

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 03. 004

# 青藏高原羌塘内流区降水时空特征

王 珂, 王 娜, 雍 斌

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**利用 8 套卫星反演与模式模拟的降水资料及地面实测降水数据, 分析了羌塘内流区 2001—2015 年的降水时空分布特征, 评估了卫星反演与模式模拟降水资料在羌塘内流区的适用性。结果表明: GSMaP\_Gauge 降水资料在羌塘内流区表现出更好的适用性, 其月数据与地面实测降水数据的相关系数达到 0.95, 相对误差、平均绝对误差和均方根误差最低; 羌塘内流区降水空间格局整体上呈现自东南向西北、由南向北逐渐减少的分布规律; 2001—2015 年, 内流区年降水量总体呈现增加趋势, GSMaP\_Gauge 年降水量更接近于内流区真实情况; 年降水主要集中在夏季, 占全年降水的 59% 以上。

**关键词:** 卫星反演; 模式模拟; 降水特征; 羌塘内流区

**中图分类号:** TV122      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004 - 6933(2019)03 - 0025 - 08

**Analysis of spatio-temporal characteristics of precipitation in Qiangtang inner flow area of Qinghai-Tibetan Plateau** // WANG Ke, WANG Na, YONG Bin (*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

**Abstract:** Using eight sets of precipitation data from satellite inversion and model simulation and ground measured precipitation data, the spatio-temporal characteristics of precipitation in Qiangtang inner flow area from 2001 to 2015 were analyzed, and the applicability of precipitation data from satellite inversion and model simulation in Qiangtang inner flow area was evaluated. The results show that the GSMaP\_Gauge precipitation data show better applicability in Qiangtang inner flow area. The correlation coefficient between the monthly data of GSMaP\_Gauge and the ground measured precipitation data is 0.95, and the relative error, average absolute error and root mean square error are the lowest. The spatial pattern of precipitation in the Qiangtang inner flow area shows a basic distribution pattern of decreasing from southeast to northwest and from south to north. From 2001 to 2015, the annual precipitation in the inner flow area shows an increasing trend, and the annual precipitation of GSMaP\_Gauge is closer to the real situation. Annual precipitation is mainly concentrated in summer, accounting for more than 59% of the annual precipitation.

**Key words:** satellite inversion; model simulation; precipitation characteristics; Qiangtang inner flow area

受全球气候变化影响, 降水时空差异问题愈加突出<sup>[1-2]</sup>。降水时空变化的研究需要准确的降水数据, 气象台站的观测数据是目前较为常用的降水数据, 站点观测具有易于操作、定点精准测量的优点<sup>[3]</sup>, 但站点的空间分布易受到地形、气候的影响。青藏高原地区地形复杂、气候高寒多变, 气象站点分布十分有限, 传统的地面站点观测在大范围实时获取青藏高原降水资料方面遇到了极大的困难。随着科技的进步发展, 卫星遥感的数据反演和模式计算等新手段被广泛应用于降水数据的获取<sup>[4-5]</sup>。卫星反演、模式模拟为地面测站稀疏的复杂地形水文过

程的研究提供了可能<sup>[6]</sup>。

很多学者在国内利用卫星反演降水资料和再分析资料研究降水变化特征<sup>[7-10]</sup>。Zhou 等<sup>[11]</sup>对比分析了卫星资料和站点观测的中国夏季降水日变化特征, 结果显示卫星资料基本能够再现站点观测的降水日变化特征; 韩振宇等<sup>[12]</sup>从气候态、不同等级降水量分布以及长期变化等方面分析, 通过与中国 559 个站点观测资料对比, 考察了 APHRODITE 降水资料在中国地区的适用性。卫星反演降水资料在高原复杂气候地形区也得到了广泛的应用<sup>[13-15]</sup>, 白爱娟等<sup>[16]</sup>对比分析了 TRMM3B41RT 资料和气象站实

基金项目: 国家自然科学基金(91547101); 江苏省自然科学基金(BK20161502)

作者简介: 王珂(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事空间关系理论、遥感数字图像处理的研究。E-mail: kewang@hhu.edu.cn

通信作者: 雍斌, 教授。E-mail: yongbin\_hhu@126.com

测降水在青藏高原中部地区的逐日降水量;郝振纯等<sup>[17]</sup>在青藏高原江河源区利用观测台站降水资料对 TRMM 降水数据精度进行了评估,结果表明 TRMM 降水数据有较好的适用性。

羌塘内流区位于具有“世界屋脊”和“亚洲水塔”之称的青藏高原西部,受大气环流和高原地貌特征的影响,形成了独特的高原气候格局,高原降水特征明显<sup>[18]</sup>。关于羌塘内流区降水的研究相对较少,在 20 世纪 70 年代羌塘地区无人区科学考察资料分析表明该区年均降水量约为 50~300 mm<sup>[19]</sup>。Liu 等<sup>[20]</sup>根据 1998 年全球能量与水循环亚洲季风之青藏高原试验(GAME-TIBET)的降水数据初步分析了羌塘流域局部降水时空分布。李兰晖等<sup>[21]</sup>基于羌塘高原及周边地区的观测降水数据、两套卫星降水产品(GPM(IMERGE)与 TRMM(3B43))、两套站点插值降水产品以及一套降水融合产品的降水数据得出,2015 年羌塘高原核心区年均降水为 154.9 mm,约为其东南边缘多年均值的 1/3。卫星降水产品均高估了羌塘降水量,5 套降水产品都不能较为准确地反演羌塘地区降水空间特征。

