

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.030.

张寒博, 窦世卿, 温颖. 基于遥感降水产品的西南地区降水时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 265-278.

Zhang Hanbo, Dou Shiqing, Wen Ying. Analysis of Spatiotemporal Dynamics of Precipitation in Southwest China Based on Remote Sensing Precipitation Products[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 265-278.

# 基于遥感降水产品的西南地区降水时空动态分析

张寒博<sup>1</sup>, 窦世卿<sup>2</sup>, 温颖<sup>3</sup>

(1. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 510308; 2. 桂林理工大学  
测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

**摘要:** [目的] 探究遥感降水产品在西南地区的适用性, 揭示区域降水时空特征, 为西南地区旱涝灾害评估及水资源利用等提供科学参考依据。[方法] 首先结合西南地区内 100 个地面气象站点降水数据, 从多年平均和年际两种时间尺度以及气象站点空间尺度评价了 2001—2019 年 TRMM 降水产品和 GPM 降水产品的适用性, 然后基于优选的降水产品, 采用变异系数法、Theil-Sen Median 趋势分析耦合 Mann-Kendall 显著性检验方法及 Hurst 指数法进行降水时空变化及其可持续性分析, 并预测了未来降水趋势。[结果] (1) GPM, TRMM 在西南地区均表现出较好的一致性和适用性, 虽然都存在一定的低估现象, 但 GPM 的降水空间细节表征能力优于 TRMM, 在整体上更接近实测数据。(2) 19 年间西南地区整体降水波动变化并不突出, 主要表现出较低波动变化和中等波动变化, 共占全域的 87.54%; 近 19 年西南地区降水变化趋势整体上表现为增加, 降水增加区域占全域的 83.71%, 降水变化趋势以弱 (50.38%)、中 (24.30%) 持续性为主; 未来西南地区 62.24% 的区域降水趋势将持续增加, 主要分布在西南地区中部和北部地区, 13.23% 的区域降水趋势将持续减少, 主要分布在云南中部和四川西南部地区。[结论] GPM 比 TRMM 更适合表征西南地区的降水特征, 能有效用于开展降水的时空动态分析。

**关键词:** GPMIMERG; TRMM3 B43; 遥感技术; 适用性评价; 时空动态分析

**中图分类号:** P426.616

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)05-0265-14

## Analysis of Spatiotemporal Dynamics of Precipitation in Southwest China Based on Remote Sensing Precipitation Products

Zhang Hanbo<sup>1</sup>, Dou Shiqing<sup>2</sup>, Wen Ying<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510308, China,  
2. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin University of Technology, Guilin,  
Guangxi 541006, China, 3. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the applicability of remote sensing precipitation products in southwest China, to reveal the spatial and temporal characteristics of precipitation in Southwest China, and to provide scientific references for the assessment of droughts and floods in southwest China and the utilization of water resources. [Methods] Firstly, combined with precipitation data from 100 ground-based meteorological stations in the study region, the applicability of TRMM and GPM precipitation products were evaluated on both the multi-year average and inter-annual scales, as well as the meteorological station scale. Subsequently, based on the preferred remote sensing precipitation product, the coefficient of variation method, Theil-Sen median trend analysis coupled with Mann-Kendall significance test and Hurst exponent were adopted to analyze spatiotemporal changes of precipitation and assess their sustainability. Moreover, our

收稿日期: 2023-05-25

修回日期: 2023-11-08

资助项目: 国家自然科学基金 (42161028, 41976189); 广东省科学院发展专项资金项目 (2022GDASZH-2022010202); 广西八桂学者专项项目 (DT2100001072)

第一作者: 张寒博 (1996—), 男, 河南开封人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为水环境遥感。E-mail: 2120191109@glut.edu.cn

通信作者: 窦世卿 (1977—), 女, 河北定州人, 教授, 博士, 主要研究方向为三维 GIS 与遥感技术应用研究。E-mail: doushiqing@glut.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

effort predicted the precipitation trends in the future. [Results] (1) Both TRMM and GPM products demonstrated good consistency and applicability in southwest China, albeit with some overestimation. However, compared with TRMM, GPM displayed a higher spatial resolution and better data quality, which was overall closer to the measured data. (2) Precipitation in southwest China had experienced low and moderate fluctuations over the past 19 years, with 87.54% of the region. The trend for precipitation changes in this region had mostly been increasing (83.71%), mainly weak to moderate sustainability (50.38% weak, 24.30% moderate). The prediction for future precipitation trend as a whole suggested a general increase in precipitation, with 62.24% of the region showing increasing trends, mainly in the central part of the study region, and 13.23% showing trends, mainly in the central Yunnan and southwestern Sichuan regions. This effort provided valuable insights for decision-making related to agricultural production and water resources management in southwest China. [Conclusion] GPM is more suitable than TRMM to characterize the precipitation characteristics in southwest China and can be effectively used to carry out spatiotemporal dynamic analysis of precipitation.

**Keywords:** GPM IMERG; TRMM 3B43; remote sensing technique; applicability evaluation; spatio-temporal dynamic analysis

降水对水文循环、气象预报、灾害防治和生态循环等领域具有关键性作用,其时空分布变化也深刻影响着生态环境与生物多样性<sup>[1]</sup>,因此,利用大尺度精细化遥感降水产品开展降水时空动态分析对生态保护、水资源利用等具有重要意义。

获取降水数据的传统方式主要依靠地面气象站点,但易受环境因素和经济条件限制,难以实现降水的全面观测<sup>[2]</sup>。近年来,凭借遥感技术的发展,遥感降水产品得以产生,它具有时空分辨率高、覆盖范围广、数据获取方便等特点,利用卫星遥感对降水进行探测现已成为获取长时序和空间化降水资料的重要数据来源<sup>[3]</sup>。其中,热带降水测量卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)和全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement, GPM)是两种当前广泛应用于水文气象、环境监测、气候研究等方面的卫星遥感降水产品<sup>[4-6]</sup>。TRMM 降水产品于1997年发射,主要应用于热带和亚热带的降水监测,其被认为能较好表征区域降水的时间变化特征和空间分布特征<sup>[7-8]</sup>。而 GPM 降水产品于2014年发射,是继 TRMM 计划后的新一代全球卫星降水产品,其获取降水数据的空间范围扩展至全球<sup>[9]</sup>。

前人的研究表明不同降水数据在不同地区存在区域差异,如李强宇<sup>[10]</sup>、薛鹏飞<sup>[11]</sup>、Taghi Mahdavi<sup>[12]</sup>和 Adrianos Retalis<sup>[13]</sup>等分别在长三角地区、雅鲁藏布江流域、伊朗乌尔米亚湖以东地区以及塞浦路斯岛地区对 TRMM 和 GPM 降水产品进行了精度验证与比较研究,研究结果都表明两种卫星降水产品均与地面气象数据存在一定相关性,但其精度与适用性

不仅在不同地区存在差异,而且在同一区域的不同时期也具有差异性。

近年来,全球气候变暖和人为因素的影响促使极端天气气候事件频发,使得年际降水发生显著变化,制约农业、经济、生态等发展<sup>[14]</sup>。西南地区作为我国重要的农业区域,虽然其在传统观念上被普遍认为降雨量充沛,水资源丰富,但由于地理位置、气候条件以及地形等因素的相互制约,形成了降水总量大,分布不均匀的特点,从而忽视了严重的旱涝隐患<sup>[15]</sup>。因此,研究西南地区的降水分布格局对地区的经济发展、农业生产及早涝灾害预防等领域具有重要意义。趋势分析、降水变异程度分析、降水状态可持续性分析等方法在国内外对降水变化特征研究中已被广泛应用。如卢晓宁等<sup>[16]</sup>基于 TRMM 数据,从伏旱多年平均状态、演变趋势、频率三方面分析了四川省伏旱的时空演变规律,表明历年旱情发生频率最高的区域位于川东盆地;刘月璇等<sup>[17]</sup>通过 Sen-MK 检验及结合 Hurst 指数等方法对内蒙古地区进行降水时空特征分析;也有基于 TRMM 数据通过 Theil-Sen Median 趋势分析以及 Hurst 指数实现对滇黔桂岩溶区<sup>[18]</sup>的降水时空动态特征分析;国外学者 Milad Nouri 等<sup>[19]</sup>通过 Mann-Kendall 检验分析了伊朗 1996—2012 年的降水趋势,从而监测该地区的干旱气候变化。

