有更高的捕捉降水在时间上变化的能力。

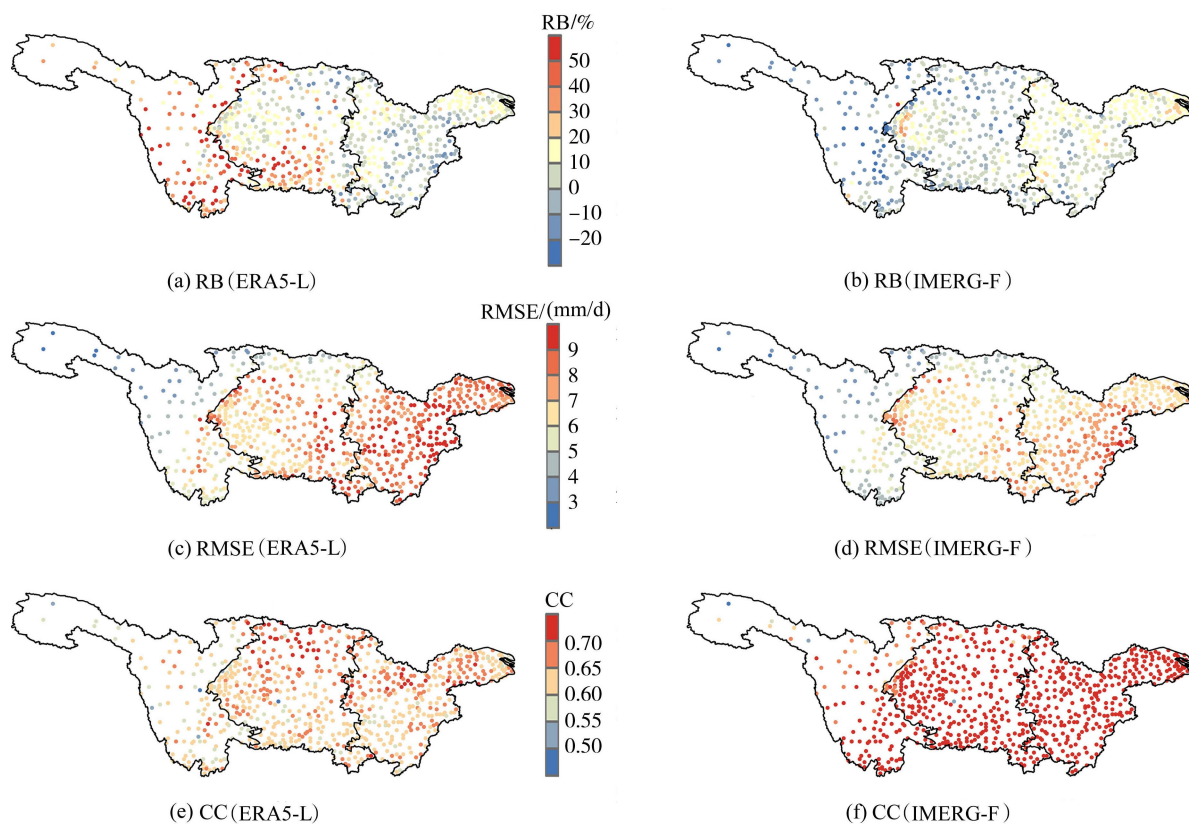


图 2 ERA5-L 和 IMERG-F 的一致性指标在长江流域的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of continuous metrics for ERA5-L and IMERG-F in the Yangtze River Basin

由图 3 可知,ERA5-L 的 POD 在长江流域全境都达到了 0.7 以上,且其在上游高原地形区和中游山地地形区显著高于 IMERG-F。ERA5-L 和 IMERG-F 的 POD 呈现出不同的空间模式,ERA5-L 对降水事件的命中率从下游平原地形区到上游高原地形区逐级上升,而 IMERG-F 在下游平原地形区和上游高原地形区的 POD 高于中游山地地形区,说明了卫星反演方式在复杂地形区对降水的探测能力仍有提升的空间。虽然 ERA5-L 的命中率在长江流域比 IMERG-F 有显著优势,但 ERA5-L 的 FAR 在整个流域范围却明显高于 IMERG-F,在上游高原地形区尤其显著。ERA5-L 和 IMERG-F 的 FAR 空间分布有所不同,IMERG-F 的 FAR 在长江流域整体上较低(基本均在 0.4 以下),而 ERA5-L 的 FAR 空间分布与 POD 的空间分布一致,从下游到上游 FAR 逐渐增大。结合命中率和误报率从综合成功率看,得益于较高的 POD,ERA5-L 在长江流域中下游地区的 CSI 高于 IMERG-F,但同样较高的 FAR 使得 ERA5-L 在上游高原地区的 CSI 表现劣于 IMERG-F。

