

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0081

黄国如,陈晓丽.北江飞来峡流域 TRMM 卫星降雨数据适应性研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):27-36. HUANG G R, CHEN X L. Adaptability of TRMM satellite rainfall data in Feilaixia catchment of Beijiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 27-36. (in Chinese)

北江飞来峡流域 TRMM 卫星降雨数据适应性研究

黄国如^{1,2,3}, 陈晓丽¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要:近年来 TRMM 卫星降雨数据的精度和适应性备受关注,以位于亚热带季风气候区的典型流域——北江飞来峡流域为研究区,利用 24 个实测站点降雨数据对 TRMM 数据集进行时空精度和准确性分析;采用 CDD、CWD 和 RX5day 等指标研究流域内极端持续性气候特征,并应用 Cox-Stuart 趋势分析法分析流域内极端持续性气候变化趋势,重点探讨 TRMM 降雨数据对持续性极端降雨情况的捕捉能力。所得结果如下:时空精度分析表明 TRMM 在低纬度低海拔地区精度和准确性较好,而在高纬度且地形变化较大的地区则表现一般,容易出现虚报、误报现象;持续极端气候方面,TRMM 倾向于低估 CWD 及后汛期的 RX5day,TRMM 可捕捉到流域西部的持续干旱趋势,但难以捕捉到流域东南部持续性降雨显著增加的趋势。本研究所得结果可为流域内水资源管理和径流预测等提供一定科学依据,也可作为同纬度其他相似流域参考。

关键词:TRMM;适应性;持续性极端降雨指标;Cox-Stuart;趋势分析

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



Adaptability of TRMM satellite rainfall data in Feilaixia catchment of Beijiang River basin

HUANG Guoru^{1,2,3}, CHEN Xiaoli¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and
Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In recent years, the accuracy and applicability of TRMM satellite rainfall data have attracted much attention. In this study, we evaluated the TRMM data set over the Feilaixia catchment of the Beijiang River basin from 1998 to 2015 using gauged rainfall data from 24 stations. We first evaluated the accuracy of the TRMM at daily scale by using eight statistical performance indices. Then we used three consecutive extreme indices, including consecutive dry days (CDD), consecutive wet days (CWD), and maximum consecutive 5-day precipitation (RX5day), together with Cox-Stuart test method to explore the extreme consecutive climate and its trends in the catchment, with special focus on the ability of TRMM in capturing consecutive extreme rainfall. The results revealed that TRMM had better precision and accuracy in regions with low latitude and low altitude, but in regions with high latitude and large topographic changes, it performed poorly and was prone to false alarms and errors. TRMM tended to underestimate CWD and RX5day (in the post-flood period) and it could capture the consecutive drought trends in the western part of the catchment, but failed to capture the significant increase trends of consecutive rainfall in the southeastern

收稿日期:2018-12-10 修回日期:2019-02-01 网络出版时间:2019-06-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190531.1418.002.html>

基金项目:广东省水利科技创新项目(2016-22);广东省水资源节约与保护资金项目(201711031)

作者简介:黄国如(1969—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

part. The conclusions obtained in this study can provide a scientific basis for water resources management and runoff monitoring within the catchment, and can also be used as reference for catchments with similar latitudes.

Key words: TRMM; adaptability; consecutive extreme indices; Cox-Stuart; trends analysis

降雨数据对于流域水资源管理及旱涝灾害防治至关重要。当前降雨数据的主要获取方式仍是通过地面雨量站进行观测,但由于降雨过程存在较大的时空分异性,仅靠离散的雨量站点难以真实地反映降水时空分布状况,尤其是在我国西北和青藏高原等雨量站点稀疏且分布不均地区。随着遥感技术的迅速发展,一系列具有高时空分辨率的卫星降雨产品相继问世,主要有 TRMM、CMORPH、PERSIANN、GSMaP 等,应用遥感卫星降雨数据已逐渐成为主流,其中 TRMM(tropical rainfall measuring mission)是专门用于定量获取热带、亚热带地区降雨的数据产品,其日尺度产品 TRMM 3B42 V7 具有时效性强、空间分辨率高、覆盖性好等特点,已成为当前国际上应用最为广泛的卫星降雨反演数据之一^[1-4],因此对其精度及可替代性进行分析显得尤为重要。目前国内外已有不少学者进行了这方面研究,例如,刘少华等^[5]根据中国大陆境内 2 257 个气象站点 1998—2013 年逐日降水资料,对热带降水精度和一致性进行系统评估,结果表明 TRMM 日降水数据准确性从东南沿海向西北内陆递减,气象站点降水日数显著大于 TRMM 年均降水日数;王兆礼等^[6]选取位于珠江流域下游的东江和北江流域为研究区域,基于地面雨量站点数据评估了该产品的精度和适应性,在网格尺度上,大多数网格的日尺度相关系数达到 0.6 以上;李麒麟等^[7]为评估 TRMM 卫星降水产品精度,利用国内 824 个气象站点日降水数据,对比分析了其在中国大陆和九大流域内逐日、逐月尺度的观测精度,研究表明 TRMM 日降水数据在海河流域、淮河流域、长江流域、珠江流域、东南诸河流域呈现较高的观测精度;Ebrahimi 等^[8]在中国青藏高原地区对 TRMM 3B42 V7 进行了日、周、月和季节尺度上的评价研究,结果表明 TRMM 倾向于低估小型降雨事件、高估大型降雨事件;Zad 等^[9]、Kenabatho 等^[10]和 Hur 等^[11]分别以马来西亚彭亨河流域、非洲博兹瓦纳 Notwane 流域、新加坡为例,对 TRMM 3B42 产品进行了多时空尺度评价,结果表明指标的表现并不尽如人意,建议在实际应用前对产品进行修正。地属亚热带季风气候区的北江飞来峡流域,雨季峰高量大,洪涝灾害频发,防洪形势较为严峻,TRMM 在该流域的精度及适应性

