

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221891

流域尺度全球降水数据产品的相互比较

金平伟¹, 张红丽², 李 浩¹, 王 超³, 黄 俊¹

(1. 珠江水利委员会珠江流域水土保持监测中心站, 广东 广州 510611; 2. 水利部水土保持监测中心, 北京 100055; 3. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 鉴于国家、大陆和全球尺度降水数据集之间的差异性方面的研究较多而很少考虑河流流域尺度上数据集的可靠性, 采用最大/最小差异百分比法和 TFPM-MK 趋势分析法研究评估了 12 种广泛应用的降水数据集在全球 6 292 个流域中降水估计和变化趋势等方面之间的差异。结果表明, 降水数据集之间存在较大差异, 数据集之间的年平均降水量差异超过 500 mm/a 的流域共有 2 469 个, 占地面积达 $4\,419.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在格陵兰岛、非洲、大洋洲和西亚。现有数据产品不能对所有流域的降水趋势达成一致, 难以为了确保流域内的水利发电、生活供水、防洪和抗旱等方面有效政策的制定和实施提供合理的科学依据。

关键词: 全球降水; 江河流域; 卫星观测; 再分析数据

中图分类号: TV125; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0010-05

1 引言

气候变化加速了全球水循环, 导致全球降水具有很强的时空异质性^[1]。准确可靠的降水数据可揭示驱动降水变化的机制, 且水文、生态和大气模型模拟预测的准确性在很大程度上依赖于优质降水估算的可用性^[2]。目前, 存在许多降水数据产品, 分为测站产品、卫星产品和基于再分析的产品, 包括雨量计、雨滴谱仪和雷达在内的工具广泛用于监测地球表面附近的降水, 其优势体现在测量位置的高精度。但基于测站的产品存在一定的缺点, 如测量站分布不均或沙漠、海洋、森林、山脉、山谷和发展中国家的观测站点稀少及缺乏长期和连续的观测。基于卫星的降水产品可克服这些缺陷。卫星数据^[3]已被广泛用于预测台风、洪水和暴雨。然而, 卫星降水产品可能包含较大的系统误差和随机误差(如观测误差、样本源不确定性和算法误差)。因此选择和应用一种降水产品前有必要评估可用数据源之间的差异。近几十年来, 关于国家、大陆和全球尺度降水数据集的相互比较方面的研究已较多^[4]。如 SUN Q 等^[5]量化

了 30 种降水产品在多个时间尺度上的差异, 发现地表年降水量的差异可能高达 300 mm/a。然而, 少有研究考虑流域尺度上的数据集比较。考虑到不同降水产品在流域尺度的广泛应用, 有必要对流域的这些产品进行综合评价。为此, 本文采用最大/最小差异百分比法和 TFPM-MK 趋势分析法研究评估了全球 6 292 个流域在多个时间尺度上的 12 种不同降水产品的时空异质性, 获得了一些有益的结论, 可供借鉴。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

12 种降水数据产品为 CRU、GPCC、PREC/L、UDEL、CPC-Global、CMAP、GPCP、MSWEP、GPCP_PEN_v2. 2、NECP2、ERA5、JRA-55, 包括 5 个测站、4 个卫星和 3 个再分析产品, 其时间范围为 1979~2016 年。6 292 个流域的基本信息详见 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data-providers-and-partners/global-runoff-data-centre-grdc>。

2.2 研究方法

收稿日期: 2022-09-11, **修回日期:** 2022-11-05

基金项目: 水利技术示范项目(SF-202207); 广东省水利科技创新项目(2020-25); 珠江水利科学研究院科技创新自立项目(2021ky021)

作者简介: 金平伟(1976-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水土保持项目咨询等, E-mail: 449215634@qq.com

通讯作者: 李浩(1990-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为水土保持及遥感应用等, E-mail: 1548778537@qq.com

2.2.1 泰森多边形法

泰森多边形法^[6]将单个流域划分为 n 个泰森多边形,单个泰森多边形内的栅格降雨数据与该泰森多边形的面积相乘即为该泰森多边形的降雨量。计算公式为:

$$R_b = \frac{R_1 S_1 + R_2 S_2 + \dots + R_i S_i + R_{n-1} S_{n-1} + R_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_i + \dots + S_{n-1} + S_n} \quad (1)$$

