

ERA5 再分析降水数据在长江三角洲的性能评估

姚 飞¹, 杨秀芹¹, 刘慕嘉¹, 张余庆²

(1.南京信息工程大学水文与水资源工程学院,南京 210044;2.淮阴师范学院城市与环境学院,江苏 淮安 223300)

摘要:采用长江三角洲 1961—2018 年 171 个气象站逐日实测降水数据评估 ERA5 再分析降水数据对雨日的探测能力,分析 ERA5 模拟降水量的准确性及 ERA5 对极端降水指标的刻画能力。结果表明:ERA5 再分析降水数据能够再现降水过程,有较高的命中率(POD)和公正先兆评分(ETS),误报率(FAR)较低,在研究区南部的探测性能优于北部,ERA5 对小雨为主的雨日数探测偏多 17.68%;ERA5 高估区域多年平均降水量约 15.75%,均方根误差(RMSE)较小,降水量较大时误差也较大,且在南部的误差略高于北部,在月、季、年尺度均表现出较好的线性相关性;ERA5 对 PRCPTOT、RX5d、R95P、R99P、R20 和 R25 6 个极端降水指标随时间变化表现出先高估后低估的趋势,其中强度指标南部比北部高估得多,频率指标北部比南部高估得多;RX1d、SDII、CDD 3 个指标一直被低估,北部比南部低估得多;CWD 和 R10 2 个指标持续被高估,没有明显的南北差异。

关键词: ERA5; 地面站点降水; 雨日; 极端降水; 性能评估

中图分类号: P468.0⁺ 24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0178-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.04.023

Performance Evaluation of ERA5 Reanalysis Precipitation Data in the Yangtze River Delta

YAO Fei¹, YANG Xiuqin¹, LIU Mujia¹, ZHANG Yuqing²

(1.School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2.School of Urban and Environmental Sciences, Huaiyin Normal University, Huai'an, Jiangsu 223300)

Abstract: Using the daily measured precipitation data of 171 meteorological stations in the Yangtze River Delta from 1961 to 2018, this study evaluated the detection ability of ERA5 reanalysis precipitation data for rainy days, analyzed the accuracy of ERA5 precipitation simulation and the ability of ERA5 to describe extreme precipitation indices. Assessment results showed that ERA5 reanalysis precipitation data could reproduce the precipitation process, with high probability of detection (POD), small equitable threat score (ETS) and low false alarm ratio (FAR). The detection performance in the south of the study area was better than that in the north. The percent of false alarm occurrences for rainy days of ERA5 was about 17.68%, mainly occupied by light rain. ERA5 overestimated the regional multi-year average precipitation by about 15.75%, and the root mean square error (RMSE) was small. The error was also large when the precipitation was large. And the error in the south region was slight higher than that in the north region. ERA5 had a good linear correlation on monthly, seasonal and annual scales. ERA5 showed a trend of overestimation and then underestimation over time for six extreme precipitation indicators such as PRCPTOT, RX5d, R95P, R99P, R20 and R25. And the intensity indices over estimated much higher in the south than those in the north, while the occurrence indices had opposite trend. The three indices RX1d, SDII and CDD had been underestimated, and there was a significantly large underestimation in the north than that in the south. While ERA5 had a continuously overestimation for CWD and R10 with no significant difference between the north and the south.

Keywords: ERA5; rain gauge observation; rainy day; extreme precipitation; performance evaluation

准确的降水信息对气候变化研究、水文模拟预测、灾害风险管理和农业生产至关重要,随着全球气候变暖,极端降水事件被越来越多的学者关注^[1-2]。目前,降水的直接观测方式为雨量站网观测,但无法反映降水的连续空间分布;间接观测方式为天气雷达估测和气象卫星反演,但天气雷达分布范围有限且造价高昂,卫星反

收稿日期:2021-12-15

资助项目:国家自然科学基金项目(41907384)

第一作者:姚飞(1993—),男,硕士研究生,主要从事流域水文气候与水资源规划与管理研究。E-mail:yaofei@nuist.edu.cn

通信作者:杨秀芹(1981—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事流域水文气候与水资源规划与管理研究。E-mail:young_sd@nuist.edu.cn

演降水由于受反演算法、传感器性能等限制,存在输出的降水数据精度有限等弊端^[3]。利用数据同化方式把各种观测降水与短期数值天气预报产品融合集成,得到再分析降水数据集,ERA5 是欧洲中期天气预报中心(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的第五代全球气候再分析数据集^[4]。

已有学者比较了不同再分析降水产品的性能。Sun 等^[5]总结了全球 30 个降水数据集的基本特征,分析发现,不同降水数据估计值的大小和变化都存在较大差异,再分析比其他类型的数据集有更大的可变性;Colorado-Ruiz 等^[6]利用地面观测降水数据,评估 ERA5、ERA-Interim 及 CFSR 等再分析数据在美国南部和墨西哥地区对极端和非极端降水指标的模拟性能,ERA5 表现出明显优于其他再分析降水产品的性能;王彧蓉等^[7]从时间和空间上对 ERA5 和 CFSR 在长江中下游地区的适用性进行对比评估,在空间分布特征上,ERA5 比 CFSR 的表现略差,但从定量综合评估指标来看,ERA5 表现优于 CFSR;Huang 等^[8]基于地面观测降水数据对 ERA5、ERA-Interim、JRA55、MERRA2、NCEP2 等 5 套再分析产品在塔克拉玛干沙漠的准确性进行误差分析发现,ERA5 的性能最优,其次是 ERA-Interim;比较 ERA5 和其他 9 种基于卫星或再分析产品的日尺度和小时尺度性能表明,ERA5 在逐日尺度上表现良好,在伊朗、印度、土耳其、澳大利亚和北美也进行了类似的研究,这些研究普遍认为 ERA5 能够探测降水事件并重现时空分布,但在大多数情况下高估了降水^[9-10]。

ERA5 具有较高的时空分辨率,能够较好模拟出降水的时空分布特征,但在不同地区 and 不同时间对降水事件的探测能力和对降水量模拟的准确性并不一致。Jiang 等^[11]基于中国大陆站点观测数据评估 ERA5 对降水事件的探测能力并对降水量进行误差分析发现,ERA5 在不同气候区的表现能力存在显著差异,模拟的降水量也有较大偏差,但对降水事件的探测能力优于其他几种卫星降水产品;刘婷婷等^[12]以中国 728 个站点的日降水数据为参考发现,ERA5 降水数据在北温带对日降水事件的识别能力精度最高,夏秋季较冬春季的精度低,海拔 >500 m 地区的精度低于海拔 ≤ 500 m 地区的精度,ERA5 对暴雨的识别偏差较大且受阈值影响;Xin 等^[13]基于粤港澳大湾区的高密度站点观测降水发现,ERA5 在沿海城市地区旱季表现较好,在山地植被区雨季表现较好,在城镇化水平较高的地区模拟能力不足。

长江三角洲是中国经济发展和城市化进程最快的区域之一,近年来该地区的极端降水事件发生频率明显升高^[2,14],目前 ERA5 降水资料在该地区对极端降水事

件的刻画性能评估较少。本文基于 1961—2018 年逐日站点实测降水数据,研究 ERA5 再分析降水数据在月、季和年 3 个时间尺度上对雨日的探测性能,定量评估 ERA5 在 3 个时间尺度上模拟降水量的准确性,最后评估 ERA5 对极端降水事件的刻画能力。该研究为 ERA5 在水文模拟预测、城市雨洪管理等方面提供适用性参考,为基于该数据开展相关研究提供准确性评价,也为其他再分析降水产品区域适用性评估提供借鉴。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

长江三角洲($27^{\circ}01'N$ — $35^{\circ}20'N$, $114^{\circ}54'E$ — $123^{\circ}08'E$)位于我国东部长江下游,包括浙江省、安徽省、江苏省和上海市,总面积约 35.8 万 km^2 。研究区南部和西部海拔较高,中部、东部和北部海拔较低,年降水量受东亚季风气候影响具有高度的空间异质性,沿海地区地势平坦且海拔较低,特别容易受台风和潮汐影响,研究区降水有明显季节差异,降水量和雨日数呈现明显南多北少的空间分布特征^[14]。