研究较少,因此有必要开展 TRMM 数据集在该流域的时空精度和准确性分析。

另外,受人类活动产生的温室气体影响,全球气候发生剧烈变化,极端降雨事件的频繁发生对人类的生产生活造成严重影响,已成为各专家学者高度关注的问题^[12-13]。目前大多学者专注于极端气候事件强度和发生频次等问题上^[14,15],但研究极端气候事件的持续性确有其必要性和现实意义,相比某一日发生极端降雨事件,其持续发生对人们的日常活动和出行影响更大,也会给生态环境和农作物生长造成更为严重的破坏及损失^[16],因而考虑极端降雨事件发生的持续性更具有现实意义,特别是在中国东南部亚热带季风气候区,如北江飞来峡流域。再者,对极端降雨事件的持续发展趋势进行预测分析也是十分重要的,目前应用最为广泛的趋势分析方法为 Mann-Kendall 非参数统计方法^[17-18],此外, Cox-Stuart 趋势检验法是 Cox 和 Stuart 于 1955 年提出的一种不依赖于数据结构的快速判断趋势是否存在的方法,同样适用于分析长时间序列水文气象因子随时间的变化趋势^[19-20],本文选取 Cox-Stuart 方法进行分析,以此来对比使用该方法所得结果与使用 M-K 方法已有结果^[13]的异同之处。

本文利用北江飞来峡流域 24 个雨量站点实测数据,对 TRMM 数据集进行准确性分析,并通过 CDD、CWD 及 RX5day 等持续性极端降雨指标评价 TRMM 数据集对极端气候的捕捉能力,采用 Cox-Stuart 趋势分析方法,对北江飞来峡流域的持续性极端降雨指标进行趋势分析,以全面评估 TRMM 数据集在飞来峡流域的综合表现。

1 研究区域和数据来源

北江流域地处我国南方湿润地区,属于亚热带季风气候区,雨量充沛,夏季以东南风和偏南风为主,冬季则为北风和偏北风,年均降水量超过 1 700 mm,年内降水分布不均,主要集中在 4—9 月,多年平均气温约为 21 ℃,年内气温在 10~30 ℃,夏季最高温超过 30 ℃。流域内植被良好且覆盖率高,植物根系发达,土壤持水能力强。飞来峡水利枢纽是广东省最大的以防洪为主的综合性水利枢纽,主要以防洪为主,兼有发电、航运、供水和改善生态

环境等作用,是北江流域综合治理关键工程。飞来峡水利枢纽控制流域面积为34 097 km²,占北江流域面积的73%,为北江流域重要组成部分,本文将其控制的北江流域称之为北江飞来峡流域,地处东经111°55′~114°50′,北纬23°10′~25°25′。流域内近年来连续性暴雨事件频发,如2017年5月7日—9日,广东粤北山区持续性暴雨,局部大暴雨,强降雨时空分布高度集中,持续时间长,累计雨量大,对飞来峡流域人民的生产生活造成了严重影响。

根据资料的时间连续性和站点的空间分布特征,选取北江飞来峡流域24个雨量站点1998—2015年日降雨数据(简称站点数据集)作为基础研究数据,各站点空间分布见图1。日降雨量数据来自广东省水文局。TRMM是由美国航空航天局(NASA)和日本空间开发局(NASDA)于1997年联合开展的遥感降水观测计划,数据由NASA官方网站下载可得(<https://www.nasa.gov/>)(简称TRMM数据集)。其覆盖面为全球50°N~50°S,空间分辨率为0.25°,存储格式为NC格式。为了保证数据的可靠性,已利用RCLimdex1.0软件对上述数据进行了严格的质量控制,包括数据记录日期是否与现实一致、降雨量是否小于零、记录值是否严重偏离本地区气象实际情况(以超出3倍标准差的值定义为出界值)等,再通过人工检查与相邻站点的记录进行对比,合理的保留,不合理的按缺测值处理,进行严格质量控制处理后方对数据进行下一步处理。

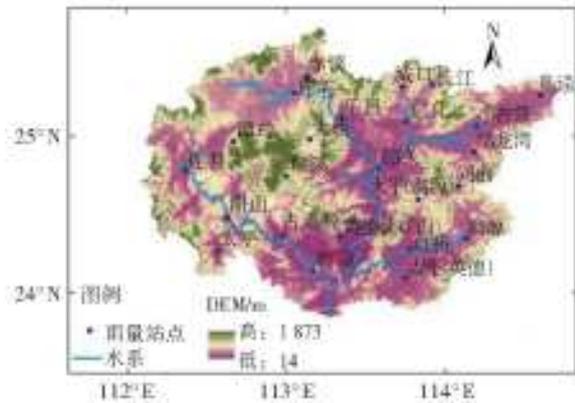


图1 飞来峡流域站点分布
Fig. 1 Distribution of stations in Feilaixia catchment

2 研究方法

2.1 TRMM数据集准确性和精度分析

针对1998—2015年TRMM数据集日尺度降雨数据,采用探测率(POD)、虚警率(FAR)、准确率(ACC)和频率偏差系数(FBI)等指标进行准确性评价^[5]。现以0.1 mm/d作为降雨事件阈值进行定义

(表1);在总日数中,两个数据集均有降雨事件的日数记录为*a*;站点数据集无雨,但TRMM数据集有雨的日数记录为*b*;站点数据集有雨,但TRMM数据集无雨的日数记录为*c*;两个数据集均无降雨事件的日数记录为*d*。

表1 降雨事件定义
Tab. 1 Definition of rainfall events

降雨事件	实测站点	
	有降雨	无降雨
TRMM 有降雨	<i>a</i>	<i>b</i>
TRMM 无降雨	<i>c</i>	<i>d</i>

四个准确性指标计算如式(1)至(4)

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (2)$$

$$ACC = \frac{a+b}{a+b+c+d} \quad (3)$$

$$FBI = \frac{a+b}{a+c} \quad (4)$$

式中:POD、FAR、ACC三个指标取值范围均为0~1,其中:POD、ACC越接近1,TRMM数据集准确性越高,FAR越接近0,错误率越低;FBI的理论取值为0~∞,理想取值为1,取值在0~1,说明TRMM数据集低估了降雨天数,取值在1~∞,说明TRMM数据集高估了降雨天数。

针对1998—2015年TRMM数据集日尺度降雨数据,采用皮尔逊相关系数(PCC)、偏差系数(Bias)、均方根误差(RMSE)和平均误差(ME)等指标进行精度评价^[5]。各计算公式为

