

DOI: CNKI: 32-1309/ P. 20110514. 1445. 004

天山山区降水量的空间分布及其估算方法

赵传成, 丁永建, 叶柏生, 赵求东

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用天山山区及周边 31 个国家基本站 1998 ~ 2008 年期间的逐月降水资料结合 TRMM 卫星月平均降水资料, 使用卫星结合雨量计的降水估算方法, 得到天山山区逐月降水空间分布, 并运用交叉检验方法对降水估算精度评估, Nash-Sutcliffe 效率系数在 0.5 以上, 相关系数高达 0.9 以上。结果表明, TRMM 卫星对西北山区的降水活动有一定的探测能力, 能够较好的反映天山山区降水时空变化特征, 为山区降水数据稀缺条件下的降水空间分布估算提供方法, 为相关的水文、气象等研究提供数据支持。

关键词: 天山山区; 降水; TRMM 卫星; 交叉检验; 空间分布

中图分类号: P426.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)03-0315-08

降水是地球系统水循环的重要环节, 但全球降水测量因降水时空变化很大而极其困难, 同时, 降水作为分布式水文模型的重要输入参数, 尤其是在流域产汇流计算时, 更需要流域降水量的时空分布资料^[1]。目前降水空间分布主要基于雨量台站实际观测资料通过空间插值或利用遥感数据反演获取, 由于雨量台站分布的不均匀性和在山区分布稀疏的特点, 通过观测数据插值获得降水的空间分布, 难以达到区域空间尺度和时间尺度的要求。而降水资料的准确与否不仅直接影响模拟精度, 也成为模拟的最大的不确定因素之一。因此, 对降水量的模式模拟和遥感数据的反演研究越来越受到重视^[2-4]。遥感数据具有较高的时间空间分辨率、覆盖范围广、不受地形地貌条件限制的特点, 利用遥感资料反演降水量的时空分布成为气象水文研究领域的热点。

由于降水时空变化差异较大, 卫星和地面测雨雷达网和雨量计网的结合, 逐步生成有效完整的降水测量系统是目前国际上降水观测的主要发展方向。从 20 世纪 90 年代末开始的热带降雨测量卫星 (Tropic Rainfall Measurement Mission, TRMM) 为研究全球降水提供了较为稳定的平台^[5]。目前 TRMM 已经形成了一系列的数据产品^[6-8]。国内外学者利用 TRMM 资料进行降水分析和降水资料验证等方面做了大量工作, TRMM 的日降水产品 3B42 在孟加拉国的对比结果表明 TRMM 反演降水值达到观测值的 96%, 能够很好的反映区域的降水状况^[9], 结合观测降水资料生成的降水产品 3B42 V6 较 V5 版精度有较大的提高; Takahashi 等^[10]利用 TRMM 10 年 (1998 ~ 2007 年) 资料对中南半岛日降水模式进行研究, 半岛一半以上的降水发生在凌晨, 降水频率和降水强度分析结果也表明凌晨降水对降水模式有较大的影响。Koo 等^[11]使用 TRMM (3B42 version6) 3 h 步长的降水资料对韩国 6 ~ 8 月降水量、降水频率、降水强度等特性进行分析对比, 在日时间尺度上, TRMM 降水分布与地面观测具有很强的一致性。傅云飞等^[12]使用 TRMM 降水雷达对亚洲对流降水和层云降水的频次和强度及降水垂直结构的特点进行了研究, 指出亚洲陆面对流和层云降水强度均弱于洋面, 地形强迫不但可引起迎风坡上的高降水频次和强降水带, 而且导致其下风方向降水频次减少。在天山伊犁河的研究结果表

收稿日期: 2010-07-07; **网络出版时间:** 2011-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110514.1445.004.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2007CB411502); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (200701046)