针对羌塘内流区观测站点降水资料缺乏,核心区降水产品资料与实际降水量不确定性问题,本研究利用羌塘内流区的 5 个气象站点实测降水和 8 套卫星反演与模式模拟的降水资料对其降水时空分布特征进行进一步的研究。通过地面实测降水数据对 8 套降水资料在月尺度上进行精度检验,计算内流

区年降水量和季节降水量,初步评估 8 套降水资料在羌塘内流区的适用性,以期为增强对该地区降水分布特征的理解,以及在缺资料地区反演降水提供科学参考。

## 1 研究区概况

羌塘内流区位于青藏高原的西部,是青藏高原的重要组成部分,坐标为 29.67°N~38.63°N、78.66°E~93.66°E。内流区面积约 70.96 万 km<sup>2</sup>,年均降水量 50~300 mm,80% 以上集中在 6—9 月,气候干冷多变。该区平均海拔为 4 900 m,人口稀少,交通不便,属于典型无人区。高海拔、复杂地形以及恶劣气候导致了该流域内的气象站点分布较少且极不均匀,仅有 5 个国家基准和基本气象站(图 1),是一个典型的严重缺资料地区。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 地面参考数据

a. 地面实测降水数据。选取的是羌塘内流区的 5 个国家基准和基本站的降水观测数据,数据来自中国气象科学数据共享服务网,且经过严格的质量控制,选取的时间段为 1957—2016 年。气象站点主要分布在内流区东部和南部,记录了 1957 年起的气象数据。站点降水虽然不能真实全面地反映出区域的降水情况,但仍可以代表一定范围内的降水值,

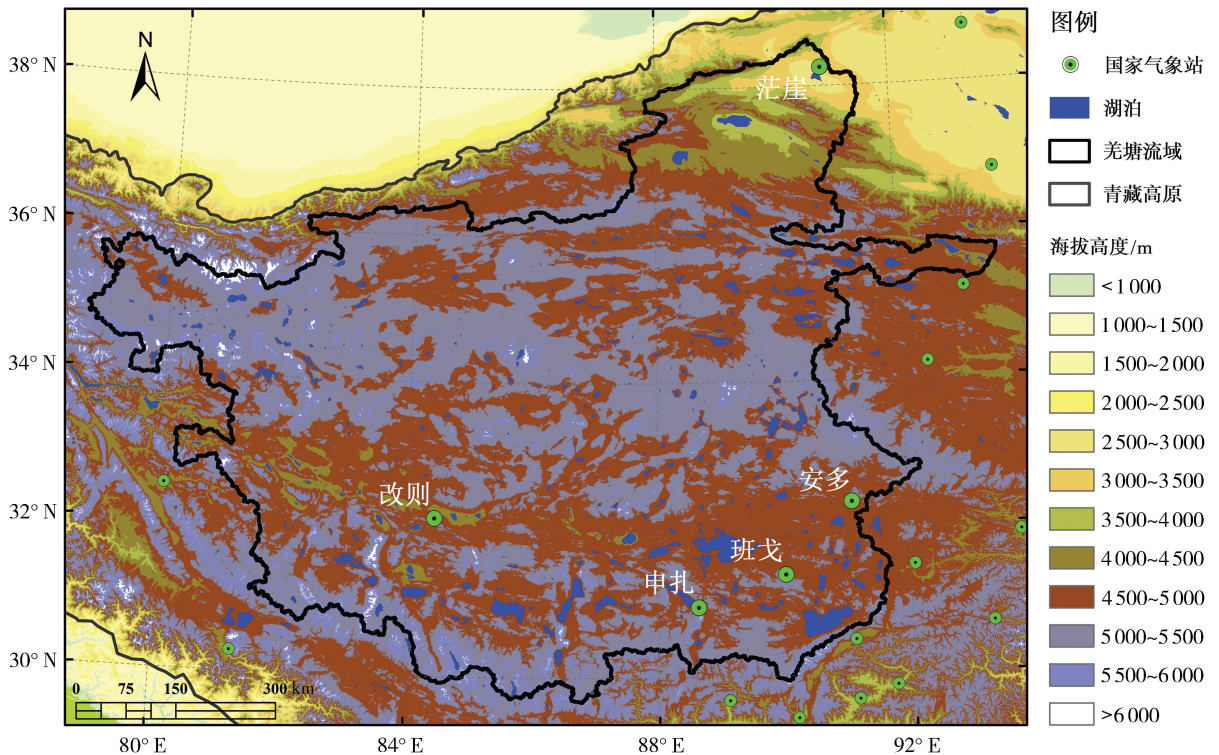


图 1 研究区及气象站位置

依然是降水最直接、可靠、准确的测量方法<sup>[22]</sup>。本研究对比各站点对应的网格的降水,对降水资料进行精度检验。

**b.** 青藏高原所在羌塘地区布设了9个雨量站,观测了羌塘地区2008年6—9月的月降水数据<sup>[23]</sup>,本研究采用这套降水数据作为补充的地面实测数据进行验证。具体数据见表1。

表1 2008年6—9月9个站点的月降水量 mm

站 点	6月	7月	8月	9月	总计
纳木错	104	170	137	135	546
曲嘎切	140	184	140	97	561
德 庆	175	203	144	67	589
保 吉	134	186	109	74	503
多 节	140	183	141	113	577
当 雄	154	229	147	142	672
申 扎	177	131	139	72	519
班 戈	68	191	105	77	441
那 曲	108	184	152	127	571

