李蒙, 秦天玲, 刘少华, 等. 2017. 怒江上游 TRMM 3B42V7 降水产品资料时空验证及降水特征分析[J]. 高原气象, 36(4): 950-959. Li Meng, Qin Tianling, Liu Shaohua, et al. 2017. Spatial-temporal validation of TRMM 3B42V7 precipitation products and analysis of precipitation characteristics in the upper reaches of Nujiang River[J]. Plateau Meteorology, 36(4): 950-959. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2016. 00071.

怒江上游 TRMM 3B42V7 降水产品资料时空验证及降水特征分析

李　蒙, 秦天玲, 刘少华, 卢亚静
(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京　100038)

摘要: 利用 1998－2013 年热带测雨卫星 TRMM 3B42V7 降水数据产品和 18 个气象站点观测数据对怒江上游进行了降雨时空分布特征的对比分析, 研究了 TRMM 3B42V7 数据产品在该区域的精度。结果显示: 研究区内 TRMM 3B42V7 数据和站点数据相关性月尺度最强(R>0. 9), 年尺度次之(R>0. 5), 日尺度较差(R<0. 5); 流域面雨量两组数据在月尺度上有极强的相关性(R≈0. 98), 时间序列拟合较好, 但在降水量大的月份 TRMM 3B42V7 数据较站点观测数据略偏大; 不同时间尺度下两组数据的空间分布特征总体具有较好的一致性, 局部分布特征有差异; 流域西北和东南局部区域 TRMM 降水分别有低估和高估趋势, 其他大部区域相当。利用 TRMM 3B42V7 数据对流域降水进行季节占比分析, 结果显示, 流域降水季节分配不均匀, 夏季(6－8 月)降水占全年降水总量的比例较大, 高达 42%～72%; 其他春(3－5 月)、秋(9－11 月)、冬(12 月至次年 2 月)三季节降水整体较少, 总占比为 28%～58%。

关键词: 怒江上游; TRMM 3B42V7; 降水; 时空分布; 精度分析
文章编号: 1000-0534(2017)04-0950-10　　**中图分类号**: P426. 61^{+}3　　**文献标志码**: A
DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2016. 00071

1　引言

面雨量是流域水循环模拟和水资源核算的关键支撑, 而现有的地面观测站点虽对单点降水观测精度较高, 但由于站点分布不均和观测范围有限等局限性, 尚不能完全满足流域面降水的应用需求。尤其西藏地区站点分布较少且不均匀, 采用插值方法来获取地区面降水存在较大的误差, 难以反映区域降水空间分布的异质性(辜智慧等, 2006)。卫星遥感观测降水方法的出现, 为解决上述问题提供了新的途径和方法(解承莹等, 2015; 自勇等, 2007)。其中热带测雨卫星 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)数据是当前精度最高、应用最广的卫星测雨产品, 该产品的类型较多, 本研究选取 TRMM 3B42V7 版本的数据进行研究。该卫星产品覆盖全球 50°S － 50°N 的范围, 空间分辨率为 0. 25°×0. 25°, 降水数据可有效刻画区域降水的空间分布特征, 同时能够弥补站点稀少地区的资料缺乏问题(白爱娟等, 2008)。TRMM 降水数据的运用越来越广泛, 涉及到水文(Pombo and de Oliveira, 2015; Mantas et al, 2015; Almazroui, 2011; 白爱娟等, 2011)、气象(傅云飞等, 2008; 蒋璐君等, 2014; 毛江玉等, 2012)、自然灾害(刘志雄等, 2013; 朱强等, 2011; 杜灵通等, 2012)等多个领域。TRMM 数据广泛运用的同时, 其基本特性和在不同地区的精度就成为在运用前必须考虑的问题。

针对上述问题, 很多学者做了大量研究工作。国际上, 例如 Chiu et al(2006)在美国新墨西哥州将 TRMM 两个版本的产品 V5 和 V6 分别与站点观测数据进行了对比分析, 结果表明这两种产品均与站点数据有较高的相关性(R>0. 8), 其中 V6 产品

收稿日期: 2016-01-26; **定稿日期**: 2016-06-20
资助项目: 国家自然科学基金项目(91547209, 41571037); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(2015ZY02)
作者简介: 李蒙(1992－), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面研究. E-mail: limenglee@ 126.com
通讯作者: 秦天玲. E-mail: tianling406@ 163.com

与实测数据有更好的一致性。Omotosho and Oluwafemi(2009)在尼日利亚验证了 TRMM 3B43V6 数据用于该地区暴雨的 1 min 降水率的可用性。Huffman et al(2007)在澳大利亚将 TRMM 3B42RT 数据在日、月尺度上与观测数据进行了一致性检测，证明 TRMM 数据与观测数据之间亦具有较高的线性相关特征。在国内，刘俊峰等(2010)在不同时间尺度上分析了 TRMM 3B42 降雨数据在中国大陆 50°N 以南地区的适用性，发现随着时间尺度的增加，TRMM 数据的精度逐渐提高。赵志轩等(2011)采用 WEP 分布式水文模型，利用 TRMM 3B42 数据和地面数据相结合的方法，对堰塞湖形成期内的日均入湖流量进行了模拟预报。骆三等(2011)利用 TRMM 3B42 测雨产品在全国区域与气象站观测资料进行对比，发现卫星资料日降水和降水频率与台站资料类似，相关系数在 0. 8 左右。刘鹏等(2010)利用 TRMM PR 数据分析研究了 1998－2005 年我国南方地区的气候分布，发现 TRMM PR 数据与雨量计观测数据在多年年平均和季平均上具有较好的气候分布一致性，但在极值区两者还存在一定的差异。齐文文等(2013)利用 TRMM 3B43 数据进行精度修正后，分析了青藏高原降水的空间和季节分布特征。

综合上述研究发现，在较大空间尺度上进行面雨量的检验已取得了丰硕成果，但在小范围特别是点尺度上分析 TRMM 降水数据与站点观测数据差异性的研究相对较少。本研究采用“点面结合”的方式对 TRMM 降水数据和站点观测数据在站点(点)和流域(面)尺度上对怒江上游进行 TRMM 数据的精度验证，并分析怒江上游的降水特征。

