

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0025

郭家力,丁光旭,杨旭,等.多源卫星降水产品在长江流域的时空精度对比[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):230-242,252. GUO J L, DING G X, YANG X, et al. Comparison of temporal and spatial accuracy of precipitation products from multi-source satellites in the Yangtze River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2):230-242,252. (in Chinese)

多源卫星降水产品在长江流域的时空精度对比

郭家力^{1,2},丁光旭¹,杨旭³,汤正阳³,张海荣³,潘仁伟¹,戴凌全^{1,2}

(1. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002;2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心(三峡大学),湖北 宜昌 443002;
3. 中国长江电力股份有限公司智慧长江与水电科学湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443000)

摘要:准确评估现有多源卫星降水产品的时空精度特征,可为长江流域的水资源高效开发利用奠定坚实的气象数据基础。利用长江流域191个气象站点1999—2019年逐日站点实测降水数据和TRMM(tropical rainfall measuring mission)、CMORPH(CPC MORPHing technique)、CHIRPS(climate hazards group infrared precipitation with station data)和PERSIANN_CDR(precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks climate data record)4种卫星降水产品,运用皮尔逊相关系数 R 、均方根误差 E_{RMS} 和纳什效率系数 E_{NS} 等连续性指标评价卫星降水产品在长江流域时间和空间尺度上相对于站点降水的探测精度,并运用探测率 P_{OD} 、误报率 R_{FA} 和 T_S 评分3个分类评价指标衡量卫星降水产品对不同量级降水的捕捉能力。结果表明:在年尺度上,TRMM和CMORPH相对于CHIRPS和PERSIANN_CDR表现出更高的探测精度,而对于年降水量空间分布特征,仅有TRMM、CMORPH和CHIRPS能不同程度地准确反映;在月尺度上,TRMM和CMORPH对降水估计仍然具有较高精度,TRMM、CMORPH和CHIRPS在描述月降水空间分布方面在长江流域不同区域各具优势;在日尺度上,4种卫星降水产品对弱降水的捕捉能力均较强,对强降水探测能力则较差;在空间尺度上,4种卫星降水产品在日和月尺度上表现为高海拔地区精度较高,而年尺度上则无明显变化规律。总体而言,4种卫星降水产品中,TRMM和CMORPH在长江流域年、月、日不同时间尺度上更具优势,但在空间分布上,4种产品在不同地区差异显著。这一结论为进一步开发适用于长江流域的高时空分辨率降水融合产品奠定了研究基础。

关键词:卫星降水产品;时空比较;精度对比;统计评估;长江流域

中图分类号:TV125;P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



降水作为水循环过程中最为活跃的环节,对其时空分布特性进行有效而准确的观测,对水文、气象、农业等方面的预警和决策起着极其重要的作用^[1]。目前,观测降水的3种方式分别为地面雨量计、地基天气雷达和卫星遥感^[2]。地面雨量计的空间分布往往不均匀,尤其是海洋和高海拔地区(如长江上游高原地区)分布稀疏^[3],很难通过插值等估算

方法为无资料地区提供较为准确的地面降水资料;同时,雨量计等测量设备长期置于室外易损坏,很难保证测量设备能够长时间按需运转^[4]。地基天气雷达可以提供降水、暴雨形成的内部细节,并且可以对大面积区域进行实时高分辨率降水监测^[5],但雷达系统进行降水测量时需要覆盖大面积地区,维护费用过于昂贵^[6]。卫星遥感能够提供高分辨率、长时

收稿日期:2021-07-21 修回日期:2021-10-29 网络出版时间:2021-11-04

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211104.1039.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(52179018;52009065;51909010);智慧长江与水电科学湖北省重点实验室(中国长江电力股份有限公司)开放基金(ZH2002000103);三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目(KF2019-12);宜昌市自然科学基金项目(A20-3-005)

作者简介:郭家力(1984—),男,湖北孝感人,副教授,博士,主要从事水文学气象耦合研究。E-mail:jiali.guo@ctgu.edu.cn

通信作者:丁光旭(1996—),男,贵州金沙人,主要从事水文学气象耦合研究。E-mail:1033487543@qq.com

间序列、高精度的降水观测资料,特别为无资料或少资料地区的水文气象研究提供基础的数据资料^[7]。

目前,国际上已出现多种卫星遥感降水产品,如 TRMM(tropical rainfall measuring mission)、GPM(global precipitation measurement)、CMORPH(CPC MORPHing technique)、PERSIANN_CDR(precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks climate data record)等。国内已有大量学者分析了不同卫星遥感降水产品在中国不同区域的适用性。这些研究大致可分为两类:一类是单一降水产品(或单一降水产品的不同版本)在某一流域(或区域)的适用性研究^[8-9];另一类是多种降水产品的精度对比研究,见表1。如:金秋等^[9]通过对比 TRMM 同种卫星降水产品 3B42 RTV7 及 V7 两个不同版本在长江流域的精度,发现 V7 版本数据在长江流域有较高的精度;张磊磊等^[10]通过对比 TRMM 3B42 V7(TM-PA、RT)、CMORPH 和 PERSIANN 卫星降水数据

在黄河源区的精度,发现 TRMM 3B42 V7(TMPA)数据精度最高;卫林勇等^[11]通过对比 CHIRPS、CMORPH_BLD、PERSIANN_CDR 和 TRMM 3B42V7 卫星数据在 5 个不同省份不同尺度的降水监测能力,发现 PERSIANN_CDR 相对适用于新疆和吉林,TRMM 3B42V7 较适用于陕西、江西以及云南。但目前国内的研究专注于气候或者地形单一区域,如柴达木盆地^[12]、雅鲁藏布江流域^[13]和太行山区^[14],反而缺乏了对空间跨度广、气候类型差别大的区域的研究。近几年也有部分学者注意到这一不足,并展开了对长江流域^[8-9]、中国大陆^[15]等大尺度区域上的研究。但因为这些大尺度区域空间跨度大、地形复杂多变,往往需要根据地形气候划分不同的区域进行研究。因此,本文以长江流域为研究对象,根据地形气候类型的不同将其划分为 4 个区域,并通过 TRMM、CMORPH、CHIRPS 和 PERSIANN_CDR 4 种卫星降水产品从时间和空间角度分析各数据集在长江流域不同分区的精度对比情况。

表 1 国内现有卫星降水产品精度对比

Tab.1 Summary of researches on domestic existing satellite precipitation products

作者	研究区域	卫星降水产品	评价指标	空间分辨率/(°)	时间分辨率
吴一凡等 ^[8]	长江流域	GPM IMERG	皮尔逊相关系数 R 、均方根误差 E_{RMS} 、平均绝对误差 E_{MA} 、相对误差 E_R	0.10	1 d
金秋等 ^[9]	长江流域	TRMM 3B42 (RTV7、V7)	相对偏差 B_{bias} 、相关系数 C_c 、均方根误差 E_{RMS}	0.25	3 h
张磊磊等 ^[10]	黄河源区	TRMM 3B42 V7(TMPA、RT)、CMORPH、PERSIANN	相关系数 C_c 、相对误差 E_R	0.25	3 h
卫林勇等 ^[11]	陕西、吉林、新疆、江西、云南	CHIRPS、CMORPH_BLD、PERSIANN_CDR、TRMM 3B42V7	相对偏差 B_{bias} 、相关系数 C_c 、均方根误差 E_{RMS} 、平均误差 E_M	0.25	1 月
曾琪铤等 ^[12]	柴达木盆地	TRMM 3B42 V7、GPM IMERG	相对偏差 B_{bias} 、相关系数 C_c 、均方根误差 E_{RMS}	0.10	1 d
刘江涛等 ^[13]	雅鲁藏布江流域	PERSIANN_CDR、TRMM 3B42 V7	相对偏差 B_{bias} 、相关系数 C_c	0.25	1 d
李麒嵩等 ^[15]	中国大陆	TRMM 3B42 V7、GPM IMERG	皮尔逊相关系数 R 、均方根误差 E_{RMS} 、平均绝对误差 E_{MA} 、相对误差 E_R	0.25	1 d
黄琦等 ^[16]	雅砻江流域	CMFD、GPM IMERG、MSWEP	皮尔逊相关系数 R 、均方根误差 E_{RMS} 、相似度系数 S_1	0.10	1 d
程开宇等 ^[17]	瓯江流域	TRMM 3B42 V7(TMPA、RT)、CMORPH、PERSIANN	相对偏差 B_{bias} 、相关系数 C_c 、纳什效率系数 E_{NS}	0.25	3 h

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

长江全长约 6 300 km,是中国和亚洲最长的河流,也是世界第三大河流。长江流域位于 $90^{\circ}33' \sim 122^{\circ}25'E$ 和 $24^{\circ}30' \sim 35^{\circ}45'N$ 。流域总面