### 2.1.2 降水格点数据

采用8套降水资料对比分析羌塘内流区的降水时空分布特征。8套降水资料分别为:日本国家宇航局建立的高时空分辨率全球卫星降水数据GSMaP\_Gauge;美国国家海洋和大气局发布的气候数据校正产品PERSIANN-CDR;基于卫星观测的降水数据集CMORPH-CRT;美国国家航空航天局和日本国家宇航局联合生成的基于卫星观测的融合降水数据TMPA-V7;中国科学院青藏高原研究所建立的中国区域高时空分辨率地面气候要素驱动数据集ITPCAS;美国国家航空航天局和美国国家海洋和大气局联合开发的全球陆面数据同化系统Noah模型生成的3个版本的降水数据集Noah-V1.0、Noah-V2.0、Noah-V2.1。8套降水资料的基本信息见表2。

### 2.2 研究方法

为定量比较8套降水资料对于站点实测降水量的精度,选取下列统计指标<sup>[24]</sup>:相关系数 $R$ 用来评价降水数据同站点实测降水的线性相关程度,最优值为1;平均绝对误差 $E_{MA}$ 用来衡量卫星数据误差的整体水平,最优值为0;均方根误差 $E_{RMS}$ 不仅可用来

表征降水数据与站点实测降水之间的平均误差大小,还可用来表示它们之间的离散程度,最优值为0;相对误差 $E_R$ 能反映出降水数据的系统偏差程度,最优值为0。具体计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - G_i| \quad (2)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - G_i)^2} \quad (3)$$

$$E_R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $n$ 为样本的总数; $G_i$ 为站点的实测降水数据; $\bar{G}$ 为站点实测降水数据平均值; $P_i$ 为各套降水数据集; $\bar{P}$ 为各套降水数据集的平均值。

## 3 结果分析

### 3.1 降水精度评估

以羌塘内流区5个气象站点2001—2015年的实测降水月数据为参照,提取了相应地理位置的8套降水资料的点位数据进行降水资料的精度检验,得到如图2所示散点图,并标注了 $R$ 、 $E_{MA}$ 、 $E_{RMS}$ 和 $E_R$ 值。对比可知,GSMaP\_Gauge和ITPCAS与实测数据都保持着非常好的相关性,它们的散点聚集簇更接近1:1的对角线。其中,GSMaP\_Gauge整体表现相对更好,只出现轻微的低估;ITPCAS在中低雨量范围内,出现较为明显的高估,其表现次于GSMaP\_Gauge。另外,由于ITPCAS在融合时使用到羌塘内流区5个气象站点的降水数据,因此相关性非常好,但其在羌塘其他地区的精度仍需验证。Noah系列降水数据均出现不同程度的高估,其中,Noah-V1.0相关性最差,Noah-V2.0高估最严重。综合对比分析8套数据的散点分布以及4个统计指数,在羌塘

表2 8套降水资料基本信息

产品名称	空间分辨率/(°)	时间分辨率/d	时间序列	覆盖范围
GSMaP_Gauge	0.10	1	2000年3月起	60°N~60°S
PERSIANN-CDR	0.25	1	1998年1月至2016年8月	60°N~60°S
TMPA-V7	0.25	0.125	1998年1月起	50°N~50°S
CMORPH-CRT	0.25	1	1998年1月至2015年12月	60°N~60°S
ITPCAS	0.10	0.125	1979年1月至2015年12月	中国
Noah-V1.0	1.00	30	1979年1月起	60°N~60°S
Noah-V2.0	1.00	30	1948年1月至2010年12月	60°N~60°S
Noah-V2.1	1.00	30	1979年1月起	60°N~60°S

内流区, GSMaP\_Gauge 是表现最好的一套产品, 有着极好的相关性, 极小的平均绝对误差和相对误差; ITPCAS 次之; PERSIANN-CDR 和 Noah-V2.1 结果类似, 只在细微之处有差别, 表现居中; CMORPH-CRT 和 Noah-V1.0 表现较差; TMPA-V7 与 Noah-V2.0 表现最差, 均出现明显的高估现象。

为了进一步验证降水资料的精度, 采用独立观测的地面数据进行比较, 即以表 1 中的雨量站月降水观测数据为参照, 提取相应地理位置的 8 套降水资料的点位数据进行降水产品的精度检验, 得到如图 3 所示散点图。对比分析它们的散点分布以及 4