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (5)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \times 100\% \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - S_i)^2} \quad (7)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - S_i) \quad (8)$$

式中:*n*为总天数;*T*为TRMM降雨量;*S*为站点降雨量。PCC代表TRMM数据集的相关系数,取值为0~1,越接近1,说明相关程度越高;Bias代表系统偏差程度,越接近0表示系统偏差越小;RMSE代表TRMM数据集在数值上的偏离程度,同样是越接近0,一致性越好;ME代表TRMM数据集的

平均离差程度,越接近 0,离差程度越小。

2.2 持续性极端降雨指标选取

在 1998 至 2001 年气候变化监测会议中, WMO 提出了一套极端气候指标,其中有 27 个指数被认为是核心指标,这些指标具有弱极端性、噪声低、显著性强等特点,可利用日气温和日降水数据由极端气候指数计算软件 RClimdex 计算得出, RClimdex 是一个受 WMO 认可并具有一定国际影响力的极端气候研究工具,现拟从中选出与极端降雨事件持续性相关的 3 个指数进行研究,分别为 CDD、CWD 及 Rx5day,各指标详细信息见表 2。

表 2 3 个极端持续性降雨指标
Tab. 2 Three consecutive extreme rainfall indices

代码	名称	定义
CDD	连续无雨日数/d	最长连续无降雨日数
CWD	连续有雨日数/d	最长连续降雨日数
Rx5day	5 日最大降雨量/mm	连续 5 日最大降雨量

2.3 Cox-Stuart 趋势检验法

Cox-Stuart 趋势检验法是 1955 年由 Cox 和 Stuart 共同提出的一种不依赖于数据结构的快速判断趋势是否存在的方法,适用于检验一个时间序列的数据是否存在上升或下降趋势,其理论基础是符号检验。主要思想是将数据序列以中间位置为界,拆分为两部分组成 n 对数对,并做减法运算,得出每对数对的差值 $D_i = x_i - x_{i+n}$ 。统计 D_i 分别为正数和负数的对数 S^+ 和 S^- ,显然,当 S^+ 较多时,说明序列有减小趋势,当 S^- 较多时,序列有增大趋势。

具体算法如下。

(1) 引入假设检验。原假设 H_0 : 数据无趋势; 备择假设 H_1 : 数据有上升(或下降)趋势。

(2) 取检验统计量。取检验统计量 $K = S^+$ (或 S^-), 此时,在原假设成立的条件下, S^+ 服从参数为 n' 和 0.5 的二项分布,即 $S^+ \sim B(n', 0.5)$, 其中 n' 为 n 对数对中差值 D_i 不为零的对数。

(3) 计算显著性水平。显著性水平 P 值可由式(9)计算得出

$$P = (K \leq S^+) = \frac{1}{S^{n'}} \cdot \sum_{i=1}^{S^+} C_{n'}^i \quad (9)$$

(4) 判断显著性水平是否满足要求。如要求置信度达到 0.05,那么,当 P 值小于等于 0.05 时可拒绝原假设,即认为数据有上升趋势,且通过了 0.05 显著性水平检验。

本文根据各站点各气候指标的 P 值(统计量为 S^+ 时)大小,对其趋势强度进行了分级,总共分为 4

个等级:当 $0 < P \leq 0.05$ 时,接受备择假设并定义该趋势为极强上升趋势;当 $0.05 < P \leq 0.1$ 时,定义为强上升趋势;当 $0.1 < P \leq 0.25$ 时,定义为弱上升趋势;当 $P > 0.25$ 时,定义为无显著趋势。相同地,统计量为 S^- 时,当 $0 < P \leq 0.05$ 时,定义该趋势为极强下降趋势;当 $0.05 < P \leq 0.1$ 时,定义为强下降趋势;当 $0.1 < P \leq 0.25$ 时,定义为弱下降趋势;当 $P > 0.25$ 时,定义为无显著趋势。

3 结果与讨论

3.1 TRMM 降雨数据集准确性和精度分析

考虑到流域内实测站点较为密集,且若将气象站点观测数据插值成空间数据后会产生不可量化的偏差,因此,本文直接利用实测站点坐标提取卫星降水的对应格点数据,以实测站点降水观测数据为基准,对 TRMM 数据集进行日尺度准确性和精度分析。

3.1.1 准确性分析

采用四个准确性指标对 TRMM 数据集日雨量数据进行统计,并将统计量通过空间插值得到 TRMM 日尺度降雨量 4 个准确性指标空间分布见图 2。

从图 2 可以看出,POD 取值为 0.586~0.685,流域西北大部分地区取值偏低,东南地区表现较好,西北地区由于大东山的存在,最高海拔接近 1 900 m,表明 TRMM 数据集在高海拔地区表现不如低海拔地区,ACC 表现与 POD 类似。FAR 分布图说明 TRMM 在流域中下游表现较佳,在中上游等地形变化较大、海拔较高的地区出现虚报、误报情况较多,特别是在武水上游,同样符合低纬度低海拔表现更佳的规律。另外,FBI 取值为 0.727~0.877,取值均小于 1,说明 TRMM 在整个流域均低估降雨日数,在流域东部,仅出现略微低估现象,在流域西部及南部,低估现象较为明显。对比来看,国内外已有成果与本文所得结果较为类似,在纬度方面,Man-tas 等^[21]在安第斯山脉的秘鲁境内通过比较 POD、FAR、FBI 等指标得出了 TRMM 数据集在安第斯山脉中段及北段的表现优于纬度更高的南段的结论,Cai 等^[22]在中高纬度地区—辽宁省 Huntai 流域进行了 TRMM 数据集的表现评估,结果表明 TRMM 在中高纬度地区捕捉极端降水时无法获得理想的精度,Jiang 等^[23]在渤海流域也同样得出了 TRMM 在高纬度地区具有高系统偏差的研究结论;在海拔和地形方面,Prakash 等^[24]在印度的研究表明 TRMM 在多山地区的系统误差明显偏高,Deo 等^[25]在 New Caledonia 的研究也同样表明,随着海拔升高