作者简介: 赵传成 (1978 -), 男, 山东曹县人, 博士研究生, 主要从事气候变化和水文水资源研究。

E-mail: zhao_chch1978@yahoo.com.cn

通信作者: 丁永建, E-mail: dyj@lzb.ac.cn

明, TRMM 对山区降水过程有一定的探测能力, 能够反映降水量的基本特征, 但其值偏小^[13], TRMM 多卫星降水分析资料在华北地区南部、长江流域与观测资料吻合较好, 而在高原上有较大差异^[14-15]。鉴于 TRMM 资料的高时空分辨率, 已经广泛应用于水文模型研究中, 并取得与观测降水输入同等精度的模拟结果^[16-17]; 由此表明 TRMM 降雨数据在区域降水估算和陆面水文过程研究中具有广泛的应用前景。

天山山区观测台站十分稀疏且分布极不合理, 70% 的气象台站设在天山南北坡的低山带和山前平原区, 中、高山以上地区站点稀少^[18]。如何获取该区域高分辨率的区域降水分布是亟待解决的问题。鉴于 TRMM 降水资料在天山地区与观测值相比较小的结果, 本文旨在应用 TRMM 资料和气象站点观测资料, 构建降雨量空间估算理论模型, 对天山山区降水量时空分布进行估算, 为该区域水资源评估提供科学依据, 为分布式水文模型的运行提供数据支撑。

1 区域概况及资料

1.1 区域概况

天山位于 39°N ~ 45.5°N, 73°E ~ 96°E (图 1), 呈纬向分布, 由一系列山脉、山间盆地和谷地组成, 地处西风气候带。天山山区降水分布极不均匀, 降水量自西向东呈现出减少的变化趋势, 并且明显具有北坡多于南坡的特点。天山北坡年降水量可达 500 ~ 700 mm, 北坡西段个别迎风坡可达 1 000 mm, 形成西北干旱区中的“湿岛”^[19]。降水随海拔高度的升高而递增的趋势非常明显, 天山南坡的这种趋势更为突出^[20]。研究表明^[21-22]: 天山山区最大降水带位于海拔 3 000 m 左右的中山带, 新疆 65% 的河流源于天山山区, 其径流量占全疆总径流量的 54%。因此, 天山山区的降水变化对新疆的生态环境及地区经济发展有着重要的影响。