个统计指数, 可以发现以这套雨量站降水数据为“真值”时, GSMaP\_Gauge 仍是表现最好的一套产品, 有着最高的相关性, 最小的平均绝对误差和较小的均方根误差, 其次是 PERSIANN-CDR 与 Noah-V2.1; Noah-V2.0 表现居中; TMPA-V7、ITPCAS 和 Noah-V1.0 结果类似, 表现较差; CMORPH-CRT 表现最差。结合图 2 与图 3 可知, ITPCAS 降水资料与雨量站降水数据进行对比的结果不如与气象站点对比验证结果, 表明其在羌塘内流区的降水反演精度一般。综合来看, GSMaP\_Gauge 有最好的降水表现。

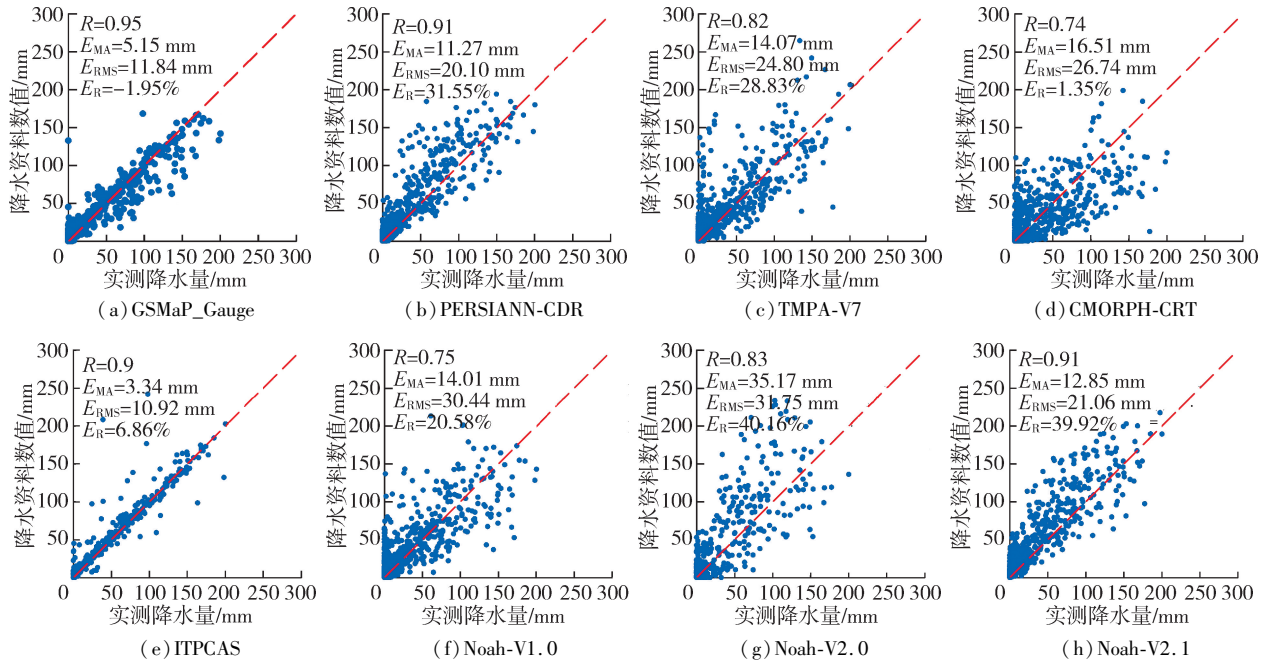


图 2 8 套降水资料与地面实测降水量对比

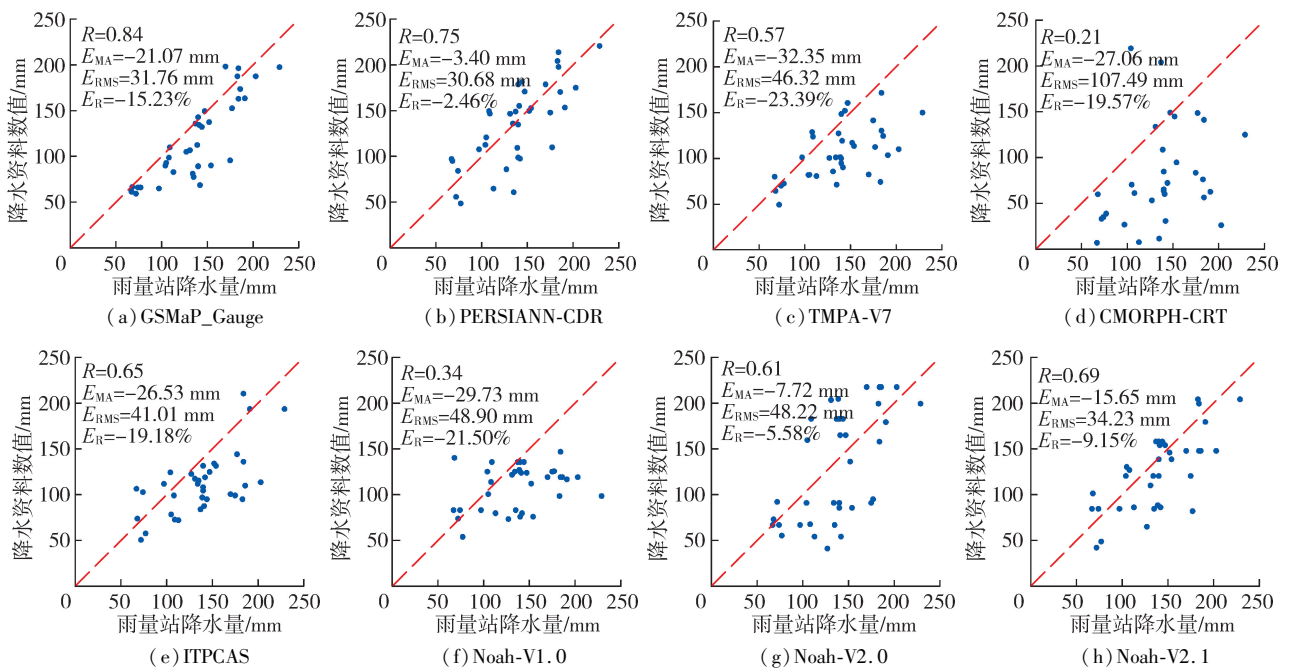


图 3 8 套降水资料与 9 个雨量站降水量对比

### 3.2 年降水时空分布特征

#### 3.2.1 空间分布特征

在满足互相比对验证精度前提下,利用8套降水资料进一步探究羌塘的降水空间分布特征。图4为8套降水资料在羌塘内流区的2001—2015年期间多年平均降水量空间分布。由图4可见,各套数据的多年平均降水在羌塘内流区的空间分布存在很大的差异。GSMaP\_Gauge、TMPA-V7、CMORPH-CRT和ITPCAS主要呈现出东南多西北少的降水分布,最大降水区均出现在东南地区,但TMPA-V7和CMORPH-CRT部分降水最大值分别出现在西南和北部地