TRMM 低估现象越明显,Chen 等^[26]的研究也同样 表明了 TRMM 数据在高海拔地区的弱适应性。

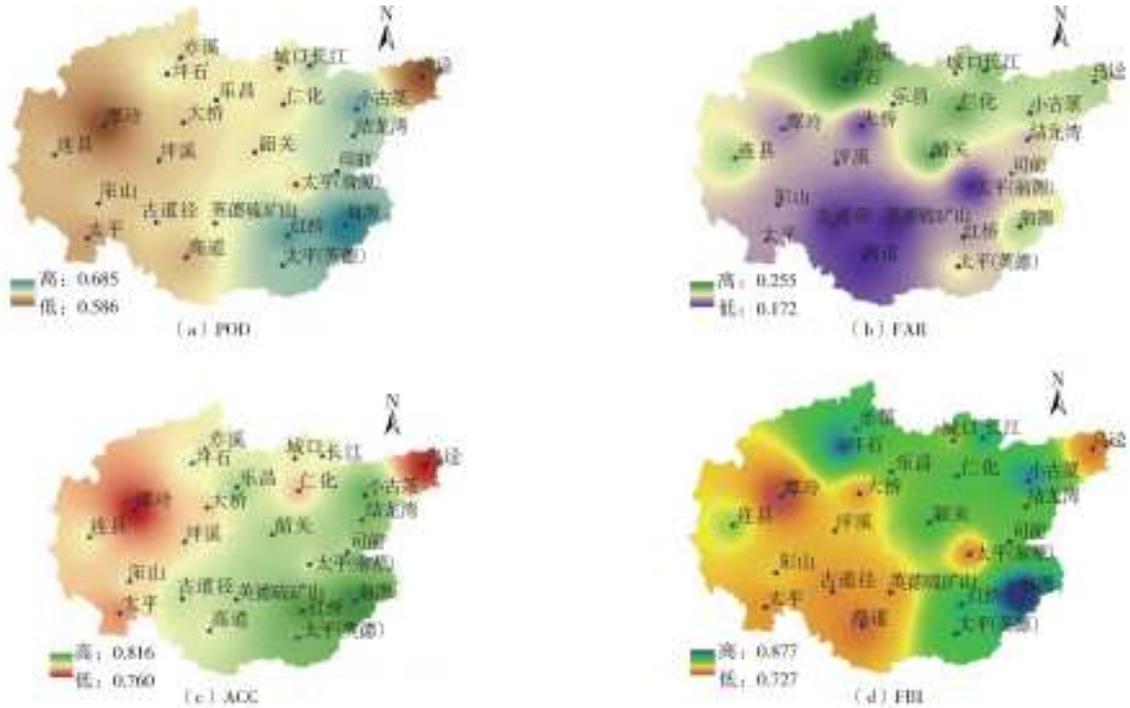


图 2 TRMM 数据集四个准确性指标空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of four accuracy indices for TRMM