积约 180 万 km^2 ,约占中国国土面积的五分之一^[18]。根据流经区域的地势特征将长江流域划分为 4 个区域(图 1):上游高原地区(河流源头至宜宾)主要流经青藏高原和云贵高原;上游盆地地区(宜宾至宜昌)主要包含四川盆地;中游地区(宜昌至湖口),该地区地势降低、河面展宽,分别

有汉江和湘江等支流汇入,沿江两岸湖泊众多,流量大增;下游地区(湖口至入海口)流经长江中

下游平原,江阔水深,是我国重要的工农业生产基地。

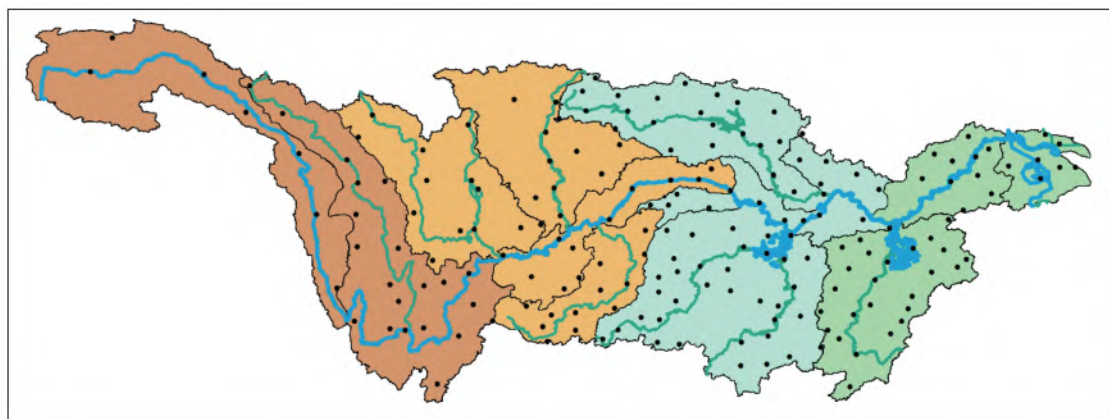


图 1 长江流域分区图及研究站点

Fig. 1 The zoning map of the Yangtze River basin and the meteorological stations

长江流域自西向东横跨我国地势三级阶梯,流域面积覆盖 15 个省级行政单位,地貌类型复杂多变。该流域位于亚热带和温带气候区,具有显著的季风气候特征。夏季盛行东南风,冬季盛行西北风,因受季风气候影响,流域年内降水分配不均,主要发生在夏季,年平均降水约为 1 100 mm,年平均气温

约为 14 °C^[19]。长江流域 191 个国家气象基准站 1999—2019 年多年平均降水量见图 2。长江流域多年平均降水由西北向东南递增,而且降水的空间差异极大,由上游高原区及源头的年均降水量不足 400 mm 至下游地区的超过 2 000 mm,甚至局部地区达到 2 400 mm。

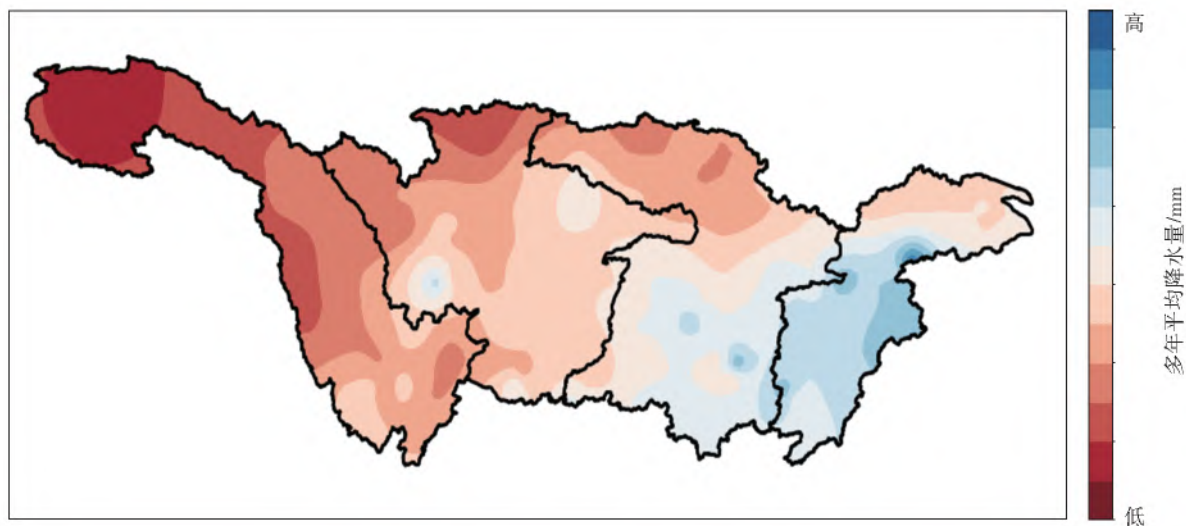


图 2 长江流域多年平均降水量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of multi-year average precipitation in the Yangtze River basin

1.2 数据来源

1.2.1 台站数据

原收集到分布于长江流域内的国家气象基准站点为 230 个(<http://data.cma.cn>)。经过了严格的质量筛选(即对所选取的站点逐日降水数据连续缺测不超过 1 个月的进行插补,以及剔除降水数据连续缺测超过 1 个月的站点)之后,最终得到 191 个国家气象基准站 1999—2019 年的逐日降水数据集,其

中上游高原地区、上游盆地地区、中游地区和下游地区分别有 27 个、48 个、74 个和 42 个站点(图 1)。

1.2.2 多源卫星降水数据

选取国际上具有代表性的 4 种高时空分辨率卫星降水产品数据集: TRMM, CMORPH, CHIRPS (climate hazards group infrared precipitation with station data) 和 PERSIANN-CDR。各数据集的特征见表 2。

表 2 4 种降水数据集特征
Tab. 2 4 types of precipitation data set features

卫星产品	版本	空间分辨率/(°)	时间分辨率/d	空间覆盖范围	数据源
TRMM	3B42V7	0.25	1	50°N~50°S	https://gpm.nasa.gov/
CMORPH	Version 1.0	0.25	1	60°N~60°S	http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/
CHIRPS	Version 2.0 (0.25)	0.25	1	50°N~50°S	ftp://chg-ftpout.geog.ucsb.edu/pub/org/chg/products/
PERSIANN_CDR	Version 1 Revision 1	0.25	1	60°N~60°S	https://www.ncei.noaa.gov/data/precipitation-persiann/

TRMM 是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与日本国家太空发展局(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)之间的一项联合太空计划, TRMM 卫星是第一颗旨在监测和研究热带和亚热带降水的气象卫星。该卫星搭载的 5 种气象方面的仪器中, 降水雷达(PR)、TRMM 微波成像仪(TMI)和可见红外扫描仪(VIRS)是用于测量降水的主要仪器^[20]。

CMORPH 由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)利用时间空间联合内插整合多平台卫星观测制作的全球高时空分辨率降水产品^[21]。基本原理是从地球静止卫星观测的高分辨率红外亮温资料计算降水云系统的移动矢量, 然后把基于低轨卫星被动微波反演的瞬时降水分布沿着该移动矢量外推至目标分析时间以做成空间连续的降水分布。

CHIRPS 是由美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)与加利福尼亚大学的气象小组共同开发的一种混合产品, 结合了来自全球电信系统(Global Telecommunication System, GTS)的卫星测量值和全球多个站点降水测量值^[22]。

PERSIANN_CDR 是由加州大学欧文分校水文气象和遥感中心开发的产品, 其降水估算输出根据 GridSat-B1 红外数据的 PERSIANN 算法生成^[23]。

2 研究方法

2.1 最邻近内插法

最邻近内插法(the nearest neighbour interpolation, NNI), 也称零阶插值, 是一种广泛用于图像缩放、信号处理中的一种插值方法。在该算法中, 它所输出像素的具体灰度等于距离其该点最近的原始数据样本值。这种方法的优点是计算简单, 运算量较小, 且比较容易得到较为准确的结果, 因而在面对卫星栅格数据与实测点源数据不对应时是一种较为合适的处理方法。由于站点数据为点源数据, 而卫

星数据为栅格数据, 因此将卫星栅格数据转化为站点点源数据时采用了最邻近内插法, 即选择与气象站点所在经纬度最接近的卫星栅格(栅格中心点为判断依据)降水数据, 如果有多个栅格与站点的距离相同, 则取多个栅格降水平均值作为此站点对应的卫星产品降水观测值。

2.2 精度指标

选取多种统计评价指标在不同尺度上对 4 种卫星降水产品的精度进行评价。这些指标可以分为两类: 连续性指标和分类评价指标, 见表 3。连续性指标反映卫星降水产品与站点资料的在不同尺度时间序列的吻合程度和误差特征; 分类指标反映卫星降水产品对日尺度及日尺度以下降水事件的捕捉能力^[24]。选取的连续性指标包括皮尔逊相关系数 R 、均方根误差 E_{RMS} ^[16] 和纳什效率系数 E_{NS} ^[17]。分类评价指标包括探测率 P_{OD} 、误报率 R_{FA} 和 T_S 评分^[25]。各指标的计算公式见表 3。