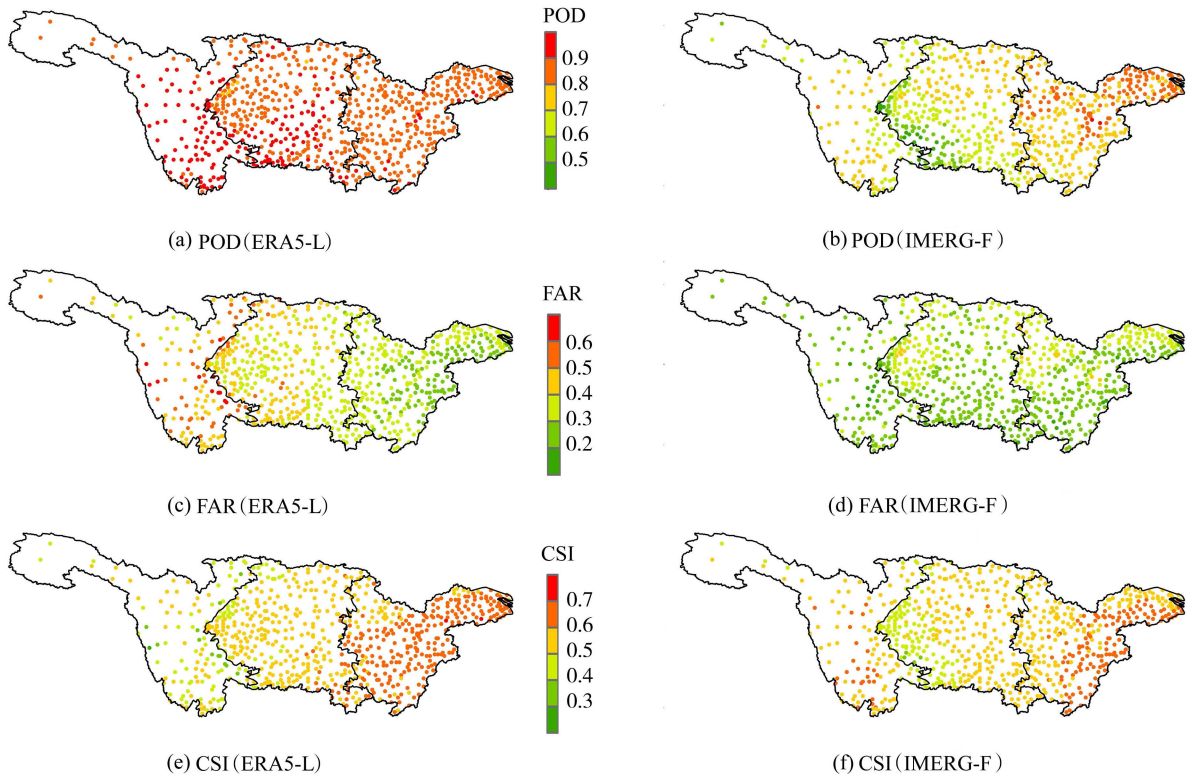


图3 ERA5-L 和 IMERG-F 的分类指标在长江流域的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of classification metrics for ERA5-L and IMERG-F in the Yangtze River Basin

由图4(a)可知,ERA5-L在四季都呈现出高估现象,尤其是在冬季,一半以上时间高估超过了70%,说明再分析降水数据更易高估小雨强或固态降水事件的降水量。IMERG-F的一致性指标在夏季明显优于ERA5-L,特别是IMERG-F与地面参考的相关性显著高于ERA5-L,表明在降水强度高的季节,卫星反演方法对降水量的估算比气象模式再分析方法更精确。从降水事件角度,ERA5-L在4个季节中对降水事件的探测POD显著高于IMERG-F,但在春夏秋三季对降水事件FAR比IMERG-F高。综合POD和FAR,春夏秋三季ERA5-L和IMERG-F对降水事件的综合探测能力相当,但冬季ERA5-L对降水事件的探测能力明显强于IMERG-F。综上,冬季除了RB外ERA5-L的误差指标都优于IMERG-F,更加适用;而夏季除了POD,IMERG-F的误差指标优于ERA5-L,因此夏季卫星降水数据比再分析降水数据更加适用;春秋两季,则根据具体需求选择使用ERA5-L或IMERG-F,若需要尽量保证降水量的准确性则选择IMERG-F,若对降水事件要求较高则选择ERA5-L。

## 2.2 误差随降水强度变化

为分析ERA5-L和IMERG-F在不同降水强度上的误差情况,绘制了两者在长江流域不同地形区的一致性指标在6个降水强度区间上的分布(图5)。再分析降水ERA5-L同卫星降水IMERG-F呈现一样的“低雨强高估,高雨强低估”现象,进一步发现ERA5-L在降水强度超过20 mm/d时会产生显著低估,这与Jiang等<sup>[21]</sup>的结论一致。ERA5-L在降水强度较低时(小于2 mm/d)会产生严重高估,尤其在上游高原区,高估超过200%,这也与图2(a)中ERA5-L在上游高原区的显著高估和图4(a)中ERA5-L在冬季高估严重的结论一致。因此,ERA5-L极大地高估了高原地区易产生的固态降水。ERA5-L和IMERG-F的RMSE在降水强度低于50 mm/d时总体差距不大,但当降水强度超过50 mm/d时ERA5-L的RMSE明显高于IMERG-F,在下游平原区更加显著。因此,推断图4(b)中夏季ERA5-L的RMSE高于IMERG-F主要发生在强降水事件,尤其是在夏季更易发生强降水事件的下游平原区。IMERG-F在不同的地形区的CC都高于ERA5-L,且随着降水强度的增加这种优势更加显著。随着降水强度的增加,卫星降水数据相比再分析数据更能捕捉降水量的时空变化。需要说明的是在小雨强事件上IMERG-F的CC依然稍高于ERA5-L,看似与图4(e)中ERA5-L在冬季的CC高于IMERG-F矛盾,但图4(c)反映的是两种降水数据与地面参考在空间上的相关性,而图5则