3.1.2 精度分析

采用 4 个评价指标对 TRMM 数据集日雨量数

据进行统计,并将统计量通过空间插值得到日尺度降雨量 4 个精度指标空间分布见图 3。

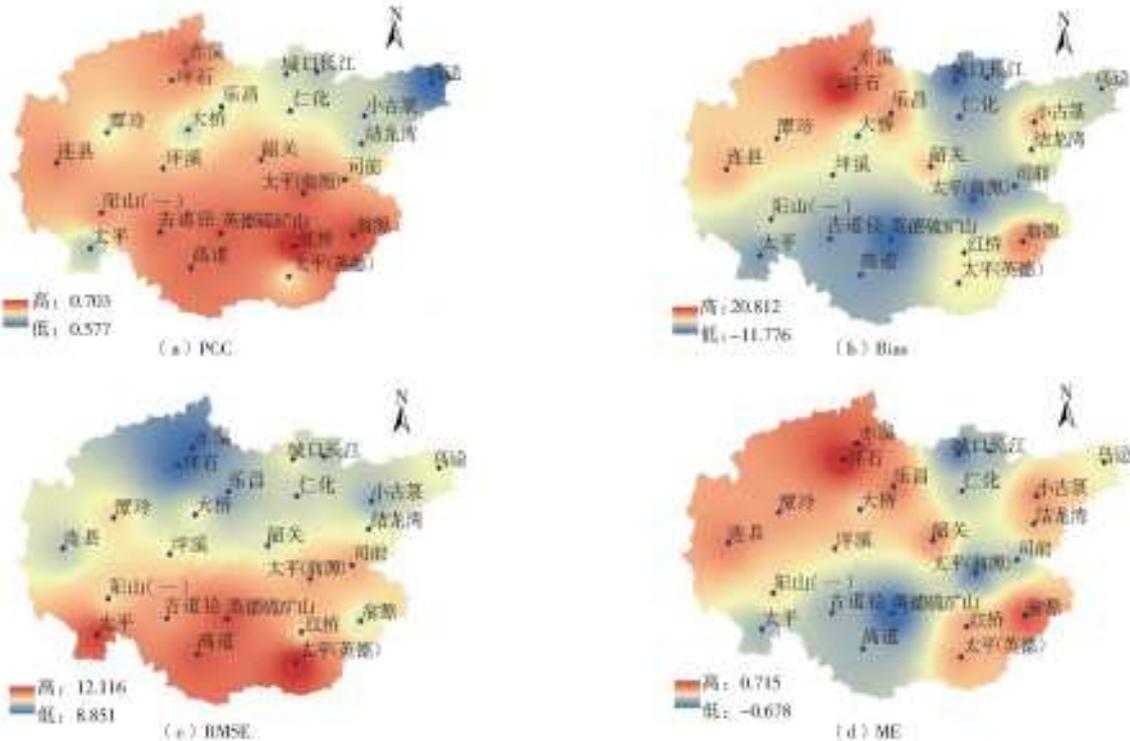


图 3 TRMM 数据集四个精度指标空间分布

Fig. 3 Spatial distribution maps of four precision indices for TRMM

从图 3 可以看出,PCC 取值范围为 0.577~0.703,两个数据集表现出了较好的相关性,尤其是在流域的中下游地区,所得结果与 Wang 等^[27]在北

江和东江流域的研究相似,说明 TRMM 数据集在日尺度上对降雨数据的捕捉能力较强;另外,在月尺度上两个数据集的 PCC 范围为 0.890~0.969,也

表现出了时间尺度越大、精度越高的规律。且无论是日尺度还是月尺度,均表现出低纬度低海拔地区相关性更强的规律。Bias 取值范围为 $-11.776\% \sim 20.812\%$,结果略优于 Wang 等的研究^[27];在流域中下游主河道以及流域东北部淡水支流区域,Bias 表现出轻度的低估现象,低估程度最高约 10%,一方面可能因为流域主河道范围内人类活动较为密集,城镇化程度较高,存在热岛和增雨效应,而 TRMM 数据集无法准确捕捉该现象,另一方面可能因为流域东北部海拔普遍较主河道范围偏高,水汽无法越过,而使得 TRMM 出现低估现象,尤其是在英德到清远的暴雨中心处低估现象最为明显(英德西北方向是大东山,海拔高达 1 800 m,夏季东南季风带来丰富的降水,但由于地形原因,水汽无法越过大东山,因此在英德至清远处形成一个稳定的暴雨中心)。而在流域西北部纬度较高、海拔较高地形变化较大的区域则表现出明显的高估现象,ME 表现与 Bias 相似。对于 RMSE,其取值范围为 8.851~12.116 mm,表现也比 Wang 等^[27]的研究稍好(8.86~14.19 mm),RMSE 说明 TRMM 数据集在流域西北部表现最佳,一致性较好,在流域中下游地区则表现稍差。

3.2 TRMM 数据集持续性极端降雨指标评价及趋势分析

3.2.1 持续性极端降雨指标评价分析

为进一步分析 TRMM 数据集模拟捕捉极端持续性气候能力,采用 RCLimdex 分别在两个数据集下对所选取的 3 个持续性极端降雨指标进行统计,并采用 4 个评价指标进行计算,得到 TRMM 数据集年尺度下 3 个持续性极端降雨指标评价结果见表 3。

从表 3 可以看出,两个数据集持续性极端降雨指标的皮尔逊相关系数总体偏低,CDD 的相关系数平均值仅约 0.3,CWD 为 0.335,RX5day 稍高一些,为 0.603,最高的为坪石站 0.932,说明 TRMM 数据集在极端持续性降雨方面的模拟能力仍有待提升。其次,关于 Bias,CDD 均表现为正值,说明 TRMM 数据集总体上高估了流域的连续无雨日数,出现了较高的系统偏差,平均值高达 24.134%;CWD 大部分站点表现为负值,说明 TRMM 数据集总体上低估了流域的连续有雨日数,不过偏差程度不高,平均值为 -6.292% ,但低估 CWD 会造成较严重影响,如直接应用 TRMM 数据集进行 CWD 的预估,会使得相关部门重视不足,导致严重后果;RX5day 的 Bias 有高有低,不过总体均值为 $-$

4.526%,说明 TRMM 数据集对 RX5day 模拟能力较好。另外,RMSE 方面,CDD 均值为 17.36 d,说明 TRMM 对于全年最长连续无雨日数的预估有约 17 d 的偏差,且是高估,与站点数据集偏离程度较高,一致性不足;CWD 的 RMSE 均值仅为 3.098 d,说明 TRMM 对全年最长连续有雨日数产生了 3 d 的低估,在可接受范围内,一致性较好;RX5day 平均约有 60 mm 偏差,偏差程度仍较大。最后,ME 表现与 Bias 相似,CDD 均为正值,再次说明 TRMM 数据集对 CDD 存在较大程度的高估现象;CWD 大部分为负值,说明了 TRMM 低估,不过离差程度很小,均值仅为 -0.72 d;站点上,RX5day 的 ME 有正有负,但总体上微弱低估,约 11 mm。总体来看,TRMM 对 RX5day 的模拟能力较好。

表 3 TRMM 数据集 3 个持续性极端降雨指标评价结果

Tab. 3 Evaluation results of three consecutive extreme rainfall indices for TRMM

极端降雨指标	CDD			
	PCC	Bias/%	RMSE/d	ME/d
最小值	-0.014	4.802	13.762	1.889
第一四分位数	0.127	16.787	15.852	6.139
中位数	0.319	25.808	16.400	8.750
第三四分位数	0.405	30.991	18.729	10.417
最大值	0.638	39.813	24.369	12.111
平均值	0.297	24.134	17.360	8.153

极端降雨指标	CWD			
	PCC	Bias/%	RMSE/d	ME/d
最小值	-0.214	-28.520	1.599	-4.389
第一四分位数	0.140	-9.192	2.600	-1.028
中位数	0.384	-6.477	2.953	-0.667
第三四分位数	0.495	-0.949	3.468	-0.083
最大值	0.783	2.685	5.050	0.222
平均值	0.335	-6.292	3.098	-0.720

极端降雨指标	RX5day			
	PCC	Bias/%	RMSE/mm	ME/mm
最小值	0.141	-29.851	33.700	-66.871
第一四分位数	0.439	-8.638	46.833	-18.422
中位数	0.648	-4.188	53.943	-8.032
第三四分位数	0.746	-0.201	70.838	-0.498
最大值	0.932	11.950	114.896	20.863
平均值	0.603	-4.526	60.260	-11.422

为进一步深入评估 TRMM 数据集对持续性极端气候的模拟表现能力,以 RX5day 为代表进行月尺度评价,以了解洪水期和枯水期 TRMM 数据集的不同表现。结果见图 4。