皮尔逊相关系数 R 反映了卫星观测值与站点观测值的相关性, 相关性越强, 其值越趋近于 1。均方根误差 E_{RMS} 反映了卫星观测值与站点观测值的离散程度^[16], 离散程度越小, 其值越趋近于 0。纳什效率系数 E_{NS} 反映了卫星观测值与站点观测值的相似程度, 值越趋近于 1 表明该两组数据越相似。

在日尺度上采用分类评价指标检验卫星降水产品对降水的捕捉能力。探测率 P_{OD} 表示正确探测到降水的概率, 误报率 R_{FA} 表示错误探测到降水的概率, T_S 评分表示综合探测的准确性。依据国家气象局颁布的降水强度等级划分标准, 选取 0.1、10.0、25.0 和 50.0 mm/d 的降水强度分别代表发生小雨、中雨、大雨和暴雨的阈值。

3 结果分析

3.1 年尺度精度对比

3.1.1 降水数据集年精度比较

以站点和对应网格(或网格平均值)卫星降水产品的逐年年降水量为基准, 计算长江流域各站点年

降水量的皮尔逊相关系数 R 和均方根误差 E_{RMS} 两个评价指标值。表 4 展示的这两个指标为长江流域及各区域内多站点空间平均值,该表可以体现卫星

降水数据与站点降水数据年际相关程度以及偏差情况,表中加粗显示的数值表示 4 种产品中表现最优的卫星降水产品。

表 3 降水产品精度评价指标

Tab. 3 The evaluation indices for precipitation products accuracy

指标类别	评价指标	计算公式	理想数值
	皮尔逊相关系数 R	$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}}$	1
连续性指标	均方根误差 $E_{\text{RMS}}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - G_i)^2}{N}}$	0
	纳什效率系数 E_{NS}	$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}$	1
分类评价指标	探测率 P_{OD}	$P_{\text{OD}} = \frac{H}{H+M}$	1
	误报率 R_{FA}	$R_{\text{FA}} = \frac{F}{H+F}$	0
	T_{S} 评分	$T_{\text{S}} = \frac{H}{H+M+F}$	1

注: N 为观测气象台站个数; i 为观测气象台站的序列号; P_i 为气象台站所对应的卫星降水产品栅格值, mm; \bar{P} 为其所对应的平均值, mm; G_i 为气象台站所观测的降水值, mm; \bar{G} 为其所对应的平均值, mm。

表 4 逐年连续性指标参数计算

Tab. 4 Yearly continuity index parameter calculation

统计指标	卫星降水数据集	全流域	上游高原地区	上游盆地地区	中游地区	下游地区
R	TRMM	0.84	0.82	0.79	0.85	0.89
	CMORPH	0.83	0.77	0.78	0.85	0.88
	CHIRPS	0.76	0.77	0.69	0.78	0.81
	PERSIANN_CDR	0.72	0.65	0.64	0.74	0.81
$E_{\text{RMS}}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	TRMM	0.42	0.30	0.38	0.42	0.55
	CMORPH	0.42	0.44	0.36	0.38	0.53
	CHIRPS	0.52	0.38	0.48	0.53	0.64
	PERSIANN_CDR	0.61	0.73	0.56	0.56	0.70

注:表中加粗表示 4 种产品中表现最优的卫星降水产品。

由表 3 可知:一方面,就卫星降水数据总体精度而言,TRMM 和 CMORPH 在整个长江流域的精度均优于 CHIRPS 和 PERSIANN_CDR,且 PERSIANN_CDR 的精度最差;另一方面,同一种卫星降水产品在长江流域的不同分区对降水的探测精度有明显的地区差异。就 R 值而言,下游地区 > 中游地区 > 上游地区。同一卫星降水数据集 R 值在上游高原地区和上游盆地地区则较为接近,其中 TRMM、CHIRPS 和 PERSIANN_CDR 在上游高原地区的 R 值略高于上游盆地地区,而 CMORPH 在上游高原地区略低于上游盆地地区。就 E_{RMS} 指标

而言,TRMM 和 CHIRPS 呈现出从上游至下游递增的趋势,而 CMORPH 和 PERSIANN_CDR 在上游高原地区的值高于上游盆地地区。对比 R 值与 E_{RMS} 值可以看出,在 R 值最大的下游地区,其 E_{RMS} 值也最大,这是因为相关系数 R 只能反映两组数据之间的一致性,不能反映两者在数值上的差异。在下游地区 E_{RMS} 值较大的原因可能与降水量空间分布有关,长江流域下游地区降水量级大(图 2),使得误差相对较高。此外,PERSIANN_CDR 的 E_{RMS} 值在上游高原地区最大,且远大于另外 3 种卫星降水产品,说明对于年降水量而言,PERSIANN_CDR 在

地形复杂且海拔较高的地区精度较差。

为了进一步地探究卫星降水数据与站点降水数据年际变化过程的拟合程度,利用4种卫星降水数据集绘制长江流域以及不同分区 E_{NS} 值箱线图,见图3。长江流域 TRMM、CMORPH、CHIRPS 和 PERSIANN_CDR 的 E_{NS} 值波动区间分别为 0.28~0.73、0.31~0.83、-0.02~0.57 和 -0.4~0.5, E_{NS} 中位数从小到大依次为 PERSIANN_CDR (0.28) < CHIRPS (0.40) < TRMM (0.58) < CMORPH (0.65), 这表明 CMORPH 卫星观测值与站点观测值的年降水总量年际变化过程更相似。同一种卫星降水数据的 E_{NS} 值在不同分区的表现差异

巨大,如表现最好的 CMORPH 在上游高原地区、上游盆地地区、中游地区和下游地区的波动范围依次为 -0.70~0.84、0.06~0.82、0.48~0.82 和 0.48~0.86,中位数分别为 0.17、0.53、0.68 和 0.70,且呈现出从上游至下游逐渐增大的趋势,其余3种卫星降水数据集也具有类似的趋势,这与 R 值的规律相同。就 E_{NS} 而言,4种卫星降水产品在上游高原地区对年总降水量的年际变化过程捕捉能力较差,其原因可能与气候类型、地形地貌等因素有关。据余坤伦等^[26]分析,长江上游高原地区海拔高、气温低,降水多以固态降雪和冰雹的形式出现,而卫星产品难以捕捉这一现象。

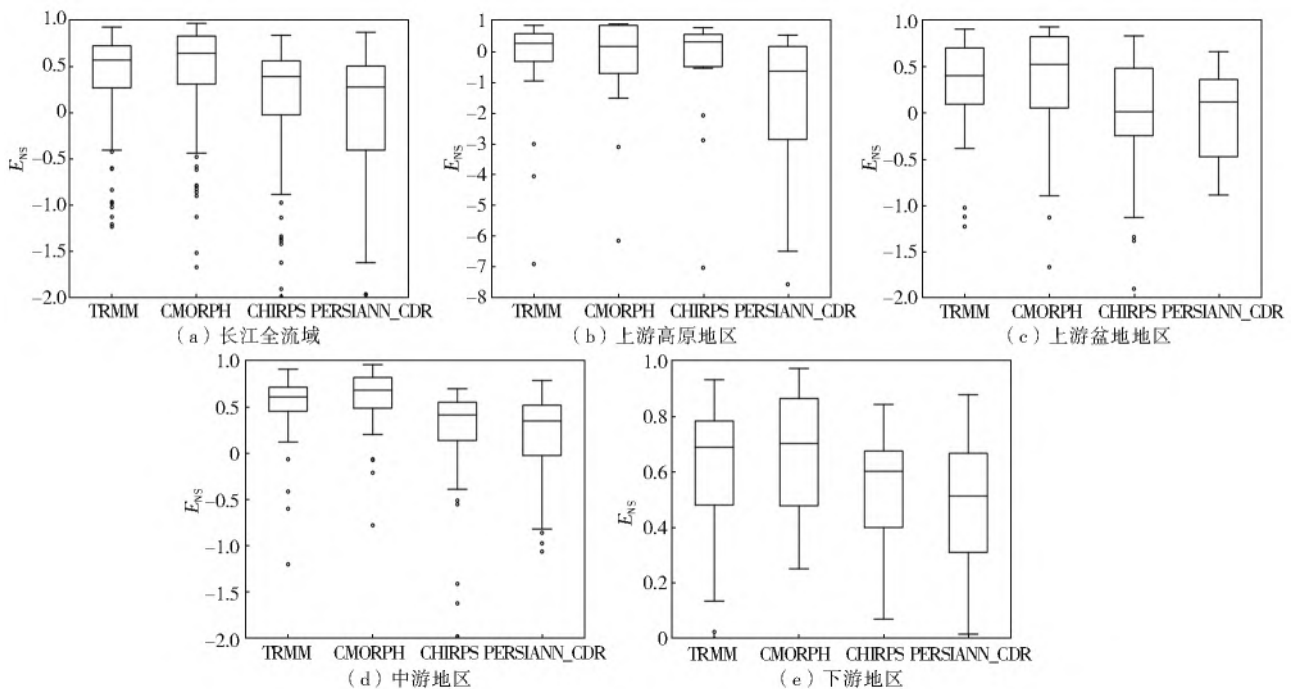


图3 长江流域及不同分区年尺度纳什效率系数评价指标箱线图

Fig. 3 Box plots of Nash efficiency coefficient evaluation indicators on annual scales in the Yangtze River basin and different subregions