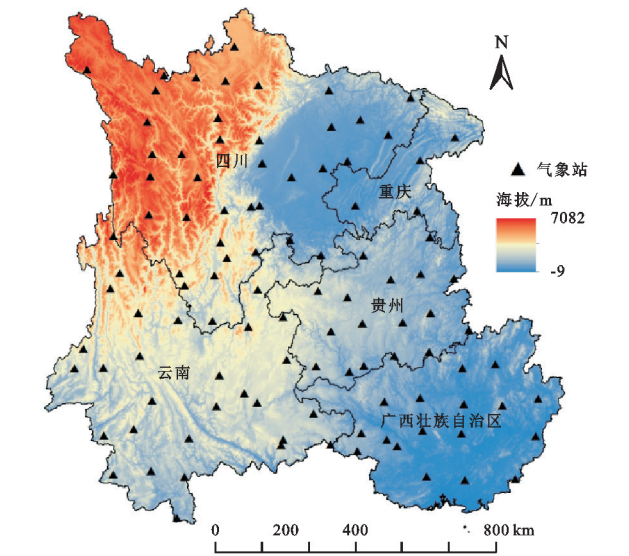
虽然国内不乏有对西南地区作降水时空分布特征的研究,但基于不同分析方法所得到的研究结果具有差异性,且大部分的研究普遍是基于地面气象站点数据。因此本文以西南地区共 100 个地面气象站点的实测数据作为参考值,从多年平均和年际两种时间

尺度以及气象站点尺度对 TRMM 3B43 和 GPM IMERG 降水产品在西南地区的适用性进行定量评价, 优选出数据质量较高的遥感降水产品作为分析降水动态变化的基础数据。基于优选的遥感降水产品, 采用变异系数法、Theil-Sen Median 趋势分析耦合 Mann-Kendall 显著性检验方法和 Hurst 指数法研究西南地区的降水时空变化以及可持续性变化, 并做出对西南地区未来降水趋势的预测。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

中国西南地区(除西藏地区外)地理位置为 20°54′—34°19′N, 96°21′—112°04′E, 是中国重要的农业经济区<sup>[20]</sup>。该区域的地形以山地和高原为主, 西北临青藏地区, 海拔高度由西北向东南递减, 属亚热带季风气候区, 干湿分明, 受其复杂的地形地貌和气候的影响, 降水量的年际变化较大, 降水格局分配不均, 促使旱涝灾害时常发生<sup>[21]</sup>。研究区域范围及地面气象站点分布如图 1 所示。



注: 基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1719 号的标准地图制作, 底图未做修改, 下图同。

图 1 西南地区范围及气象站点分布

Fig. 1 The extent and distribution of meteorological stations in southwest China

1.2 数据来源及预处理

采用 2001—2019 年 TRMM 3B43 (Version7) 及 GPM IMERG Final Precipitation (GPM\_3 IMERG) 作为遥感降水数据源, 来源于美国国家航空航天局 NASA 数据共享网站 (<https://trmm.gsfc.nasa.gov/>)。其中, TRMM 空间分辨率为 0.25°×0.25° (约 27.5 km×27.5 km), 时间分辨率为 1 个月, 覆盖范围

为 50°S—50°N, 180°E—180°W; GPM 空间分辨率为 0.1°×0.1° (约 11 km×11 km), 时间分辨率为 1 个月, 空间范围为 90°S—90°N, 180°E—180°W, 数据格式为 HDF5。本文数据均采用 UTM 投影坐标系, 预处理过程主要包括投影转换、格式转换、单位标准化、裁剪等预处理操作。

气象数据从中国气象局国家气象中心 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>) 获取, 共计 22 800 个观测值, 包括 2001—2019 年西南地区内共 100 个地面气象站点的每月降水量数据。预处理过程主要包括无效值剔除、缺失值插补等, 并统计得到年际降水总值、降水平均值、降水最小值、降水最大值等。2001—2019 年气象站点年际降水数据情况如表 1 所示。

2 评价指标与研究方法

2.1 遥感降水产品适用性评价指标

引入皮尔逊相关系数 ( $R$ )、决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE)、相对误差 (BIAS) 来评估遥感降水产品在西南地区的可靠性。其中  $R, R^2$  表示影像数据与实测数据之间的线性相关程度, 其绝对值在 0~1, 值越大相关性越高; RMSE 表明误差的整体水平, 其值越小表明模拟数据与实测数据越接近; BIAS 反映模拟数据与实测数据的偏离程度, 取值越接近 0 数据越精确, 对于  $BIAS > 0$  表示高估,  $BIAS < 0$  表示低估<sup>[22-23]</sup>。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y') (x_i - x')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y')^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$
 (1)

$$R^2 = \frac{|\sum_{i=1}^n (y_i - y') (x_i - x')|^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y')^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$
 (2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$
 (3)

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n y_i} - 1 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$
 (4)

式中:  $y_i$  表示第  $i$  个气象站实测数据值;  $y'$  为气象站实测数据平均值;  $x_i$  表示第  $i$  个气象站所对应位置的遥感影像数据值;  $x'$  为遥感影像数据的平均值;  $n$  表示研究区气象站点的个数。

表 1 2001—2019 年气象站点年际降水数据情况

Table 1 Interannual precipitation data of meteorological stations in 2001—2019

序号	站点	省份	最小值/ mm	最大值/ mm	平均值/ mm	序号	站点	省份	最小值/ mm	最大值/ mm	平均值/ mm
1	石渠	四川	364.30	826.70	609.58	51	思茅	云南	774.50	1947.80	1420.57
2	若尔盖	四川	464.80	849.30	663.36	52	元江	云南	375.00	1013.90	763.49
3	甘孜	四川	472.00	859.40	669.88	53	江城	云南	1483.40	2519.90	2150.78
4	班玛	青海	442.60	820.20	653.94	54	砚山	云南	705.50	1255.00	990.94
5	色达	四川	461.60	899.00	683.86	55	文山州	云南	684.70	1184.30	1009.77
6	道孚	四川	433.40	789.70	640.57	56	广元	四川	678.70	1222.10	943.95
7	阿坝	四川	541.70	918.60	712.81	57	万源	四川	897.50	1767.30	1303.16
8	马尔康	四川	557.80	1069.60	823.88	58	阆中	四川	593.60	1417.70	1024.14
9	红原	四川	508.10	993.30	758.67	59	巴中	四川	657.30	1729.30	1136.05
10	小金	四川	530.70	805.20	642.83	60	达县	四川	889.70	1693.50	1243.16
11	松潘	四川	560.50	912.10	739.41	61	奉节	重庆	646.20	1540.10	1018.16
12	温江	四川	610.90	1343.30	921.57	62	遂宁	四川	549.80	1311.00	971.43
13	都江堰	四川	746.60	1968.20	1141.89	63	南充	四川	714.80	1220.70	1029.59
14	新龙	四川	497.80	825.60	656.76	64	万县	重庆	842.10	1717.60	1154.46
15	理塘	四川	576.40	949.10	749.87	65	沙坪坝	重庆	814.80	1452.10	1156.82
16	资阳	四川	542.20	1192.10	864.86	66	彭水	四川	832.50	1702.60	1201.81
17	稻城	四川	405.90	828.90	646.64	67	桐梓	贵州	666.90	1402.30	969.71
18	康定	四川	712.90	1002.20	875.66	68	叙永	四川	784.20	1666.70	1138.77
19	汉源	四川	604.70	958.30	747.53	69	酉阳	重庆	954.40	1737.60	1341.98
20	乐山	四川	768.90	1483.10	1189.78	70	毕节	贵州	665.40	1157.90	875.60
21	得荣	四川	225.40	515.70	352.50	71	湄潭	贵州	711.10	1370.80	1075.72
22	木里	四川	576.80	999.40	779.36	72	思南	贵州	764.20	1417.00	1067.55
23	九龙	四川	763.80	1097.00	922.89	73	铜仁	贵州	898.80	1701.50	1273.01
24	越西	四川	803.90	1276.00	1091.22	74	黔西	贵州	545.10	1288.10	906.87
25	昭觉	四川	738.50	1367.80	1032.18	75	安顺	贵州	796.30	1578.30	1184.09
26	雷波	四川	477.00	1202.20	866.96	76	贵阳	贵州	735.20	1562.00	1098.93
27	宜宾	四川	644.20	1405.50	999.05	77	凯里	贵州	776.10	1651.90	1188.31
28	中甸	云南	421.60	854.10	605.14	78	三穗	贵州	771.60	1484.20	1103.08
29	维西	云南	698.60	1266.90	915.44	79	兴义	贵州	850.50	1618.00	1227.06
30	盐源	四川	539.00	919.90	746.28	80	望谟	贵州	803.00	1804.00	1218.58
31	西昌	四川	558.20	1284.30	995.41	81	罗甸	贵州	846.10	1528.10	1150.76
32	昭通	云南	317.60	925.10	674.05	82	独山	贵州	905.70	1541.60	1235.32
33	怒江州	云南	622.40	1283.40	937.51	83	榕江	贵州	824.60	1738.90	1222.09
34	丽江	云南	655.00	1165.40	940.27	84	融安	广西	1225.70	2347.50	1883.12
35	华坪	云南	738.40	1420.00	1068.86	85	桂林	广西	1254.30	3012.00	1953.13
36	会理	四川	793.80	1380.40	1107.19	86	广南	云南	714.00	1296.80	1007.54
37	会泽	云南	573.70	980.00	757.66	87	凤山	广西	1041.30	2420.90	1542.66
38	威宁	贵州	619.30	1313.90	875.16	88	河池	广西	973.70	2022.70	1433.87
39	腾冲	云南	1174.90	1867.80	1459.04	89	都安	广西	1174.40	2290.90	1734.46
40	保山	云南	663.30	1368.30	931.68	90	柳州	广西	940.60	1997.90	1504.78
41	大理	云南	695.30	1364.80	986.38	91	蒙山	广西	1381.20	2366.00	1818.61
42	昆明	云南	565.80	1191.70	953.49	92	贺县	广西	1154.80	2192.90	1622.02
43	盘县	贵州	660.20	1828.40	1228.45	93	那坡	广西	1071.60	1849.40	1348.75
44	景东	云南	723.30	1504.30	1047.65	94	百色	广西	729.80	1534.00	1128.89
45	玉溪	云南	581.30	1183.50	844.20	95	靖西	广西	1000.10	2211.30	1610.61
46	宜良	云南	429.80	1274.70	848.46	96	田东	广西	838.20	1502.70	1210.38
47	泸西	云南	522.30	1096.70	855.19	97	平果	广西	1037.00	1750.80	1330.69
48	耿马	云南	916.60	1757.10	1258.94	98	来宾	广西	923.00	1951.10	1361.41
49	临沧	云南	707.60	1368.60	1095.65	99	梧州	广西	1089.20	2006.40	1509.90
50	澜沧	云南	1136.00	1919.30	1584.35	100	南宁	广西	906.30	1987.50	1301.97