式中, R_b 为流域的平均降雨量; R_i 为 Thiessen 多边形 i 的降雨量; S_i 为 Thiessen 多边形 i 的面积; n 为流域内泰森多边形的数量。

2.2.2 TFPM-MK 趋势分析方法

TFPM-MK 趋势分析方法对于假设的时间序列 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n)$, 传统的 Mann-Kendall 趋势检验方法的方程为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{其中 } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{g=1}^k t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (4)$$

$$Z_{\text{MK}} = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(s)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(s)} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, n 为时间序列中值的个数; $\text{Var}(s)$ 为方差; k 为队列的组数, 每组有 t_j 个并列观察值; Z_{MK} 为标准化检验统计量。若 $Z_{\text{MK}} > |Z_{1-\alpha/2}|$, 则表明时间序列呈显著的上升趋势; 若 $Z_{\text{MK}} < -|Z_{1-\alpha/2}|$ 时, 则表明时间序列呈显著的下降趋势。

时间序列 X 的自相关系数 r_m ($m=1$):

$$r_m = \frac{\frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} (x_i - \bar{x})(x_{i+m} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

r_m 的上、下极限 L_u 、 L_d :

$$L_u = -(1 - 1.64\sqrt{n-2})/(n-2) \quad (7)$$

$$L_d = -(1 + 1.64\sqrt{n-2})/(n-2) \quad (8)$$

当 $L_d \leq r_m \leq L_u$ 时, 时间序列是独立的, 可使用传统的 Mann-Kendall 趋势检验方法来评估趋势。否则, 需对时间序列进行修改。即利用下式计算时间序列中的非参数 Theil-Sen 方法 (TSA) 斜率 (b):

$$b = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (9)$$

基于非参数 TSA 斜率 (b) 和自相关系数 (r_m), 可重构出一个不受自相关影响的新的时间序列为:

$$\begin{cases} x_i^* = x_i - bi \\ y_i^* = x_i^* - r_m x_{i-1}^* \\ y_i = y_i^* + bi \end{cases} \quad (10)$$

3 结果和讨论

3.1 年降水量差异

图 1 为 1979~2016 年间 12 个降雨产品在 6 292 个流域上的年降水量。由图 1 可知, 1979~2016 年全球年降水量的中心估计值为 817.1 mm/a, 这与 SUN Q 等^[4] 观点接近。在流域尺度上, 每种数据集类型均具有独特的特征。测站降雨产品的年降水量小于 500 mm/a 的流域数量最多 (总计 3 092 个流域, 占全球陆地面积的 46.6%, 图 1(a)~(e)), 而卫星产品和再分析产

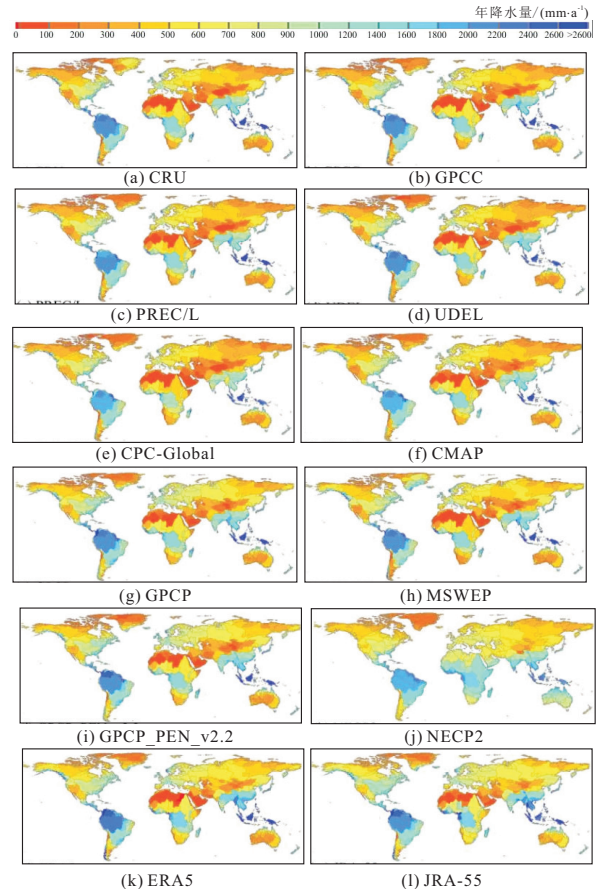


图 1 1979~2016 年间 12 个降雨产品在 6 292 个流域上的年降水量

Fig. 1 Annual precipitation of 12 rainfall products in 6 292 watersheds from 1979 to 2016