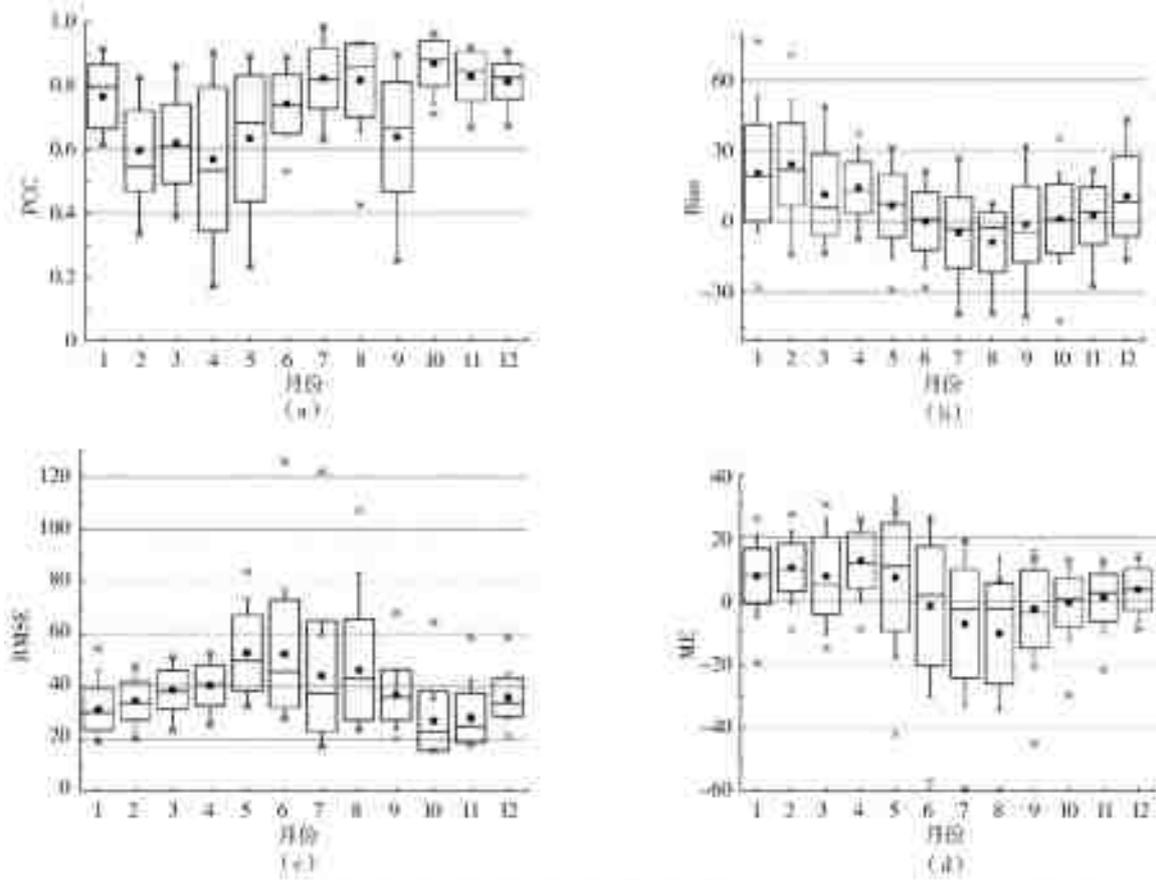


图 4 TRMM 数据集月尺度 RX5day 四个评价指标箱型图

Fig. 4 Box plot of four evaluation indices of RX5day on monthly scale for TRMM

由图 4(a)可知各月份的 PCC 值均在 0.5 以上,其中,1、7、8、10—12 月均高于 0.8,说明两个数据集在这些月份的相关程度非常高,仅在 2—4 月表现稍差,由于飞来峡流域汛期在 4—9 月,所以总体来说,TRMM 在汛期表现尚可。由图 4(b)可知,5—11 月 Bias 较小,均在 10% 以内,其中,7—9 月 Bias 为负值,说明 TRMM 在洪水期对持续性降雨出现了略微低估现象;另外,枯水期后段 1—3 月偏差明显较大,且为正值,说明 TRMM 在枯水期出现了明显的高估现象。由图 4(c)可以看出,枯水期两个数据集一致性较高,相反,洪水期 4—9 月 RMSE 值较高,不过该结果也是合理的,因为洪水期 RX5day 值本身就比枯水期高很多。图 4(d)与 4(b)相似,表现较好的为 6—11 月,其中前汛期 4、5 月 ME 明显偏大,且为正值,说明 TRMM 对前汛期的持续性降水出现了明显高估,后汛期 7—9 月 ME 为负值,再次说明 TRMM 低估了洪水期的持续性降水量。研究结果与 Hur 等^[11]、Zulkafli 等^[28]分别在新加坡和秘鲁北部、厄尔多瓜东南部的研究结果相似,也说明了 TRMM 数据集总体上确实存在坦化的现象,对持续性降雨的估计趋于平缓。

3.2.2 Cox-Stuart 持续性极端指标趋势分析

为了解飞来峡流域内 1998—2015 年 3 个持续性极端降雨指标的趋势,采用 Cox-Stuart 方法进行分析,结果见图 5。

根据站点数据集所得结果见图 5(a)、5(c)、5(e)所示,CDD 在流域主干道及中下游地区有不同程度的上升趋势(以强上升趋势为主),其中,流域西部连江上游出现极强上升趋势,说明此区域容易出现持续性极端干旱事件,需要多加关注,这与 Wu 等^[13]采用 MK 方法所得结论较为一致,也与 Zhang 等^[29]在珠江流域的干旱研究相吻合。CWD 在流域东南部、中部偏西出现极强上升趋势,说明该区域持续性极端降雨天气显著增加,流域上游地区多处出现微弱的上升趋势,流域的西部、中部偏东等地区则出现了不同程度的下降趋势,因此需要密切关注流域东南部的持续性降雨事件。RX5day 在流域东南部和西南部出现了极强上升趋势,在流域东北部淡水出现强上升趋势,说明持续性极端降水量在这些区域有很强的上升趋势,容易引发洪涝灾害,特别是中上游地区背靠南岭山脉,上游河道比降较大,加之河流水系呈阔叶脉状分布,汇流迅速,持续性洪涝灾害发生的可能性将大大

增加。另外,西北局部出现了下降趋势,说明西北方向的持续性极端降雨量有减少的趋势,其余区域呈弱上升或无明显趋势。

TRMM 数据集的结果如图 5(b)、5(d)、5(f)所示,CDD 在流域西部出现极强上升趋势,与站点数据集表现一致,但在流域上游及流域东南部地区的模拟结果与站点数据集有较大出入,总体均呈现上升趋势。CWD 在流域西部表现出了极强的下降趋