2　研究区域、数据和方法

2. 1　研究区概况

怒江发源于青藏高原的唐古拉山南麓的吉热拍格，其上游是指嘉玉桥水文站以上流域，在青藏高原东部，位于 91°10′E－96°30′E，30°25′N－32°46′N。山系复杂，地貌结构各异(李吉均，1999)，下垫面条件独特，降水时空差异大。本文研究区即怒江上游(图 1)，平均海拔 4800 m，最高海拔达 6440 m。研究区域覆盖面积7. 6×10^4 km^2，约占中国境内怒江流域面积的 55%，流域多年平均年降雨量约为 550 mm。

2. 2　数据来源及处理

卫星测雨数据来源于 TRMM 3B42V7 数据产品(数据来源：ftp：//disc2. nascom. nasa. gov)，时间系列为 1998－2013 年。地面站点观测数据采用国家地面气象站基本气象要素日值数据集(数据来源：中国气象科学数据共享服务网 http：//cdc. nmic. cn/home. do)，时间系列为 1951－2013 年。研究区 18 个气象站点空间分布见图 1。

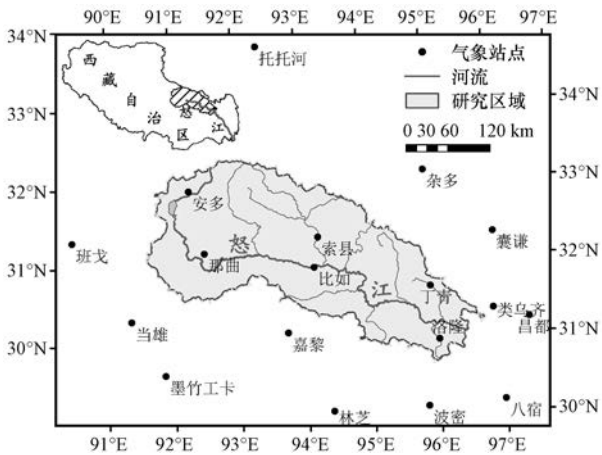

图 1　研究区域地理位置及气象站点分布

Fig. 1　Location of study area and the distribution of weather stations

TRMM 3B42V7 数据和地面观测数据是两种完全不同类型的数据形式，在时间、空间尺度以及展示方式上需对它们进行统一。TRMM 数据采用的是世界时，时间分辨率为 3 h，格式为 HDF(Hierarchical Data Format，层次型数据格式)。数据处理方式如下：

TRMM 3B42V7 数据处理：首先，根据其空间分辨率分别提取气象站点位置所在格点的坐标以及包括整个研究区在内的所有格点坐标，然后用 Matlab 语言编程提取原始 HDF 格式内的数据，同时转换为北京时间，进而累加得到 TRMM 日、月、年尺度数据的序列。需要指出的是，由于北京时和世界时相差 8 h，而 TRMM 原始数据时间分辨率为 3 h，因此在时间尺度上无法恰好转换为北京时间 1 日的 0～24 h 尺度，但却可以转换为北京时间前一日 23:00至翌日 23:00。于是本研究采用的 TRMM1 日降水即为北京时间前一日 23:00 至翌日 23:00 的降水，与气象站点的降水数据时间(0～24 h)有微小差别，但影响较小。

流域面雨量处理：对于站点数据，需采用数据插值方法来计算面雨量(赵煜飞和朱江，2015)。常用插值方法有 IDW(反距离权重插值法)、Kriging(克里金插值法)、Spline(样条插值法)等。这几种

方法在站点较密集时插值结果相差不大，但对于山区或者降水点不是很密集的地区，IDW 法有助于提高所预测数据的精度(何红艳等，2005)。研究区位于怒江上游，站点稀少，下垫面条件相对较复杂，因此采用 IDW 方法来进行该地区的站点降水量插值计算。运用该方法将每日站点降水量插值到 0. 25°×0. 25°的网格上，计算面上平均降水量得到日尺度流域面降水量序列，求和分别得到月和年尺度流域面降水量序列；对于 TRMM 数据，本身即为均匀分布的格网数据，可简单采用算术平均法得到不同时间尺度流域面雨量序列。

2. 3 检验方法

TRMM 3B42V7 数据和站点数据对比检验分别按日、月、年时间尺度以及整个流域空间尺度进行。分析指标主要包括单点和流域面上降水量时间序列相关性、流域降水量空间分布与相对误差空间分布、降水季节分布等。具体采用的检验方法与指标定义如下：

(1) 相关性检验利用 TRMM 3B42V7 数据和站点数据在相同尺度下作一元线性回归，采用相关系数法和散点斜率法进行。

(2) 降水空间分布检验主要考察月、年时间尺度下，研究区站点数据和 TRMM 3B42V7 数据典型时段降水量空间分布特征；以及日尺度下两组数据的降水频率空间分布特征；并采用相对误差对卫星数据空间分布和精度进行评估。具体说明如下：①月、年尺度降水空间分布：为进行气象站点数据和 TRMM 3B42V7 数据的空间分布特征对比分析并展示，分别选取了 1998 － 2013 年月、年尺度的降水序列中典型降水时段：月尺度为 2008 年 8 月，年尺度为 2008 年；同时对流域多年平均降水分布情况进行计算分析。站点降水空间分布运用 Arcgis 软件反距离权重插值方法 IDW(Inverse Distance Weighted)进行空间插值得到，为保证两组数据的统一性，插值网格分辨率为 0. 25°×0. 25°。②日降水频率分布：由于日降水量分布情况在不同时间变化很大，存在一日内无降水、降水少、降水多等不同情况发生，且一日降水量一般较少，另一方面，两种数据在日尺度上的相关性较差，因此本研究不进行日尺度上的降水量空间分布对比，而进行日降水频率空间分布对比分析。其中，降水频率与临界值有关系，在此参考 Dai et al(2007)的研究，定义每个格点或每个站点在一定时间内(1998 － 2013 年共 5844 天)日降水大于 1. 0 mm 的天数占总天数的百分比为日降水频率。两组数据的处理方法为对站点数据日降水序列进行统计得到每个站点的日降水频率，并插值到 0. 25°×0. 25°的网格上；对于 TRMM 3B42V7 数据，运用 Python 及 Matlab 软件对每日每个格点的降水量进行统计，得到每个格点的日降水频率，从而得到整个流域的日降水频率分布。③相对误差分布：相对误差指研究区内 1998 － 2013 年每个站点的观测降水量均值与其对应格点的 TRMM 3B42V7 数据降水量均值的相对误差率(不同时间尺度下相对误差率相同)。为进行空间分析，将研究区所有站点的相对误差率进行空间插值，插值方法和空间分辨率同上。