注：(1)最小值、最大值分别指 2001—2019 年中降水量最小年份的年际降水总值；(2)平均值指 2001—2019 年年际降水总值的平均值。



## 2.2 空间分布分析

变异系数法可以反映长时序数据的相对变化程度,是一种衡量目标数据对整体影响程度的客观方法,将采用变异系数法来研究遥感年降水数据的空间分布变化与稳定性<sup>[24]</sup>。其计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma}{GPM'} \quad (5)$$

式中:CV 为遥感降水数据的变异系数; $\sigma$  为像元的标准差; $GPM'$  为像元的平均值。CV 值越大,波动变化越大,说明该地区降水量在时序上不稳定;CV 值越小,波动变化越小,说明该地区降水量比较均匀,空间差异小。

## 2.3 变化趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析作为一种可靠的非参数统计的计算方法,相比一元回归趋势分析法,其结果不受数据缺失的影响,但由于本身是基于中值的计算,因而不能实现序列趋势的显著性判断<sup>[25]</sup>。而 Mann-Kendall 检验不受异常值的干扰,能够判断序列的突变点以及每个区间的趋势情况,且能够对趋势分析结果进行显著性判断,因此在气象、水文等领域的趋势检验和突变检验中得到广泛应用<sup>[26]</sup>。因此,将使用 Theil-Sen Median 趋势分析结合 Mann-Kendall 检验来研究西南地区长时间序列的年降水变化趋势。

对于时间序列数据  $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  Theil-Sen Median 趋势的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (6)$$

式中:Median 为取中值函数; $j, i$  为时间序列; $\beta$  为趋势分析结果,当  $\beta > 0$  时,时间序列呈上升趋势,反之呈下降趋势。

Mann-Kendall 趋势检验法的计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (9)$$

sgn 为符号函数,在给定显著水平  $\alpha$  下,当  $|Z| > \mu_{1-\alpha/2}$  表示研究的时间序列数据在  $\alpha$  水平上显著性变化。

## 2.4 变化可持续性分析

Hurst 指数法是表征长时间序列信息持续性的

有效方法,在水文、植被、干旱等领域中广泛应用于对各要素的未来趋势预测<sup>[27]</sup>。将采用重标极差( $R/S$ )分析方法来获取 Hurst 指数,研究西南地区基于遥感降水产品在未来的降水变化趋势。

其基本原理为:设时间序列  $|\xi(t)|, t=1, 2, 3, \dots, n$  对任意正整数  $\tau \in [1, n]$  存在极差  $R$ 、标准差  $S$ ,满足公式(10)时,说明分析的时间序列存在 Hurst 现象。

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (C\tau)^H \quad (10)$$

式中: $H$  即为 Hurst 指数。当  $0 < H \leq 0.4$  时,表现为反向持续性; $0.4 < H \leq 0.5$  时,表现为弱反向持续性; $0.5 < H \leq 0.6$  时,表现为弱持续性; $0.6 < H \leq 0.8$  时,表现为中持续性; $0.8 < H \leq 1$  表现为强持续性。

## 3 结果与分析

### 3.1 遥感降水产品适用性评价

3.1.1 多年平均尺度适用性评价 图 2 为两种遥感降水产品多年平均降水的空间分布,TRMM 降水范围为 505~2 406 mm, GPM 降水范围为 470~2 333 mm。从整体的降水空间分布上看,两种遥感降水数据的总体降水趋势基本一致,表现为从西北到东南逐渐增多。从降水空间细节分布上看,TRMM 在降水量明显减少的范围内出现少量像元降水量较高的现象,而 GPM 在不同地区的降水量变化上表征较为平滑,这可能是因为 GPM 的空间分辨率优于 TRMM,因此 GPM 的降水空间细节纹理特征表现能力更强。降水量较少的地区主要集中四川的西部高原地区、云南中部和东北部地区以及贵州西北部地区,其降水量少于 800 mm;降水量较多的地区主要分布在四川的盆地中西部、云南西南部、贵州东南部、重庆和广西等地区,其降水量高于 1 200 mm。

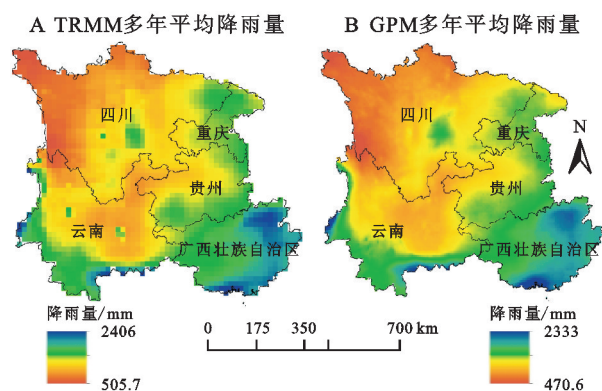


图 2 TRMM 与 GPM 多年平均降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of TRMM and GPM multi-year average precipitation

通过 100 个气象站实测数据分别评估两种遥感

降水产品在西南地区的适用性,图3可以看出,TRMM与实测数据的 $R^2$ 为0.845,BIAS为0.072,RMSE为152.436 mm;GPM与实测数据 $R^2$ 为0.852,BIAS为0.066,RMSE为146.912 mm。从 $R^2$ 上看,GPM与TRMM仅相差了0.007,这反映出两种数据与实测数据在西南地区内均表现出良好的一

致性,且差异性相对较小;此外,TRMM与GPM的BIAS均为正值,说明两者对于该地区的多年平均降水量均存在高估现象,但TRMM的高估现象更明显;从RMSE上看,GPM(146.912 mm)的RMSE小于TRMM(152.436 mm),表明GPM在多年平均尺度上的准确性要高于TRMM。

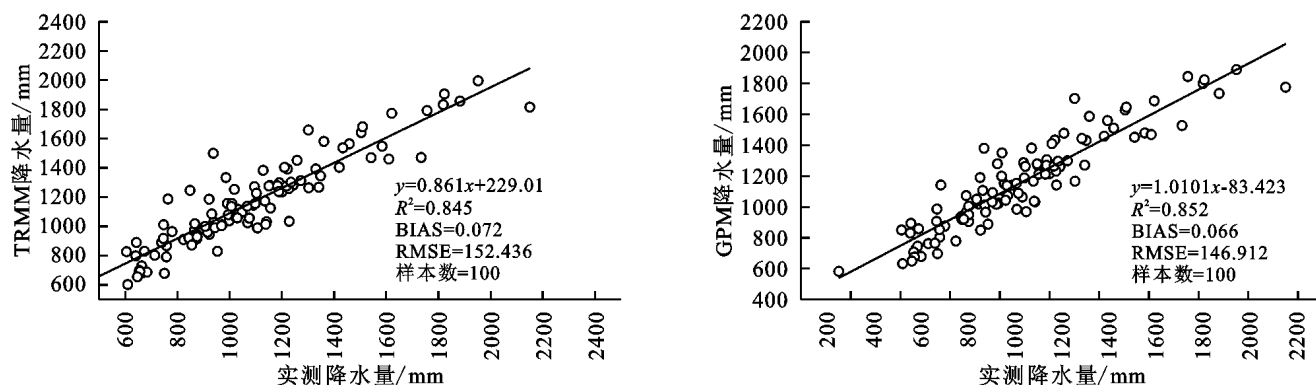


图3 TRMM,GPM多年平均降水数据分别与实测多年平均降水数据对比

Fig. 3 The multi-year average precipitation data of TRMM and GPM are compared with the measured multi-year average precipitation data and scatter plots