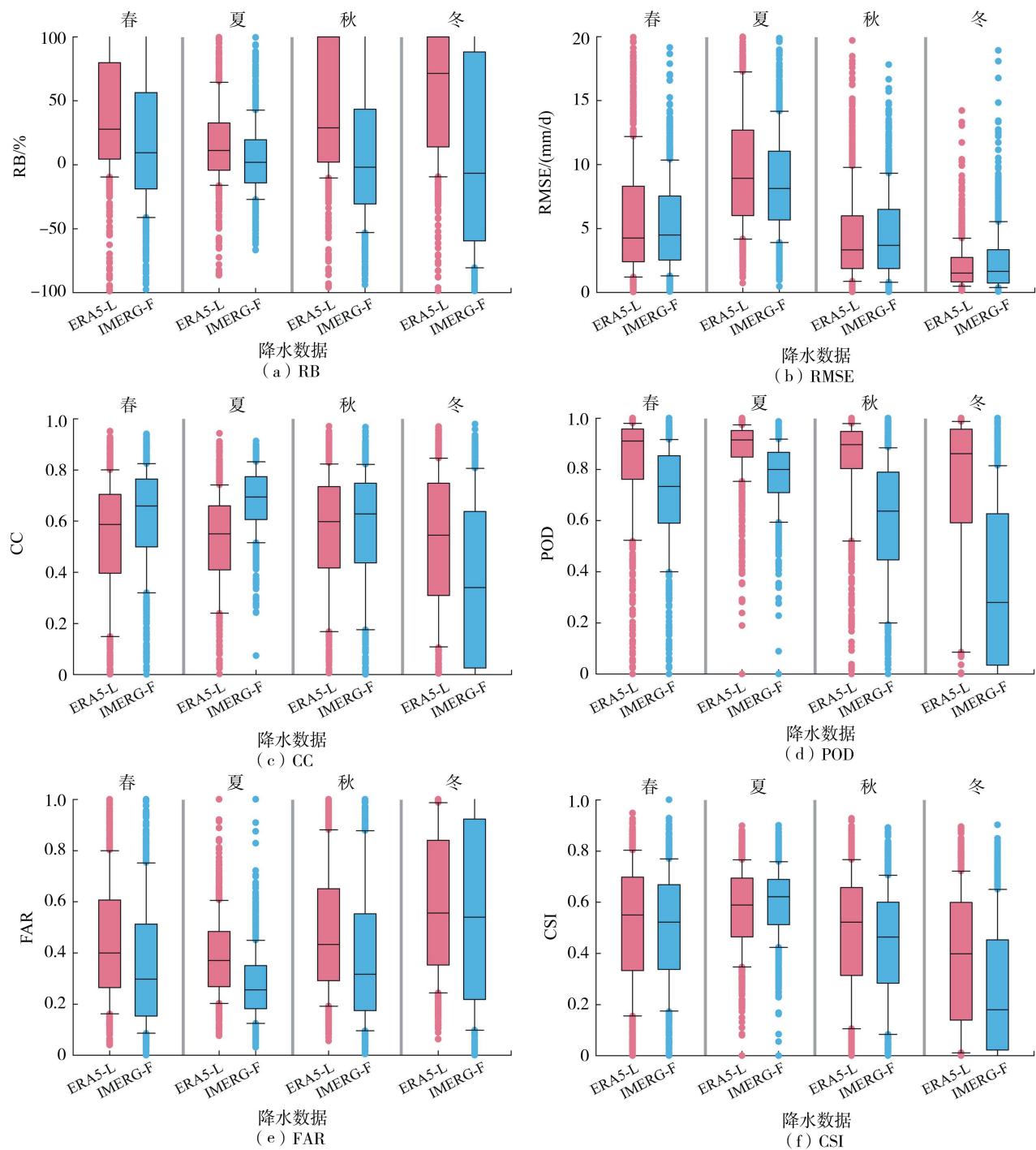


图 4 ERA5-L 和 IMERG-F 在长江流域不同季节的误差指标箱型图

Fig. 4 Boxplots of error metrics for ERA5-L and IMERG-F in different seasons in the Yangtze River Basin

是表达时空相关性,意味着 ERA5-L 在冬季捕捉降水量的时序变化上弱于 IMERG-F。

由图 6 可知,总体上两种降水数据的分类指标随降水强度的变化趋势一致,即随着降水强度的增大 POD 和 CSI 逐渐增大,FAR 则逐渐减小,说明两种降水数据对降水事件的探测能力与降水强度密切相关。从 POD 看,ERA5-L 在整个雨强区间上都保持较高水平,尤其是在上游高原地形区 POD 达 0.8 以上。当降水强度高于 10 mm/d 时,IMERG-F 探测降水命中率与 ERA5-L 相当,但当降水强度低于这个阈值时 IMERG-F 的 POD 远不如 ERA5-L,特别是在中游山地地形区和上游高原地形区。这验证了图 3 中 IMERG-F 在地形复杂地区的 POD 低于 ERA5-L 的结论,且进一步指出 IMERG-F 的这种劣势体现在中小雨强降水事件上。在小于 5 mm/d 的事件上,IMERG-F 的 POD 在 0.6 附近,说明 IMERG-F 在小雨强上的漏报率不容忽视。结合