(3) 降水年内季节分布特征通过流域面上多年平均 5 日滑动平均曲线和降水差积曲线来分析研究区干旱期和湿润期的变化以及季节时段的划分，同时在多年平均月尺度下，统计 TRMM 3B42V7 数据不同季节降水量占全年降水量的比例，以此分析研究区年内降水季节分布特征。其中 5 日滑动平均曲线和降水差积曲线采用的均为流域面上每日多年平均降水序列。

3 日、月、年尺度降水相关分析

3. 1 站点降水量序列相关性检验

运用散点斜率法分别计算 TRMM 3B42V7 数据与各气象站点观测数据之间的相关系数 R 以及回归直线的斜率 k(表 1)。从表 1 中不同时间尺度下相关系数的平均值可以看出，月尺度下两组数据具有明显的线性相关特征(R>0. 9)；日尺度下，相关性较差，R 仅为 0. 3 左右(R<0. 5)；年尺度下，相关性尚可(R>0. 5)。年尺度下相关性没有月尺度高的原因是统计到年尺度时，数据点减少较多，个别年份降水离散对整体相关系数的影响将更为敏感。从斜率 k 可以看出，TRMM 3B42V7 数据与站点观测数据之间的偏离程度：$k>1$，则 TRMM 3B42V7 数据偏大；$k<1$，则 TRMM 3B42V7 数据偏小。从表 1 中可以看出，日尺度下，所有站点的 TRMM 3B42V7 数据总体上均小于地面观测值；月和年尺度下，TRMM 3B42V7 数据偏离情况有大有小，程度各异。但整体来看，月尺度偏离程度较年尺度要小，更接近站点观测值。

为更直观的看出 TRMM 3B42V7 数据和站点数据不同时间尺度下的相关特性，选取流域内部上、中、下游典型站点安多、索县和洛隆三站，作出其不同时间尺度散点分布(图2)，从图2中可以进

表 1　研究区 1998－2013 年 TRMM 与站点观测降水量相关系数及偏离程度

Table 1　Correlation coefficient and deviation degree of TRMM and site observation precipitation in the study area during 1998－2013

序号	站点	相关系数 R			斜率 k		
		日尺度	月尺度	年尺度	日尺度	月尺度	年尺度
1	班戈	0. 292	0. 913	0. 491	0. 399	0. 956	0. 517
2	安多	0. 300	0. 921	0. 502	0. 362	0. 800	0. 639
3	那曲	0. 301	0. 955	0. 819	0. 419	1. 164	0. 924
4	当雄	0. 293	0. 938	0. 849	0. 368	1. 027	0. 737
5	墨竹工卡	0. 320	0. 956	0. 875	0. 378	1. 068	0. 918
6	托托河	0. 268	0. 945	0. 803	0. 412	1. 008	0. 847
7	杂多	0. 326	0. 963	0. 626	0. 366	0. 873	0. 498
8	索县	0. 289	0. 935	0. 789	0. 390	1. 115	1. 197
9	比如	0. 292	0. 943	0. 880	0. 410	1. 239	1. 527
10	丁青	0. 301	0. 956	0. 871	0. 345	0. 987	0. 999
11	囊谦	0. 297	0. 935	0. 610	0. 323	0. 892	0. 516
12	类乌齐	0. 344	0. 956	0. 868	0. 324	0. 833	0. 797
13	昌都	0. 304	0. 948	0. 825	0. 345	1. 084	0. 933
14	嘉黎	0. 260	0. 931	0. 720	0. 336	1. 124	0. 877
15	波密	0. 358	0. 768	0. 797	0. 476	1. 029	1. 137
16	洛隆	0. 260	0. 860	0. 669	0. 405	1. 364	1. 331
17	八宿	0. 286	0. 839	0. 620	0. 486	1. 372	1. 078
18	林芝	0. 413	0. 920	0. 651	0. 726	1. 384	1. 010
平均值		0. 306	0. 921	0. 737	0. 404	1. 004	0. 916

一步看出，月尺度下相关性最好，年尺度次之，日尺度较差。其原因是 TRMM 卫星利用测雨雷达以及微波成像仪等采集的数据信号进行联合反演来估计降水，与地面观测站点直接测量降水会存在一些差异，这些差异导致在日尺度下 TRMM 3B42V7 产品与站点降水的相关性较差；TRMM 3B42V7 产品在发布前已经根据全球逐月的雨量计观测资料对卫星反演的数据在月尺度上进行校正（骆三等，2011），因此其在月尺度上的相关性较高；但是 TRMM 3B42V7 产品在年尺度上的相关性反而降低，可能是由于系列年太短，数据点较少，个别异常点对整体的相关性影响较大造成的。

3. 2　流域面雨量序列对比检验

对两组数据计算得到的流域面雨量进行相关性分析（图 3），可以看出，仍然是月尺度下两组数据相关性最好，年尺度下次之，日尺度最差。图 4 为月尺度下流域面降水量 TRMM 3B42V7 数据和地面观测数据的时间序列。从图 4 可知，两种数据在时间上基本一致，这进一步证明了月尺度下 TRMM 3B42V7 数据的可用性。绝大部分降水量大的月份 TRMM 数据比站点观测数据偏大（张蒙等，2016），降水量小的月份两者相当。

4　降水空间分布特征

4. 1　月、年尺度降水量空间分布

从站点降水和 TRMM 3B42V7 数据降水月、年尺度空间分布（图 5）可以看出，两种降水数据在空间分布上基本呈现一致性，即：流域上、下游降水量较少，中游降水量较多。但 TRMM 3B42V7 数据的降水量空间变化幅度比站点数据要大，TRMM 卫星对降水较大的区域雨量探测比站点数据偏大，而对降水较小区域的雨量探测比站点数据偏小。由于地面气象站点数量不足或分布不均匀，造成降水量空间分布不连续变化，存在围绕站点向外扩散的极值区域，而对应的 TRMM 3B42V7 数据则表现出了较好的空间分布连续性，因此对 TRMM 3B42V7 数据进行一定的修正就可以利用其空间分布连续的优势进行其他方面的运用。