品分别拥有 2 654 个(占全球陆地表面的 40.4%)和 2 343 个(占世界陆地表面的 26.3%)河流流域。与之相比,再分析降雨产品中年降水量超过 1 000 mm/a 的河流流域数量最多(占总数的 34.1%),而测站降雨产品的数量最少(1 904 个流域)。再分析产品尤其为 NECP2 数据集(图 1(j)),在全球河流流域中具有较高的降水量,而测站降雨产品的降水量则最低。再分析数据对年降雨的过高估计主要位于南半球,包括撒哈拉沙漠地区、澳大利亚和阿拉伯半岛(图 1(j)~(l))。与测站降雨产品相比,卫星降雨产品亦具有更高的降水量(图 1(f)~(i)),尤其是在欧洲和北亚。

图 2 为 1979~2016 年期间 12 个降水产品之间年降水量的最大差异数值。由图 2 可知:①有 3 125 个河流流域的年降水量在各降雨产品之间最大的差异超过 500 mm/a,总面积为 $5\,989.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ (占全球陆地面积的 44.2%),主要分布在格陵兰岛、非洲、大洋洲和亚洲南部的河流流域

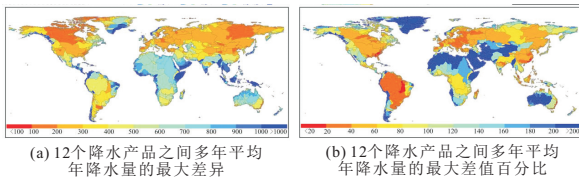


图 2 1979~2016 年期间 12 个降水产品之间年降水量的最大差异数值

Fig. 2 Maximum difference value of annual precipitation between 12 rainfall products from 1979 to 2016

(大多分布在沙漠地区,这些地区的降雨观测站很少,图 2(a))。降雨观测站分布较少可能是造成误差较大的原因。与之相比,只有 883 个流域年降雨量在各降雨产品之间的最大差值小于 200 mm/a,流域面积达 $1\,075.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。这些流域通常位于具有高密度雨量观测站的流域,包括北美和亚洲。雨量观测站分布密集是各数据库之间降雨观测差异较小的原因。②世界上有 1/2 以上河流流域年降雨量在各降雨数据集之间的差异超过了 100%(共计 3 708 个流域,面积达 $6\,198.4 \times 10^4 \text{ km}^2$),它们主要分布在格陵兰岛、非洲、西亚和大洋洲。其中只有 177 个流域($939.2 \times 10^4 \text{ km}^2$)的最大百分比差异小于 30%,这些流域集中在南美洲和欧洲。总而言之,不同降雨数据产品之间年降水量的差异很大。③全球最大 15 个河流流域的面积占全球陆地面积的 29.3% ($3\,977.1 \times 10^4 \text{ km}^2$),是最多样化的陆地生态系统之一^[7]。有 13 个河流流域的年降水量在各降水产品之间的差异超过 200 mm/a。其中,尼罗河流域(697.0mm/a)、塔曼拉塞特流域(696.9

mm/a)、恒河流域(679.6mm/a)和乍得湖流域(699.8 mm/a)的差异性最大。NCEP 降水产品显著高估了尼罗河、扎伊尔、巴拉那、尼日尔、塔曼拉塞特和乍得湖流域的年降水量。

评估各流域年降水量的变化趋势对分析各种水文过程的机制及其对植被变化的影响和预测未来气候的变化至关重要。图 3 为基于 TFPM-MK 方法计算的各流域年降水量变化趋势。图 3 中, $|Z_{MK}| > 2.32$ 、 $|Z_{MK}| > 1.96$ 、 $124|Z_{MK}| > 1.64$ 分别表示年降水量呈增加或减少趋势的置信水平分别超过 99%、95%、90%; $|Z_{MK}| < 1.64$ 表示年降水量无变化趋势。由图 3 可知,降水数据集在流域尺度的年趋势方面显示出相当大的差异。NECP2 降水数据集表明,4 310 个流域的年降水量有显著增加趋势(置信区间为 90%),包括亚马逊河、尼罗河和密西西比河流域。与之相比,GPCP_PEN_v2.2 降水数据集表明,只有 821 个流域呈现显著的增加趋势。此外,使用 UDEL 数据,1 589 个流域的年降水量呈现显著下降趋势,而 MXWEP 数据集只有 139 个流域呈现类似趋势。但在所有调查产品中,没有一个流域显示出