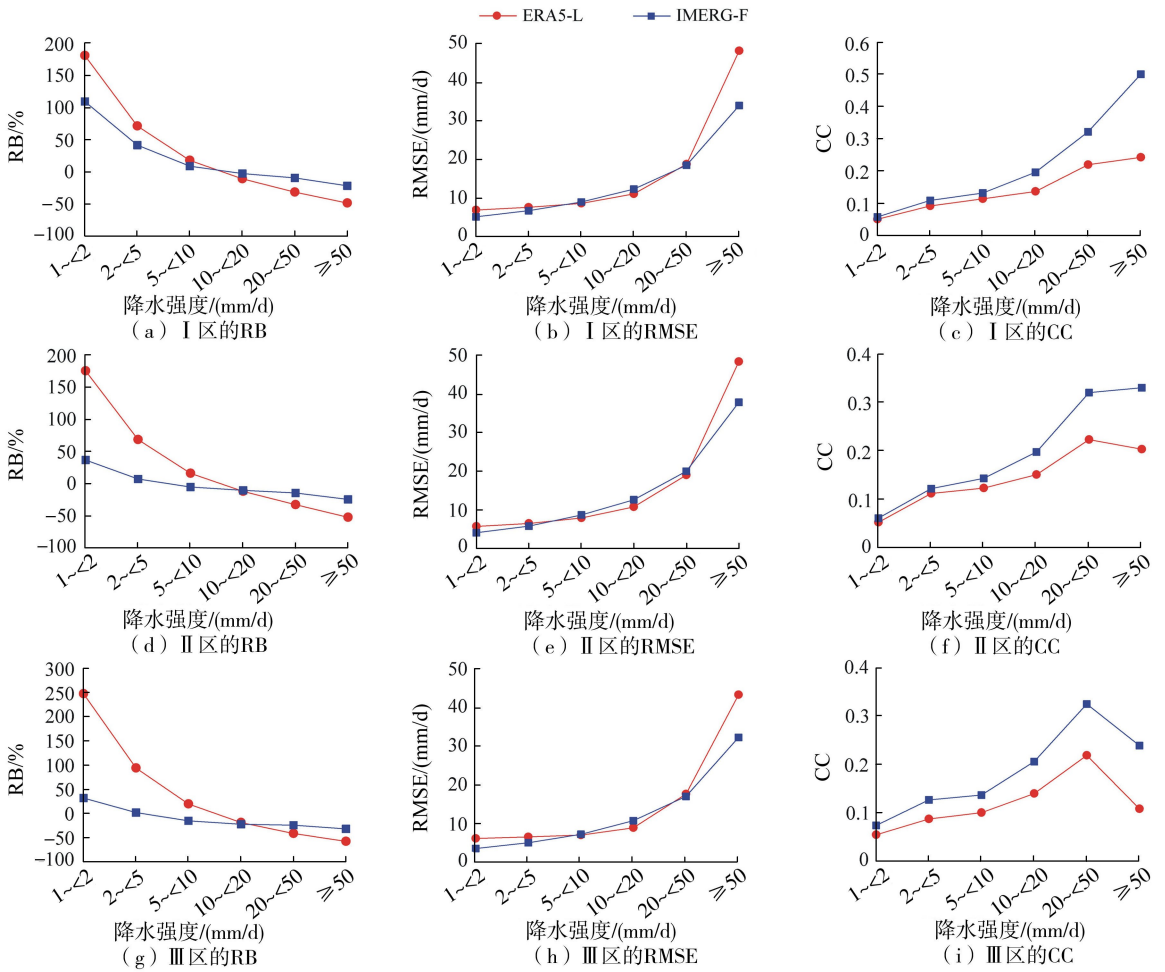


图5 ERA5-L和IMERG-F在长江流域不同地形区的一致性指标随降水强度分布

Fig. 5 Distributions of continuous metrics with precipitation intensity for ERA5-L and IMERG-F in different topographic areas of the Yangtze River Basin

图4(a)中IMERG-F冬季的RB远低于ERA5-L,是由于IMERG-F较高的漏报率导致降水量正负相抵后整体优于ERA5-L。整个雨强区间上ERA5-L和IMERG-F在下游平原地形区的FAR较为接近,但在中游山地地形区和上游高原地形区ERA5-L的FAR比IMERG-F高,这与两者FAR的空间分布一致(图3(c)(d))。结合图4,ERA5-L在冬季FAR的表现优于IMERG-F,这主要受益于ERA5-L在下游平原地形区的小雨强( $<2\text{ mm/d}$ )事件上比IMERG-F有更低的误报率。从CSI看,在平原和山地地形区,ERA5-L准确捕捉中小雨强事件( $<10\text{ mm/d}$ )的能力强于IMERG-F,超过这个降水强度阈值后则IMERG-F表现更优;而在高原地形区除了在小雨强事件( $<2\text{ mm/d}$ )外,IMERG-F对降水事件的探测能力则全面超过ERA5-L。

### 2.3 误差随高程变化

按高程信息将长江流域划分为6个高程分布等级:海拔低于50m的地区划为1区,海拔在50~200m的地区为2区,海拔在 $>200\sim 500\text{ m}$ 的地区为3区,海拔在 $>500\sim 1000\text{ m}$ 的地区为4区,海拔在 $>1000\sim 2000\text{ m}$ 的地区为5区,海拔大于2000m的地区划为6区。

由图7可知,从一致性指标看,ERA5-L和IMERG-F的RMSE和CC随着高程的增加呈现一致的变化趋势:两种降水数据的RMSE均随高程的增加而显著减小,主要是由于海拔越高降水越少,而RMSE与降水强度密切相关;两种降水数据的CC随高程的增加略微下降,但总体较为平稳(ERA5-L的CC在0.6以上,IMERG-F的CC在0.7以上)。ERA5-L和IMERG-F的RMSE和CC虽然随高程的增加呈现出一致的变化趋势,但IMERG-F的RMSE和CC的表现都优于ERA5-L,这也与两者的空间分布是一致的(图2)。然而,ERA5-L和IMERG-F的RB随高程的变化则与RMSE、CC表现出截然不同的分布情况。IMERG-F的RB随高程的增加而减小,而ERA5-L在高程1区和2区的RB略有下降趋势,但当高程超过200m时ERA5-L的