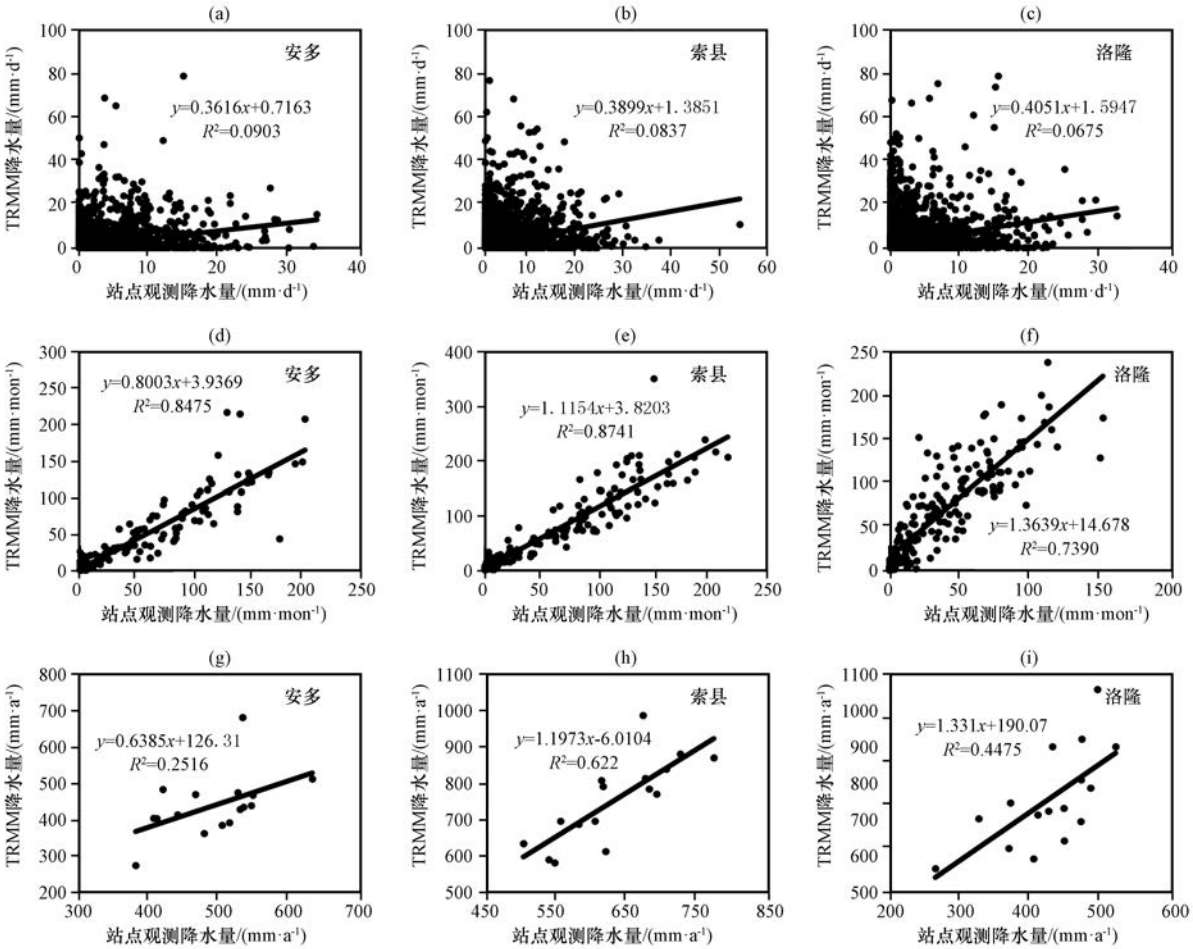

图 2 1998－2013 年日(a~c)、月(d~f)、年(g~i)不同时间尺度典型站点 TRMM 与站点观测降水量散点分布

Fig. 2 Precipitation scatter diagram of day (a~c), month (d~f) and year (g~i) time scale between TRMM and station data of typical sites during 1998－2013

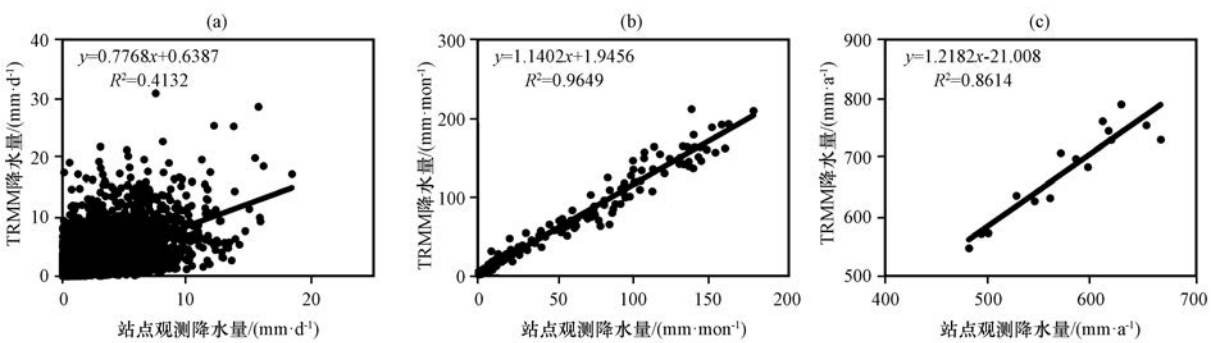

图 3 1998－2013 年不同时间尺度 TRMM—站点观测流域面降水量散点分布

(a) 日尺度，(b) 月尺度，(c) 年尺度

Fig. 3 Areal precipitation scatter diagram of different time scale between TRMM and station data during 1998－2013.