3.1.2 年际尺度适用性评价 通过克里金插值将实测数据进行空间化,由图4—6可以看出,两种数据在年际尺度的空间分布上与实测数据基本一致,没有出现差异性过大的降水范围,但在大部分年份中,TRMM在云南中部地区出现了个别细小范围的高降水区域,而GPM并无显现出同样的区域。从影像的数据质量上看,GPM的降水细节特征相较于TRMM的表现更为明显。2001—2019年西南地区的降水在空间上分布极不均匀,在时间上分布也不稳定。从空间维度上看,西南地区的西北部及中部地区长年降水最少,而东南部地区长年降水较为充沛;在时间维度上,四川、重庆、贵州等局部地区降水时多时少,并无明显的规律。

以100个地面气象站点的年均降水量作为该研究区域同期的实际降水情况,并提取对应气象站点处同期的两种遥感降水产品。3种数据19年的年均降水量(图7)表明,2001—2019年西南地区的年均降水量基本稳定在900~1200 mm,其中,2009年和2011年是西南地区较为干旱的年份,而较为湿润的年份为2008年、2015年以及2017年。19年间3种降水数据的变化趋势整体趋于一致,相较于实测数据,TRMM和GPM均存在高估现象,但除2003年、2010年、2014年及2017年等个别年份外,TRMM较GPM的高估现象更为明显。

将两种遥感降水产品分别与实测数据进行精度

验证,图8可以看出,TRMM和GPM在三项指标上整体上曲线变化趋于一致。除2003年、2011年、2014年等个别年份外,两种数据在随时间变化均表现出 $R^2$ 为上升趋势时,BIAS与RMSE都呈下降趋势;反之, $R^2$ 为下降趋势时,BIAS与RMSE都呈上升趋势,这说明了当遥感降水产品与实测数据相关性更高时,其偏离程度更高,模拟效果更佳。而在表现异常的个别年份中,其异常表现主要为当 $R^2$ 为降低趋势时,BIAS也呈下降趋势,TRMM的异常表现与GPM相比更为突显,原因可能为受到气候干旱的影响,西南地区的降水量微弱,而GPM在微量降水的探测上更具优势<sup>[28]</sup>,因此相比TRMM,GPM与实测数据的偏离程度更低。

对于相关性指标,两种遥感降水产品在年际尺度上与实测数据均有着很好的相关性和一致性。其中, $R^2$ 集中在0.669~0.909,均在2003年和2009年表现较低,在2002年表现较高,GPM(0.696~0.909)的 $R^2$ 明显优于TRMM(0.669~0.871);BIAS(0.047~0.095)均大于0,表明在年际尺度上两者都存在高估现象,而TRMM的高估现象更为突显;尽管两种遥感降水产品与实测数据都存在一定的偏离程度,但GPM(153.125~208.484 mm)的RMSE明显小于TRMM(177.773~216.292 mm),主要可能是因为GPM载荷双频降水雷达和GPM微波成像仪,在微量降水和固态降水方面有更强的探测能力<sup>[29]</sup>。



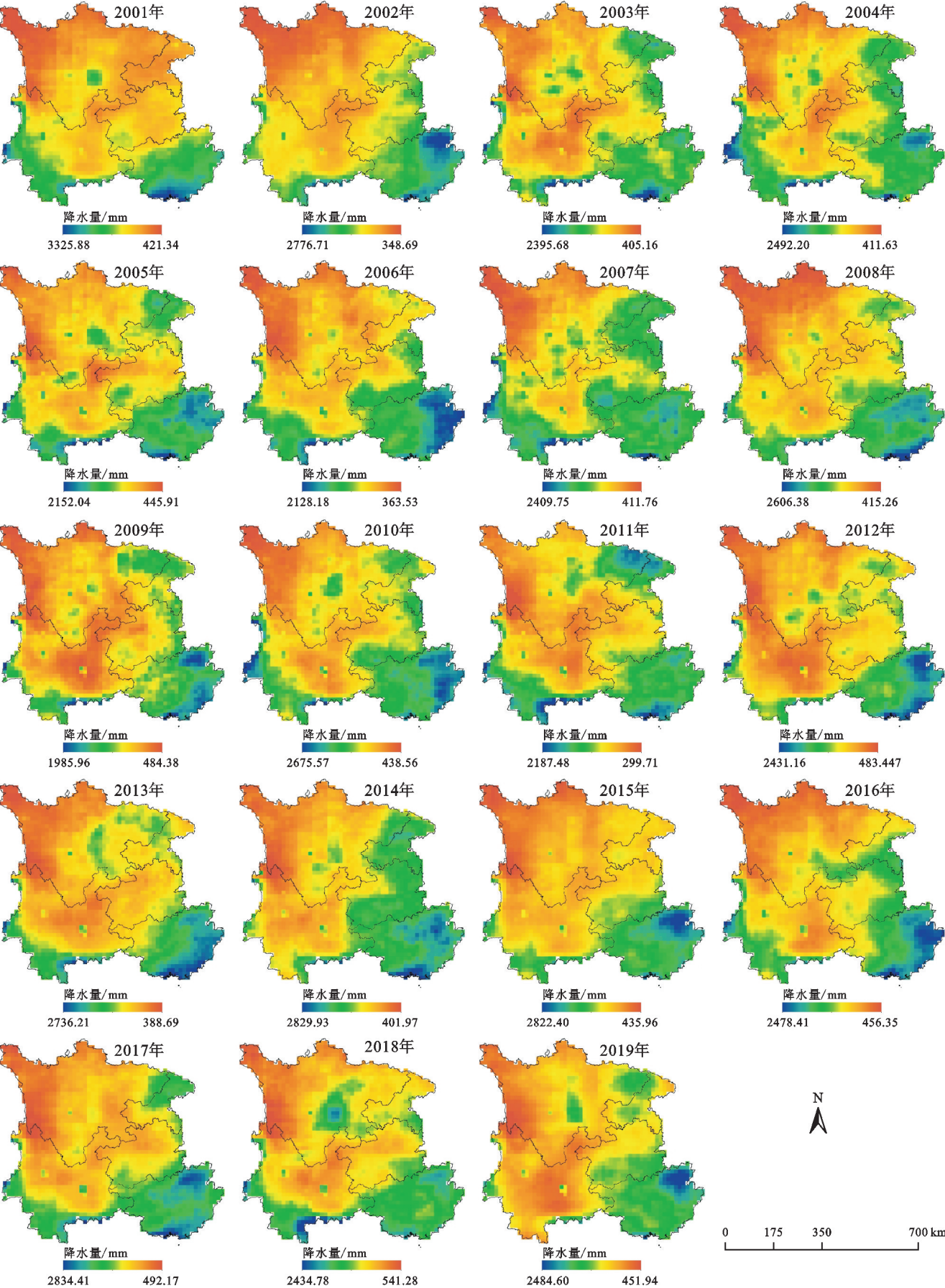


图 4 2001—2019 年 TRMM 年际降水数据空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of TRMM interannual precipitation data from 2001 to 2019