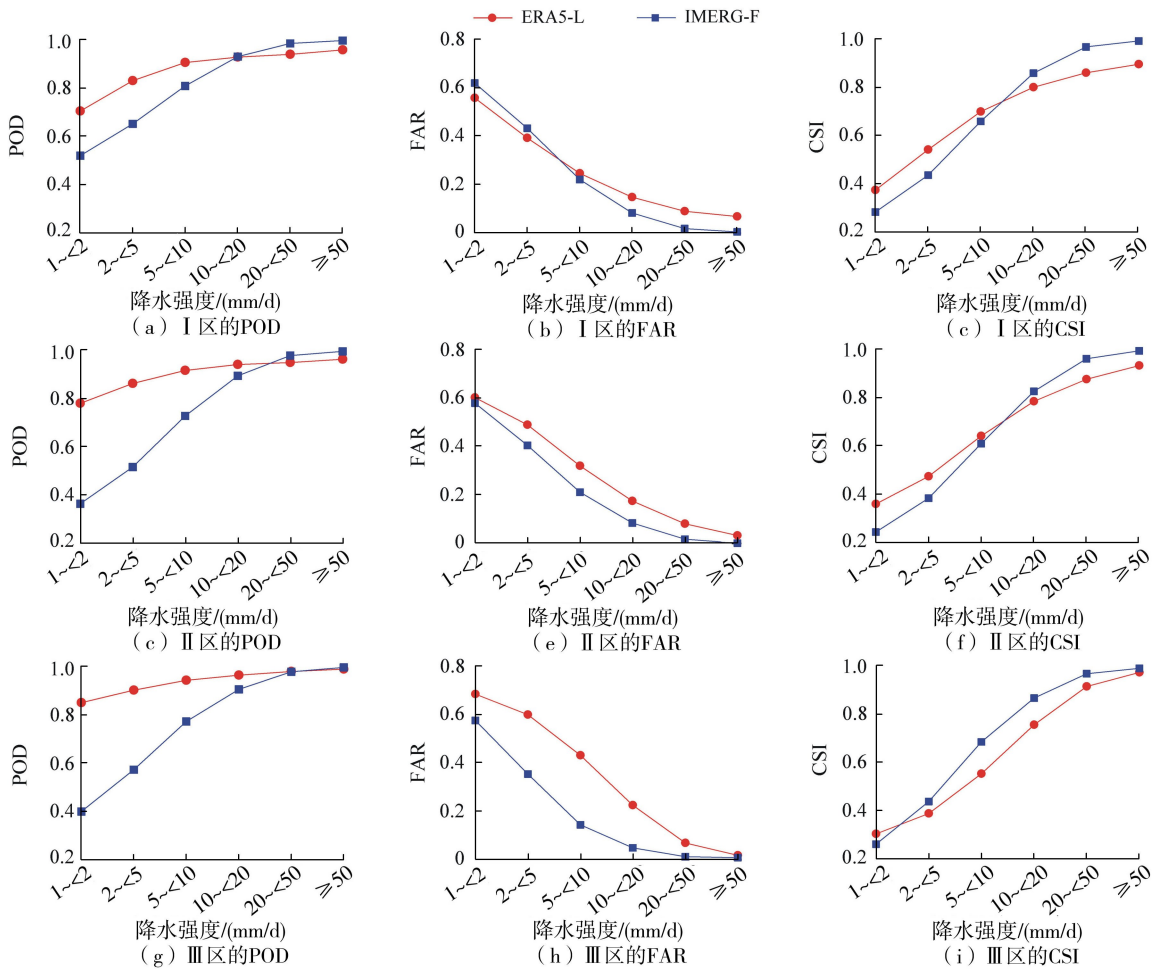


图 6 ERA5-L 和 IMERG-F 在长江流域不同地形区的分类指标随降水强度分布

Fig. 6 Distributions of classification metrics with precipitation intensity for ERA5-L and IMERG-F in different topographic areas of the Yangtze River Basin

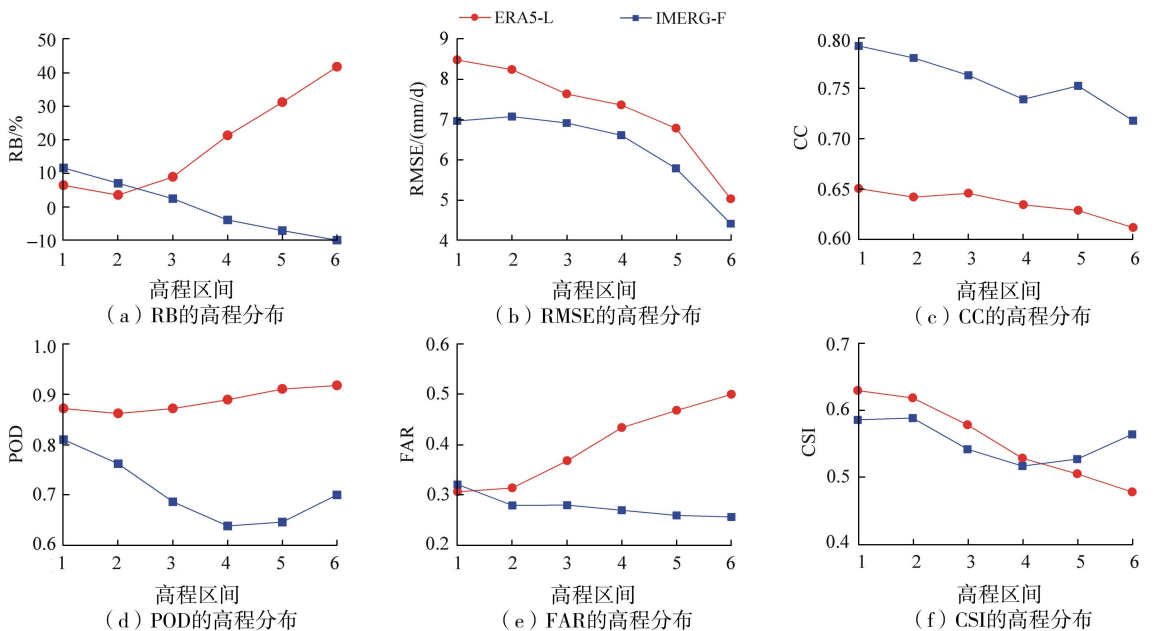


图 7 ERA5-L 和 IMERG-F 的误差指标随高程变化

Fig. 7 Variation of error indexes for ERA5-L and IMERG-F with elevation



RB 随高程增加而显著变大且高估严重。然而,当高程低于 200 m 时,ERA5-L 的相对偏差要优于 IMERG-F 且低于 10%,说明在低海拔地区再分析数据对降水量大小的整体估计较为精确。