1.1.1 数据介绍与处理地面气象站观测数据 选取研究区内 171 个气象站(图 1)1961—2018 年逐日降水数据作为实测降水序列,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。站点观测降水为点数据,ERA5 降水数据为空间分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的栅格数据,若 1 个栅格内有多个气象站,则取该栅格内所有气象站的平均值作为该栅格的实测降水序列^[11,15]。经统计,171 个气象站分布在 162 个栅格内。

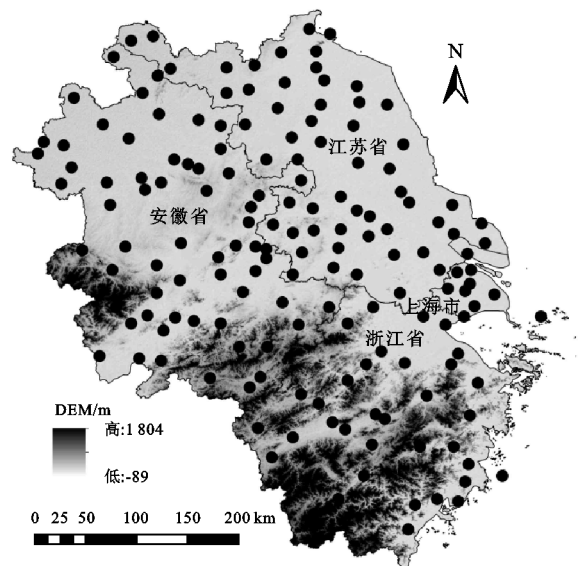


图 1 长江三角洲及地面气象站点空间分布

1.1.2 ERA5 再分析降水数据 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)是由 34 个国家组成的国际气象组织,在天气预报研究领域处于国际领先地位,ERA5 是 ECMWF 最新的第五代再分析产品。ERA5 目前有 1950—1978 年和 1979—现在的逐小时再分析气象数据^[4],下载

网站为 <https://cds.climate.copernicus.eu/>。我国地面雨量站点观测降水记录的格式为前 1 日 20:00 至当日 20:00 的累积降水量记作当日降水量,而 ERA5 日降水量为 1 UTC(协调世界时)至翌日的 00 UTC 之间的累积降水量,00 UTC 时刻记录的降水量即为 23 UTC~24 UTC 的降水量,因此本文在精度评估前将 ERA5 降水产品与地面雨量站的观测时间进行了一致性校正。本文根据气象站经纬度选取有覆盖站点的栅格降水数据^[11,15],后文中均简称 ERA5。

1.2 评估方法与统计指标

以站点实测降水数据为基准,分别评估 ERA5 在月、季和年 3 个时间尺度对雨日(日降水量 ≥ 0.1 mm/day)的探测性能^[11-12],用命中率(probability of detection, POD)、误报率(false alarm ratio, FAR)和公正先兆评分(equitable threat score, ETS)等 3 个探测指标评估 ERA5 对雨日的探测能力。POD 代表雨日被 ERA5 正

确探测的概率,FAR 代表非雨日被错误地探测为雨日的概率,即“发出错误预警”的情况,ETS 是在消除随机命中概率对评分影响后的得分,ETS 的取值范围为 $-1/3\sim 1$,ETS ≤ 0 表示 ERA5 不能探测到雨日,ETS >0 表示 ERA5 成功探测到雨日,ETS=1 为没有空报和漏报情况下的完美探测^[11-13]。

选取均方根误差(root mean square error, RMSE)、相对误差(relative bias, RB)、相关系数(correlation coefficient, CC)、平均偏差(mean bias, Bias)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)等统计指标定量评估 ERA5 日降水数据和 ERA5 对极端降水指标的刻画能力, RMSE 表示误差的平均幅度,综合衡量数据准确性, RB 表示 ERA5 高估(RB >0)或低估(RB <0)地面降水的程度,CC 反映 ERA5 与气象站实测降水变化的同步性, Bias 可以衡量平均误差大小,MAE 可以看出平均误差的等级^[11-12,15]。统计指标具体定义见表 1。

表 1 本文选用的统计指标

序号	指标名称	计算表达式	最优值	单位
1	命中率	$POD = \frac{N_{hit}}{N_{hit} + N_{miss}}$	1	—
2	误报率	$FAR = \frac{N_{falsealarm}}{N_{hit} + N_{falsealarm}}$	0	—
3	公正先兆评分	$ETS = \frac{N_{hit} - N_{ref}}{N_{hit} - N_{ref} + N_{falsealarm} + N_{miss}}$ $N_{ref} = \frac{(N_{hit} + N_{falsealarm})(N_{hit} + N_{miss})}{N}$	1	—
4	均方根误差	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - G_i)^2}$	0	mm/d
5	相对误差	$RB = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - G_i)}{\sum_{i=1}^N G_i} \times 100$	0	%
6	相关系数	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}}$	1	—
7	平均偏差	$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - G_i)$	0	mm
8	平均绝对误差	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i - G_i $	0	mm

注: N 为样本容量; G 、 E 分别为气象站观测样本和 ERA5 再分析样本; $\bar{G}$ 、 $\bar{E}$ 为相应样本算术平均值; N_{hit} 为站点、格点均为雨日事件发生的次数; N_{miss} 为站点为雨日、格点为非雨日事件发生的次数; $N_{falsealarm}$ 为站点为非雨日、格点为雨日事件发生的次数。

另外,选取世界气象组织推荐的 11 个极端降水指标^[16](表 2),分析基于 ERA5 与站点实测降水的极端降水指标的差值、Bias、MAE、RB、CC 和 RMSE 等统计指标,评估 ERA5 在长江三角洲地区对极端降水事件的刻画能力。

2 结果与分析

2.1 ERA5 日降水数据评估

2.1.1 逐月探测性能及统计指标分析 图 2~图 4 为 ERA5 在长江三角洲 1—12 月 POD、FAR 及 ETS 的时空分布。由图 2 可知,POD 在 1—3 月介于 0.91~0.99,

4—6 月介于 0.84~0.98,此时研究区北部出现全年最小值,在降水量较大和降水事件频发的 7、8 月 POD 基本大于 0.96,个别格点达 100%,即 ERA5 成功探测到每个雨日;9—12 月 POD 介于 0.88~0.99,有不明显先减小后增大的变化趋势。由图 3 可知,1—12 月 FAR 介于 0.16~0.62,在研究区北部有先减小后增大的变化趋势,南部有先增大后减小的变化趋势。7—9 月 FAR 较高且南北差异较小,特别是 8 月 FAR 基本大于 0.50,其他月份南部误报情况少于北部。由图 4 可知,1—12 月 ETS 介于 0.07~0.67,均

值为 0.41,说明 ERA5 对雨日的探测是有效的。ETS 在 1—5,10—12 月基本大于 0.4,南部略高于北部,6—9 月基本小于 0.3,没有南北差异,特别是 7,8 月大多格点的 ETS

小于 0.25,为全年最小值。ETS 的分布特征综合反映 POD、FAR 的时空分布关系,ERA5 有较高的命中率,但在部分区域、部分月份也有较高的误报率。

表 2 本文选用的极端降水指标

序号	指标分类	极端降水指标	名称	描述	单位
1	强度指标	PRCPTOT	年降水总量	年内日降水量≥1 mm 的降水量之和	mm
2		RX1d	1 日最大降水量	每年内连续 1 日降水量最大值	mm
3		RX5d	5 日最大降水量	每年内连续 5 日降水量最大值	mm
4		R95P	异常降水总量	日降水量大于基准期内第 95%分位值的总降水量	mm
5		R99P	极端降水总量	日降水量大于基准期内第 99%分位值的总降水量	mm
6	频率指标	SDII	日降水强度	降水量≥1 mm 的总量与日数之比	mm/d
7		CDD	持续干旱日数	日降水量<1 mm 的最长连续日数	d
8		CWD	持续湿润日数	日降水量≥1 mm 的最长连续日数	d
9		R10	中雨以上日数	年内日降水量>10 mm 的日数	d
10		R20	大雨以上日数	年内日降水量>20 mm 的日数	d
11		R25	暴雨以上日数	年内日降水量>25 mm 的日数	d