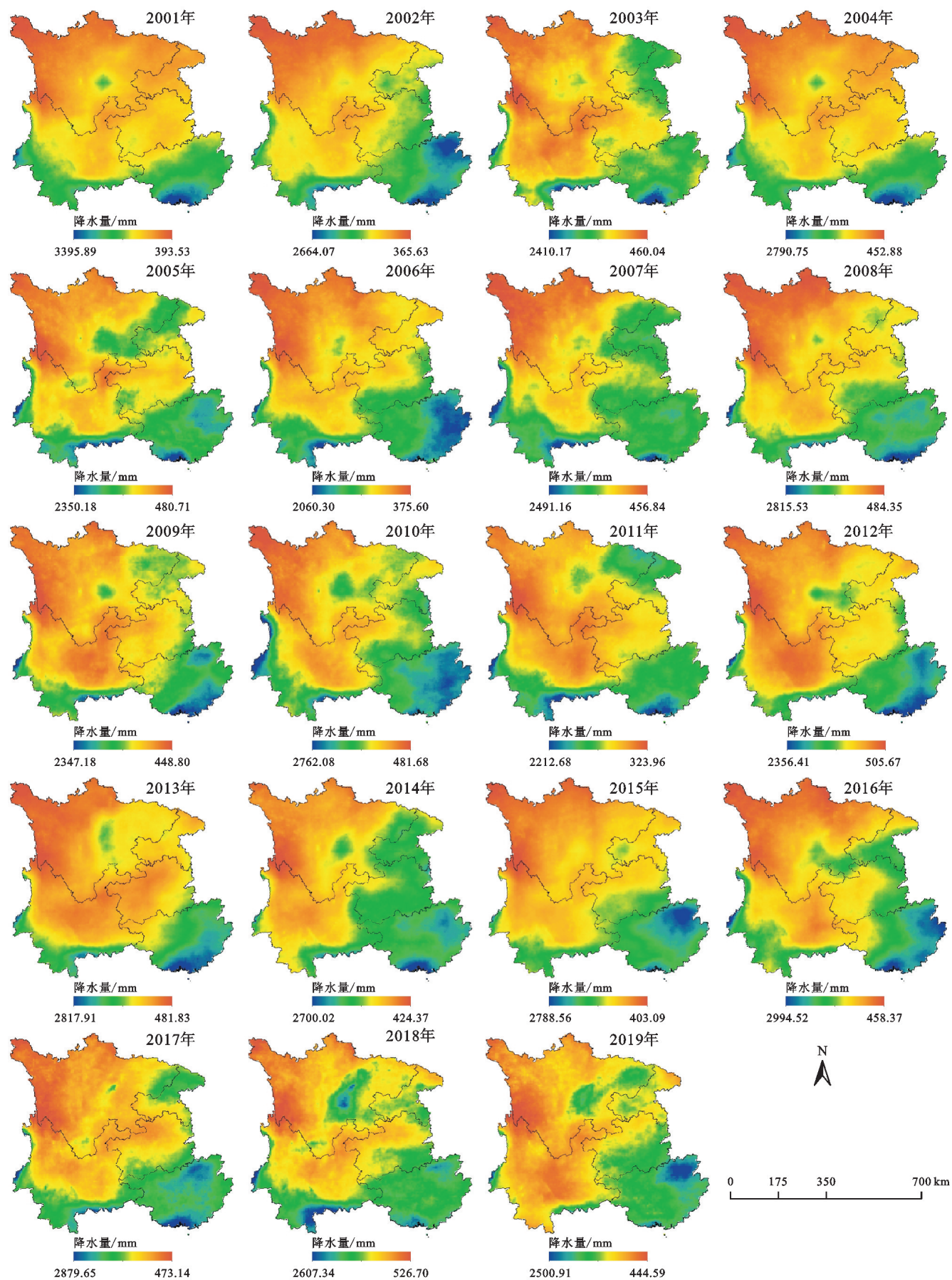


图 5 2001—2019 年 GPM 年际降水数据空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of GPM interannual precipitation data from 2001 to 2019



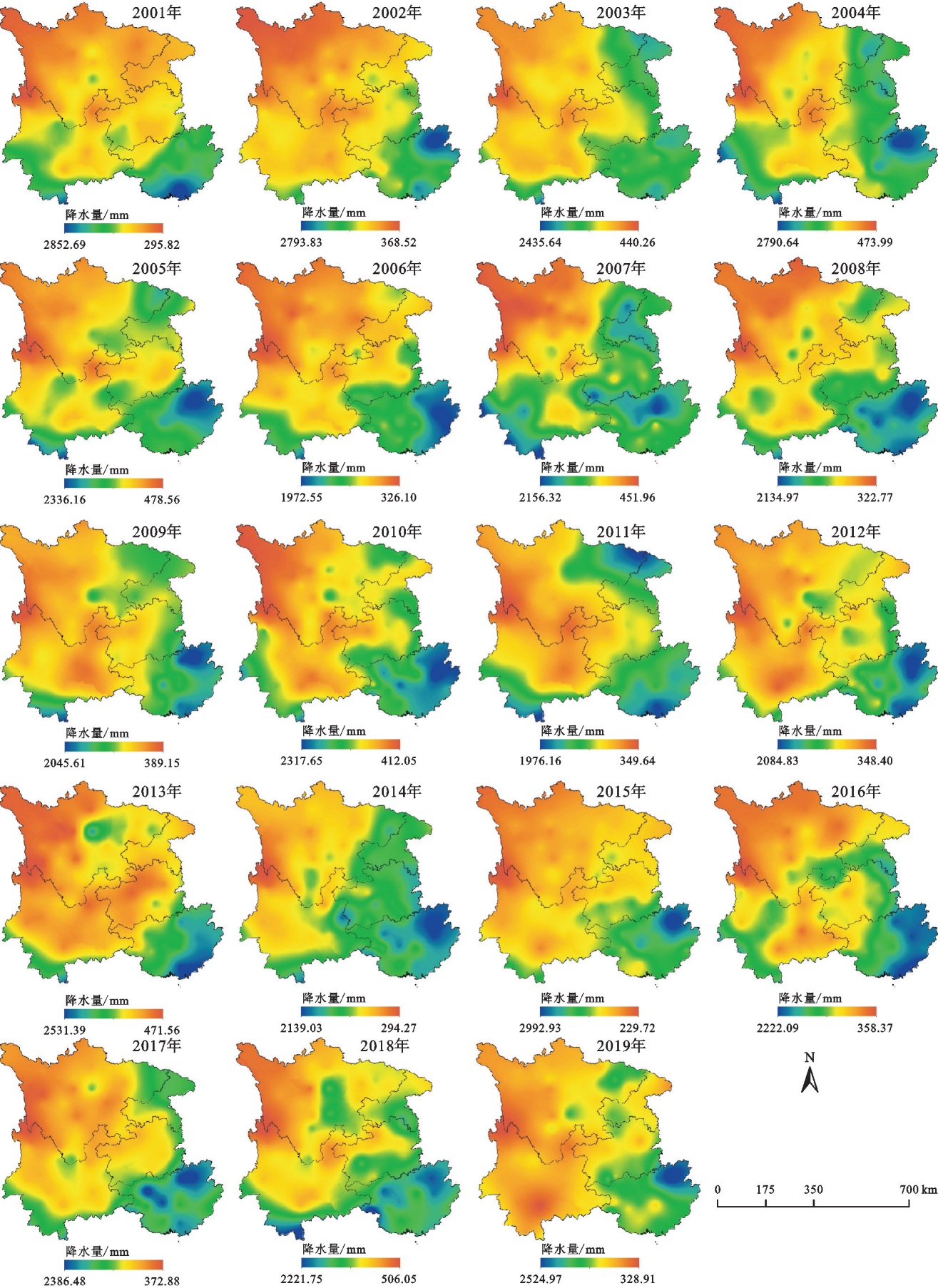


图 6 2001—2019 年实测年际降水数据空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of measured interannual precipitation data from 2001 to 2019

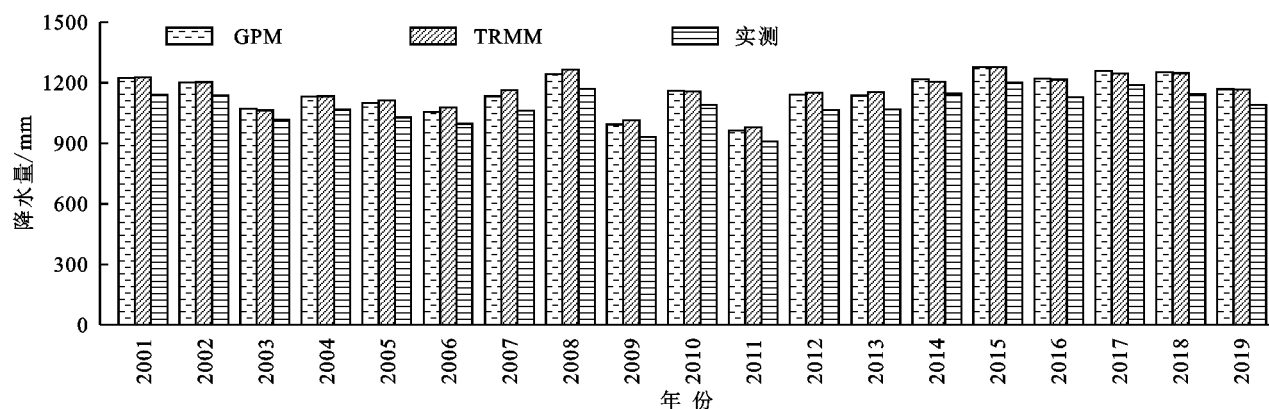
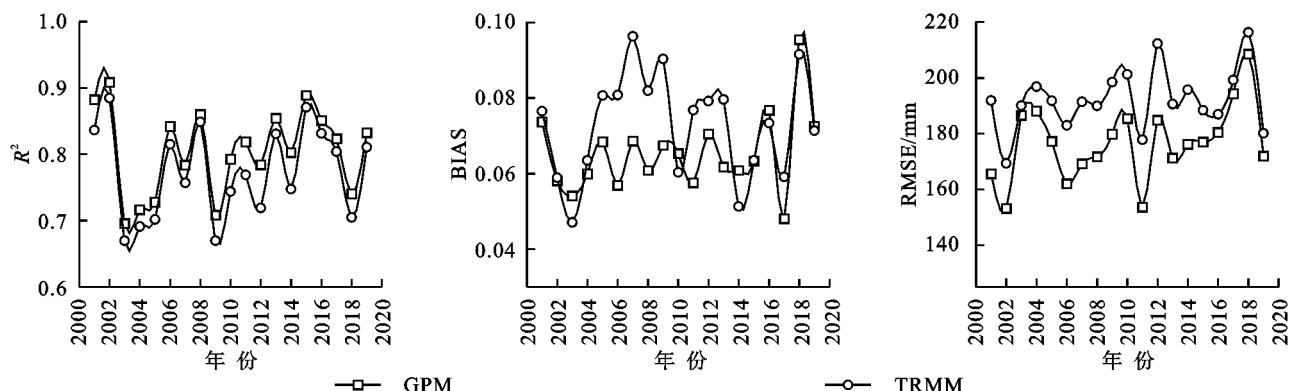