(a) Daily scale, (b) monthly scale, (c) yearly scale

4.2 日降水频率及相对误差空间分布

根据降水频率统计得到站点和 TRMM 3B42V7 数据的日降水频率空间分布(图 6)可知，两组数据的日降水频率空间分布总体分布特征类似：流域中游的降水频率较大，上、下游降水频率较小。但局部分布特征有差异，TRMM 3B42V7 数据在流域中、下游表现出日降水频率较站点偏大，尤其是中游偏大较多；而在流域上游，TRMM 3B42V7 数据

的日降水频率却较站点偏小。

此外，计算了研究区内 TRMM 3B42V7 数据与站点数据的相对误差空间分布(图 7)。由图 7 可以看出，TRMM 3B42V7 数据平均降水量在流域西北部较站点降水量偏小约 10%，而在流域东南部 TRMM 3B42V7 数据平均降水量比站点降水量约偏大 70%，存在严重高估现象，流域其它部分 TRMM 3B42V7 数据平均降水量与站点基本一样，差异较小。

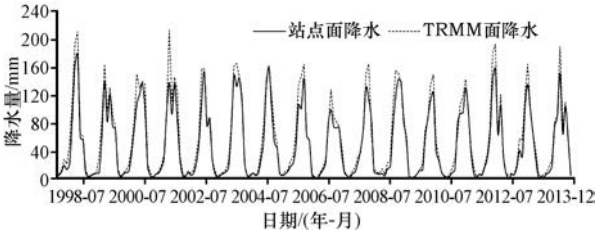

图 4　1998－2013 年 TRMM 和站点观测流域面降水量月时间序列

Fig. 4　Time series of the mean monthly areal precipitation from TRMM and station data during 1998－2013

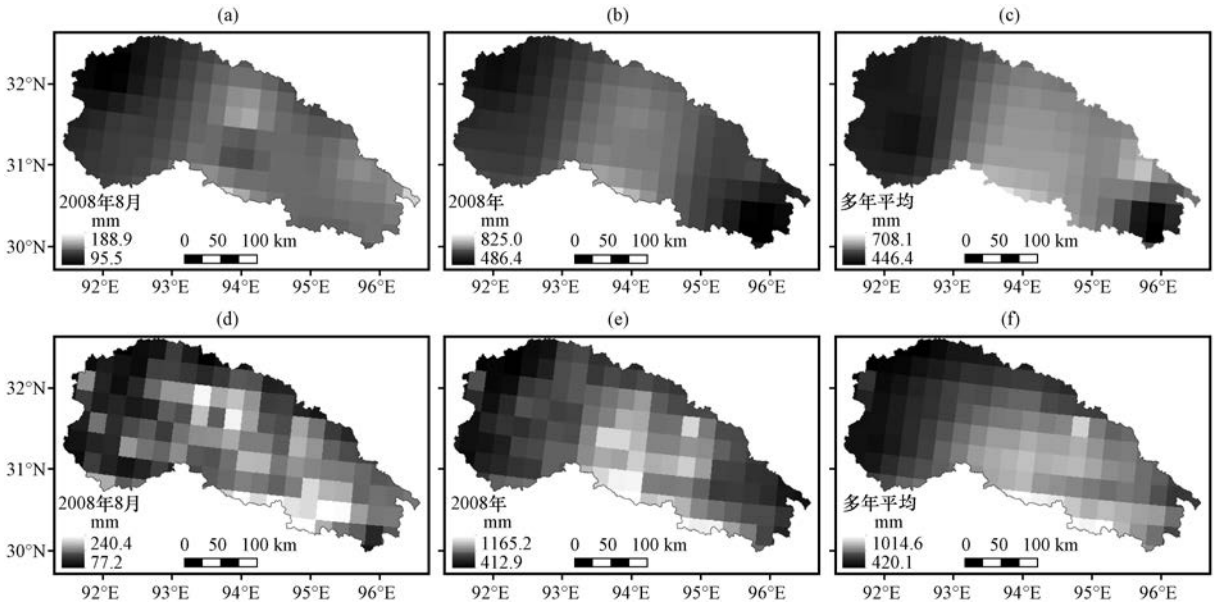

图 5　怒江上游不同时间尺度站点(a~c)和 TRMM(d~f)数据降水量空间分布

(a，d) 月尺度，(b，e) 年尺度，(c，f) 多年平均

Fig. 5　Precipitation spatial distribution between station (a~c) and TRMM (d~f) data of different time scale in the upper reaches of Nujiang River. (a，d) monthly scale，(b，e) yearly scale，(c，f) years average

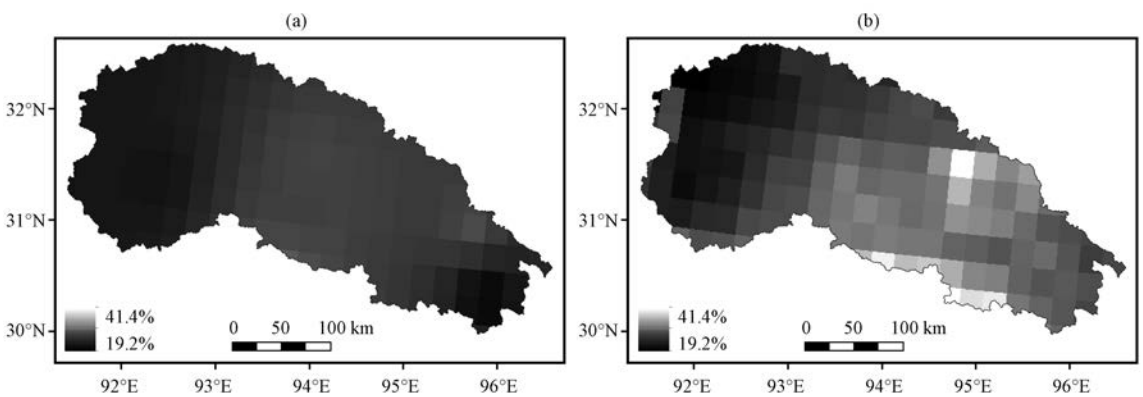

图 6　1998－2013 年日尺度站点观测(a)与 TRMM(b)降水频率空间分布

Fig. 6　Precipitation frequency distribution of day scale between station (a) and TRMM (b) data during 1998－2013

5　降水季节分布特征

经过上述对比分析，认为 TRMM 3B42V7 数据在月以上时间尺度较为准确，与站点观测数据具有较好的一致性，因此采用 TRMM 3B42V7 数据对研究区内降水季节分布进行分析。分别由站点数据和