区;PERSIANN-CDR、Noah-V2.0和Noah-V2.1则主要呈现出南多北少的空间分布特征,降水极值区也出现在内流区南部边缘;而Noah-V1.0在中北部出现了最大降水区,与其他7套降水资料的空间分布极不相同。结合8套降水资料的精度评估可知,GSMaP\_Gauge的降水空间分布特征更符合羌塘内流区年降水分布。

表3为8套降水资料2001—2015年羌塘内流区5个气象站的年均降水量( $P$ )及其多年的波动情

况(采用标准差 $\sigma$ 表示)。结合图4和表3的实测数据可以看出,5个气象站的年均降水符合内流区降水东南多西北少的空间分布格局。其中,GSMaP\_Gauge在5个气象站的年均降水最接近实测降水,这说明GSMaP\_Gauge能够很好地反演该地区降水。各套产品多年降水均出现较大的波动性,明显地,时间序列较短的Noah-V2.0在5个站点的降水波动性均比其他7套产品的小。由此可见,时间序列长短是影响波动性的一个重要原因。

#### 3.2.2 时间分布特征

研究表明,青藏高原的湖泊面积不断增加可能是因降水增多导致<sup>[25]</sup>,因此利用实测和8套降水资料时间序列分析降水趋势变化。计算5个气象站的年降水并进行趋势性检验(图5),可以发现,羌塘内流区5个站点的年降水均呈现出不同程度的增加趋势。在降水增幅上,茫崖站的降水增加趋势不显著,降水增幅是0.21 mm/a;而班戈的年降水增加趋势最显著,降水增幅达到3.22 mm/a;改则站、安多站和申扎站的降水增幅依次为1.87 mm/a、2.13 mm/a、