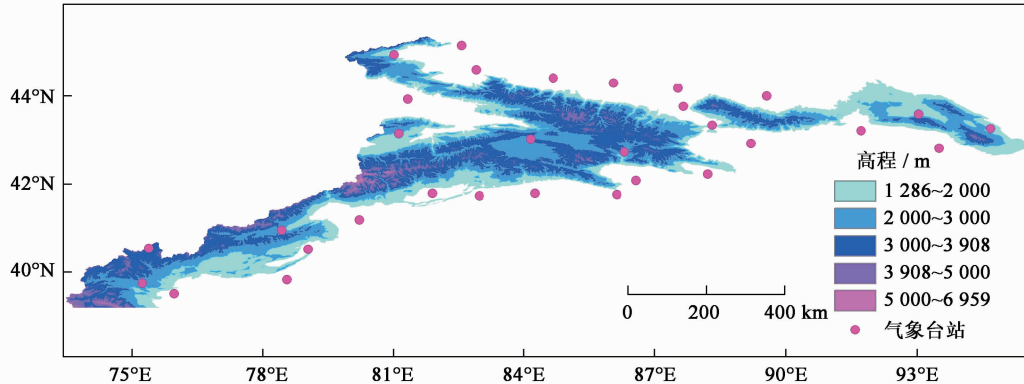


图 1 天山山区气象台站分布

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

1.2 数据来源

3B43 V6 数据是 TRMM 卫星第六版本 3 级产品 (3B43 Version 6) 月平均降水资料, 是一套覆盖 50°S ~ 50°N 的网格降水数据集, 水平分辨率为 0.25° × 0.25°。该数据集是 TRMM 卫星与其他卫星 (SSM/I, AMSR-E, AMSU-B) 和观测联合反演的降水产品, 该数据集首先订正 TRMM/TMI 资料, 并联合 SSM/I, AMSR-E, AMSU-B 资料估值降水, 其次利用全球降水气候计划 (GPCP) 的红外降水估值订正微波降水, 再进行微波和红外资料联合估值。此外, 3B43 还融合了全球地面雨量计观测资料和全球降水气候中心的全球降水资料, 提供了每个标准观测时次每个网格降水的最优估值。由于其准确性好、分布面广、时空分辨率较高等特点, 因而得到了广泛的应用。本研究采用的是美国 NASA 的 Goddard 数据分发中心 DAAC (Distributed Active Archive Center, 见 ftp://disc2.nascom.nasa.gov/data/TRMM/Gridded/3B43_V6/), 资料时间范围为 1998 年 1 月至 2008 年 12 月, 空间范围为 39°N ~ 46°N, 73°E ~ 96°E, 每个格网中心的高程基于分辨为 90 m 的数字高程数据 (DEM, 见 <http://srtm.csi.cgiar.org/selection/inputCoord.asp>)。气象台站数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://www.cma.gov.cn/>)。

tp://cdc.cma.gov.cn/), 时间为1998年1月至2008年12月, 数据内容为月降水量、各气象站点的经度、纬度、海拔, 共计31个站点。

2 研究方法

根据 Sokol^[23]提出的雷达结合雨量计估算降水空间分布方法, 提出卫星联合雨量计计算天山山区降水量估算方法。首先定义卫星反演降水数据与气象台站观测降水比例系数 p_k :

$$p_k = \frac{R_k + \lambda}{S_k + \lambda}, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中 λ 为常数, 通常 λ 取值为 10 mm ^[23]; R_k 和 S_k 为位于第 k 个网格的气象台站雨量计观测降水量和该网格卫星反演降水量; n 为研究区中的气象台站数。通过 kriging 内插方法将降水比例系数 p_k 插值到整个研究区, 得到了一个空间分布的降水比值系数 $p_{i,j}^{\text{mer}}$ 。降水量估算公式为

$$P_{i,j} = \max(p_{i,j}^{\text{mer}}(S_{i,j} + \lambda) - \lambda, 0) \quad (2)$$

式中 $P_{i,j}$ 为第 i, j 网格的降水量; $S_{i,j}$ 为当前网格的卫星反演降水量。这种降水估算方法简单易行且计算量小。若当前网格包含气象台站, 则降水量为台站观测降水, 否则该网格的降水量则融合了卫星反演与其附近台站观测的降水数据。

为得到降水比例系数的空间分布, 使用了 Kriging 空间内插, 由此得到的降水数据需要进行误差分析, 以评估数据集的精度。通常采用交叉验证法来验证插值的效果^[24-25], 方法为选定某些观测台站, 在进行空间插值时不使用其数据资料, 将网格化后的内插数据与这些观测台站的数据进行对比, 分析台站观测数据与内插数据的误差, 分别得到各个台站的交叉检验序列。通常采用平均误差(反映系统偏差)、均方根误差等统计分析两者之间的误差, 评估该数据集的精度, 本文还引入 Nash-Sutcliffe 系数 E_{NS} , 作为评估该数据集精度的方法^[26]。其计算公式如下:

$$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{\text{obs}} - P_i^{\text{ev}})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i^{\text{obs}} - P_i^{\text{mean}})^2} \quad (3)$$

式中 P_i^{obs} 为位于第 i 个网格的气象台站的观测降水量; P_i^{ev} 为第 i 个网格的估算值; P_i^{mean} 为第 i 个网格的气象台站的平均降水量; n 为资料序列长度。 E_{NS} 取值为 $-\infty \sim 1$ 。 $E_{\text{NS}} = 1$ 为最优值, 当 $E_{\text{NS}} > 0$, 认为观测值与估算值具有正相关关系, 估算值可以进行分析应用。当 $E_{\text{NS}} < 0$, 则表明观测值优于估算值, 估算值不能用于分析。