势,与站点数据集较为一致,但 TRMM 在其他区域的表现并不尽如人意,尤其是在流域东南部,几乎无法捕捉到东南部持续性降雨气候显著增加的趋势。RX5day 在流域西南部连江中段表现出了强上升趋势,与站点数据集一致,河流主河道上的趋势也与站点数据集基本一致,均呈现弱上升趋势,但 TRMM 无法准确捕捉到东南区域的上升趋势以及西北区域的下降趋势。

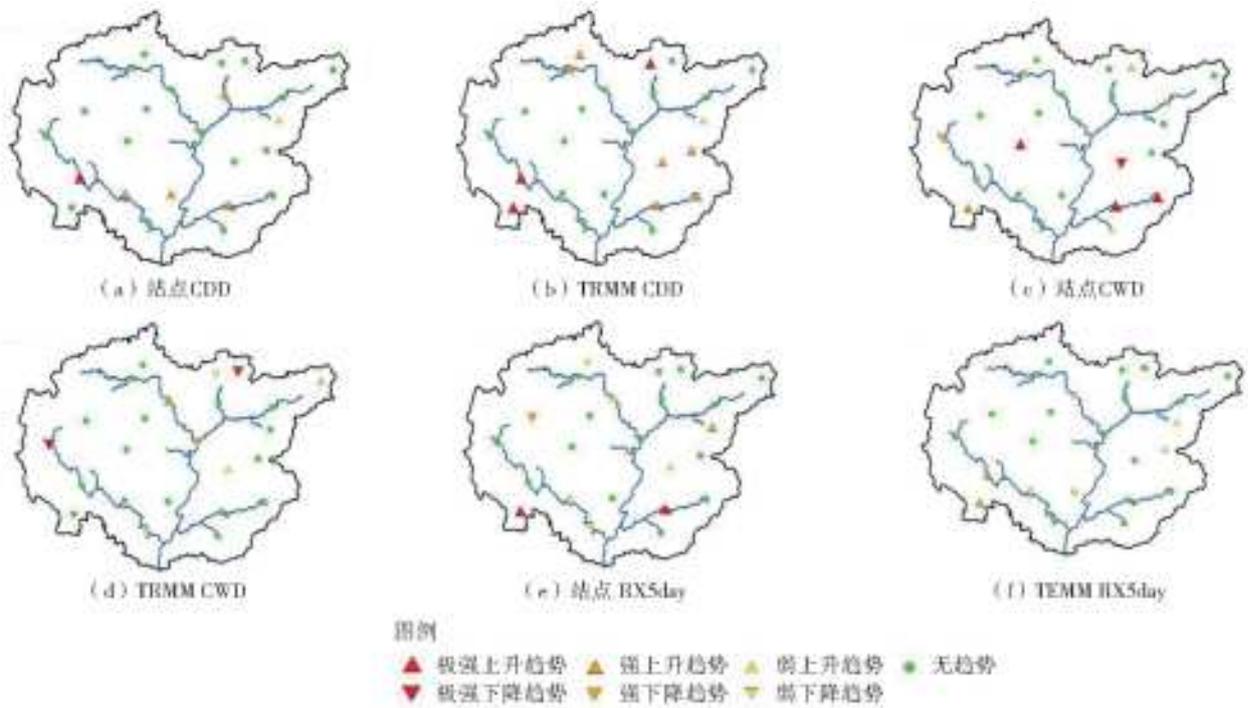


图 5 TRMM 数据集持续性极端降雨指标趋势空间分布

Fig. 5 Trend spatial distribution maps of consecutive extreme rainfall indices for TRMM

4 结论

为分析 TRMM 数据集在北江飞来峡流域的精度及其可替代性,本文利用流域内实测逐日降雨数据对 TRMM 数据集进行了多时空评价分析,对流域内的持续性降雨指标进行探讨,并采用 Cox-Stuart 方法进行趋势分析,所得结论如下。

(1)对 TRMM 降雨数据进行准确性和精度评价,准确性评价表明,TRMM 数据在低纬度、地形变化较小的流域中下游准确性较高,而在高纬度、地形变化较大的西北部则出现虚报、误报的概率较大。精度评价说明 TRMM 数据在飞来峡流域中下游等低纬度低海拔地区的适应性较强,但在流域东北部、西北部等地形变化剧烈、海拔较高的区域则表现不佳。

(2)利用持续性极端降雨指标来评价 TRMM 数据集对极端气候的捕捉能力时发现,TRMM 数据偏向于高估 CDD、低估 CWD,对于 CWD 的低估会使相关部门重视不足,在南方湿润地区导致较为严

重后果,需要引起重视。另外,月尺度的 RX5day 结果说明,TRMM 倾向于高估前汛期(4—6 月)和枯水期,而低估后汛期(7—9 月)的连续降雨量,说明 TRMM 对持续性极端降雨的捕捉趋于坦化。

(3)Cox-Stuart 趋势分析结果表明,流域西部较易出现持续性干旱,东南部的持续性降雨显著增加,TRMM 数据集可以捕捉到西部的持续干旱事件增加的趋势,但无法捕捉到流域东南部的持续性降雨显著增加的趋势,这在南方湿润地区稍显不足。

参考文献(References):

- [1] LI Z, YANG D, 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.
- [2] FENSTERSEIFER C, ALLASIA D G, PAZA R. Assessment of the TRMM 3B42 precipitation product in