3.1.2 降水数据集年尺度降水空间分布差值

图4是根据长江流域4种卫星降水和站点降水所计算的多年平均降水,经过径向基函数(Rbf)中的线性插值法将站点数据插值成格网数据(空间分辨率为 0.25°)得到的长江流域多年平均降水空间分布差值。该图表示卫星降水与站点降水数据多年平均降水差值百分比的空间分布。从整体上来说,TRMM、CMORPH和CHIRPS在长江流域大部分地区的差值百分比在 $\pm 20\%$ 以内,能够较准确地估计长江流域的降水,且以正偏为主。

就不同分区而言,TRMM能更好地捕捉上游高原地区的降水空间分布特征,CHIRPS和CMORPH次之,且CMORPH对上游高原地区南部的降水高估程度大于 40% ,PERSIANN_CDR则高估了

上游高原大部分地区的降水,其高估程度也在 40% 以上。TRMM、CMORPH和CHIRPS均能较好地估计上游盆地地区的降水(图4(a)~4(c)),但在上游盆地南部地区,TRMM和CMORPH有 $0\sim 20\%$ 不同程度的低估。TRMM 3B42V7和CMORPH能够较好地估计中游地区降水空间分布特征;CHIRPS则普遍高估,其高估程度在 20% 左右。TRMM、CMORPH和CHIRPS均高估了下游地区的降水,就高估程度而言 $TRMM < CMORPH < CHIRPS$ 。PERSIANN_CDR在中游和下游地区均高估了长江左岸的降水,而低估了长江右岸的降水。总体而言,在年尺度上,除PERSIANN_CDR之外,TRMM、CMORPH和CHIRPS均能较好地反映长江流域降水的空间分布特性。

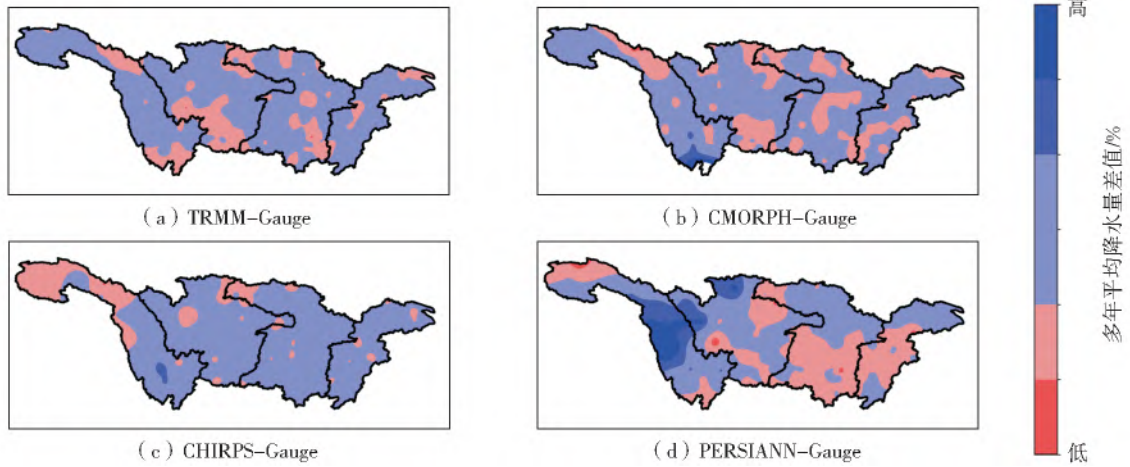


图 4 站点和卫星降水产品年均降水量空间分布差值

Fig. 4 The difference between the spatial distribution map of the annual average precipitation of the station and the satellite precipitation product

3.2 月尺度精度对比

3.2.1 降水数据集月精度比较

为进一步分析 4 种降水产品的估算精度,图 5 给出了 TRMM、CMORPH、CHIRPS 和 PERSIANN_CDR 4 种卫星降水产品以站点月降水数据为基准,计算的长江流域不同分区内多站点评价指标平均值,并绘制能够综合体现标准差、 R 和 E_{RMS} 这 3 个指标的泰勒图,图中的标准差和 E_{RMS} 均经过归一化

处理。由图 5 可知:对整个长江流域而言,TRMM 和 CMORPH 最接近站点观测值(gauge 点),总体精度最高,CHIRPS 次之,PERSIANN_CDR 精度最低;对不同分区而言,TRMM 在上游高原地区的精度最高,CHIRPS 和 CMORPH 次之,PERSIANN_CDR 精度则最低;在上游盆地地区、中游地区和下游地区,CMORPH 的精度最高,TRMM 略微次之,CHIRPS 和 PERSIANN_CDR 精度则比较低。

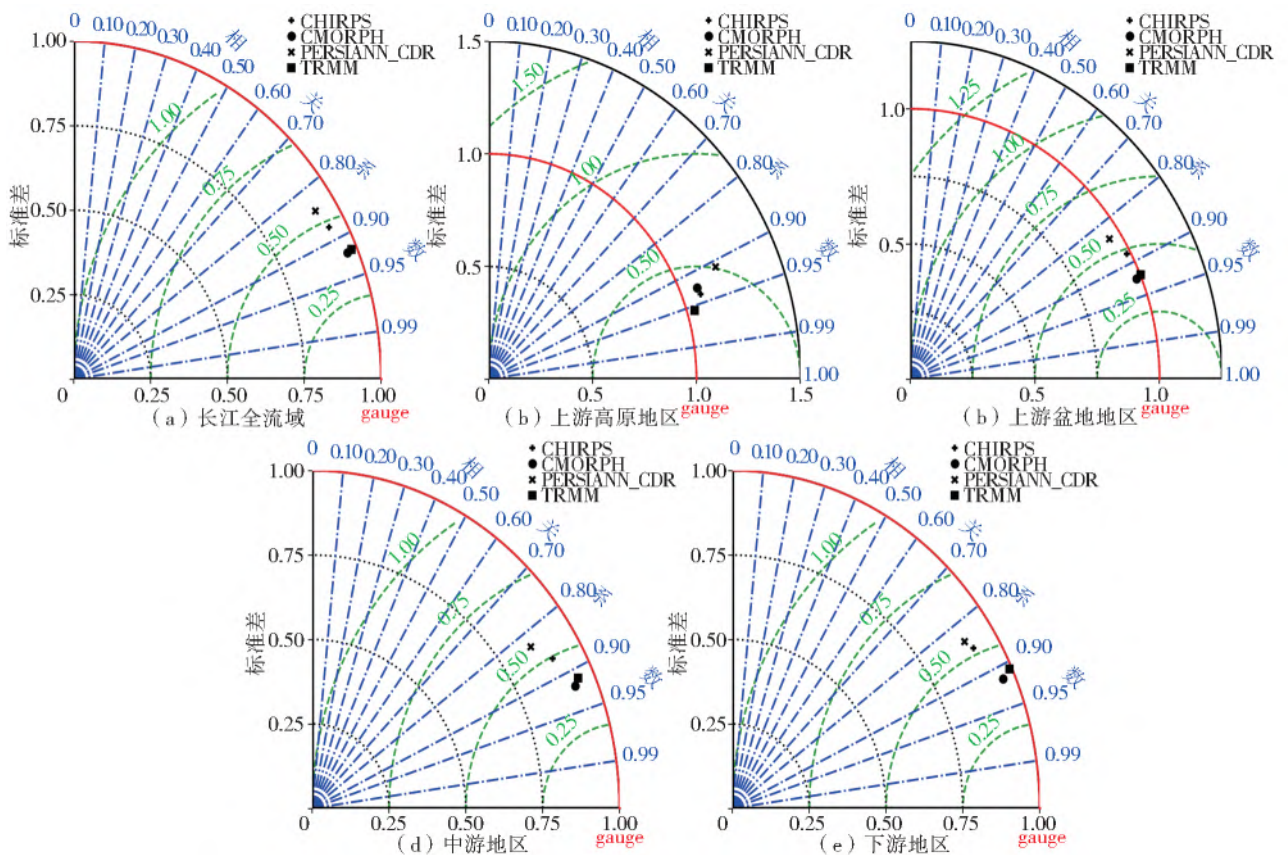


图 5 4 种卫星降水产品在长江流域及不同分区月平均降水泰勒图

Fig. 5 Taylor map of monthly average precipitation of 4 satellite precipitation products in the Yangtze River basin and different districts