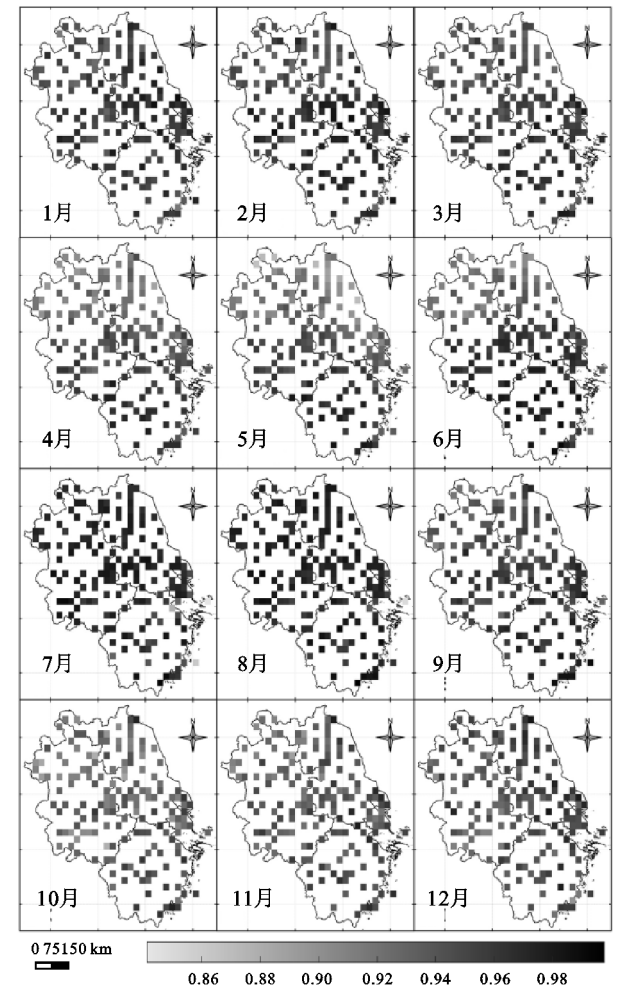


图 2 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲逐月的命中率(POD)

图 5~图 7 为 ERA5 在长江三角洲 1—12 月 RMSE、RB 和 CC 的时空分布。由图 5 可知,各月 RMSE 介于 1.09~22.10 mm/d,RMSE 具有雨季高于旱季的特点,1—3,10—12 月 RMSE 均较小(1.14~11.25 mm/d)且具有南高北低的空间分布特征,7—9 月 RMSE 较大且表现出北高南低的空间分布特征。由图 6 可知,ERA5 以高估降水 24.52%~33.92%为主。除 6 月外,其他各月在研究区西南部均有少数格点被低估。RB 在

1—6,12 月等降水较少的月份较大,其他降水较多的月份较小,说明 ERA5 在降水多时准确性较高,采用 ERA5 研究雨季的降水准确性相对较好。由图 7 可知,1—12 月 CC 介于 0.44~0.92,1—3,10—12 月较大(0.85~0.92),4—9 月先减小后增大,最小值出现在 7,8 月(0.44~0.47),可能是汛期降水量大、降水情况复杂导致降水模拟难度增加所致。

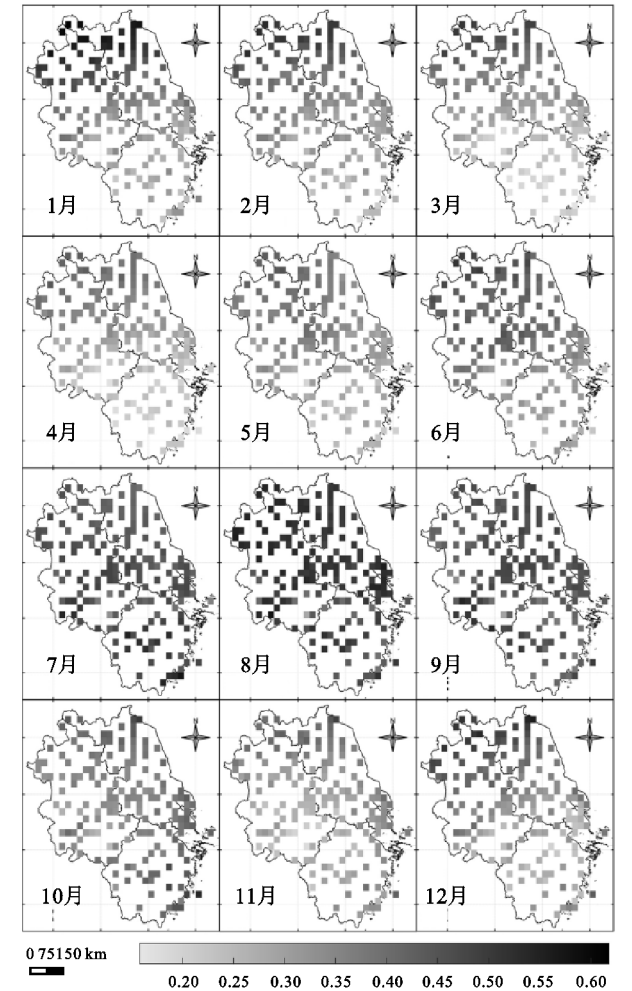


图 3 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲逐月的误报率(FAR)

2.1.2 逐季探测性能及统计指标分析 从图 8 可以

看出,POD 在季节尺度上表现出优异性能(0.89~0.99),从高到低依次为夏季、冬季、春季、秋季,区域平均依次为 0.97,0.95,0.94,0.94,春季和秋季南部略高于北部,夏季和冬季南北差异较小,表现最好的夏季 POD 介于 0.89~0.99,均值为 0.97;FAR 介于 0.18~0.54,在春季、冬季明显呈北高南低、中间过渡的分布特点;夏季、秋季约为 0.45,南北差异不明显;ETS(0.09~0.61)在整个区域都是有效的,但在夏季表现较差,分布在 0.09~0.42,均值只有 0.24,冬季表现最好,均值为 0.52,春季和秋季均值分别为 0.47 和 0.43。从图 9 可以看出,RMSE 介于 1.45~16.78 mm/d,均值从大到小依次为夏季 13.33 mm/d,秋季 6.19 mm/d,春季 6.12 mm/d,冬季 2.49 mm/d,RMSE 在夏季北高南低,其他 3 个季节均为北部略低于南部;ERA5 在超过 1/2 的格点高估降水 22.23%~29.13%,每个季节均有个别格点被低估,RB 空间分布差异不大,春季、夏季北边较南边略小,秋季、冬季没有明显的南北差异;CC 冬季的相关性最好,多数格点介于 0.83~0.86,春季、秋季次之,多为 0.71~0.75,夏季多为 0.58~0.62。

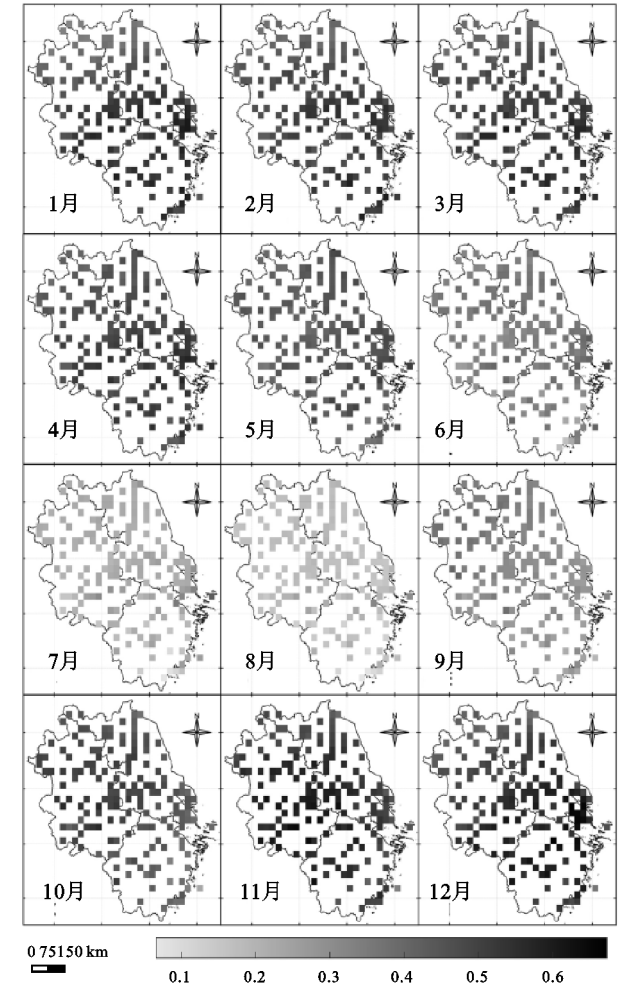


图 4 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲逐月的公正先兆评分(ETS)