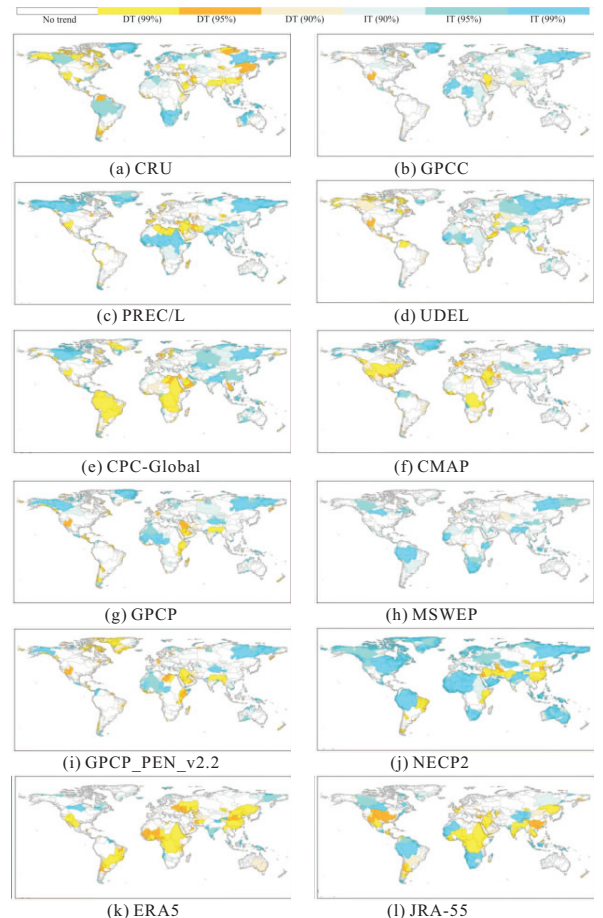


图 3 基于 TFPM-MK 方法计算的各流域年降水量变化趋势

Fig. 3 Annual precipitation variation trend of each basin calculated based on TFPM-MK method

一致的年降水趋势(增加或减少)。如在 PRECL、CPC 全球产品中,长江流域的年降水量为显著增加趋势,而 CRU、NECP2、ERA5、JRA-55 产品均显示年降水量为显著下降区域,其余 6 个产品表明长江流域的降水量无明显变化趋势。

3.2 旱季降水变化及不确定性

旱季降水的变化会对农业和生态系统的稳定性带来巨大的影响。基于 12 个降雨产品估计得出全球旱季平均降水量为 121.8 mm。其中,CPC-Global 降雨产品估计所得的旱季降雨最少,约为 4.1 mm,而 ERA5 降雨产品估计所得的旱季降雨最大,约为 203.7 mm。可见,不同降雨产品之间对旱季降雨的估计差异也较大,而基于站点测量的降雨产品之间对旱季降雨的估计较为一致。

图 4 为 1979~2016 年间 12 个降雨产品在 6 292 个流域上的旱季平均降水量。由图 4 可知,全球最干燥的流域主要分布在非洲、大洋洲和中亚。这些地区发生干旱的风险很高,旱季平均年降水量不足 20 mm。与之相比,欧洲、北美东部和南美洲在枯水期的水资源丰富,旱季降水量超过 100 mm/a。基于卫星(图 4(f)~(i))和再分