3.2.2 月尺度降水分区拟合对比

为了更直观地比较各卫星降水产品在长江流域不同分区的月尺度精度情况,图6给出了4种卫星降水产品与站点多年月平均降水数据在不同分区的散点图,该图表示卫星降水与站点降水多年月

平均降水量在不同区域的拟合对比情况, R 值代表的是卫星降水产品与站点降水数据在月面雨量上的空间相关性。分析散点图可以发现,4种卫星降水数据与站点降水数据在空间上具有良好的相关性($0.92 \leq R \leq 0.98$)。

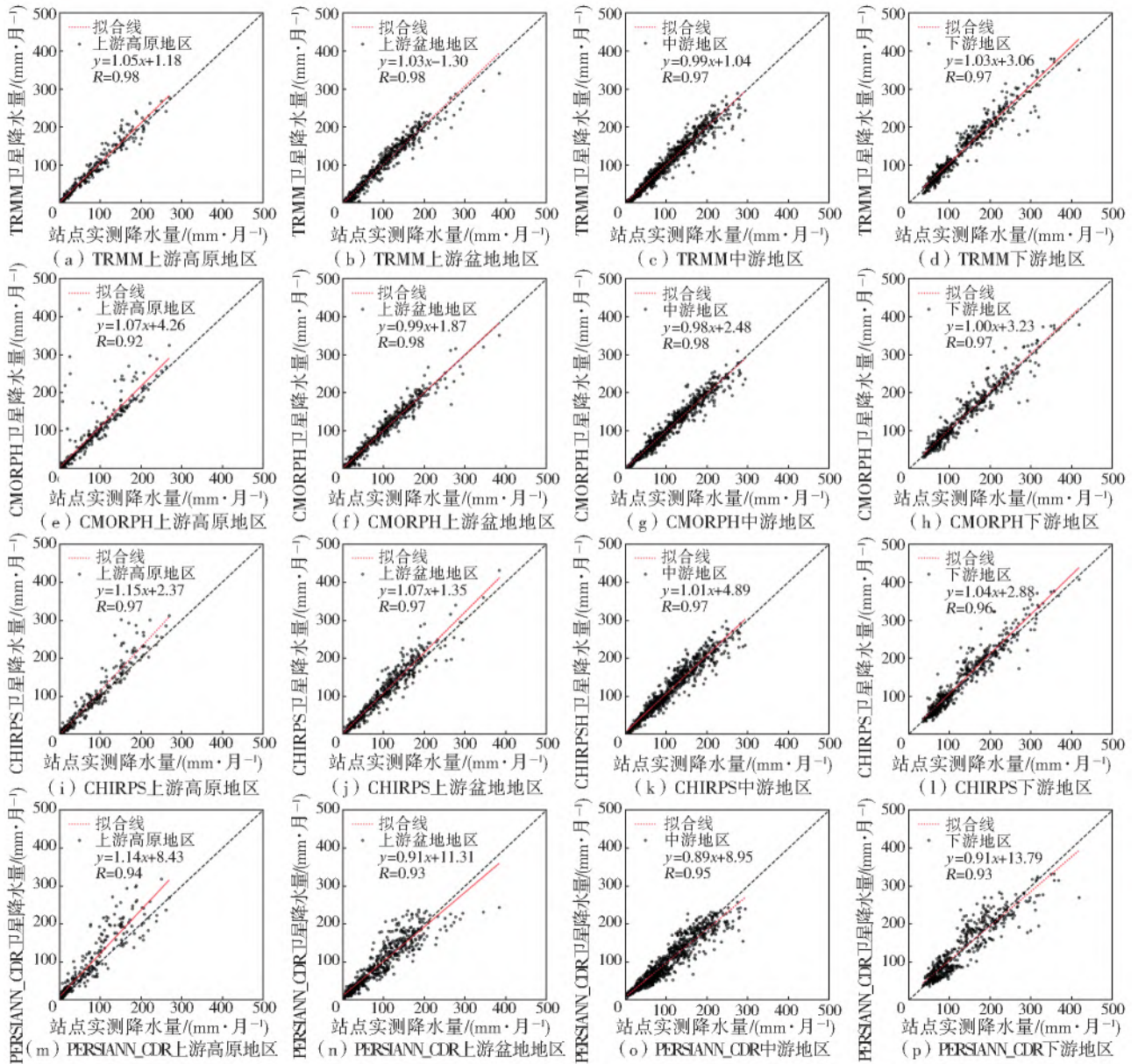


图6 站点和卫星降水产品月均降水量不同区域散点图

Fig. 6 Scatter plots of the average monthly precipitation of the stations and satellite precipitation products in different regions

就4种卫星降水产品在不同分区对降水的估计情况而言,从斜率上来看,4种卫星降水产品均高估了上游高原地区的降水。其中,CHIRPS和PERSIANN_CDR对该地区降水的高估程度大于TRMM和CMORPH,斜率分别为1.15和1.14。在上游盆地地区TRMM和CHIRPS的斜率分别为1.03和1.07,表明这两种卫星降水产品在该区域对降水具有高估现象,且CHIRPS的高估程度要大于TRMM;而PERSIANN_CDR的斜率为0.91,表明

PERSIANN_CDR在该区域对降水具有低估现象。在中游地区TRMM、CMORPH和CHIRPS的斜率分别为0.99、0.98和1.01(均接近于1)能够准确地反映中游地区的降水,而PERSIANN_CDR的斜率为0.89,严重地低估了该地区的降水。在下游地区CMORPH能够更准确地反映该地区的月降水,TRMM和CHIRPS则高估了该地区的降水,斜率分别为1.03和1.04,PERSIANN_CDR则低估了该地区的降水,斜率为0.91。

就 4 种卫星降水产品在不同分区空间分布拟合精度而言,上游高原地区 TRMM 的精度优于其他 3 种卫星降水产品,在上游盆地地区和下游地区 CMORPH 的精度优于其他 3 种卫星降水产品,而在中游地区 TRMM、CMORPH 和 CHIRPS 均有较高的精度,这也与图 5 显示的结果一致。

3.3 日尺度精度对比

3.3.1 降水数据集日尺度评价指标空间分布

图 7 是长江流域各个站点连续性评价指标(R 、 E_{RMS} 、 E_{NS})不同分区空间分布情况。从图 7 可以

看出,在日尺度上,CMORPH 的 R 整体具有绝对优势($R > 0.65$),大部分站点 R 在 0.8 以上,TRMM 和 CHIRPS 次之,PERSIANN_CDR E_{RMS} 最低,绝大部分站点 R 在 0.4 以下。从 E_{RMS} 来看,4 种卫星降水产品都大致呈现出由西向东逐渐增加的趋势,这可能与降水分布相关,流域东部地区较西部地区降水量大使得误差绝对值相对较高。在 E_{NS} 方面,4 种卫星降水产品的纳什效率系数平均值由大到小依次为 $\text{CMORPH} > \text{TRMM} > \text{CHIRPS} > \text{PERSIANN_CDR}$ 。综上,4 种产品中站点数据 R 和 E_{NS} 最高且 E_{RMS} 最低的是 CMORPH,其在日尺度上综合表现最好。

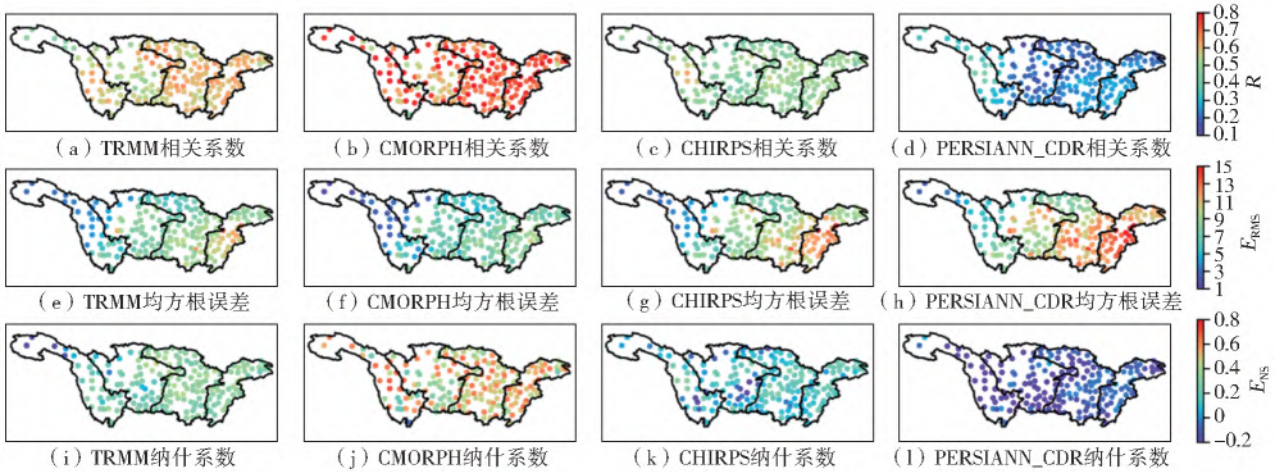


图 7 日尺度评价指标空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of daily-scale evaluation indicators