2.1.3 年尺度探测性能及统计指标分析 从图 10

可以看出,多年平均 POD 介于 0.93~0.98,呈南高北低、中间过渡的空间分布特征;FAR 介于 0.24~0.48,呈现南低北高、中间过渡的空间分布特征。ETS 介于 0.35~0.48,其中介于 0.39~0.42 的较多,空间分布有不明显的南高北低的特征。RMSE 介于 6.89~10.45 mm/d,除了研究区西南和东南部的部分格点均方根误差偏大以外,其余部分的 RMSE 介于 7.37~8.33 mm/d。ERA5 在大部分地区高估了降水,RB 分布在 -8.84%~42.46%,在 11.16%~21.16%的格点最多,江苏省和安徽省的 RB 基本都在该区间内,RB>30%的格点只有 4 个,均在浙江省境内,存在略微低估的格点有 7 个,分布在安徽省西南部和浙江省东南部,为 -8.84%~-0.18%。CC 分布在 0.61~0.72,较高的格点位于安徽省与浙江省的交界处。

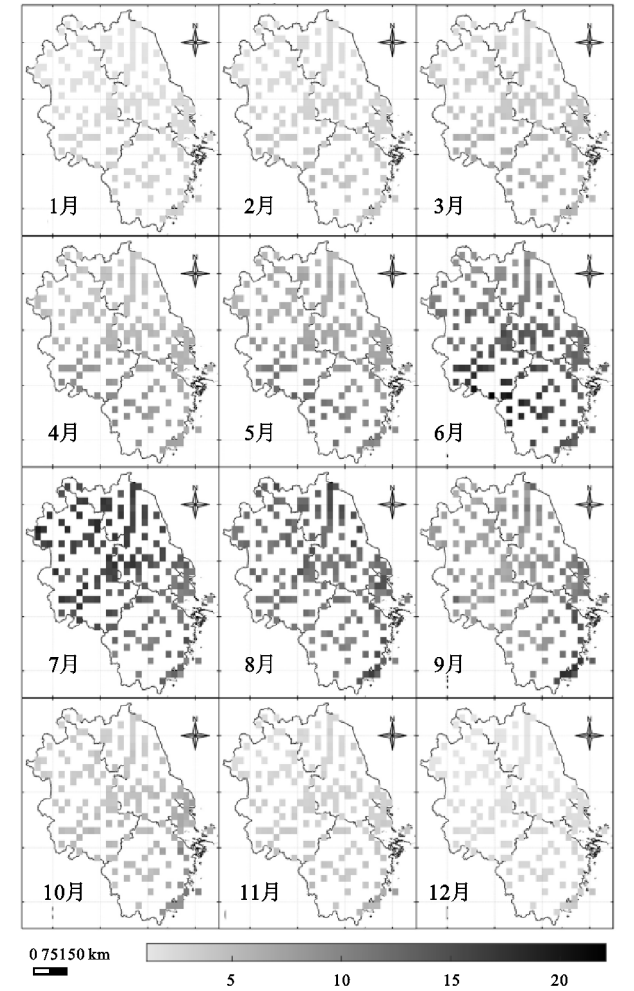


图 5 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲逐月的均方根误差(RMSE)

2.2 基于 ERA5 再分析降水数据的极端降水指标性能评估

2.2.1 区域平均极端降水指标的差值趋势分析 图 11 为基于 ERA5 与站点实测降水计算的极端降水指标区域平均值的差值变化趋势,>0 表示高估,<0 表示低估。PRCPTOT 整体上被高估,差值随时间呈减少趋势,2006 年之前,差值介于 130.09~294.09 mm,2006 年之

后,PRCPTOT 被高估的程度明显减小,准确性明显提高,差值多在 0 mm 附近波动(图 11a)。RX1d 普遍被低估,并且低估值越来越大,年际波动幅度也比较大,最大低估值 39.84 mm 出现在 2018 年(图 11b)。RX5d 从高估变为低估,高估最多为 1982 年的 39.28 mm,2005 年之后低估得比较明显,最低值出现在 2007 年(40.39 mm)(图 11c)。R95P 在 2007 年之前都是被高估,在 2.38~151.33 mm 变化,最大值出现在 1983 年,2005 年之后在 0 mm 附近波动,最大低估值 51.43 mm 出现在 2018 年(图 11d)。R99P 在 2005 年之前基本被高估,最大值 54.95 mm 出现在 1964 年,在 2005 年之后以低估为主,最大低估值 38.19 mm 出现在 2018 年(图 11e)。

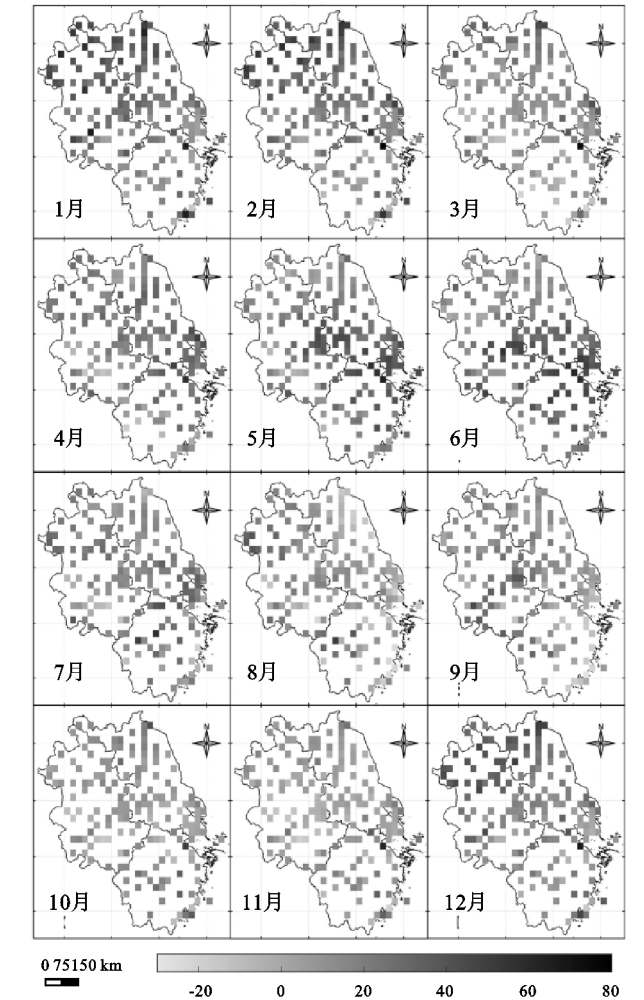


图 6 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲逐月的相对误差(RB)

SDII 一直被低估,并且低估量随时间变化越来越大,最小值 1.90 mm 出现在 1982 年,最大值 4.51 mm 出现在 2007 年(图 11f)。CDD 一直被低估,但有逐年减小的趋势,最大值 19.07 天出现在 1977 年,在 1980 年以前年际变化较大,1980 年以后稳定在 0~11 天,2009 年、2015 年表现较好,分别低估 1.09,1.00 天(图 11g)。CWD 一直被高估,年际变化范围较小,最大值和最小值分别出现在 1973 年(7.60 天)和 1966 年(7.35 天)(图 11h)。R10 在 2018 年(低估 0.60 天)以前一直被高估,最大值 15.88 天出现在 1977 年,高估值随时间呈减少趋势,2000

年以后明显减少(图 11i)。R20 表现比较好,在 2002 年之前基本为高估,最大值 5.96 天出现在 1983 年,从 2003 年开始低估,最大值 4.48 天出现在 2018 年(图 11j)。R25 的变化趋势和 R20 相似,差值变化范围更小,最大值和最小值出现在 1983 年和 2018 年,分别高估 3.88 天和低估 4.27 天(图 11k)。