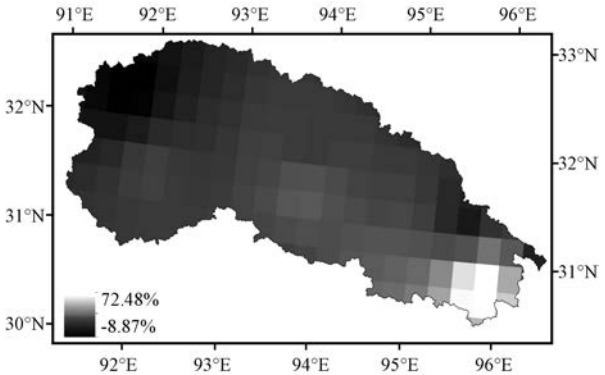

图 7 1998－2013 年 TRMM 与站点观测降水量均值相对误差空间分布(单位：%)

Fig. 7 Bias spatial distribution of mean precipitation between TRMM and station data during 1998－2013. Unit：%

TRMM 3B42V7 数据统计得到降水差积曲线以及 5 日滑动平均雨量线(图 8)。从站点与 TRMM 数据平均日雨量差积曲线(图 8a)可以看出，站点和 TRMM 3B42V7 数据降雨差积曲线反映了年内研究区的干旱与湿润期变化，1－5 月中旬为干旱少雨期，5 月下旬到 9 月下旬为湿润多雨期，之后 10－12 月再次进入干旱少雨期；站点观测雨量的差积曲线与 TRMM 数据结果相似，两者揭示的研究区降雨的年内变化特征一致。从5日滑动平均曲线

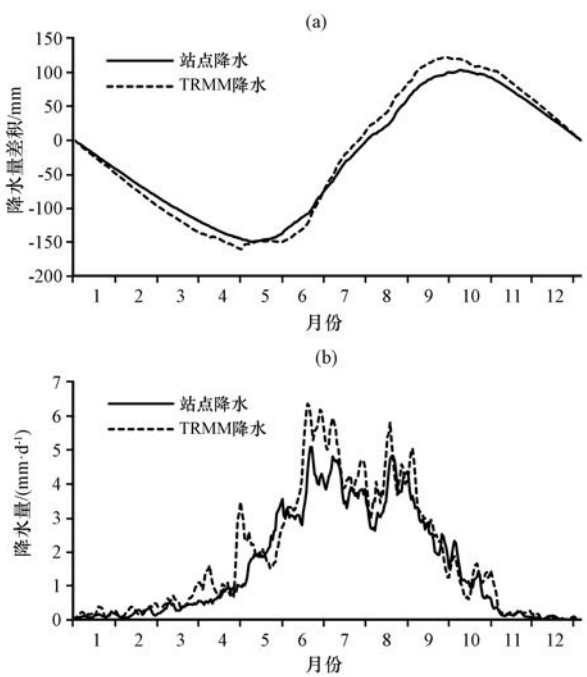

图 8 站点与 TRMM 数据平均日降水量差积曲线(a)和 5 日滑动平均曲线(b)

Fig. 8 The daily rainfall difference accumulative curve (a) and 5-day moving average curve (b) for averaged TRMM and station precipitation

(图 8b)可以看出，站点和 TRMM 3B42V7 数据 5 日滑动平均降水量在年内变化明显，其中 6－8 月降水较其他月份增大较多(郝振纯等，2011)。因此将研究区的降水季节划分如下：3－5 月、6－8 月、9－11 月、12 月至次年 2 月。其中 6－8 月为夏季多雨时段，12 月至次年 2 月为冬季少雨时段，其他两时段为春季、秋季过渡期。

根据上述时段划分对研究区内 TRMM 3B42V7 数据进行四季降水占比统计(图 9)，其中每月降水均为多年平均月降水量。由图 9 可知，研究区年内降水分配不均匀，夏季(6－8 月)降水占全年降水总量的比例较大，高达 40%～70%；春(3－5 月)、秋(9－11 月)季节降水整体较少，占比为 10%～30%；冬季(12 月至次年 2 月)流域降水为全年最少，降水比例不足 5%。

6 结论

对怒江上游 1998－2013 年的气象站点观测降水资料以及 TRMM 卫星降水资料进行了对比分析，同时利用两组数据研究了流域内降水的时空变化特征。得出以下主要结论：

(1) 站点尺度上，研究区内 TRMM 数据和站点数据相关性月尺度最强(R>0. 9)，年尺度次之(R>0. 5)，日尺度较差(R<0. 5)；流域面尺度上，流域面降水量 TRMM 数据与站点观测数据有极强的相关性(R≈0. 98)，TRMM 3B42V7 数据面降水量比站点面降水量略微偏大。

(2) 空间分布上，TRMM 3B42V7 数据和站点数据总体上在月、年以及多年平均尺度下，都表现出较为一致的降水空间分布特性；日尺度上，两种数据在降水频率的空间分布特征上也类似。整体上，TRMM 3B42V7 数据较站点数据显示了更好的空间分布连续性，其降水在怒江流域上游东南区域和西北区域分别存在严重的高估和微弱低估的现象，但流域尺度上 TRMM 数据总体可用性较为良好。

(3) 研究区降水季节分布特征明显。具体表现为：降水季节分配不均匀，夏季(6－8 月)降水占全年降水总量的比例较大，高达 42%～72%；其后依次为春(3－5 月)、秋(9－11 月)以及冬季。