3.3.2 不同量级降水捕捉能力检验

图 8 展示了在不同降水量级下卫星降水产品和站点逐日降水在整个长江流域、上游高原地区、上游盆地地区、中游地区以及下游地区的 P_{OD} 、 R_{FA} 和 T_{S} 值。降水阈值分别为 0.1、10.0、25.0 和 50.0 mm/d。从图 8 可以看出,4 种卫星产品都对降水事件(0.1 mm/d 为降水是否发生的阈值)有着较高的探测率,这表明 4 种卫星产品均能较好地识别降水事件的发生,这可能与卫星上搭载的测雨雷达和微波成像仪加强了对弱降水以及固态降水的探测有关。

当降水强度阈值增加时,4 种卫星产品的探测率 P_{OD} 均开始下降,这意味着卫星产品对日尺度的强降水捕捉能力降低。其中,CMORPH 和 TRMM 对降水的捕捉能力优于另外两种,且 PERSIANN_CDR 的捕捉能力最差,而 TRMM 对大雨和暴雨的捕捉能力优于 CMORPH。

就误测率而言,CMORPH 的 R_{FA} 在不同量级的降水之间比较稳定(0.4 左右),仅在上游高原地区随着降水强度阈值的增大而上升,这可能与上游高原区站点稀少,以及上游高原地区云层与冰雪相混

合的复杂气象条件干扰了卫星对降水的准确估计有关^[27],其他 3 种卫星降水产品的 R_{FA} 则随着降水强度阈值的增大而上升。

综合比较 4 种卫星降水产品的 T_{S} 评分,其规律表现非常一致:降水阈值增大, T_{S} 评分减小;同一降水阈值下,探测精度从大到小排序为 $\text{CMORPH} > \text{TRMM} > \text{CHIRPS} > \text{PERSIANN_CDR}$ 。

3.4 空间尺度精度对比

由于长江流域地形复杂,高程跨度大,因此针对不同卫星降水产品随高程的变化进行精度评价。以长江流域各站点降水量为基准,采用 R 、 E_{RMS} 和 E_{NS} 评价不同站点高程上 4 种卫星降水数据的探测精度,图 9 为各评价指标与站点高程的散点图。

日尺度上,4 种卫星降水产品出现较明显的“分层”现象。就 R 而言:CHIRPS、CMORPH 和 TRMM 随高程增加波动较为平稳;而 PERSIANN_CDR 有随着高程增加而增大的趋势,但 R 总体还处于较低水平。就 E_{RMS} 而言:4 种卫星降水产品与高程成反比,即随着高程的增加,4 种卫星降水产品的精度提高,其 E_{RMS} 随高程变化幅度由高到低分别为

-1.8 mm/1 000 m(PERSIANN_CDR)、-1.7 mm/1 000 m(CHIRPS)、-1.4 mm/1 000 m(TRMM)和-1.3 mm/1 000 m(CMORPH)。就 E_{NS} 而言:

CHIRPS、CMORPH 和 TRMM 表现较为平稳,无明显波动,而 PERSIANN_CDR 则随高程增加, E_{NS} 先减小后增大。

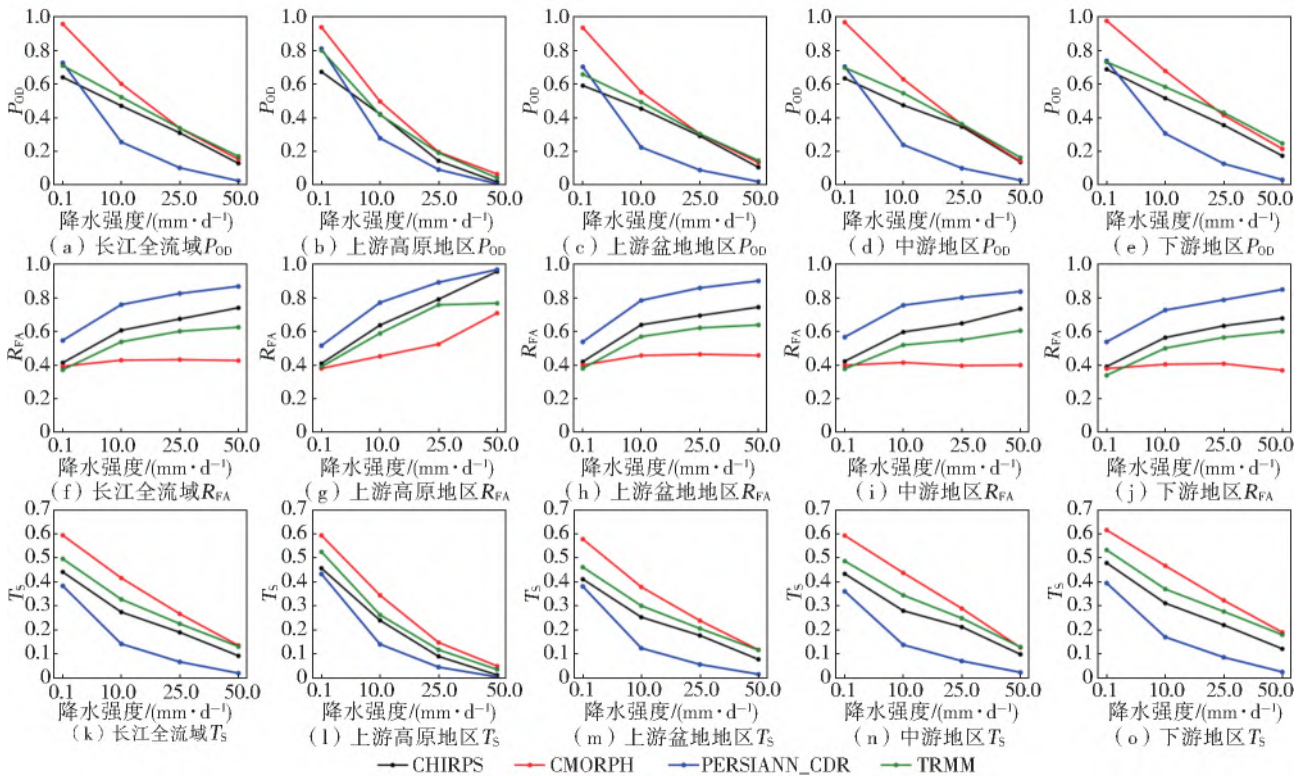


图8 不同阈值下卫星降水产品各分区 P_{OD} 、 R_{FA} 和 T_S 值

Fig. 8 P_{OD} 、 R_{FA} 、and T_S values of satellite precipitation products in different regions under different thresholds

在月尺度上,就 R 而言,4 种卫星降水产品与高程成正比,即随着高程增加明显提高,相应的变化幅度由大到小分别为 0.03/1 000 m(PERSIANN_CDR)、0.02/1 000 m(CHIRPS)、0.01/1 000 m(TRMM)和 0.009/1 000 m(CMORPH)。就 E_{RMS} 而言,CHIRPS、CMORPH 和 TRMM 变化规律同日尺度,PERSIANN_CDR 则表现为先波动后降低的趋势。就 E_{NS} 而言,CHIRPS、CMORPH 和 TRMM 的波动幅度较小,PERSIANN_CDR 波动幅度较大,表现为先增大后减小再增大的趋势。

在年尺度上,随着高程增加,4 种卫星降水产品 R 并未表现出明显的变化规律。在 E_{RMS} 上,CHIRPS、CMORPH 和 TRMM 随高程变化波动较为平稳,而 PERSIANN_CDR 则波动较大,随高程的增加表现为先增大后减小的趋势。对于 E_{NS} 而言,4 种卫星降水产品大多位于 -5~1,随着高程的增加,4 种卫星降水产品在高海拔地区都出现了较明显的波动,其中 PERSIANN_CDR 波动最大。

研究区域内高海拔站点(1 500 m 以上)大多位于上游高原地区,该地区站点仅有 27 个,占流域总站点数的 14%,因此在刻画流域内卫星降水与高程

变化规律时有一定的局限性。

4 结论与展望

采用长江流域 191 个国家气象基准站 1999—2019 年逐日降水数据集,研究了 CMORPH 等 4 种卫星降水产品在不同时间和空间尺度上的探测精度,得到以下结论。

在捕捉年降水量的年际变化特征时,TRMM 和 CMORPH 相比于 CHIRPS 和 PERSIANN_CDR 具有更高的精度。在年降水量空间分布特征上,4 种卫星降水产品在不同的分区表现差异明显,其中仅 TRMM、CMORPH 和 CHIRPS 能不同程度地反映长江流域降水的空间分布特性。