3 结果与讨论

3.1 交叉检验的结果

天山山区面积约为 26.9 万 km^2 , 占全疆总面积的 16.3% , 天山山区及周边气象台站共计31个, 其中29个台站海拔低于 2500 m , 海拔 3000 m 以上的台站只有2个。将台站分为内插站(26个)和检验站(5个: 温泉, 巴仑台, 拜城, 吐尔尕特, 伊吾), 通过26个站点的内插与5个交叉检验台站的观测数据进行分析对比, 检验数据集精度的统计量如表1所示。由表1可见, 数据集交叉检验所得5个台站降水插值的均方根误差(E_{RMS})在 $7.12 \sim 18.89 \text{ mm}$ 之间; 估算值与观测降水的 E_{NS} 为 $0.50 \sim 0.84$, 估算值能够很好的反映主要的降水变化; 估算值与观测降水的相关系数(R)介于 $0.70 \sim 0.95$, 由此可以说明估算值与观测降水之间有很好的—致性。

表1 台站降水量交叉检验统计量结果

Table 1 Validation results in the five validation stations

统计量	E_{RMS}/mm	E_{NS}	R	估算最大值/mm	观测最大值/mm
温泉	17.9	0.53	0.73	80.9	123.1
巴仑台	18.9	0.69	0.92	95.1	135.5
拜城	7.3	0.69	0.85	44.7	62.2
吐尔尕特	11.6	0.74	0.90	79.8	94.1
伊吾	7.1	0.84	0.95	99.1	118.1

图2所示,不同月份估算值与观测值的精度有很大的差别。一般来说,1~4月和10~12月降水估算方法计算结果较好,误差小且相关性高。由于天山山区降水主要集中在夏秋季,5~9月估算结果与观测结果虽然存在较好的相关性,但 E_{NS} 系数不高,多集中0.31~0.58,两者的均方根误差较大,主要原因可能为TRMM 3B43月降水资料偏小造成。