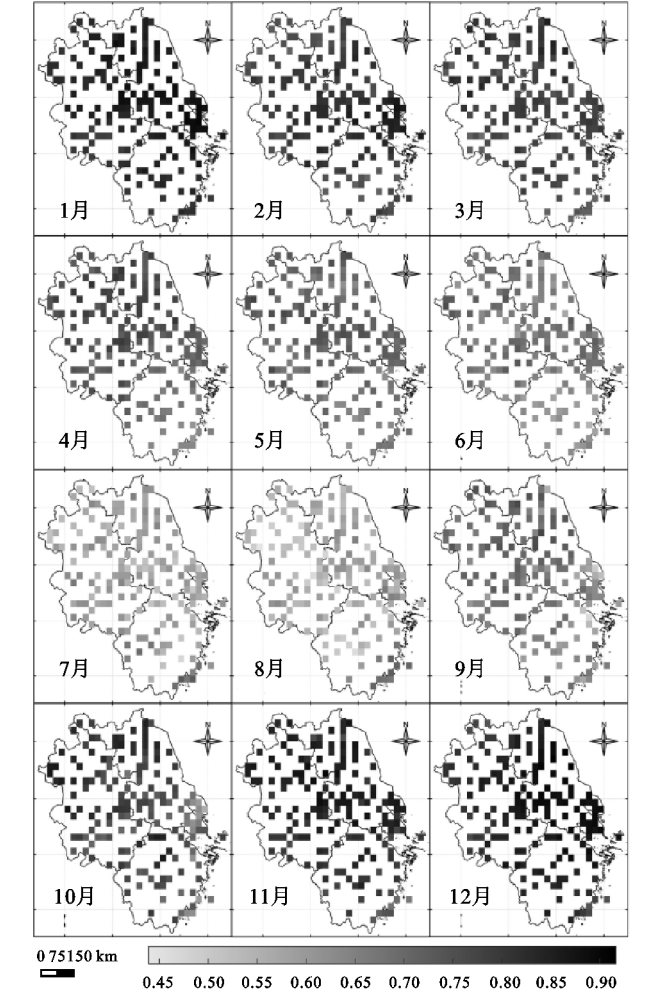


图 7 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲逐月的相关系数(CC)

综上所述,PRCPTOT、RX5d、R95P、R99P、R20 和 R25 表现出先高估后低估的趋势,RX1d、SDII、CDD 3 个指标则一直被低估,CWD 和 R10 2 个指标持续被高估。

2.2.2 极端降水指标及其差值的空间分布特征

ERA5 与站点实测的多年平均 PRCPTOT 均具有南多北少、均匀过渡的空间分布特征(图 12a1、图 12a2),大部分区域的年降水总量为 1 000~1 500 mm;由图 12a3 可知,ERA5 在大部分区域高估约 111.66~243.66 mm,北部高估少,南部高估多,最高的格点高估 520.12 mm,安徽省和浙江省的部分格点被低估,最大低估量为 152.34 mm。

站点实测的多年平均 RX1d 为 78.61~146.54 mm,最小值位于上海市和浙江省的中部地区,最大值发生在浙江省的沿海地区(图 12b1);ERA5 的多年平均 RX1d 空间分布差异不明显(图 12b2),两者有较一

致的南多北少的空间分布特征,该指标多被低估,大部分区域低估 5.62~24.22 mm,江苏省北部低估值达55.22 mm(图 12b3)。站点实测和 ERA5 的 RX5d 均有南高北低的特点,大部分区域被低估 5.00~26.00mm,仅在南部地区存在被高估的栅格(图 12c1~图 12c3)。ERA5 的 R95P 和 R99P 均有南高北低的分布特征,但存在较明显的高估,大部分区域的 R95P 高估 30.68~74.66 mm, R99P 高估 7.43~20.65 mm(图 12d1~图 12e3)。站点实测和 ERA5 的 SDII 最大值分别为 12.51,9.61 mm,最小值分别为 8.76,6.13 mm,两者空间分布无明显差异,有明显的低估,特别是在江苏省北部,最大值为 5.21 mm/d(图 12f1~图 12f3)。两者计算的 CDD 均呈南低北高的空间分布特征,整个区域内都存在低估,研究区的西北部有些格点的低估值约为 11.90 天,其他大部分区域的低估值分布在 3~7 天(图 12g1~图 12g3)。两者计算的 CWD 均呈南部略高北部略低的空间分布,ERA5 在整个区域内均高估该指标,大部分地区高估 2~5 天(图 12h1~图 12h3)。两者计算的 R10、R20、R25 均有南高北低的特点,ERA5 在大部分区域高估 R10 在 4~6 天;高估 R20 在 0~2 天,但在部分区域也存在低估;R25 的差值主要分布在-1~1 天,没有明显的地区差异(图 12i1~图 12k3)。