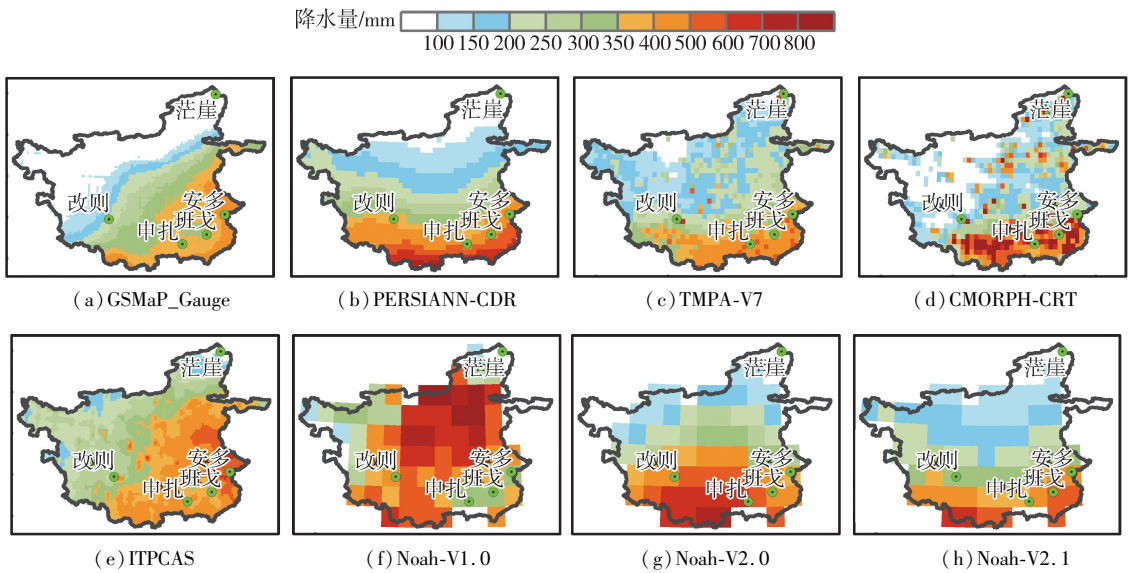


图4 8套降水资料的多年平均降水量空间分布

表3 8套降水资料与5个气象站的地面实测的年均降水量及波动情况

产品名称	茫崖		改则		班戈		安多		申扎	
	$P$	$\sigma$	$P$	$\sigma$	$P$	$\sigma$	$P$	$\sigma$	$P$	$\sigma$
实测	51	27	202	38	344	92	475	86	361	79
GSMaP_Gauge	71	42	205	52	352	84	420	78	358	70
PERSIANN-CDR	76	20	380	78	478	68	464	72	487	65
TMPA-V7	271	168	249	62	391	96	426	96	491	110
CMORPH-CRT	260	39	145	38	380	85	306	96	362	64
ITPCAS	54	28	275	99	353	82	500	76	356	91
Noah-V1.0	76	36	442	145	346	78	347	83	445	113
Noah-V2.0	47	6	485	23	493	48	356	39	696	54
Noah-V2.1	76	20	349	61	507	73	499	65	570	77

2.98 mm/a,可见站点所在地区的降水也是逐年增加的。在降水量上,处于内流区北部的茫崖站的年降水量基本在 100 mm 以下,位于西南部的改则年降水量为 100~300 mm,处于东南部的申扎、班戈和安多站的年降水量依次增多,安多站的年降水量高达 300~700 mm,这与羌塘内流区降水自东南向西北、由南向北减少的空间分布格局一致。

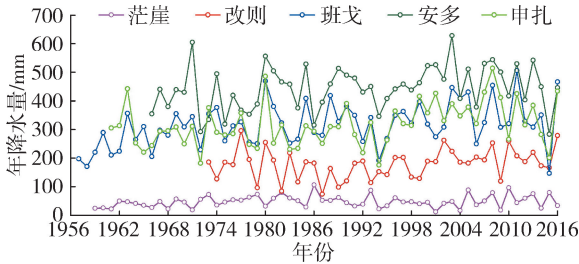


图5 5个气象站点实测降水的年变化序列

图6为8套降水资料的年变化序列。可以看出,除了 Noah-V1.0 与 ITPCAS,其他降水数据的变化趋势大体上是一致的,只是数值上存在一定的差异,降水资料显示羌塘内流区年降水量大致为 180~380 mm,这与实际测站年降水增加的趋势一致。GSMaP\_Gauge 对羌塘地区降水为低估,故其年降水值均小于其他降水资料。Noah-V1.0 与 ITPCAS 降水趋势基本一致,均为先平缓后增加,但其在 1996 年出现异常,这与 Noah-V1.0 所使用的数据源有关,不同阶段使用不同的数据源直接导致了 Noah-V1.0

降水数据出现明显的跳跃式变化<sup>[26]</sup>。

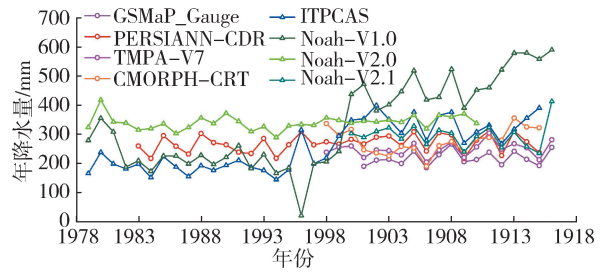


图6 8套降水资料的年变化序列

### 3.3 季节降水特征

受地形、气候条件的影响,羌塘内流区降水年际分布不均,年内分配差异同样明显,降水季节分明。选取降水资料 GSMaP\_Gauge、PERSIANN-CDR 与 Noah-V1.0 为代表计算 2001—2015 年羌塘内流区的季节降水空间分布。图7为 GSMaP\_Gauge、PERSIANN-CDR 和 Noah-V1.0 多年平均降水量的季节分布,可以明显看出这3套降水资料在羌塘内流区的降水基本集中在夏季,且夏秋两季的降水空间分布与年降水空间分布极为相似。不同的是,在冬季,降水分布基本呈现为西多东少,由西南向东北递减的格局。明显地, Noah-V1.0 对羌塘内流区降水表现为高估的原因是其在春冬两季对羌塘北部降水出现严重高估。