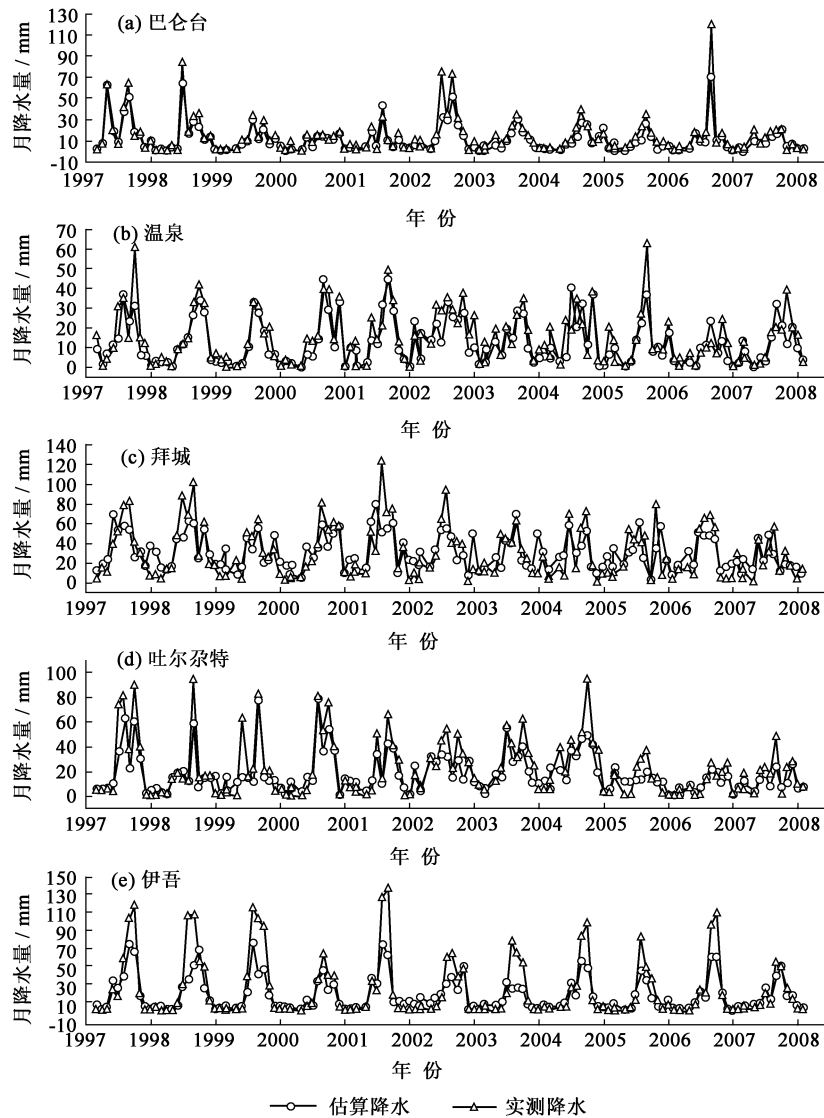


图2 检验台站估算降水和观测降水

Fig. 2 Temporal variations of precipitation estimated and observed in the validation stations

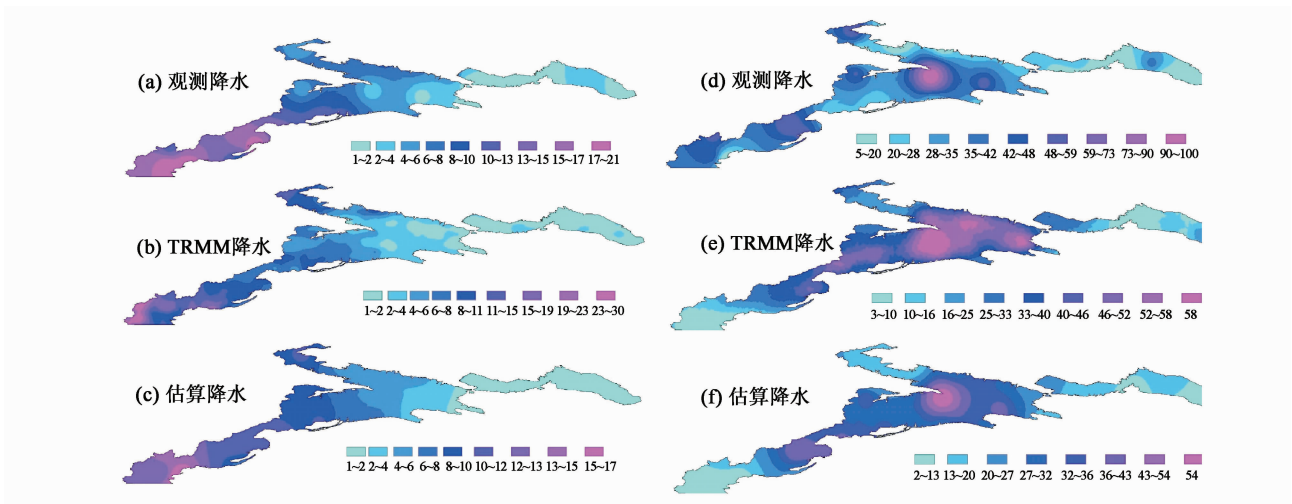


图 3 天山山区 2008 年 1 月(左)和 7 月(右)降水分布(单位: mm)

Fig. 3 Distributions of precipitation in Tianshan Mountains in Jan. and Jul. of 2008