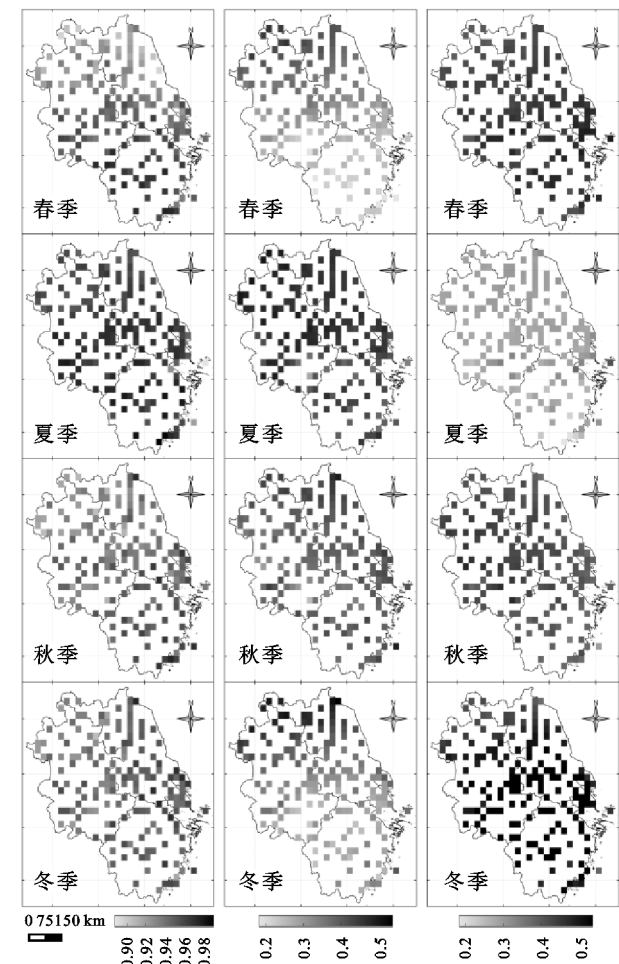


图 8 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲各个季度的 POD、FAR、ETS

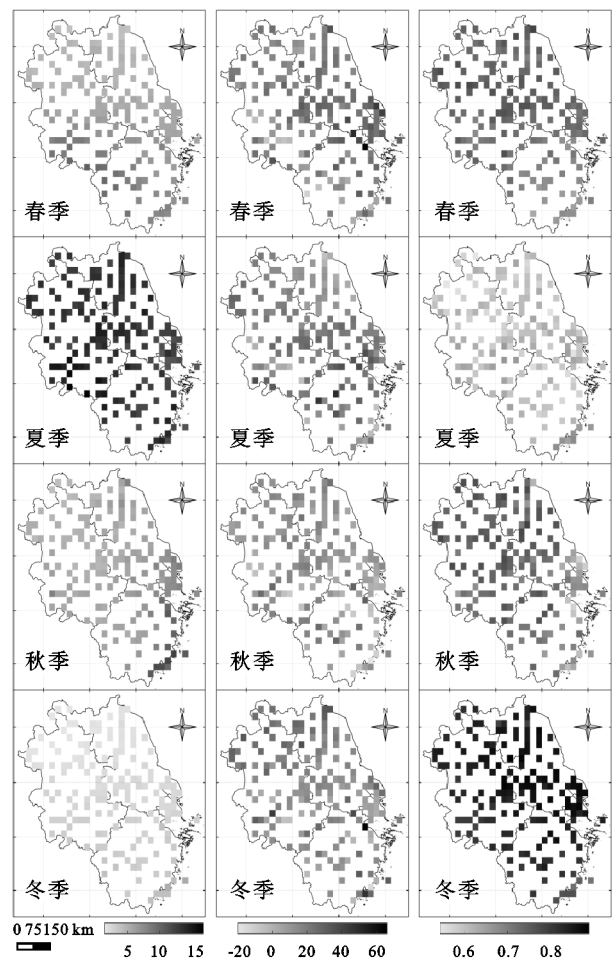


图 9 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲各个季度的 RMSE、RB、CC

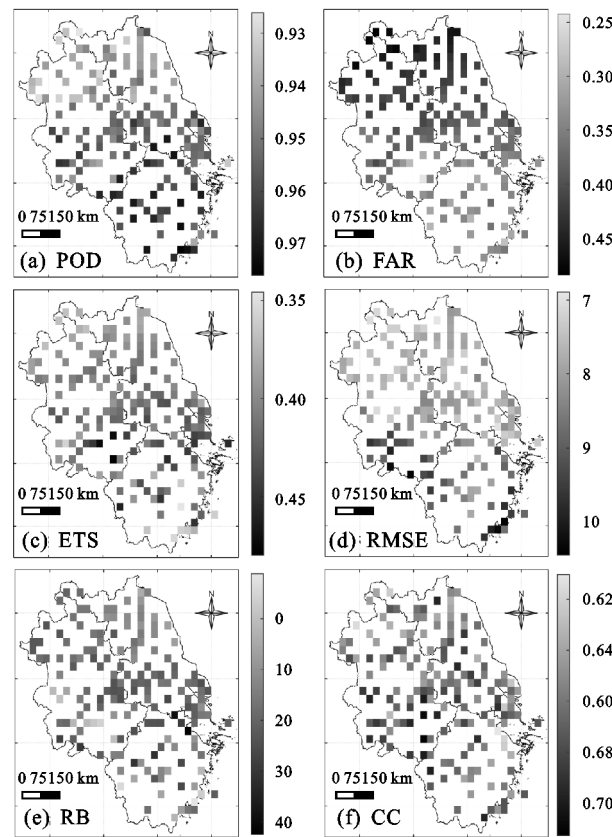


图 10 ERA5 再分析降水数据在长江三角洲年尺度表现

图 13 较图 12 更清晰地显示 ERA5 与地面站点实测降水计算的极端降水指标差值在所有格点的表现。ERA5 高估 PRCPTOT 约 200 mm,Bias 约为 70 mm/a,MAE 约为 50~100 mm/a,RB 在 10%~20%,在各格点存在较高的相关性,RMSE 在 100~330 mm/a;RX1d 所有格点基本为低估,有较低的 Bias、MAE、RMSE,RB 在-40%~0,相关系数变化幅度较大;ERA5 对 RX5d 的表现与 RX1d 相似,RB 在-20%~20%,CC 在 0~0.8,在有些格点相关性较差;对 R95P 和 R99P 有高估也有低估,格点之间

CC 变化幅度较大,R99P 的差及 Bias、MAE、RMSE 均较小,RB 在-20%~20%,R95P 的表现较 R99P 差;SDII 在所有格点均为低估,RB 在-40%~-10%,相关系数变化幅度较小;CDD 在所有格点均为低估,有较低的 Bias、RB、MAE 及 RMSE,相关系数较高;CWD 在所有格点均为高估,CWD 有较高的 RB、较低的相关系数;R10 在大部分格点高估,Bias 在 6~8 天,有较高的相关系数;R20、R25 在研究区既有高估也有低估,有较小的 Bias、RB、MAE、RMSE 及较高的 CC,且各指标变化幅度不大。