图 7 TRMM, GPM 年均降水量和实测年均降水量

Fig. 7 Comparison of the average annual precipitation of TRMM and GPM with the measured average annual precipitation

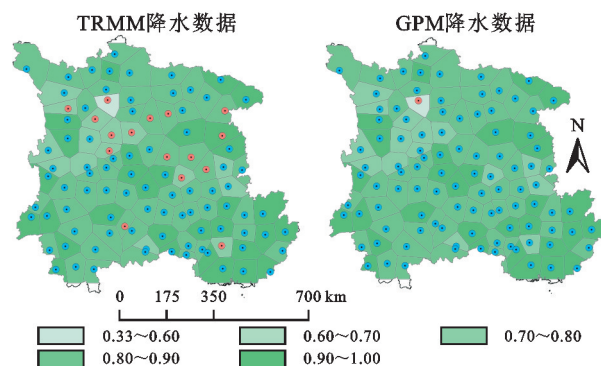
图 8 实测数据与两种降水数据的  $R^2$ , BIAS, RMSE (2001—2019 年)Fig. 8  $R^2$ , BIAS, and RMSE of measured and two types of precipitation data (2001—2019)

### 3.1.3 遥感降水产品在气象站点尺度适用性评价

分别计算每个气象站点 19 个年际实测数据与 TRMM, GPM 的皮尔逊相关系数, 并对其进行显著性检验。由图 9 可以看出两种遥感降水产品与实测数据在西南地区东南部站点的相关性优于西北部, 并且所有站点都通过了 5% 的显著性检验 ( $|R| > 0.456$ ), 但 GPM 与实测数据之间有着更高的相关性, 而 TRMM 相较于 GPM 有着较多站点没有通过 1% 显著性检验 ( $|R| > 0.575$ )。其中, TRMM 与实测数据的  $R$  为 0.475~0.968, 有 55% 的站点高于 0.8; 而 GPM 与实测数据的  $R$  为 0.535~0.963, 有 90% 的站点高于 0.8, 且 99% 的站点通过了 1% 显著性检验。两种数据在该研究区域各个站点处的降水量与实测降水量之间具有较好的相关性的一致性, 但整体上 GPM 的精度更优。

表 2 统计了相关系数低于 0.7 的地面气象站基本信息, 整体上 GPM 与实测数据的相关性要优于 TRMM。其中, GPM 与 TRMM 在四川小金县站点处的表现均不佳, 并且结合实测数据与降水数据的  $R$  空间分布 (图 9) 表明了 TRMM 在四川、贵州及云南部分地区的  $R$  较低, 其主要原因是地形、地势的影响, 四川地势呈西高东低, 地貌复杂, 邻接青藏高原, 其中小金县地形狭长, 处于青藏高原东南边缘, 海拔

较高, 以及云南地势高低错落, 地形主要为山地与山间盆地, 贵州地区的地貌以高原山地居多, 地势起伏严重。随着遥感卫星传感器空间分辨率的提升, 卫星获取地表细节的能力也得以提高, 使其在降水观测上受到地势的影响逐渐减小<sup>[30]</sup>, 而 GPM 的空间分辨率高于 TRMM, 模拟降水的效果更佳。

图 9 站点实测数据与 TRMM, GPM 数据的  $R$  分布Fig. 9  $R$  distribution between the measured data of the site and the TRMM and GPM data

### 3.2 降水空间分布分析

通过变异系数法逐像元对研究区 2001—2019 年 GPM 进行变异特征分析, 并将结果分为 5 个等级 (表 3)。由图 10 可知, 19 a 间西南地区整体降水波动变化并



不突出,主要表现出较低波动变化和中等波动变化,各占全域的 40.52%和 47.02%,此外,低波动变化与高波动变化区域仅占总面积的 1.79%和 0.35%。较低波动变化主要分布在川西高原和川东盆地、云南西北部和南部及广西西南部,其中川东盆地、川西高原和云南西北部长期降水稀少,而云南南部和广西西南部长年降水充沛;中等波动变化主要分布在云南西部、广西东南部、重庆、云黔交界处及四川山地与盆地交界处,这些地区主要受到地势起伏以及海洋湿度的影响,降水波动较为明显;较高波动变化主要分布在重庆南部、贵州中部以及黔桂交界处,这些地区地貌复杂,地势垂直落差较大,易受气流的影响,导致降水波动变化大。

表 2 相关系数低于 0.7 的地面气象站基本信息  
Table 2 Basic information of ground weather stations with correlation coefficient less than 0.7

站点	省份	经度	纬度	$R_{GPM}$	$R_{TRMM}$
小金	四川	102.21	31.00	0.535	0.551
新龙	四川	100.19	30.56	0.780	0.686
资阳	四川	104.39	30.07	0.862	0.673
康定	四川	101.58	30.03	0.740	0.667
汉源	四川	102.41	29.21	0.761	0.599
乐山	四川	103.45	29.34	0.730	0.546
越西	四川	102.31	28.39	0.756	0.496
遂宁	四川	105.33	30.30	0.801	0.480
叙永	四川	105.26	28.10	0.851	0.668
彭水	四川	108.10	29.18	0.954	0.601
万县	重庆	108.24	30.46	0.870	0.663
宜良	云南	103.10	24.55	0.881	0.475
桐梓	贵州	106.50	28.08	0.840	0.594
湄潭	贵州	107.28	27.46	0.803	0.647
黔西	贵州	106.01	27.02	0.751	0.696

表 3 降水变异程度分级  
Table 3 Grading of precipitation variability

CV	变异程度	面积占比/%
$CV \leq 0.05$	低波动变化	1.79
$0.05 > CV \leq 0.10$	较低波动变化	40.52
$0.10 > CV \leq 0.15$	中等波动变化	47.02
$0.15 > CV \leq 0.20$	较高波动变化	10.32
$CV > 0.20$	高波动变化	0.35

3.3 降水变化趋势分析

采用 Theil-Sen Median 趋势耦合 Mann-Kendall 检验对研究区的降水变化趋势划分为 4 类(表 4),19 年间西南地区降水变化趋势主要表现为增加,各变化趋势面积占比为轻微增加(53.71%)>显著增加(29.46%)>轻微减少(16.78%)>显著减少(0.05%),其中非显著变化面积占 70.49%。结合 2001—2019 年西南地区降水变化趋势(图 11)可以看出,西南地区整体上呈现出年降水量增加的趋势,降水增加的面积为 83.71%,说明

经过早期 2009—2012 年的大旱之后,西南地区的干旱气候有所缓解,降水量逐渐增加,这也与年际降水量变化趋势情况基本一致。重庆北部、贵州北部、云南中部及四川西部地区的降水量呈现轻微减少趋势,也基本符合这些地区稳定的降水波动变化情况。降水量显著增加的地区主要分布在川北高原和盆地交界处、云黔交界处、贵州南部及广西北部,这些地区的年际降水量也表现出较高的波动变化。