综上，本研究利用 TRMM 3B42V7 降水数据和站点降水数据对怒江上游的降雨进行了点面结合对比分析，进而研究了怒江上游降水时空分布特征。

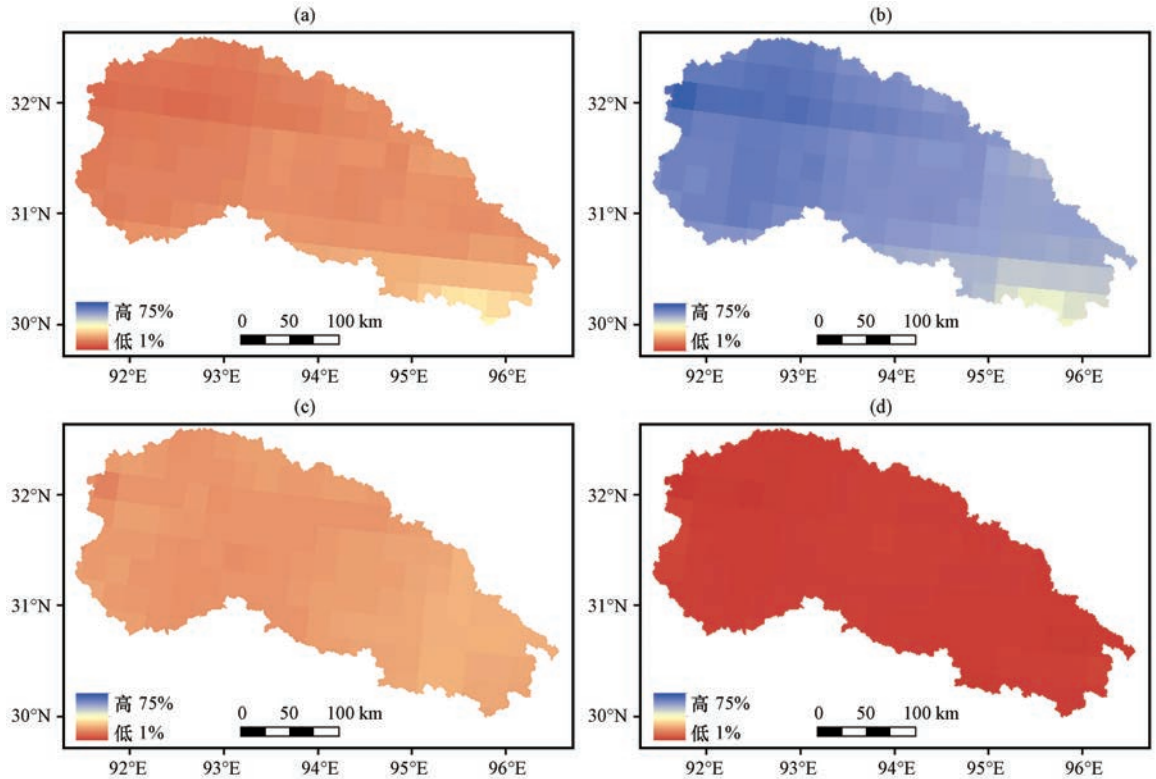

图 9　研究区 TRMM 不同季节降水量占全年降水量的比重

(a) 3－5 月，(b) 6－8 月，(c) 9－11 月，(d) 12 月至次年 2 月

Fig. 9　The ratio of seasonal rainfall to annual average precipitation from TRMM data in study area. (a) from March to May, (b) from June to August, (c) from September to November, (d) from December to February of next year

结果表明怒江上游 TRMM 3B42V7 降水产品在月尺度上具有较高的探测精度，可作为该流域水文过程模拟、降水特性分析以及区域旱涝分析等研究的基础数据。

参考文献：

Almazroui M. 2011. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998－2009[J]. Atmos Res, 99(3/4): 400-414.

Chiu L S, Liu Z, Vongsaard J, et al. 2006. Comparison of TRMM and water district rain rates over New Mexico[J]. Adv Atmos Sci, 23(1): 1-13.

Dai A, Lin X, Hsu K. 2007. The frequency, intensity, and diurnal cycle of precipitation in surface and satellite observations over low- and mid-latitudes[J]. Climate Dyn, 29(7/8): 727-744.

Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. J Hydrometeor, 8(1): 38-55.

Mantas V M, Liu Z, Caro C, et al. 2015. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes[J]. Atmos Res, 163: 132-145.

Omotosho T V, Oluwafemi C O. 2009. One-minute rain rate distribution in Nigeria derived from TRMM satellite data[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71(5): 625-633.

Pombo S, de Oliveira R P. 2015. Evaluation of extreme precipitation estimates from TRMM in Angola[J]. J Hydrol, 523: 663-679.

白爱娟，刘晓东，刘长海. 2011. 青藏高原与四川盆地夏季降水日变化的对比分析[J]. 高原气象，30(4)：852-859. Bai Aijuan, Liu Xiaodong, Liu Changhai. 2011. Contrast of diurnal variations of summer precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor, 30(4): 852-859.

白爱娟，刘长海，刘晓东. 2008. 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，51(3)：704-714. Bai Aijuan, Liu Changhai, Liu Xiaodong. 2008. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis[J]. Chinese J Geophys, 51(3): 704-714.

杜灵通，田庆久，黄彦，等. 2012. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. 农业工程学报，28(2)：121-126. Du Lingtong, Tian Qingjiu, Huang Yan, et al. 2012. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28(2): 121-126.

傅云飞，刘奇，自勇，等. 2008. 基于 TRMM 卫星探测的夏季青藏高原降水和潜热分析[J]. 高原山地气象研究，28(1)：8-18. Fu

Yunfei, Liu Qi, Zi Yong, et al. 2008. Summer precipitation and latent heating over the Tibetan Plateau based on TRMM measurements[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 28(1): 8-18.

辜智慧, 史培军, 陈晋. 2006. 气象观测站点稀疏地区的降水插值方法探讨—以锡林郭勒盟为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 42(2): 204-208. Gu Zhihui, Shi Peijun, Chen Jin. 2006. Precipitation interpolation research over regions with sparse meteorological stations: A case study in Xilin Gole League[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 42(2): 204-208.

郝振纯, 童凯, 张磊磊, 等. 2011. TRMM降水资料在青藏高原的适用性分析[J]. 水文, 31(5): 18-23. Hao Zhenchun, Tong Kai, Zhang Leilei, et al. 2011. Applicability analysis of TRMM precipitation estimates in Tibetan Plateau[J]. Hydrology, 31(5): 18-23.

何红艳, 郭志华, 肖文发. 2005. 降水空间插值技术的研究进展[J]. 生态学杂志, 24(10): 1187-1191. He Hongyan, Guo Zhihua, Xiao Wenfa. 2005. Review on spatial interpolation techniques of rainfall[J]. Chinese J Ecology, 24(10): 1187-1191.

蒋璐君, 李国平, 母灵, 等. 2014. 基于TRMM资料的西南涡强降水结构分析[J]. 高原气象, 33(3): 607-614. Jiang Lujun, Li Guoping, Mu Ling, et al. 2014. Structural analysis of heavy precipitation caused by southwest vortex based on TRMM data[J]. Plateau Meteor, 33(3): 607-614. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00094.