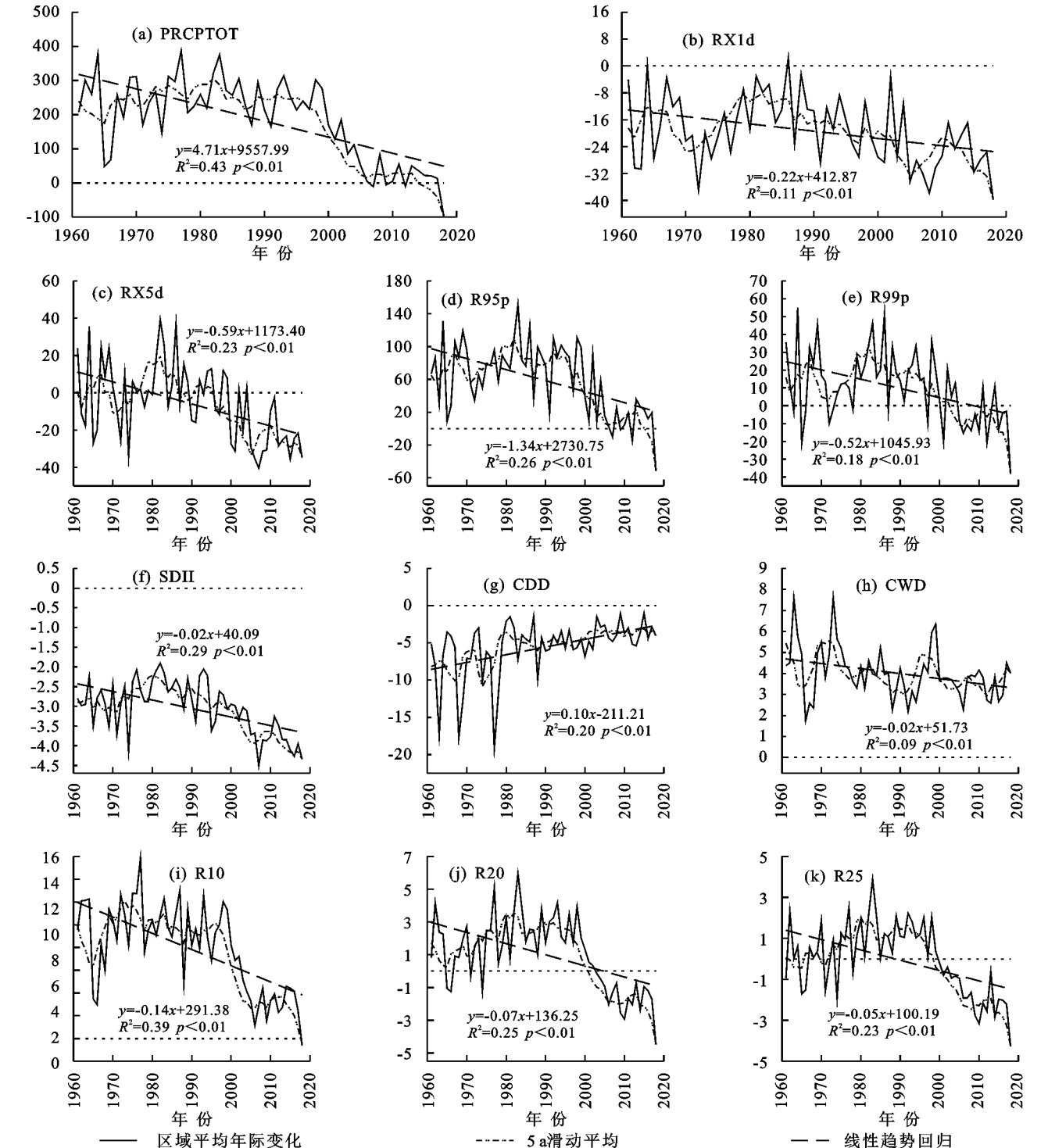


图 11 基于 ERA5 再分析降水数据及地面实测降水数据计算的区域平均极端降水指标的差值多年变化趋势

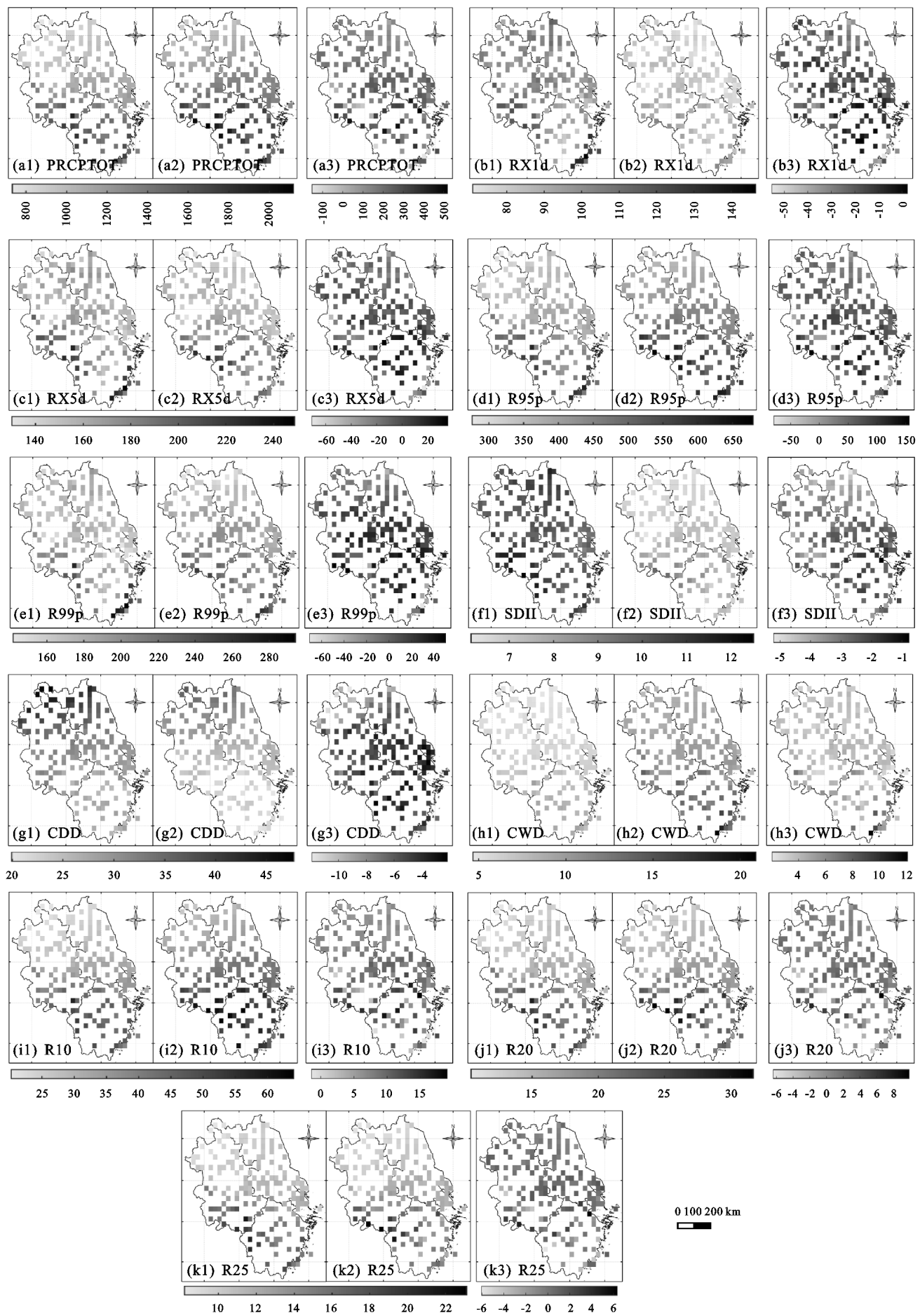


图 12 基于站点实测降水和 ERA5 再分析降水计算的极端降水指标多年均值及其差值空间分布

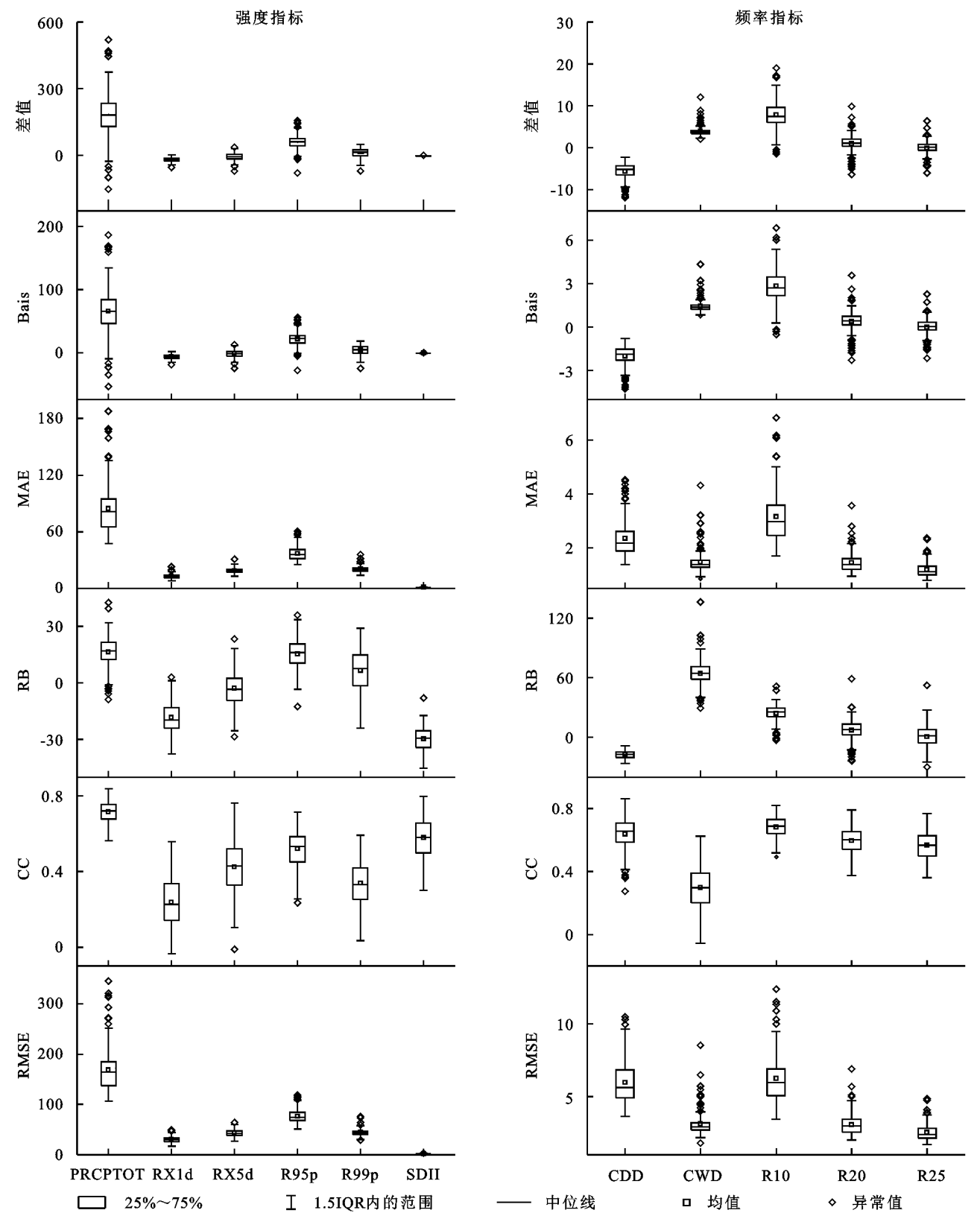


图 13 1961—2018 年 ERA5 再分析极端降水指标的统计指标箱体图

3 讨论

分析表明,ERA5 可以重现月、季和年降水过程,有较高的 POD 和 ETS,FAR 较低,高估降水量约15.75%等特点,这与现有的研究结果基本一致^[9-13,17-19]。由表 3 可知,ERA5 日降水量 ≥ 0.1 mm 的日数比站点实测多 17.68%,使得 FAR 较大,ETS 较小,这种情况在降水事

件频发和降水量大的夏季较明显,特别是 7,8 月; ERA5 日降水量介于 0.1~1 mm 的天数比站点实测多 7.66%,这说明 ERA5 中“假毛毛雨”较多^[13,20],这些“假毛毛雨”对 ERA5 的探测性能影响较大,对降水量的准确性影响较小;ERA5 日降水量 ≥ 1 mm 的日数比站点实测多 10.02%,介于 1~10 mm 的天数