在月尺度上,TRMM、CMORPH 对降水估计仍然具有较高的精度。在降水空间分布上,TRMM、CMORPH 和 CHIRPS 在不同区域各具优势,上游高原地区 TRMM 精度最高;上游盆地地区和下游地区 CMORPH 的精度最高,在中游地区 TRMM、CMORPH 和 CHIRPS 均具有较高的精度。

在日尺度上,4 种卫星降水产品的精度差别明显,由高到低排序为 CMORPH>TRMM>CHIR-

PS>PERSIANN_CDR。卫星降水产品均对弱降水的探测能力较强,而对强降水的探测能力较弱,从分

区的角度看,CMORPH 在上游高原地区具有优势,而在上游盆地地区、中游和下游地区则 TRMM 占优。

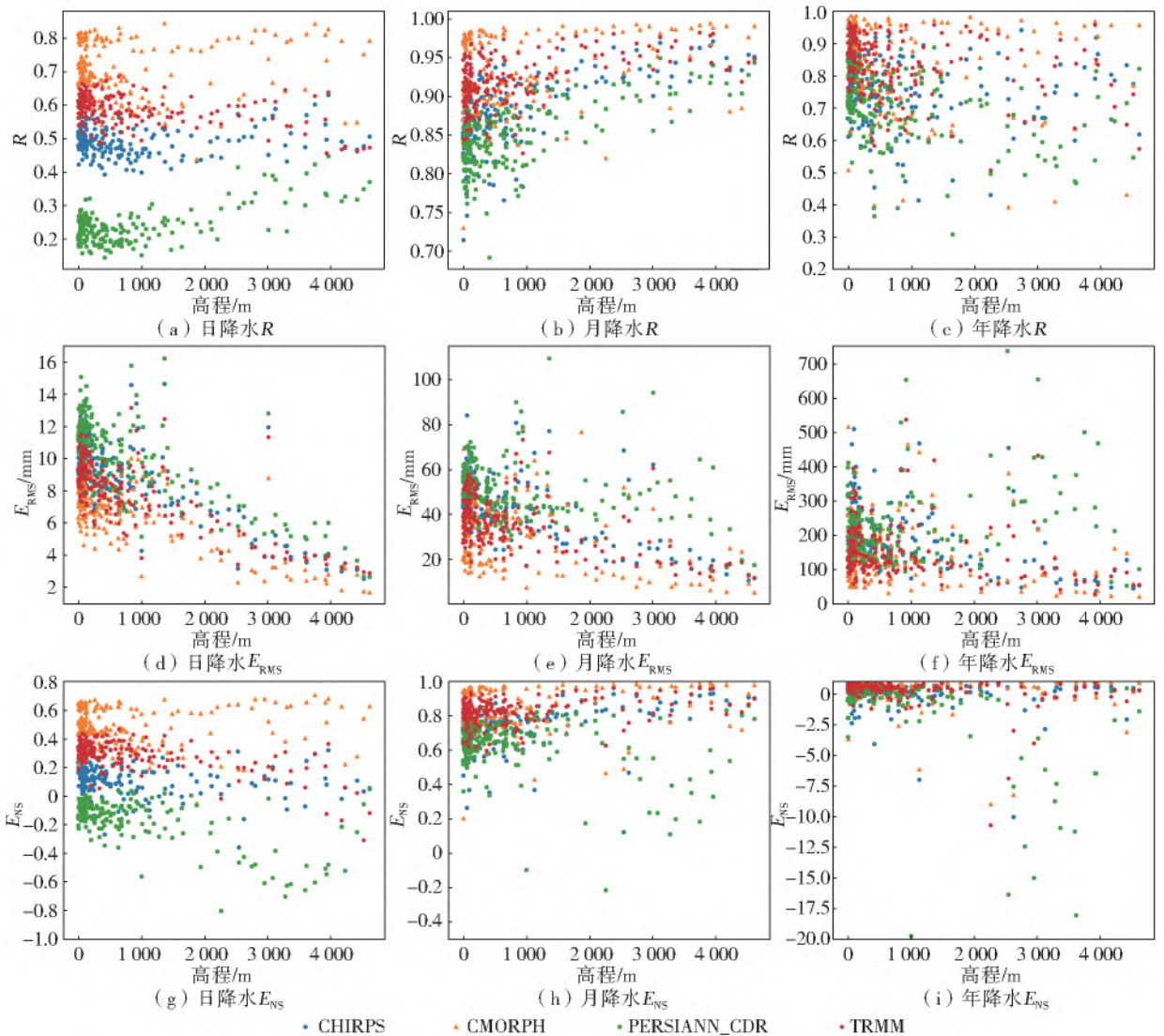


图 9 各评价指标与高程散点图

Fig. 9 Scatter plots of the evaluation indicators and elevation

在空间尺度上,4 种卫星降水产品的精度在日、月尺度上有较明显的差异,但总体上都表现为高海拔地区的精度高于低海拔地区,而在年尺度上精度随高程的变化没有表现出明显的变化规律。

本文从时间、空间两个角度对比了 4 种卫星降水产品在长江流域不同分区的降水精度和降水探测能力,总体上看 TRMM 和 CMORPH 在长江流域年、月、日 3 种时间尺度上更具有优势,而在长江流域的 4 个不同空间尺度上,4 种卫星降水产品在不同地区的精度不同,而且在日、月尺度上,4 种卫星降水产品表现为高海拔地区的精度总体上高于低海拔地区。在未来的研究中应当结合季风、下垫面等因素,加强对高寒地区固态降水特性的解析来进一步评估卫星降水产品的适用性。同时,尽管卫星所优选的两种卫星降水产品具有一定的优势,但相对站点降水而

言仍有较大差距,未来应结合长江流域更高密度的地面站点数据,对卫星降水数据进行基于线性回归模型、卡尔曼滤波、随机森林算法、贝叶斯模型等主流方法的卫星降水数据融合校正,并进一步结合当前主流水文模型/模式(如新安江、WRF-hydro 和 VIC 模型)增加径流模拟环节的精度检验。

参考文献(References):

[1] AMITAI E, LLORT X, SEMPERE-TORRES D. Comparison of TRMM radar rainfall estimates with NOAA next-generation QPE[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II, 2009, 87A: 109-118. DOI: 10.2151/jmsj. 87a. 109.

[2] LI Z, YANG D W, HONG Y. Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation

- products over the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2013, 500: 157-169. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2013. 07. 023.
- [3] KIDD C, HUFFMAN G. Global precipitation measurement[J]. Meteorological Applications, 2011, 18 (3): 334-353. DOI: 10. 1002/met. 284.
- [4] BORGA M, STOFFEL M, MARCHI L, et al. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows[J]. Journal of Hydrology, 2014, 518: 194-205. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 05. 022.
- [5] BIN Y, REN L L, YANG H, et al. First evaluation of the climatological calibration algorithm in the real-time TMPA precipitation estimates over two basins at high and low latitudes[J]. Water Resources Research, 2013, 49(5): 2461-2472. DOI: 10. 1002/wrcr. 20246.
- [6] ESTELLE D C. Optimizing satellite-based precipitation estimation for nowcasting of rainfall and flash flood events over the South African domain[J]. Remote Sensing, 2013, 5(11): 5702-5724. DOI: 10. 3390/rs5115702.
- [7] JIANG S H, REN L L, YONG B, et al. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe basin in northern China[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(4): 405-417. DOI: 10. 3882/j. issn. 1674-2370. 2010. 04. 004.
- [8] 吴一凡, 张增信, 金秋, 等. GPM 卫星降水产品在长江流域应用的精度估算[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 77-85, 152. (WU Y F, ZHANG Z X, JIN Q, et al. Accuracy evaluation of GPM precipitation product in Yangtze River basin[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 77-85, 152. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2019. 09. 014.
- [9] 金秋, 张增信, 黄钰瀚, 等. 基于 TRMM 卫星产品的长江流域降水精度评估[J]. 人民长江, 2017, 48(19): 48-52. (JIN Q, ZHANG Z X, HUANG Y H, et al. Accuracy evaluation of precipitation analysis in Yangtze River basin based on satellite TRMM[J]. Yangtze River, 2017, 48(19): 48-52. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. 19. 009.
- [10] 张磊磊, 康颖, 岳青华, 等. 四种卫星降水数据在黄河源区的适用性分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 29-33. (ZHANG L L, KANG Y, YUE Q H, et al. Analysis of the applicability of various satellite-based precipitation in the source region of Yellow River[J]. Yellow River, 2021, 43(3): 29-33. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; RMHH. 0. 2021-03-008.
- [11] 卫林勇, 江善虎, 任立良, 等. 多源卫星降水产品在不同省份的精度评估与比较分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(11): 38-44. (WEI L Y, JIANG S H, REN L L, et al. Evaluation and comparison of multi-source satellite precipitation products in different climate regions over Chinese mainland[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (11): 38-44. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZNSD. 0. 2019-11-008.
- [12] 曾琪铨, 金鑫. GPM 与 TRMM 降水数据在柴达木盆地的精度评估[J/OL]. 人民黄河: 1-6[2021-06-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1128.TV.20210401.1148.004.html>. (ZENG Q C, JIN X. The evaluate of the accuracy of the TRMM and GPM precipitation data in Qaidam basin[J/OL]. Yellow River: 1-6[2021-06-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1128.TV.20210401.1148.004.html>. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2021. 04. 000.
- [13] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 不同降水卫星数据反演降水量精度评价: 以雅鲁藏布江流域为例[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 386-396. (LIU J T, XU Z X, ZHAO H, et al. Accuracy assessment for two satellite precipitation products: Case studies in the Yarlung Zangbo River basin[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(2): 386-396. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; GYQX. 0. 2019-02-015.
- [14] 俞琳飞, 张永强, 张佳华, 等. 卫星降水产品在太行山区的适用性初步评估[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 819-829. (YU L F, ZHANG Y Q, ZHANG J H, et al. Preliminarily evaluate the applicability of satellite precipitation products over the Taihang mountains[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 819-829. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2020. 00007.
- [15] 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. (LI Q L, ZHANG W C, YI L, et al. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over Chinese mainland[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 303-313. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 03. 001.
- [16] 黄琦, 王瑞敏, 向俊燕, 等. 三种降水产品在雅砻江流域的时空适用性研究[J]. 水文, 2020, 40(4): 14-21. (HUANG Q, WANG R M, XIANG J Y, et al. Spatial and temporal applicability of three precipitation products in the Yalong River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(4): 14-21. (in Chinese)) DOI: 10. 19797/j. cnki. 1000-0852. 20190331.
- [17] 程开宇, 张磊磊, 康颖, 等. 多源卫星降水数据在瓯江流域的适用性分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 15-19. (CHENG K Y, ZHANG L L, KANG Y, et al. Applicability analysis of various satellite-based precipitation in Oujiang basin[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 15-19. (in Chinese)) DOI:

- CNKI;SUN;SDNY. 0. 2016-12-004.
- [18] ZHANG D, HONG H, ZHANG Q, et al. Attribution of the changes in annual streamflow in the Yangtze River basin over the past 146 years[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015, 119 (1-2): 323-332. DOI: 10. 1007/s00704-014-1121-3.
- [19] XIAO S, XIA J, ZOU L. Evaluation of multi-satellite precipitation products and their ability in capturing the characteristics of extreme climate events over the Yangtze River basin, China[J]. *Water*, 2020, 12 (4): 1179. DOI:10. 3390/w12041179.
- [20] 何会中, 崔哲虎, 程明虎, 等. TRMM 卫星及其数据产品应用[J]. *气象科技*, 2004, 32(1): 13-18. (HE H Z, CUI Z H, CHENG M H, et al. TRMM satellite and application of its products[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32 (1): 13-18. (in Chinese)) DOI:10. 19517/j. 1671-6345. 2004. 01. 003.
- [21] JANOWIAK J E, KOUSKY V E, JOYCE R J. Diurnal cycle of precipitation determined from the CMORPH high spatial and temporal resolution global precipitation analyses [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D23). DOI:10. 1029/2005JD006156.
- [22] FUNK C, PETERSON P, LANDSFELD M, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes [J]. *Scientific Data*, 2015, 2: 150066.
- [23] 杨娜, 卢莹, 杨茜然, 等. PERSIANN_CDR 产品对淮河流域干旱特征辨识性能评估[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(3): 1-4, 12. (YANG N, LU Y, YANG Q R, et al. Evaluation of PERSIANN_CDR performance for drought characteristics identification in the Huaihe River basin[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38 (3): 1-4, 12. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY. 0. 2020-03-001.
- [24] 熊立华, 刘成凯, 陈石磊, 等. 遥感降水资料后处理研究综述[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 11. (XIONG L H, LIU C K, CHEN S L, et al. Review of post-processing research for remote-sensing precipitation products[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 11. (in Chinese))
- [25] 王在文, 梁旭东, 范水勇, 等. 数值模式降水评分对分辨率的敏感性初探[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(1): 10-16. (WANG Z W, LIANG X D, FAN S Y, et al. Impact of spatial resolution on precipitation forecast score in numerical weather prediction models [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(1): 10-16. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HBQX. 0. 2016-01-002.
- [26] 余坤伦, 张寅生, 马宁, 等. GPM 和 TRMM 遥感降水产品在青藏高原中部的适用性评估[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1373-1381. (YU K L, ZHANG Y S, MA N, et al. Applicability of GPM and TRMM remote sensing precipitation products in the Central Tibet Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35 (6): 1373-1381. (in Chinese)) DOI:10. 13866/j. azr. 2018. 06. 14.
- [27] 闵文彬, 彭骏, 李施颖. 青藏高原 FY-3C 卫星积雪产品评估[J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(1): 145-151. (MIN W B, PENG J, LI S Y. The evaluation of FY-3C snow products in the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2021, 33(1): 145-151. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;GTYG. 0. 2021-01-020.

Comparison of temporal and spatial accuracy of precipitation products from multi-source satellites in the Yangtze River basin

GUO Jiali^{1,2}, DING Guangxu¹, YANG Xu³, TANG Zhengyang³, ZHANG Hairong³, PAN Renwei¹, DAI Lingquan^{1,2}
(1. *College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*;
2. *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*; 3. *Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China*)

Abstract: Accurately assessing the temporal and spatial accuracy characteristics of existing multi-source satellite-based precipitation products can lay a solid meteorological data foundation for the efficient development and utilization of water resources in the Yangtze River basin (YRB).

The daily precipitation data of 191 meteorological gauges in YRB from 1999 to 2019 and four types of satellite-based products of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), CMORPH (CPC MORPHing technique), CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) and PERSIANN_CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Climate Data Record) were used. The indicators (e. g. R , E_{RMS} and E_{NS}) were used to evaluate the detection accuracy of four satellite-based precipitation products related to gauge-based precipitation at temporal and spatial scales. P_{OD} , R_{FA} and T_{S} classification evaluation indicators are used to measure the ability of four satellite-based precipitation products of different magnitudes.

(下转第 252 页)

sued the *Report on Water-Energy-Food Link in Asia-Pacific Region*. In 2014, FAO expounded on the water-energy-food relationship from the perspective of food security. The relationship between the three is particularly important in the shortage of global resources, population growth, climate change, and environmental deterioration.

The spatial correlation of water resources system development index, energy system development index, food system development index, water-energy-grain system comprehensive development index, and water-energy-grain coupling coordination are calculated, and the water-energy-food coupling coordination from 2003 to 2017, and the influence of working population, fixed asset investment, GDP per capita and total population are analyzed.

The water resources system development index is lower than the energy system development index and the food system development index. The water-energy-food system comprehensive development index shows a rising trend, and low levels of coordination of water-energy-grain coupling, most are at the level of forced and primary coordination. The results of the spatial autocorrelation test showed that the Moran's I index varies greatly in the time series, except for the following 2004, 2005, outside of 2013, all passed the significance test at the 10% level, with the spatial aggregation characteristics, spatially interrelated and dependent. When performing the influence factor analysis using the spatial Dubin model, the number of the employed population, fixed asset investment, and urbanization have passed the significance test. It promotes the improved coordination of water-energy-grain coupling. The per capita GDP, population, and industrial pollution passed the significance test, which was negative, suppressed the improved coordination of water-energy-grain coupling.

According to the above studies, the water-energy-food coordination is weak at the primary level, but in the current development trend, in the future, increase working population, increase investment in fixed assets, accelerate urbanization, strictly control industrial enterprises, reduce industrial pollution emissions, reasonably control population quantity and coordinate the relationship between economic development and resource environment can enhance water-energy-food coordination.

Key words: water-energy-food; coupled coordination degree model; spatial Dubin model; comprehensive system evaluation index; spatial autocorrelation

(上接第 242 页)

The results showed that: At annual scale, TRMM and CMORPH show higher detection accuracy than CHIRPS and PERSIANN_CDR, and terms of the spatial distribution characteristics of annual precipitation, only TRMM, CMORPH and CHIRPS could reflect its spatial distribution to varying degrees; At a monthly scale, TRMM and CMORPH still have high accuracy in precipitation estimation, and TRMM, CMORPH, and CHIRPS have different advantages in describing the spatial distribution of precipitation in different regions in YRB; At daily scale, the four satellite-based precipitation products have a strong ability to capture weak precipitation but have a poor ability to detect heavy precipitation; At spatial scale, the accuracy of the four types of satellite-based precipitation data is higher in high-altitude areas at daily and monthly scales, and there is no obvious change law at the annual scale.

In general, among the four types of satellite-based precipitation products, TRMM and CMORPH have more advantages in different time scales in YRB, but the spatial distribution of the four types of products is significantly different in different regions and different time scales. This conclusion lays the foundation for the further development of high-temporal-resolution precipitation fusion products suitable for YRB.

Key words: satellite precipitation product; time-space comparison; accuracy comparison; statistical evaluation; Yangtze River basin