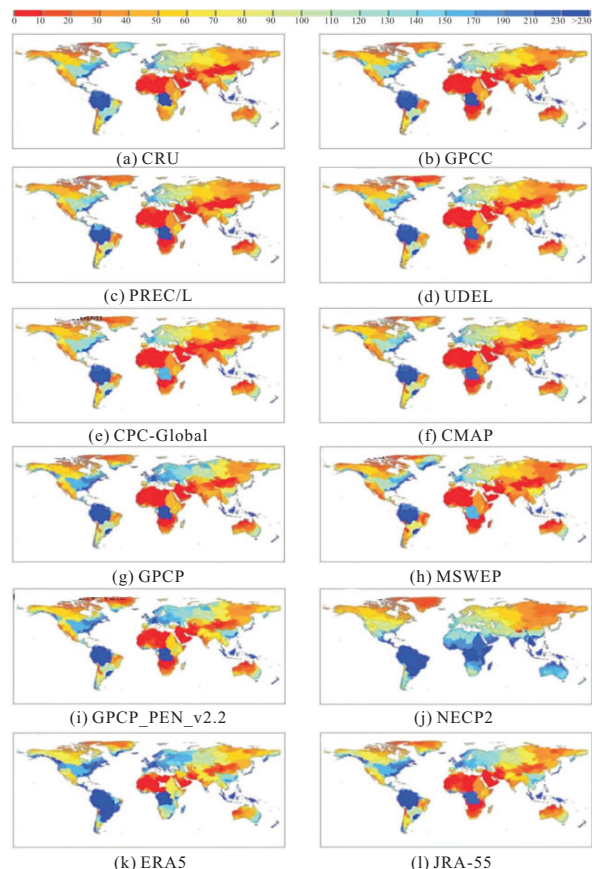


图 4 1979~2016 年间 12 个降雨产品在 6 292 个流域上的旱季平均降水量

Fig. 4 Average dry season precipitation of 12 rainfall products in 6 292 watersheds from 1979 to 2016

析(图 4(j)~(l))的产品均显示出高度的不确定性。如与其他卫星产品(CMAP 和 MSWEP)相比,GPCC 和 GPCC_PEN_v2.2 卫星降水产品表明欧洲和北美东部的旱季降水更高。而在再分析的结果中,NECP2 倾向于高估南半球的旱季降雨,特别是非洲和大洋洲的旱季降水。

图 5 为基于 TFPM-MK 方法计算的各流域旱季降水量变化趋势。图 5 中 $|Z_{MK}| > 2.32$ 、 $|Z_{MK}| > 1.96$ 和 $124Z_{MK} > 1.64$ 分别表示年降水量呈增加或减少趋势的置信水平分别超过 99%、95%、90%; $|Z_{MK}| < 1.64$ 表示年降水量无变化趋势。由图 5 可知,与年降水趋势相似,降雨数据产品之间在旱季降雨趋势的估计上存在高度的不确定性。MSWEP 降雨产品中旱季降水为显著减少趋势的流域数量最少,为 348 个,面积为 $560.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,仅为 UDEL 降雨产品的 1/2 (1 375 个流域的旱季降雨为减小趋势,面积为 $1 662.1 \times 10^4 \text{ km}^2$)。GPCC_PEN_v2.2 降雨产品中旱季降雨量呈现显著增加趋势的流域数量最少,为 600 条河流域,面积 $1 707.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,约为 CRU 降雨产品的 1/3 (2 039 条流域,面积

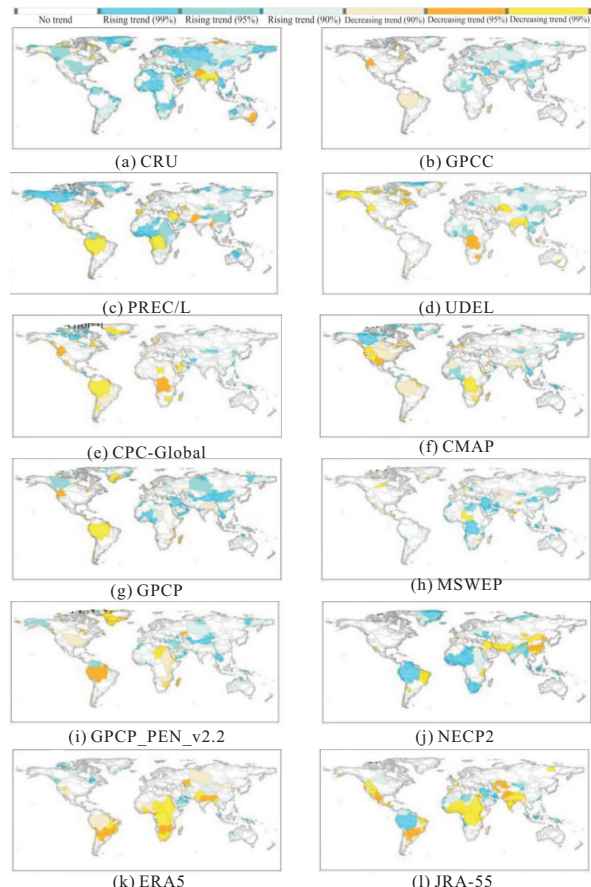


图 5 基于 TFPM-MK 方法计算的各流域旱季降水量变化趋势

Fig. 5 Variation trend of precipitation in dry season of each basin calculated based on TFPM-MK method