天山山区降水分布极不均匀, 降水年内变化差异大。图 3 为 2008 年 1 月和 7 月观测降水、TRMM 降水和估算降水空间分布。无论是降水较少的 1 月还是降水较为丰富的 7 月, 观测降水、TRMM 降水和估算降水整体表现较为一致。由于各月降水量差异, 观测降水、TRMM 降水和估算降水局部还是存在显著的差异性。2008 年 1 月降水高值处于天山西段(图 3(a)), TRMM 降水数据(图 3(a))和估算降水数据(图 3(c))表现一致, 但高值区域面积观测降水较其它两组降水数据大。2008 年 7 月, 天山山区降水高值区位于天山中段, 观测降水、TRMM 降水和估算降水均反映了这个事实, 但 TRMM 降水刻画区域较其它两组降水数据大。由于天山东段是降水最少的区域, 3 组降水数据表现较好的一致性。

通过分析, 造成 5~9 月降水均方根误差较大的原因为: ① 山区降水受地形因素影响较为显著, 降水量随海拔升高具有明显的变化规律, 通常不是简单的线性关系^[27-28]。研究表明^[3]: 海拔低于 3 000 m 的山脉降水量随海拔升高而增加, 并至山顶降水量达到最大; 海拔较高的山脉在山腰存在一个最大降水带, 其高度取决于气候的干湿度状况。天山山区地形复杂多变, 山脊平均高达 4 000 m, 高程、坡度及坡向等对降水影响十分显著, 这些因素都使得该地区的降水变化十分复杂, 是造成估算值与观测值的误差较大主要因素。② 气象台站大多布设在低山带和山前平原区且十分稀疏, 因而 TRMM 降水资料与台站观测资料之间存在一定的差异, 降水估算方法没有考虑内插时高程变化对降水比例系数的影响, 可能是产生误差较大的另一原因。

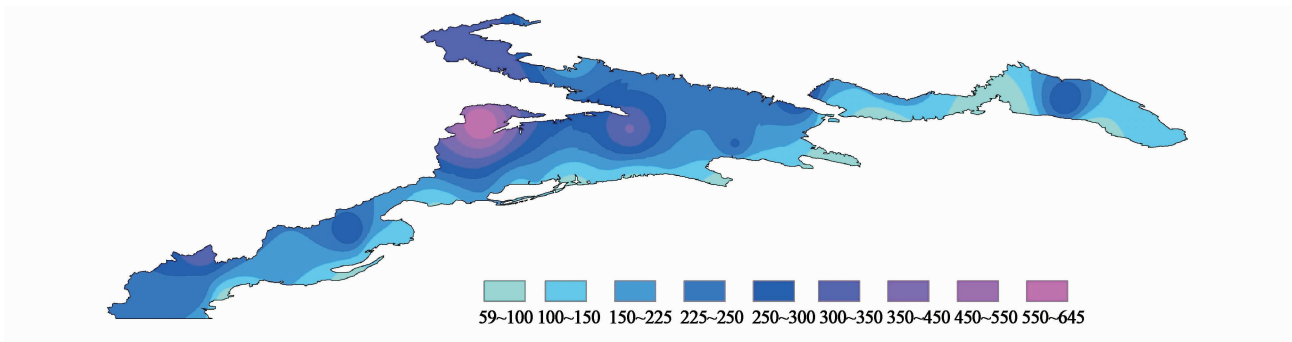


图 4 1998~2008 年天山山区多年平均降水量(单位: mm)

Fig. 4 Mean annual precipitation of Tianshan mountains during 1998-2008

3.2 天山山区降水空间变化特征分析

根据观测资料,自20世纪60年代到80年代初天山山区降水呈缓慢下降趋势,受全球气候变化的影响,进入90年代后,天山山区降水显著增加,天山山区进入到降水增多时期^[29]。由于水汽来源、地形地貌的差异,天山山区降水量的区域分布很不均匀(图4)。天山山区降水主要来自大西洋、北冰洋气流输送的水汽,由于天