从分类指标看,ERA5-L 的 POD 在整个高程区间都保持较高水平(POD 大于 0.8),且随着高程的增加有缓慢上升趋势。IMERG-F 的 POD 随着高程的增加呈现出先减小后增大的趋势,说明卫星反演降水的方式对降水事件的探测命中率并不是一味地随海拔的升高而降低。高原地形区虽然海拔高,但地形没有山地地形区复杂,而海拔在 500~1 000 m 的山区地形复杂,卫星反演降水数据在这种复杂地形区对降水事件的探测命中率仍有很大的进步空间。与 POD 相比,ERA5-L 的 FAR 随高程变化的趋势更加显著,表现为显著的上升趋势。随着高程的增加 ERA5-L 的 FAR 与 IMERG-F 拉开差距,在高程超过 2 000 m 的地区 ERA5-L 的 FAR 甚至达到 0.5,表明 ERA5-L 误报了约一半的降水事件,而 IMERG-F 的 FAR 则随高程的增加基本没有变化,稳定在 0.3 左右。总体上,ERA5-L 的 CSI 与 IMERG-F 相差不大,但由于 ERA5-L 在 2 000 m 以上的高海拔地区 FAR 远超 IMERG-F,导致 ERA5-L 在 2 000 m 以上地区的 CSI 稍低于 IMERG-F。

### 3 讨论

总体上,ERA5-L 对降水事件的综合捕捉能力稍强于 IMERG-F(上游高原地形区除外),但其对降水强度的估计却明显弱于 IMERG-F。再分析降水数据往往由于气象模式的特性而呈现非零值,导致 ERA5-L 具有很高的探测命中率。长江中下游地区雨水充沛,发生降水的概率远高于上游高原地形区。因此,ERA5-L 在长江中下游地区误报降水事件的频率也较低,尤其是在下游平原地形区,FAR 仅稍高于 IMERG-F。综合 POD 和 FAR 的表现,ERA5-L 对降水事件的综合捕捉能力在长江中下游地区高于 IMERG-F。另一方面,IMERG-F 和 ERA5-L 都存在“低雨强高估,高雨强低估”的情况,但 ERA5-L 这种现象更为严重:ERA5-L 高估(低估)了小于(大于)10 mm/d 时的降水强度,且远比 IMERG-F 显著,这与 Jiang 等<sup>[21]</sup>得到的结论一致。ERA5-L 在中小雨强上的降水强度高估与其降水频率高估密切相关<sup>[20,28]</sup>,而其在高强度降水估算中的严重低估是因为再分析技术中对流参数化方案的不足导致的<sup>[35]</sup>。对于卫星反演降水数据,IMERG-F 虽然对于小强度降水事件的探测命中率低于 ERA5-L,尤其在复杂地形区更为显著,但因为 IMERG-F 经过了双频降水雷达 DPR 的标定,其对降水强度的估计比 ERA5-L 更加精确。

ERA5-L 在长江流域上游高原地形区严重高估,尤其是在高程超过 2 000 m 的高海拔地区。结合图 5,ERA5-L 在长江流域高原地形区的高估集中在降水强度小于 5 mm/d 的降水事件上。在长江流域上游高原地形区,ERA5-L 在降水强度小于 2 mm/d 的降水事件上的 FAR 与 IMERG-F 相当(图 6),但在此降雨强度区间上 ERA5-L 对降水量的高估却远超 IMERG-F。由此推断高原地形区 ERA5-L 在小雨强事件上(<2 mm/d)的高估是源自其较高的 POD,即再分析降水数据虽然准确地命中了小雨强降水事件,但在降水量上的估计则远远偏离真实值,这与胡文韬等<sup>[17]</sup>指出 ERA5-L 在长江流域上游地区有较大一部分高估来自命中降水事件的结论一致。在 2~5 mm/d 的降水事件上,ERA5-L 在长江流域上游高原地形区的高估也接近 100%。但 ERA5-L 在 2~5 mm/d 降水事件上的高估与在小于 2 mm/d 上的高估机理不同,ERA5-L 在 2~5 mm/d 上的高估是由探测降水事件的高命中率和高误报率同时作用的结果。因此,ERA5-L 在高原地形区的高估不能全部归因于其较高的探测误报率,在小雨强事件上其对命中降水事件降水量的严重高估是主要原因;而在 2~5 mm/d 的降水事件上,ERA5-L 的显著高估则归因于其命中事件降水量的高估及较高的降水误报率。

长江流域上游高原地形区深居内陆,导致水汽输送距离较远,且高海拔地区对湿润气流的阻挡使水汽难以形成对流和锋面雨,导致降水事件少且降水强度低<sup>[36]</sup>。基于气候模式的再分析降水数据倾向于模拟到降水,导致了其在高海拔地区产生了大量的误报降水事件<sup>[16,37]</sup>。此外,长江流域上游高原地形区因为气温较低,导致在小雨强事件上出现固态降水的概率高于中游和下游地区。Jiang 等<sup>[21]</sup>指出 ERA5 在中国西部高海拔地区的误报率较高,并且推测主要原因是其在固态降水事件中出现了大量的误报事件。根据 Orsolini 等<sup>[38]</sup>的研究,再分析降水数据在模拟中缺少积雪过程可能导致高原地区过度估算了降雪或降水,这是本研究中 ERA5-L 在长江流域高原区小雨强事件上出现严重高估的原因之一。此外,再分析降水数据在处理过程中使用了大量的参数化方案和数值计算方法,因降水资料的周期性很强导致存在着系统性漂移<sup>[12]</sup>,而这种系统性偏差在降水强度较低的高寒山区格外显著<sup>[39-42]</sup>,这也是导致 ERA5-L 在长江流域上游高原地形区产生显著高估的原因之一。在长江流域上游高原地形区由于地形复杂,降水时常以局部地形雨的形式出现。