- southern Brazil[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2016, 52 (2): 367-375. DOI: 10.1111/1752-1688.12398.
- [3] LI R Z, ZHANG A D, ZHANG H, et al. Accuracy evaluation of multi-satellite precipitation products over Circum-Bohai-Sea region[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (9): 2916-2924. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201609.035.
- [4] YANG Y, TANG J, XIONG Z, et al. Evaluation of High-resolution gridded precipitation data in arid and semiarid regions: Heihe River basin, Northwest China [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(12): 3075-3101. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0252.1.
- [5] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 639-651. (LIU S H, YANG D H, WANG H, et al. Evaluation of TRMM 3B42V7 at the basin scale over mainland China [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 639-651. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.05.001.
- [6] 王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例 [J]. *水科学进展*, 2017, 28(2): 174-182. (WANG Z L, ZHONG R D, LAI C G, et al. Evaluation of TRMM 3B42-V7 satellite-based precipitation data product in the Pearl River basin, China: Dongjiang River and Beijiang River basin as examples [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 174-182. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.002.
- [7] 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 mainland China [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 303-313. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.03.001.
- [8] EBRAHIMI S, CHEN C, CHEN Q, et al. Effects of temporal scales and space mismatches on the TRMM 3B42 v7 precipitation product in a remote mountainous area [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (24): 4315-4327. DOI: 10.1002/hyp.11357.
- [9] ZAD S M, ZULKAFI Z, MUHARRAM F. Satellite Rainfall (TRMM 3B42-V7) Performance assessment and adjustment over Pahang River basin, Malaysia [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (3): 388. DOI: 10.3390/rs10030388.
- [10] KENABATHO P K, PARIDA B P, MOALAFHI D B. Evaluation of satellite and simulated rainfall products for hydrological applications in the Notwane catchment, Botswana [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 100: 19-30. DOI: 10.1016/j.pce.2017.02.009.
- [11] HUR J, RAGHAVAN S V, NGUYEN N S, et al. Are satellite products good proxies for gauge precipitation over Singapore? [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 132 (3-4): 921-932. DOI: 10.1007/s00704-017-2132-7.
- [12] WILHELM B, ENTERS D, ALLIGNOL F, et al. Does global warming favour the occurrence of extreme floods in European Alps? First evidences from a NW Alps proglacial lake sediment record [J]. *Climatic Change*, 2012, 113 (3-4): 563-581. DOI: 10.1007/s10584-011-0376-2.
- [13] WU C H, HUANG G R, YU H J, et al. Spatial and temporal distributions of trends in climate extremes of the Feilaixia catchment in the upstream area of the Beijiang River basin, South China [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 34 (11): 3161-3178. DOI: 10.1002/joc.3900.
- [14] TONG S Q, LI X Q, ZHANG J Q, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 75-89. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.262.
- [15] WU C, HUANG G. Changes in heavy precipitation and floods in the upstream of the Beijiang River basin, South China [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35 (10): 2978-2992. DOI: 10.1002/joc.4187.
- [16] SHI J, CUI L, WEN K, et al. Trends in the consecutive days of temperature and precipitation extremes in China during 1961-2015 [J]. *Environmental Research*, 2018, 161: 381-391. DOI: 10.1016/j.envres.2017.11.037.
- [17] SINGH V, GOYAL M K. Spatio-temporal heterogeneity and changes in extreme precipitation over eastern Himalayan catchments India [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, 31 (10): 2527-2546. DOI: 10.1007/s00477-016-1350-3.
- [18] SALMAN S A, SHAHID S, ISMAIL T, et al. Long-term trends in daily temperature extremes in Iraq [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 198: 97-107. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.08.011.
- [19] CONOVER W J. *Practical nonparametric statistics* [M]. Wiley, 1980.
- [20] FATICHI S, BARBOSA S M, CAPORALI E, et al. Deterministic versus stochastic trends: Detection and challenges [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, 114 (D18121). DOI: 10.1029/

- 2009JD011960.
- [21] MANTAS V M, LIU Z, CARO C, et al. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes[J]. Atmospheric Research, 2015, 163 (SI): 132-145. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2014. 11. 012.
- [22] CAI Y, JIN C, WANG A, et al. Comprehensive precipitation evaluation of TRMM 3B42 with dense rain gauge networks in a mid-latitude basin, northeast, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 126(3-4): 659-671. DOI: 10. 1007/s00704-015-1598-4.
- [23] JIANG D, ZHANG H, LI R. Performance evaluation of TMPA version 7 estimates for precipitation and its extremes in Circum-Bohai-Sea region, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 130 (3-4): 1021-1033. DOI: 10. 1007/s00704-016-1929-0.
- [24] PRAKASH S, MITRA A K, AGHAKOUCHAK A, et al. Error characterization of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA-3B42) products over India for different seasons [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529 (3): 1302-1312. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 08. 062.
- [25] DEO A, WALSH K J E, PELTIER A. Evaluation of TMPA 3B42 Precipitation Estimates during the passage of tropical cyclones over New Caledonia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 129 (3-4): 711-727. DOI: 10. 1007/s00704-016-1803-0.
- [26] CHEN Y, EBERT E E, WALSH K J E, et al. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates of tropical cyclone rainfall using PACRAIN data[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118(5): 2184-2196. DOI: 10. 1002/jgrd. 50250.
- [27] WANG Z, ZHONG R, LAI C. Evaluation and hydrologic validation of TMPA satellite precipitation product downstream of the Pearl River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31 (23): 4169-4182. DOI: 10. 1002/hyp. 11350.
- [28] ZULKAFLI Z, BUYAERT W, ONOF C, et al. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon River basins [J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15 (2): 581-592. DOI: 10. 1175/jhm-d-13-094. 1.
- [29] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 98(1-2): 89-99. DOI: 10. 1007/s00704-008-0095-4.
-
- (上接第 26 页)
- [27] 段唯鑫. 大流域洪水预报实时校正研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (DUAN W X. Reserch on real-time flood forecasting in large basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [28] 张露, 张佳宾, 梁国华, 等. 基于 API 模型与新安江模型的察尔森水库洪水预报[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1056-1059. (ZHANG L, ZHANG J B, LIANG G H, et al. Flood forecast of Chaersen reservoir based on API model and Xin'anjiang model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1056-1059. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 06. 007.
- [29] 水利部淮河水利委员. 淮河流域淮河水系实用水文预报方案[M]. 济南: 黄河水利出版社, 2002. (Member of Huaihe Water Conservancy, Ministry of Water Resources. Practical hydrological forecast scheme in huaihe river basin[M]. Jinan: Yellow River Water Conservancy Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [30] 周洋洋, 李致家, 姚成, 等. 基于 SCE-UA 算法的 API 模型应用研究[J]. 水力发电, 2014, 40(4): 13-16. (ZHOU Y Y, LI Z J, YAO C, et al. Study on the application of API model based on SCE-UA algorithm [J]. Water Power, 2014, 40(4): 13-16. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2014. 04. 004.
- [31] 李致家, 梁世强, 霍文博, 等. 淮河上中游复杂流域洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 1-6. (LI Z J, LIANG S Q, HUO W B, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2019. 01. 001.