解承莹, 李敏姣, 张雪芹, 等. 2015. 青藏高原南缘关键区夏季水汽输送特征及其与高原降水的关系[J]. 高原气象, 34(2): 327-337. Xie Chengying, Li Minjiao, Zhang Xueqin, et al. 2015. Moisture transport features in summer and its rainfall effects over key region in southern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 34(2): 327-337. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00034.

李吉均. 1999. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 1-12. Li Jijun. 1999. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. Marin Geol Quat Geol, 19(1): 1-12.

刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 2010. 多卫星遥感降水数据精度评价[J]. 水科学进展, 21(3): 343-348. Liu Junfeng, Chen Rensheng, Han Chuntan, et al. 2010. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snowcover products[J]. Adv Water Sci, 21(3): 343-348.

刘鹏, 傅云飞, 冯沙, 等. 2010. 中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析[J]. 气象学报, 68(6): 822-835. Liu Peng, Fu Yunfei, Feng Sha, et al. 2010. A comparison of the precipitation from rain gauge observations with from TRMM PR measurements in the southern China[J]. Acta Meteor Sinica, 68(6): 822-835. DOI: 10.11676/qxxb2010.078.

刘志雄, 蔡荣辉, 邓见英, 等. 2013. 2008年湖南冻雨成因研究[J]. 高原气象, 32(2): 456-467. Liu Zhixiong, Cai Ronghui, Deng Jianying, et al. 2013. Formation mechanism of freezing rain in Hunan Province in 2008[J]. Plateau Meteor, 32(2): 456-467. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00044.

骆三, 苗峻峰, 牛涛, 等. 2011. TRMM测雨产品3B42与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象, 37(9): 1081-1090. Luo San, Miao Junfeng, Niu Tao, et al. 2011. A comparison of TRMM 3B42 products with rain gauge observations in China[J]. Meteor Mon, 37(9): 1081-1090.

毛江玉, 吴国雄. 2012. 基于TRMM卫星资料揭示的亚洲季风区夏季降水日变化[J]. 中国科学: 地球科学, 42(4): 564-576. Mao Jiangyu, Wu Guoxiong. 2012. Diurnal variations of summer precipitation overthe Asian monsoon region as revealed by TRMM satellite data[J]. Sci China Earth Sci, 42(4): 564-576.

齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 2013. 基于TRMM数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. 地理科学, 33(8): 999-1005. Qi Wenwen, Zhang Baiping, Pang Yu, et al. 2013. TRMM-data-based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 33(8): 999-1005.

张蒙, 黄安宁, 计晓龙, 等. 2016. 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, 35(1): 34-42. Zhang Meng, Huang Anning, Ji Xiaolong, et al. 2016. Validation of satellite precipitation products over Qinghai-Xizang Plateau region[J]. Plateau Meteor, 35(1): 34-42. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00152.

赵煜飞, 朱江. 2015. 近50年中国降水格点日值数据集精度及评估[J]. 高原气象, 34(1): 50-58. Zhao Yufei, Zhu Jiang. 2015. Assessing quality of grid daily precipitation datasets in China in recent 50 years[J]. Plateau Meteor, 34(1): 50-58. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00141.

赵志轩, 严登华, 王浩, 等. 2011. 基于WEP模型和TRMM_PR的唐家山堰塞湖入湖径流预报[J]. 水利学报, 42(7): 848-856. Zhao Zhixuan, Yan Denghua, Wang Hao, et al. 2011. Predicting inflows to Tangjiashan barrier lake based on WEP model and TRMM precipitation data[J]. J Hydraul Eng, 42(7): 848-856.

朱强, 陈秀万, 樊启祥, 等. 2011. 基于TRMM的降雨侵蚀力计算方法[J]. 中国科学: 技术科学, 41(11): 1483-1492. Zhu Jiang, Chen Xiuwan, Fan Qixiang, et al. 2011. A new procedure to estimate the rainfall erosivity factor based on tropical rainfall measuring mission (TRMM) data[J]. Sci China Tech Sci, 41(11): 1483-1492.

自勇, 许吟隆, 傅云飞. 2007. GPCP与中国台站观测降水的气候特征比较[J]. 气象学报, 65(1): 63-74. Zi Yong, Xu Yinlong, Fu Yunfei. 2007. Climatological comparison studies between GPCP and rain gauges precipitations in China[J]. Acta Meteor Sinica, 65(1): 63-74.

Spatial-Temporal Validation of TRMM 3B42V7 Precipitation Products and Analysis of Precipitation Characteristics in the Upper Reaches of Nujiang River

LI Meng, QIN Tianling, LIU Shaohua, LU Yajing

(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The Nujiang river is a typical area of lacking data with complicated terrain and climate characteristics. TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) precipitation data can effectively describe the spatial distribution characteristics of regional precipitation, and it has great reference value to the area of lacking information. We use TRMM 3B42V7 data and 18 weather stations data to explore the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation and analyze the accuracy of TRMM 3B42V7 data in the upper reaches of Nujiang river. The correlation coefficient method and spatial analysis method are used to solve the problem. By analyzing the correlation coefficient, it shows that the best correlation coefficient between TRMM 3B42V7 data and the site observation data occurs at monthly scale (R>0. 9), second is yearly scale (R>0. 5), the worst is daily scale (R<0. 5). The two sets of data have strong correlation under monthly scale when it comes to areal precipitation ($R\approx$0. 98). Time series also fit well though TRMM 3B42V7 data is slightly larger than the site observation data in the month of abundant precipitation. Spatial-temporal comparative analysis indicates that precipitation spatial distribution has good consistency of these two group data at different time scales though the local distribution characteristics are different. There is an underestimation tendency of TRMM 3B42V7 data in the northwest of the basin, and overestimation tendency in the southeast. Precipitation in most other area has little difference between TRMM 3B42V7 data and the site observation data. TRMM 3B42V7 data is also used to analyze the seasonal proportion of precipitation in the basin and it is found that seasonal patterns of precipitation in study area vary greatly. Precipitation in summer (from June to August) account for a large proportion of total annual precipitation. The ratio of precipitation in summer is 42% ~72%, while the total ratios of spring (from March to May), autumn (from September to November) and winter (from December to February) to annual precipitation are 28% ~58%.

Key words: Upper reaches of Nujiang River; TRMM 3B42V7; Precipitation; Spatial-temporal distribution; Accuracy analysis