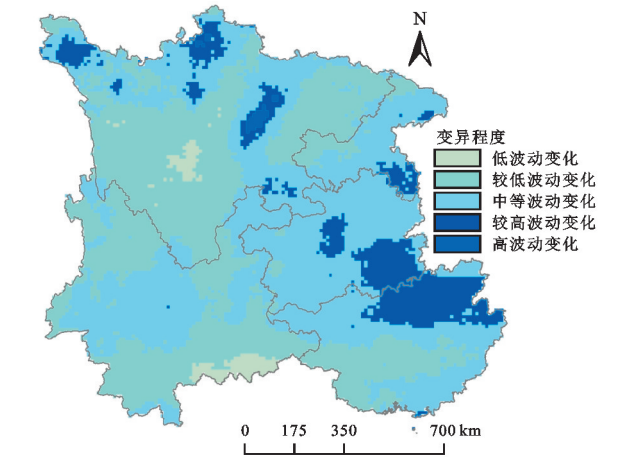


图 10 2001—2019 年西南地区降水变异程度

Fig. 10 Precipitation variability in Southwest China from 2001 to 2019

表 4 降水变化趋势分级

Table 4 Classification of precipitation trends

$\beta$	$ Z $	降水变化趋势	面积占比/%
$\beta < 0$	$ Z  > 1.96$	显著减少	0.05
$\beta < 0$	$ Z  \leq 1.96$	轻微减少	16.78
$\beta > 0$	$ Z  \leq 1.96$	轻微增加	53.71
$\beta > 0$	$ Z  > 1.96$	显著增加	29.46

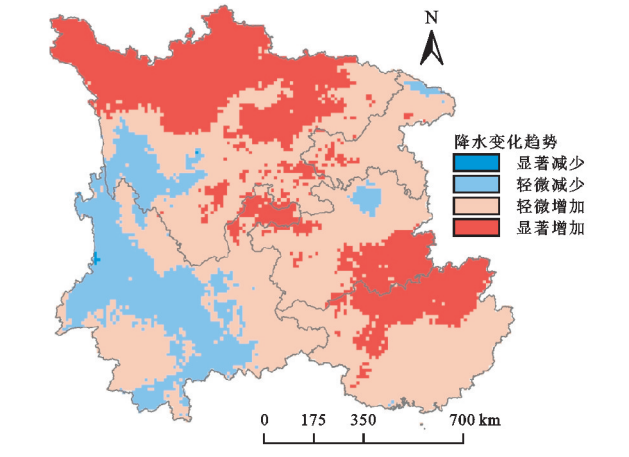


图 11 2001—2019 年西南地区降水变化趋势

Fig. 11 Precipitation trends in Southwest China from 2001 to 2019

3.4 降水变化可持续性分析

通过计算 Hurst 指数将研究区降水变化可持续性强度划分为 5 个等级,由表 5 可知,西南地区大部

分区域(75.47%)的降水变化趋势都具有持续性,其中,弱持续性地区(50.38%)>中持续性地区(24.30%)>强持续性地区(0.79%)。从图 12 来看,西南地区整体上呈现出降水的正向持续性,其中大部分地区降水变化趋势为弱持续性;强持续性主要分布在广西南部、临海区域,对海洋气流较为敏感,从而降水的可能性极大提高;中持续性地区主要分布在西南地区的中部、北部以及东部地区。而反向持续性地区主要分布在四川高原地区、广西东部、云南西北部、川渝交界处、黔桂交界处及桂黔交界处。

表 5 降水变化可持续性强度分级  
Table 5 Grading of the intensity of the sustainability of precipitation changes

Hurst	持续性强度	面积占比/%
0.0~0.4	强反持续性	7.12
0.4~0.5	弱反持续性	17.41
0.5~0.6	弱持续性	50.38
0.6~0.8	中持续性	24.30
0.8~1.0	强持续性	0.79

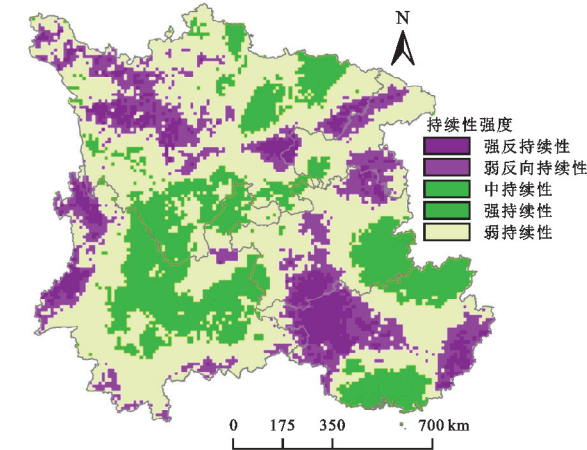


图 12 2001—2019 年西南地区降水变化可持续性强度  
Fig. 12 Sustainability intensity of precipitation change in Southwest China from 2001 to 2019

3.5 未来降水变化趋势分析

通过耦合 2001—2019 年研究区降水变化趋势和降水变化持续性来预测西南地区的未来降水变化趋势。根据  $\beta$  指数、 $|Z|$  指数和 Hurst 指数将西南地区的未来降水变化趋势分为 5 个等级(表 6),西南地区 62.24% 的区域未来降水趋势会持续增加,其中,39.45% 地区的降水轻微增加,22.79% 地区的降水显著增加。此外,西南地区的 13.23% 区域未来降水持续性减少,仍有 24.53% 区域的未来降水趋势无法确定。结合西南地区未来降水变化趋势(图 13)可知,未来降水持续性显著增加的区域主要分布在西南地区北部、中部及中东部,未来降水持续性减小的区域主要分布在西南地区西南部。从各地区来看,四川北

部未来降水变化趋势呈持续性显著增加,南部未来降水变化趋势以持续性轻微增加为主,未来降水呈持续性减小趋势的区域主要分布在川西高原中部。正是因为川西高原降水不稳定,才导致该地区的降水并不充沛,而川东盆地气候常年稳定,其未来降水基本上呈现出增加的趋势。贵州、广西、重庆未来降水变化趋势均以增加为主,川渝交界、黔桂交界及桂黔交界部分地区未来降水趋势无法确定。云南未来降水变化趋势均为轻微变化,其中未来降水变化呈减小趋势的区域主要分布在云南中部地区,西北部地区未来降水变化趋势则无法确定。

表 6 未来降水变化趋势分级  
Table 6 Classification of future precipitation trends

$\beta$	$ Z $	Hurst	未来降水变化趋势	面积占比/%
$\beta < 0$	$ Z  > 1.96$	$> 0.5$	持续性显著减小	0.01
$\beta < 0$	$ Z  \leq 1.96$	$> 0.5$	持续性轻微减小	13.22
$\beta > 0$	$ Z  \leq 1.96$	$> 0.5$	持续性轻微增加	39.45
$\beta > 0$	$ Z  > 1.96$	$> 0.5$	持续性显著增加	22.79
—	—	$< 0.5$	无法确定	24.53

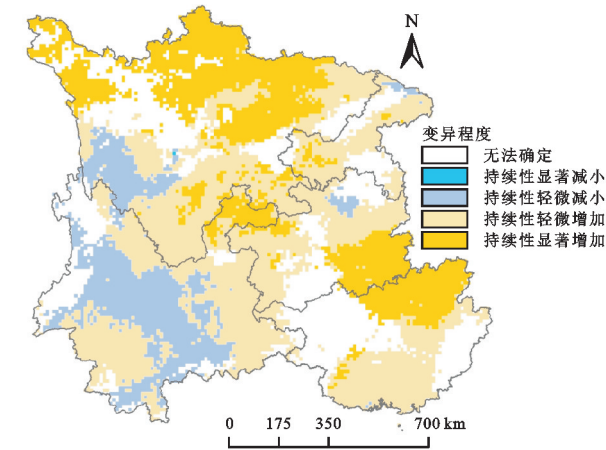


图 13 西南地区未来降水变化趋势  
Fig. 13 Trends of future precipitation in Southwest China

4 结论

(1) TRMM 和 GPM 在西南地区与实测数据均具有较好的一致性和适用性,但相比 TRMM,GPM 与实测数据的接近程度更高。其中,在多年平均尺度上,GPM 与气象站实测数据间的  $R^2$ 、BIAS、RMSE (0.852,0.066,146.912 mm)明显优于 TRMM 数据;在年际尺度上,GPM 数据整体质量优于 TRMM 数据,并且 TRMM 数据的高估现象更为明显,虽然 GPM 数据的优势在连续年际中并不突出,但在干旱年份对微量降水和固态降水估算上具有显著优势;从气象站点精度来看,GPM 数据与实测数据的相关性高于 0.8 的站点达到了总站点的 90%,并且 99% 的站点都通过了 1% 显著性检验。因此,GPM 数据在



西南地区的适用性更高,更适合作为研究地区降水时空变化特征的基础数据。

(2) 19年间西南地区的降水波动变化并不明显,整体上保持着较低(40.52%)及中等(47.02%)的降水波动变化,降水变化趋势以增加为主,整体呈现偏湿趋势,75.47%的区域降水变化趋势具有正向持续性,则说明未来降水变化仍以增加为主。在对未来降水变化趋势预测中,有62.24%的区域降水趋势会持续增加,13.23%的区域降水趋势会持续减少,其中,云南中部和四川西南部等地区未来降水趋势减少,发生轻旱及以上灾害的可能性较大,而四川北部、贵州东南部和广西北部等地区未来降水呈显著增加趋势,存在一定洪涝风险。