比站点实测多 7.90%，多出的这部分小雨日数，不仅使 FAR 增大，而且导致 ERA5 降水总量偏大，也可能导致 SDII 和 CDD 被低估、CWD 被高估；ERA5 日降水量 $>10\text{ mm}$ 和 $>20\text{ mm}$ 的日数比站点实测分别多 2.16%和 0.28%，日降水量 $>25\text{ mm}$ 的日数比站点实测值小 0.02%，这说明随着降水强度的增大，ERA5 对日降水过程的重现能力越来越强，对大雨和暴雨的重现性能优异。这些现象可能与 ERA5 过度补偿 ERA-Interim 在湿润地区偏干旱问题有关^[9,13]，ERA5 等再分析产品刻画旱季锋面降水能力比模拟雨季短时对流降水能力强的特点可以解释上述旱季模拟效果优于雨季的现象^[13,21-22]。

长江三角洲地区在研究时段内经历城镇化高速发展阶段，有研究^[13]发现，在城市化水平越高的地区模拟难度越大，但研究区内年降水总量在 2000 年以后准确性提高很多(图 11a)，也没有表现出城镇化带来的空间异质性(图 12a1~图 12a3)。ERA5 的性能在研究区内有明显的南北差异，POD、FAR 和 ETS 均在南部表现较好，这种空间异质性在旱季表现得比雨季显著。ERA5 的性能在研究区内受地形地貌和海陆相对位置的影响较小。用栅格内站点实测降水量代表相应栅格的实测降水量存在一定的不准确性，特别是在栅格内气象站点比较少的情况下明显影响评价结果^[11-13,23-24]。

表 3 长江三角洲地区 1961—2018 年 162 个格点中不同降水强度的日数频率 单位：%

项目	$\geq 0.1\text{ mm}$	$\geq 1\text{ mm}$	$> 10\text{ mm}$	$> 20\text{ mm}$	$> 25\text{ mm}$
气象站	33.45	24.33	9.27	4.58	3.38
ERA5	51.13	34.36	11.43	4.86	3.36
差值	17.68	10.02	2.16	0.28	-0.02

4 结论

(1)ERA5 对雨日的探测能力为 POD 和 ETS 较高，FAR 较低。在降水事件频发的夏季和秋季 POD 最大，特别是 7、8 月的 POD 基本大于 0.95，且没有南北差异，7、8 月的 FAR 也维持在较高的 0.28~0.58，导致 7、8 月的 ETS 明显小于其他月份。春季和冬季的 POD 略低于夏季和秋季，ETS 略高于夏季和秋季，但误报率的最大值出现在 1、2、3 月的江苏省北部。年尺度的探测性指标优于月尺度和季尺度，数值较高且分布范围较小。

(2)日降水量的误差为 RMSE 在月尺度的绝大部分格点约为 4 mm/d，在 1—3、10—12 月较低，4—9 月有先增大后减小的变化趋势，最大值出现在 6—8 月，在季节尺度上则是秋季和冬季较小，春季和夏季较大；区域多年平均 RB 为 15.75%，没有明显的时空分布变化趋

势；ERA5 在月、季、年尺度均表现出较好的线性相关性。

(3)ERA5 对极端降水事件的刻画能力为 PRCP-TOT、RX5d、R95P、R99P、R20 和 R25 6 个指标随着时间变化表现出先高估后低估的趋势，其中强度指标南部比北部高估得多，频率指标则是北部比南部高估得多；RX1d、SDII、CDD 3 个指标一直被低估，北部比南部低估得多；CWD 和 R10 2 个指标持续被高估，并没有明显的南北差异。

参考文献：

[1] He X G, Pan M, Wei Z W, et al. A global drought and flood catalogue from 1950 to 2016[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(5): 508-535.

[2] 邹磊, 夏军, 张印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1264-1274.

[3] 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): 627-637.

[4] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.

[5] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and inter-comparisons[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1): 79-107.

[6] Colorado-Ruiz G, Cavazos T. Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(11): 5406-5430.

[7] 王彧蓉, 周建中, 杨鑫, 等. 再分析降水资料的适用性评估与偏差校正: 以长江中下游地区为例[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 93-100.

[8] Huang J, Yin J F, Wang M Z, et al. Evaluation of five reanalysis products with radiosonde observations over the central Taklimakan Desert during summer[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(5): e2021EA001707.

[9] Amjad M, Yilmaz M T, Yucel I, et al. Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: e124707.

[10] Sharifi E, Eitzinger J, Dorigo W. Performance of the state-of-the-art gridded precipitation products over mountainous terrain: A regional study over Austria [J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): e2018.

[11] Jiang Q, Li W Y, Fan Z D, et al. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: e125660.

[12] 刘婷婷, 朱秀芳, 郭锐, 等. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 66-79.

[13] Xin Y, Lu N, Jiang H, et al. Performance of ERA5 reanalysis precipitation products in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay Area, China[J].*Journal of Hydrology*,2021,602:e126791.

[14] Lu M, Xu Y P, Shan N, et al. Effect of urbanisation on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region[J].*Science of the Total Environment*,2019,673:64-73.

[15] 杨秀芹,耿文杰.淮河流域 TRMM 多源卫星降水产品精度评估[J].*水电能源科学*,2016,34(7):1-5.

[16] 程诗悦,秦伟,郭乾坤,等.近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J].*中国水土保持科学*,2019,17(3):155-161.

[17] Jiao D L, Xu N N, Yang F, et al. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China[J].*Scientific Reports*,2021,11(1):e17956.

[18] Tarek M, Brissette F, Arsenault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America[J].*Hydrology and Earth System Sciences*,2020,24(5):2527-2544.

[19] Zandler H, Haag I, Samimi C. Evaluation needs and temporal performance differences of gridded precipitation products in peripheral mountain regions[J].*Scientific Reports*,2019,9:e15118.

[20] Skok G, Zagar N, Honzak L, et al. Precipitation inter-comparison of a set of satellite- and raingauge-derived datasets, ERA Interim reanalysis, and a single WRF regional climate simulation over Europe and the North Atlantic [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016,123(1/2):217-232.

[21] Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J].*Bulletin of the American Meteorological Society*,2007,88(1):47-64.

[22] Gottschalck J, Meng J, Rodell M, et al. Analysis of multiple precipitation products and preliminary assessment of their impact on global land data assimilation system land surface states[J].*Journal of Hydrometeorology*,2005,6(5):573-598.

[23] Yu C, Hu D Y, Liu M Q, et al. Spatio-temporal accuracy evaluation of three high-resolution satellite precipitation products in China area [J]. *Atmospheric Research*,2020,241:e104925.

[24] Zhang L, Li X, Cao Y P, et al. Evaluation and integration of the top-down and bottom-up satellite precipitation products over mainland China [J]. *Journal of Hydrology*,2020,581:e124456.

(上接第 177 页)

[32] Tao J, Xu T Q, Dong J W, et al. Elevation-dependent effects of climate change on vegetation greenness in the high mountains of southwest China during 1982—2013 [J].*International Journal of Climatology*,2018,38(4):2029-2038.

[33] Jiang S S, Chen X, Smettem K, et al. Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China[J].*Ecological Indicators*,2021,121:e107193.

[34] 魏建瑛,徐建英,樊斐斐.卧龙自然保护区植被覆盖度变化及其对地形因子的响应[J].*长江流域资源与环境*,2019,28(2):440-449.

[35] Tan J, Piao S, Chen A, et al. Seasonally different response of photosynthetic activity to daytime and night-time warming in the Northern Hemisphere[J].*Global Change Biology*,2015,21(1):377-387.

[36] 葛非凡,毛克彪,蒋跃林,等.华东地区夏季极端高温特征及其对植被的影响[J].*中国农业气象*,2017,38(1):42-51.

[37] 王海军,靳晓华,李海龙,等.基于 GIS 和 RS 的中国西北 NDVI 变化特征及其与气候变化的耦合性[J].*农业工程学报*,2010,26(11):194-203.

[38] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].*生态学报*,2022,42(3):1022-1033.

[39] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J].*Nature*,2013,501:88-92.

[40] Yin L, Dai E F, Zheng D, et al. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: Climate change or human activity? [J].*Ecological Indicators*,2020,112:e106013.

[41] Wei O Y, Wan X Y, Xu Y, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin[J].*Science of the Total Environment*,2020,701:e134782.