ERA5-L 在进行大气数值模拟中,大尺度降水主要是由积云参数化方案模拟得到,对流性降水则是通过对流方案模拟对流过程得到。ERA5-L 虽考虑了地形对降水分布的影响,但由于可能对地形雨模拟的机制不够完善,导致其在复杂地形区存在显著的高估。

## 4 结 论

a. ERA5-L 在长江流域的命中率整体较高,但误报率从下游到上游逐渐变大;IMERG-F 在长江流域的误报率整体较低,而命中率从下游到上游逐渐下降。综合来看,ERA5-L 对降水事件的探测能力从长江流域下游平原地形区到上游高原地形区逐渐降低,IMERG-F 则在中游山地地形区的探测能力最低,说明 IMERG-F 在复杂地形区捕捉降水事件的能力有待改善。

b. 在 4 个季节中,冬季 ERA5-L 在长江流域的适用性强于 IMERG-F。冬季降水强度较低,IMERG-F 的漏报率较高导致降水量正负相抵,因此 IMERG-F 在冬季整体上的高估没有 ERA5-L 显著。但除此之外,ERA5-L 在冬季的其他误差指标的表现都优于 IMERG-F,尤其是探测降水事件的能力以及捕捉降水空间变化的能力。

c. ERA5-L 与 IMERG-F 对降水事件的探测能力与降水强度呈正相关关系。两者都出现“低雨强高估,高雨强低估”现象,但 ERA5-L 在小雨强事件上对降水强度的高估远远超过 IMERG-F。卫星反演降水过程中,因经过了星载双频降水雷达 DPR 的标定,IMERG-F 对降水强度的反演精度明显高于 ERA5-L。

### 参考文献:

- [ 1 ] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. *Nature*,2002,419(6903): 224-232.
- [ 2 ] MICHAELIDES S, LEVIZZANI V, ANAGOSTOU E, et al. Precipitation: measurement, remote sensing, climatology and modeling[J]. *Atmospheric Research*,2009,94(4):512-533.
- [ 3 ] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010,328(5984):1382-1385.
- [ 4 ] 吴健,夏军,曾思栋,等. CMIP6 全球气候模式对长江流域气候变化的模拟评估与未来预估[J]. *长江流域资源与环境*,2023, 32(1):137-150. (WU Jian, XIA Jun, ZENG Sidong, et al. Evaluation of the performance of CMIP6 models and future changes over the Yangtze River Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2023,32(1):137-150. (in Chinese))
- [ 5 ] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [ 6 ] 初祁,徐宗学,刘文丰,等. 24 个 CMIP5 模式对长江流域模拟能力评估[J]. *长江流域资源与环境*,2015,24(1):81-89. (CHU Qi, XU Zongxue, LIU Wenfeng, et al. Assessment on 24 global climate models in the CMIP5 over the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2015,24(1):81-89. (in Chinese))
- [ 7 ] 李哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用[D]. 北京:清华大学,2015.
- [ 8 ] SHARIF H O, OGDEN F L, KRAJEWSKI W F, et al. Numerical simulations of radar rainfall error propagation[J]. *Water Resources Research*,2002,38(8):1140.
- [ 9 ] 王维,刘佳,李传哲,等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究[J]. *水资源保护*,2023,39(5):125-134. (WANG Wei, LIU Jia, LI Chuazhe, et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(5):125-134. (in Chinese))
- [ 10 ] 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. *地球科学进展*,2011,26(11):1162-1172. (LIU Yuanbo, FU Qiaoni, SONG Ping, et al. Satellite retrieval of precipitation:an overview[J]. *Advances in Earth Science*,2011,26(11):1162-1172. (in Chinese))
- [ 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):607-615. (TANG Guoqiang, WAN Wei, ZENG Ziyue, 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))
- [ 12 ] 叶梦姝. 中国大气再分析资料降水产品在天气和气候中的适用性研究[D]. 兰州:兰州大学,2018.
- [ 13 ] 苏涛,封国林. 基于不同再分析资料的全球蒸发量时空变化特征分析[J]. *中国科学(地球科学)*,2015,45(3):351-365. (SU Tao, FENG Guolin. Spatial-temporal variation characteristics of global evaporation revealed by eight reanalyses[J]. *Scientia Sinica Terrae*,2015,45(3):351-365. (in Chinese))
- [ 14 ] 唐豪,王晓云,陈伏龙,等. 基于 ERA5-Land 数据集的玛纳斯河径流模拟研究[J]. *地学前缘*,2022,29(3):271-283.