8套降水资料 2001—2015 年在羌塘内流区的季节及年降水量分布统计结果见表4。由表4可见,

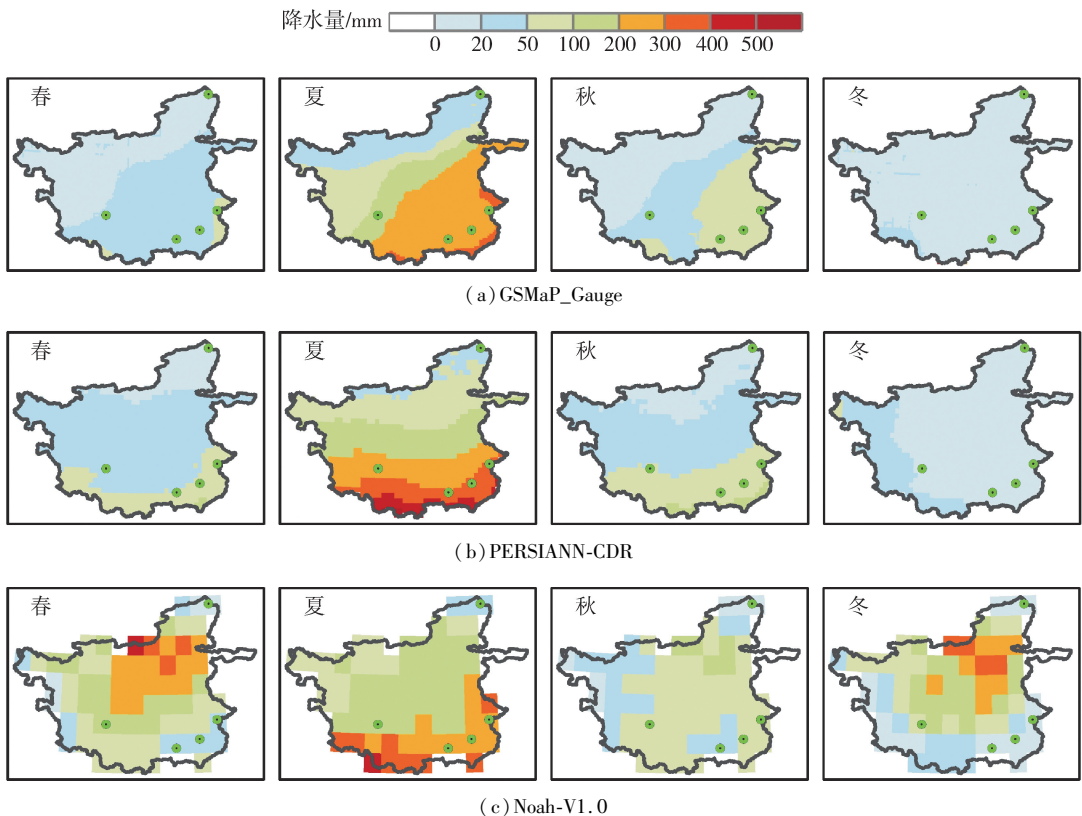


图7 GSMaP\_Gauge、PERSIANN-CDR 和 Noah-V1.0 多年平均降水量的季节分布

表 4 8 套降水资料 2001—2015 年在羌塘内流区的季节及年降水量统计结果

产品名称	春季		夏季		秋季		冬季		多年平均 降水量/mm
	降水量/ mm	占全年 百分比/%	降水量/ mm	占全年 百分比/%	降水量/ mm	占全年 百分比/%	降水量/ mm	占全年 百分比/%	
GSMaP_Gauge	26	12.04	150	69.44	32	14.81	8	3.71	216
PERSIANN-CDR	40	14.55	180	65.45	42	15.27	13	4.73	275
TMPA-V7	40	16.10	147	59.27	42	16.94	19	7.66	248
CMORPH-CRT	41	15.08	169	62.13	54	19.85	8	2.94	272
ITPCAS	53	15.63	214	63.13	57	16.81	15	4.43	339
Noah-V1.0	130	27.25	185	38.78	61	12.79	101	21.18	477
Noah-V2.0	56	16.05	219	62.75	48	13.75	26	7.45	349
Noah-V2.1	47	16.26	180	62.28	43	14.88	19	6.58	289

从年均降水量角度来看,各套降水数据的年均降水量差距较大, Noah-V1.0 的年均降水量明显大于其他 7 套数据集,且比降水量最少的 GSMaP\_Gauge 多 261 mm;从各季节降水量角度来看,其分布也存在较大差异,整体而言,8 套降水资料的降水量主要分布在夏季,除 Noah-V1.0 夏季降水只占全年降水量的 38.78%,其他 7 套降水资料的夏季降水量占比均在 59% 以上,这是由于 Noah-V1.0 数据集在春东两季高估降水而导致夏季降水占比较低。

## 4 结 论

a. 整体而言, GSMaP\_Gauge 降水资料较其他 7 套资料更适用于羌塘内流区。精度检验结果显示 GSMaP\_Gauge 月数据与站点实测降水量拟合后,  $R$  为 0.95,  $E_{MA}$  为 5.15 mm,  $E_{RMS}$  为 11.84 mm,  $E_R$  与  $E_{RMS}$  都较小,表明其对羌塘内流区降水反演效果较好,只有轻微的低估现象。

b. 羌塘内流区降水空间分布整体上呈现自东南向西北、由南向北逐渐减少的基本趋势。不同区域不同降水资料间的降水分布差异较为明显, Noah-V1.0 年降水表现出对羌塘北部地区降水的过分高估,其余 7 套降水资料的降水格局基本是由南向北减少或是自东南向西北递减。

c. 羌塘内流区 5 个站点的年降水均呈现不同程度的增加趋势,8 套降水资料年降水也显示羌塘内流区的年降水在逐年增加。其中, GSMaP\_Gauge 年降水量更接近于羌塘内流区真实情况,其代表的羌塘内流区年降水约为 216 mm。

d. 羌塘内流区的季节降水主要集中在夏季,其间降水量可占全年降水的 59% 以上,其他季节的降水分布较为相似。因春冬两季高估降水, Noah-V1.0 季节降水评估效果不佳,夏季降水只占全年降水量的 38.78%。