6 157.2×10⁴ km²)。

3.3 雨季降水变化及不确定性

为预测未来的洪水风险,气候模型需能够准确地模拟出历史气候变化的基本特征,而这很大程度上依赖于降水产品的可靠性。基于 12 个降水产品,发现全球雨季平均降水量为 349.8 mm。最小估计值为 307.3 mm(CPC-Global 降水产品),而最大估计值为 401.3 mm(MSWEP 降水产品)。在流域尺度上,2 926 个流域的雨季平均降水量均大于 250 mm。这些流域主要分布在南美洲、北非、北大洋洲和南亚。基于测量和卫星的产品显示出相对一致的雨季降水分布,南半球(北半球)降水强度高(低)。相反,再分析产品的雨季降水分布方面表现出较大的变化。如 NECP 高估了大洋洲和北非的雨季降水,而低估了亚马逊河流域和东亚的降水。

4 结论

a. 本文采用最大/最小差异百分比法和 TF-PM-MK 趋势分析法,对 12 种降水产品进行了综合比较,量化了这些数据集在流域尺度上的不确定性,揭示了全球各降水数据产品之间的巨大差异。与其他数据集相比,基于再分析的降水产品,尤其是 NECP 具有最高的不确定性。

b. NECP 数据集高估了南半球降水量。流域尺度降水估算的巨大差异可靠性尚待商榷。在南半球观测数据贫乏的地区,这一问题尤为严重。

为此,建议布设更多的观测站以获得流域尺度上更为准确的降雨数据。

参考文献:

- [1] LOS S O, COLLATZ G J, BOUNOUA L, et al. Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature, and precipitation[J]. *Journal of climate*, 2001, 14(7):1535-1549.
- [2] HUFFMAN G J, ADLER R F, ARKIN P, et al. The global precipitation climatology project(GPCP) combined precipitation dataset[J]. *Bulletin of the American meteorological society*, 1997, 78(1):5-20.
- [3] LIU Y, FU Q, SONG P, et al. Satellite retrieval of precipitation: An overview[J]. *Advances in earth science*, 2011, 26(11):1162-1172.
- [4] HEROLD N, Behrangi A, Alexander L V. Large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land[J]. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 2017, 122(2):668-681.
- [5] SUN Q, MIAO C, DUAN Q, et al. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons[J]. *Reviews of geophysics*, 2018, 56(1):79-107.
- [6] SHARMA D, GUPTA A D, BABEL M S. Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand[J]. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 2007, 11(4):1373-1390.
- [7] BEST J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J]. *Nature geoscience*, 2019, 12(1):7-21.

Inter Comparisons of Global Precipitation Datasets in Global River Basins

JIN Ping-wei¹, ZHANG Hong-li², LI Hao¹, WANG Chao³, HUANG Jun¹

(1. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China; 3. Water Planning and Design Limited, Jinan 250000, China)

Abstract: In view of the differences between national, continental and global scale precipitation data sets, there are many studies, but the reliability of data sets on river basin scale is rarely considered. To this end, the maximum/minimum difference percentage method and TFPM-MK trend analysis method were used to study and evaluate the differences between 12 widely used precipitation data sets in precipitation estimation and change trends in 6 292 basins around the world. The results show that there are large differences between precipitation data sets. There are 2 469 basins with an annual average precipitation difference of more than 500 mm/a, covering an area of 4 419.6×10⁴ km², mainly distributed in Greenland, Africa, Oceania and West Asia. The existing data products cannot reach an agreement on the precipitation trend of all basins, and it is difficult to provide a reasonable scientific basis for the formulation and implementation of effective policies to ensure water conservancy and power generation, domestic water supply, flood control and early warning in the basin.

Key words: global precipitation; river basins; satellite observations; reanalysis observations