- (TANG Hao, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Simulation of Manas River runoff based on ERA5-Land dataset[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 271-283. (in Chinese))
- [15] 赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等. 全球大气再分析资料的研究现状与进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 242-254. (ZHAO Tianbao, FU Congbin, KE Zongjian, et al. Global atmosphere reanalysis datasets: current status and recent advances[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 242-254. (in Chinese))
- [16] XU Jintao, MA Ziqiang, YAN Songkun, et al. Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products? A comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127353.
- [17] 胡文韬, 余钟波, 陈松峰, 等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(3): 15-24. (HU Wentao, YU Zhongbo, CHEN Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(3): 15-24. (in Chinese))
- [18] 欧阳琳. 喜马拉雅中部河谷的降水特征与过程研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- [19] ZHOU Hongwu, NING Shan, LI Da, et al. Assessing the applicability of three precipitation products, IMERG, GSMaP, and ERA5, in China over the last two decades[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17): 4154.
- [20] XIN Ying, LU Ning, JIANG Hou, et al. Performance of ERA5 reanalysis precipitation products in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay Area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126791.
- [21] JIANG Qin, LI Weiyue, FAN Zedong, et al. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 125660.
- [22] SHEN Zhehui, YONG Bin, YI Lu, et al. From TRMM to GPM, how do improvements of post/near-real-time satellite precipitation estimates manifest? [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 268: 106029.
- [23] HU Zengyun, HU Qi, ZHANG Chi, et al. Evaluation of reanalysis, spatially interpolated and satellite remotely sensed precipitation data sets in central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10): 5648-5663.
- [24] YOU Qinglong, MIN Jinzhong, ZHANG Wei, et al. Comparison of multiple datasets with gridded precipitation observations over the Tibetan Plateau[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(3): 791-806.
- [25] SHEN Yan, XIONG Anyuan, WANG Ying, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D2): D02114.
- [26] SHEN Yan, XIONG Anyuan. Validation and comparison of a new gauge-based precipitation analysis over mainland China[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(1): 252-265.
- [27] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [28] WU Xiaojing, SU Jianbin, REN Weiwei, et al. Statistical comparison and hydrological utility evaluation of ERA5-Land and IMERG precipitation products on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129384.
- [29] 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.
- [30] TIAN Yudong, PETERS-LIDARD C D, EYLANDER J B, et al. Component analysis of errors in satellite-based precipitation estimates[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D24): D24101.
- [31] TANG Guoqiang, CLARK M P, PAPALEXIOU S M, et al. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111697.
- [32] DAI Aiguo. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(18): 4605-4630.
- [33] YONG Bin, REN Liliang, HONG Yang, 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[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7): W07542.
- [34] SHEN Zhehui, YONG Bin, GOURLEY J J, et al. Recent global performance of the climate hazards group infrared precipitation (CHIRP) with stations (CHIRPS)[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125284.
- [35] ISLAM M A, CARTWRIGHT N. Evaluation of climate reanalysis and space-borne precipitation products over Bangladesh[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(7): 1112-1128.
- [36] 侯志康, 许民, 康世昌, 等. 中国西北地区降水相态分离及其变化分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 120-132. (HOU Zhikang, XU Min, KANG Shichang, et al. Separation and variation of precipitation forms in Northwest China[J]. *Transactions*

of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(8):120-132. (in Chinese))

- [37] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(730):1999-2049.
- [38] ORSOLINI Y, WEGMANN M, DUTRA E, et al. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations[J]. The Cryosphere,2019,13(8):2221-2239.
- [39] 温婷婷,郭英香,董少睿,等. 1979—2017 年 CRU、ERA5、CMFD 格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱区研究,2022,39(3):684-697. (WEN Tingting, GUO Yingxiang, DONG Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research,2022,39(3):684-697. (in Chinese))
- [40] 徐楠楠. 基于 LSTM 的中国大陆地区 ERA5 日尺度降水预测方法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2021.
- [41] 丁光旭,郭家力,汤正阳,等. 多种降水再分析数据在长江流域的适用性对比[J]. 人民长江,2022,53(9):72-79. (DING Guangxu, GUO Jiali, TANG Zhengyang, et al. Evaluation on applicability of various reanalysis datasets of precipitation in Changjiang River Basin[J]. Yangtze River,2022,53(9):72-79. (in Chinese))
- [42] JIANG Yaozhi, YANG Kun, SHAO Changkun, et al. A downscaling approach for constructing high-resolution precipitation dataset over the Tibetan Plateau from ERA5 reanalysis[J]. Atmospheric Research,2021,256:105574.

(收稿日期:2024-04-08 编辑:刘晓艳)

(上接第 30 页)

- [13] 武连洲,白涛,黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):168-174. (in Chinese))
- [14] GUO Wenxian, YANG Huan, HU Jianwen, et al. Driving forces of hydrological health and multifractal response of fish habitat in regulated rivers[J]. Journal of Environmental Management,2023,345:118844.
- [15] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):25-32. (in Chinese))
- [16] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(1):1-8. (in Chinese))
- [17] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):1-6. (in Chinese))
- [18] 田焯,谭伟丽,王国庆,等. LSTM 变体模型在径流预测中的性能及其可解释性[J]. 水资源保护,2023,39(3):188-194. (TIAN Ye, TAN Weili, WANG Guoqing, et al. Performance of variant LSTM models in runoff prediction and their interpretability [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):188-194. (in Chinese))
- [19] 郭燕,赖锡军. 基于长短时记忆神经网络的鄱阳湖水位预测[J]. 湖泊科学,2020,32(3):865-876. (GUO Yan, LAI Xijun. Water level prediction of Lake Poyang based on long short-term memory neural network[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):865-876. (in Chinese))
- [20] 郭明辰,张润润,闻余华. 基于 PSO-LSTM 模型的平原河网汛期水位预测[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):64-70. (GUO Mingchen, ZHANG Runrun, WEN Yuhua. Prediction of water level of plain river network during flood season based on PSO-LSTM model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):64-70. (in Chinese))
- [21] 沈凯琦,赵超,张翔宇,等. 下岸水库对永安溪水文情势的影响分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):174-180. (SHEN Kaiqi, ZHAO Chao, ZHANG Xiangyu, et al. Influence analysis of Xia'an Reservoir on hydrological regime of the Yong'an River[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):174-180. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-26 编辑:刘晓艳)