## 参考文献:

[ 1 ] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水

量空间格局的变化特征[J]. 地理研究,2006,25(6): 1031-1040. ( WANG Ying, CAO Mingkui, TAO Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change[J]. Geographical Research,2006,25(6): 1031-1040. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护,2017,33(5):1-4. ( WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):1-4. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. 地球科学进展,2011,26(11):1162-1172. ( LIU Yuanbo, FU Qiaoni, SONG Ping, et al. Satellite retrieval of precipitation:an overview[J]. Advances in Earth Science, 2011,26(11):1162-1172. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 王皓,罗静,叶金印,等. CMORPH 融合降水产品与地面观测雨量资料估算淮河流域雨量对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(3):189-194. ( WANG Hao, LUO Jing, YE Jinyin, et al. Comparative analysis of area rainfall in Huaihe River Basin estimated by CMORPH-Gauge merged data and observed rain gauge data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014,42(3):189-194. ( in Chinese ) )

[ 5 ] ASONG Z E, RAZAVI S, WHEATER H S, et al. Evaluation of integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) over southern Canada against ground precipitation observations: a preliminary assessment[J]. Journal of Hydrometeorology,2017,18(4):1033-1050.

[ 6 ] SCHULZ J, ALBERT P, BEHR H D, et al. Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT satellite application facility on climate monitoring (CM-SAF)[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2009, 9(5):1687-1709.

[ 7 ] 王丹,王爱慧. 1901—2013 年 GPC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估[J]. 气候与环境研究,2017, 22(4):446-462. ( WANG Dan, WANG Aihui. Applicability assessment of GPC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013 [J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4):446-462. ( in Chinese ) )

[ 8 ] HARRIS I, JONES P D, OSBORN T J, et al. Updated

- high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3):623-642.
- [9] 李建, 宇如聪, 陈昊明, 等. 对三套再分析资料中国大陆地区夏季降水量的评估分析[J]. *气象*, 2010, 36(12):1-9. (LI Jian, YU Rucong, CHEN Haoming, et al. Evaluation and analyses of summer rainfall over mainland China in three reanalysis datasets [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(12):1-9. (in Chinese))
- [10] 刘培, 吴凯, 许怡, 等. 中国大陆 TRMM 降水多尺度精度评价[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(3):42-47. (LIU Pei, WU Kai, XU Yi, et al. Multi-scale accuracy evaluation of TRMM precipitation data in mainland China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(3):42-47. (in Chinese))
- [11] ZHOU Tianjun, YU Rucong, CHEN Haoming, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: a comparison of satellite data with rain gauge observations [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21:3997-4010.
- [12] 韩振宇, 周天军. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J]. *大气科学*, 2012, 36(2):361-373. (HAN Zhenyu, ZHOU Tianjun. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(2):361-373. (in Chinese))
- [13] 张蒙, 黄安宁, 计晓龙, 等. 卫星反演降水资料在青藏高原地区的适用性分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(1):34-42. (ZHANG Meng, HUANG Anning, JI Xiaolong, et al. Validation of satellite precipitation products over Qinghai-Xizang Plateau region [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(1):34-42. (in Chinese))
- [14] TONG K, SU F, YANG D, et al. Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519:423-437.
- [15] MA Y, TANG G, LONG D, et al. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7):235-251.
- [16] 白爱娟, 刘长海, 刘晓东. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3):704-714. (BAI Aijuan, LIU Changhai, LIU Xiaodong. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3):704-714. (in Chinese))
- [17] 郝振纯, 童凯, 张磊磊, 等. TRMM 降水资料在青藏高原的适用性分析[J]. *水文*, 2011, 31(5):18-23. (HAO Zhenchun, TONG Kai, ZHANG Leilei, et al. Applicability analysis of TRMM precipitation estimations in Tibetan Plateau [J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(5):18-23. (in Chinese))
- [18] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1):3-12. (SUN Honglie, ZHENG Du, YAO Tangdong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1):3-12. (in Chinese))
- [19] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1989:398-399.
- [20] LIU Qi, FU Yunfei. An examination of summer precipitation over Asia based on TRMM/TMI [J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2007, 50(3):430-441.
- [21] 李兰晖, 刘琼欢, 张懿锂, 等. 羌塘高原降水空间分布及其变化特征[J]. *地理研究*, 2017, 36(11):2047-2060. (LI Lanhui, LIU Qionghuan, ZHANG Yili, et al. Spatial distribution and variation of precipitation in the Qiangtang Plateau [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(11):2047-2060. (in Chinese))
- [22] NEW M, TODD M, HULME M, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(15):1889-1922.
- [23] ZHOU Shiqiao, KANG Shichang, CHEN Feng, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 491(1):89-99.
- [24] YONG Bin, REN Liliang, HONG Yang, et al. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: a case study in Laohahe basin, China [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7):W07542.
- [25] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近 30 年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6):874-881. (WAN Wei, XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, et al. Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6):874-881. (in Chinese))
- [26] ZHOU Xinyao, ZHANG Yongqiang, YANG Yonghui, et al. Evaluation of anomalies in GLDAS-1996 dataset [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(8):1718-1727.

(收稿日期:2018-10-15 编辑:王芳)