#### 参考文献(References):

- [1] 益言.世界经济论坛发布《2023年全球风险报告》[J].中国货币市场,2023(3):66-72.  
Yi Y. WEF releases global risk report 2023[J]. China Money, 2023(3):66-72.
- [2] 刘洁,黄本胜,陈晓宏,等. GPM 遥感降水产品在广东省的极端降水事件适用性分析[J].南水北调与水利科技:中英文,2023,21(1):87-94.  
Liu J, Huang B S, Chen X H, et al. Applicability analysis of GPM remote sensing precipitation products in extreme precipitation events in Guangdong Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023,21(1):87-94.
- [3] 黎扬兵,张洪波,杨天增,等.基于 MGWR 的渭河流域 TRMM 降水产品空间降尺度分析[J].农业工程学报,2022,38(23):141-151.  
Li Y B, Zhang H B, Yang T Z, et al. A MGWR-based spatial downscaling for TRMM precipitation in the Weihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(23):141-151.
- [4] Liu J, Huang B S, Chen L X, et al. Evaluation of GPM and TRMM and their capabilities for capturing solid and light precipitations in the headwater basin of the Heihe River[J]. Atmosphere, 2023,14(3):453.
- [5] Ali S, Tong D M, Xu Z T, et al. Characterization of drought monitoring events through MODIS-and TRMM-based DSI and TVDI over South Asia during 2001—2017[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019,26(32):33568-33581.
- [6] 吕爱锋,亓珊珊.遥感及再分析降水产品在缺资料干旱内陆盆地的适用性评估[J].地球信息科学学报,2022,24(9):1817-1834.  
Lv A F, Qi S S. Applicability analysis of satellite-based and reanalysis precipitation products in poorly-gauged arid inland basins [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022,24(9):1817-1834.
- [7] 张寒博,杨骥,荆文龙,等.多种特征因子结合 GBDT 的降水数据降尺度方法研究[J].中国环境科学,2023,43(4):1867-1882.  
Zhang H B, Yang J, Jing W L, et al. Downscaling method of precipitation data based on GBDT combined with multiple eigenfactors[J]. China Environmental Science, 2023,43(4):1867-1882.
- [8] 崔路明,王思梦,刘轶欣,等. TRMM 和 GPM 卫星降水数据在中国三大流域的降尺度对比研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(6):1317-1328.  
Cui L M, Wang S M, Liu Y X, et al. Comparative study on downscaling of TRMM and GPM satellite precipitation data in three major river basins in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(6):1317-1328.
- [9] 卢新玉,刘艳,王秀琴,等.新疆地区多源降水融合试验[J].干旱区研究,2020,37(5):1223-1232.  
Lu X Y, Liu Y, Wang X Q, et al. Multisource precipitation data merging experiment in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2020,37(5):1223-1232.
- [10] 李强宇,楚岱蔚,朱晓晨.长三角地区常用遥感降水产品质量评估[J].科学技术与工程,2021,21(12):4801-4810.  
Li Q Y, Chu D W, Zhu X C. Quality evaluation of precipitation products commonly used by remote sensing in the Yangtze River Delta[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(12):4801-4810.
- [11] 薛鹏飞,余钟波,谷黄河.雅鲁藏布江流域 GPM 和 TRMM 遥感降水产品精度评估[J].水电能源科学,2020,38(11):13-16.  
Xue P F, Yu Z B, Gu H H. Accuracy evaluation of GPM and TRMM remote sensing precipitation products in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Water Resources and Power, 2020,38(11):13-16.
- [12] Mahdavi T. Comparison of two products of satellite precipitation (TRMM\_3B42 v7-3-hourly-Research grade) and GPM-IMERG (V06-half-hourly-Early) in the east of lake urmia, Iran[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2023,51(1):43-60.
- [13] Retalis A, Katsanos D, Tymvios F, et al. Comparison of GPM IMERG and TRMM 3B43 products over Cyprus[J]. Remote Sensing, 2020,12(19):3212.
- [14] 王军,谭金凯.气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考[J].地理科学进展,2021,40(5):870-882.  
Wang J, Tan J K. Understanding the climate change and disaster risks in coastal areas of China to develop coping strategies[J]. Progress in Geography, 2021,40(5):870-882.
- [15] 王莺,张强,王劲松,等.21世纪以来干旱研究的若干新进展与展望[J].干旱气象,2022,40(4):549-566.  
Wang Y, Zhang Q, Wang J S, et al. New progress and prospect of drought research since the 21st century[J].

- Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(4): 549-566.
- [16] 卢晓宇, 张静怡, 王玲玲, 等. 综合考虑植被、温度和降水的四川省月尺度伏旱遥感监测[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1145-1157.
- Lu X N, Zhang J Y, Wang L L, et al. Remote sensing monitoring of summer drought at monthly-scale considering vegetation, temperature and precipitation in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1145-1157.
- [17] 刘月璇. 基于多源遥感数据的内蒙古干旱指数模型构建及监测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.
- Liu Y X. Drought index model construction and drought monitoring in Inner Mongolia based on multi-source remote sensing data[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2021.
- [18] 靖娟利, 罗福林, 王永峰, 等. 1998—2017年滇黔桂岩溶区降水时空动态特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 158-165.
- Jing J L, Luo F L, Wang Y F, et al. Spatial and temporal dynamics of precipitation in Dian-Qian-Gui Karst Area from 1998 to 2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 158-165.
- [19] Nouri M, Homaee M. Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran[J]. Meteorological Applications, 2020, 27(2): 1899.
- [20] 贾艳青, 张勃. 基于日 SPEI 的近 55 a 西南地区极端干旱事件时空演变特征[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 474-483.
- Jia Y Q, Zhang B. Spatial-temporal variability characteristics of extreme drought events based on daily SPEI in the southwest China in recent 55 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 474-483.
- [21] 史晓亮, 吴梦月, 丁皓. SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 184-192.
- Shi X L, Wu M Y, Ding H. Difference analysis of SPEI and vegetation remote sensing information in drought monitoring in southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 184-192.
- [22] 窦世卿, 张寒博, 徐勇, 等. TRMM 降水数据在长江流域的降尺度分析与校正[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5): 377-389.
- Dou S Q, Zhang H B, Xu Y, et al. Research on downscaling and correction of TRMM data in the Yangtze River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(5): 377-389.
- [23] 张寒博, 徐勇, 窦世卿, 等. 基于 GWR 模型的长江流域 TRMM 数据降尺度[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 149-155, 162.
- Zhang H B, Xu Y, Dou S Q, et al. TRMM downscaling data of Yangtze based on GWR model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 149-155, 162.
- [24] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.
- Liu X F, Pan Y Z, Zhu X F, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 705-716.
- [25] 肖杨, 周旭, 罗雪, 等. 黔中地区近 60 年潜在蒸散量时空变化特征及主导因素识别[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 190-198.
- Xiao Y, Zhou X, Luo X, et al. Spatiotemporal variation characteristics of potential evapotranspiration and identification of leading factors in central Guizhou in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 190-198.
- [26] 刘慧媛, 邹磊, 邢万里. 1961—2018 年海河流域极端降水时空演变特征[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 1-6.
- Liu H Y, Zou L, Xing W L. Temporal and spatial variation of extreme precipitation in Haihe River Basin during 1961—2018[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 1-6.
- [27] 巩杰, 高秉丽, 李焱, 等. 1960—2020 年黄河流域气候干湿状况时空分异及变化趋势[J]. 中国农业气象, 2022, 43(3): 165-176.
- Gong J, Gao B L, Li Y, et al. Spatiotemporal variation of climate dry-wet condition and its potential trend in the Yellow River Basin from 1960 to 2020[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(3): 165-176.
- [28] 张寒博, 窦世卿, 温颖, 等. 遥感降水数据空间降尺度及干旱时空监测[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 153-160.
- Zhang H B, Dou S Q, Wen Y, et al. Spatial downscaling of remote sensing precipitation data and spatiotemporal monitoring of drought[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 153-160.
- [29] 李茂华. 基于 GPM 卫星降水产品的台风暴雨洪水风险研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- Li M H. Risk Analysis of typhoon rainstorm and flood disaster based on GPM IMERG data[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [30] 黄子立, 吴小飞, 毛江玉. CMIP6 模式水平分辨率对模拟我国西南地区夏季极端降水的影响评估[J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1470-1483.
- Huang Z L, Wu X F, Mao J Y. An evaluation for impacts of the horizontal resolution of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over southwest China[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(6): 1470-1483.