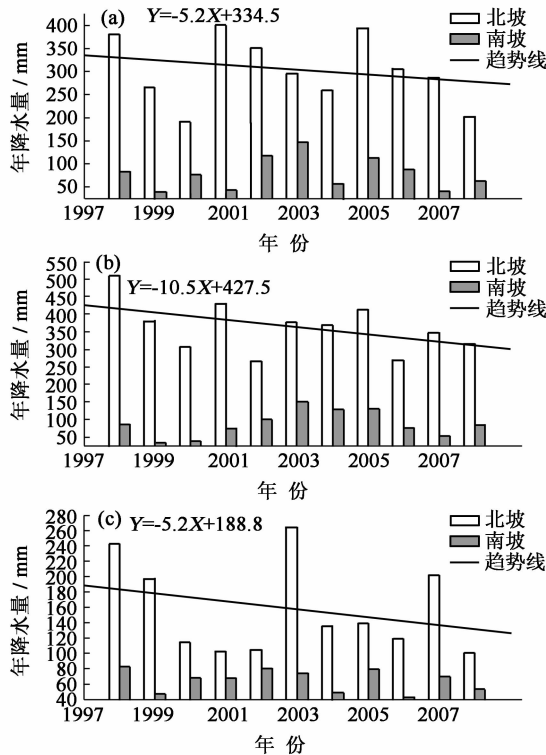


图5 天山山区南北坡年降水量差异

Fig.5 Variations of Annual precipitation at north-facing slope and south-facing slope of Tianshan mountains during 1998-2008

山巨大的高度和中间宽两边窄以及独特的走势,造成降水区域差异较为明显。图4所示,天山山区降水量高值区位于天山山区中段,年降水450 mm左右,部分可达550 mm以上;西段次之,年降水350 mm左右,部分可达400 mm,较中段少100 mm左右。东段最少,年平均降水低于300 mm,但也有个别区域年降水量高达390 mm。

自20世纪80年代后期以来,新疆北部南风分量偏强,有利于水汽由南向北输送并凝结降水,加之天山巨大的高度和独特的走势,对水汽的拦截十分有利,使得天山山区南北坡降水量差异非常显著。天山西段(图5(a))北坡年平均降水量300 mm,南坡最大年降水量不到150 mm;降水量比较丰富的天山中段(图5(b)),其北坡年平均降水量450 mm左右,而南坡最大年降水不足200 mm;天山东段(图5(c))降水量最少,南北坡的年降水量相差150 mm之多。

近10年来,天山山区年降水量波动较大,图5展示天山不同区域降水的时间变化趋势,虽都呈减少,但变化趋势不显著,统计分析表明95%区域没有通过0.1显著性检验。天山山区年降水主要集中在夏秋两季,5~10月的降水量占全年降水量的70%以上,个别高达90%。研究表明^[30],新疆降水的季节变化与温度的季节变化具有很好的一致性,四季中冬季增温幅度最大,

降水量增加也是四季中最大的,但冬季降水量占全年降水量的比重较小,对降水的年变化影响并不明显。

4 结 论

(1) 利用TRMM卫星(3B43 Version 6)月平均降水资料和天山山区台站观测资料估算天山山区降水的空间分布,经检验能够很好的反映山区降水特征和长时间序列的变化趋势。

(2) 卫星结合雨量计的降水估算方法总体上具有较高的精度,在1~4月和10~12月计算结果较好,但在降水集中的季节(5~9月)估算结果不够理想。考虑地形对山区降水的影响,尚需改进降水估算方法。

(3) 天山山区降水量与地形有着十分密切的关系,空间差异显著;天山山区降水时间变化差异较大,降水年变化主要受夏秋季降水变化的影响。

参考文献:

- [1] 叶柏生,杨大庆,丁永建,等.中国降水观测误差分析及其修正[J].地理学报,2007,62(1):3-13.(YE Bai-sheng, YANG Da-qing, DING Yong-jian, et al. A bias-corrected precipitation climatology for China [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 3-13. (in Chinese))
- [2] 王宁练,贺建桥,蒋熹,等.祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究[J].冰川冻土,2009,31(3):395-403.(WANG Ning-lian, HE Jian-qiao, JIANG Xi, et al. Study on the zone of maximum precipitation in the north slopes of the central Qilian

- Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 395-403. (in Chinese)
- [3] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 461-466. (YANG Chuan-guo, YU Zhong-bo, LIN Zhao-hui, et al. Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 461-466. (in Chinese))
- [4] 赵传燕, 冯兆东, 南忠仁. 陇西祖厉河流域降水插值方法的对比分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 208-214. (ZHAO Chuan-yan, FENG Zhao-dong, NAN Zhong-ren. Modelling the temporal and spatial variabilities of precipitation in Zulihe River basin of the western Loess Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(1): 208-214. (in Chinese))
- [5] 刘奇, 傅云飞. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究[J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(1): 111-122. (LIU Qi, FU Yun-fei. An examination of summer precipitation over Asia based on TRMM/TMI [J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 37(1): 111-122. (in Chinese))
- [6] KUBOTA T, SHIGE S, HASHIZUME H, et al. Global precipitation map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP Project: Production and validation [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45(7): 2259-2275.
- [7] PRABHAKARA C, IACOVAZZI R, YOO J M, et al. A method to estimate rain rate over tropical oceans with TRMM Microwave Imager radiometer [J]. *J Meteor Soc Japan*, 2008, 86(1): 203-212.
- [8] BELL T L, YOO J M, LEE M I. Note on the weekly cycle of storm heights over the outeast United States [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114: 1-5.
- [9] ISLAM M N, UYEDA H. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108: 264-276.
- [10] TAKAHASHI H G, FUJINAMI H, YASUNARI T, et al. Diurnal rainfall pattern observed by tropical rainfall measuring mission precipitation radar (TRMM-PR) around the Indochina peninsula [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: D07109.
- [11] KOO M S, HONG S Y, KIM J. An evaluation of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) multi-satellite precipitation analysis (TMPA) data over South Korea [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 45(3): 265-282.
- [12] 傅云飞, 张爱民, 刘勇, 等. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 730-746. (FU Yun-fei, ZHANG Ai-min, LIU Yong, et al. Characteristics of seasonal scale convective and stratiform precipitation in Asia based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(5): 730-746. (in Chinese))
- [13] 穆振侠, 姜卉芳. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 66-71. (MU Zhen-xia, JIANG Hui-fang. The vertical distribution law of precipitation in the western Tianshan Mountain based on TRMM/TMI [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 66-71. (in Chinese))
- [14] 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 Ai-juan, LIU Chang-hai, LIU Xiao-dong. 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))
- [15] 谷黄河, 余钟波, 杨传国, 等. 卫星雷达测雨在长江流域的精度分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 3-6. (GU Huang-he, YU Zhong-bo, YANG Chuan-guo, et al. Application of satellite radar observed precipitation to accuracy analysis in Yangtze River basin [J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(2): 3-6. (in Chinese))
- [16] TOBIN K J, BENNETT M E. Using swat to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(1): 253-271.
- [17] IMMERZEEL W W, DROOGERS P, DE JONG S M, et al. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 40-49.
- [18] 穆振侠, 姜卉芳, 党建新, 等. 不同地形对山区降水垂直分布规律的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(1): 66-71. (MU Zhen-xia, JIANG Hui-fang, DONG Jian-xin, et al. Effects of different topographies on vertical distribution law of precipitation in mountain region [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2010, 33(1): 66-71. (in Chinese))
- [19] 蓝永超, 吴素芬, 钟英君, 等. 近 50 年来新疆天山山区水循环要素的变化特征与趋势[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 177-183. (LAN Yong-chao, WU Su-fen, ZHONG Ying-jun, et al. Characteristics and trends of changes on water cycle factors in the Tianshan Mountainous area since 1960s [J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(2): 177-183. (in Chinese))
- [20] 韩添丁, 丁永建, 叶柏生, 等. 天山天格尔山南北坡降水特征研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 761-766. (HAN Tian-ding, DING Yong-jian, YE Bai-sheng, et al. Study on precipitation characteristics of Tianshan Tianshan Mountain [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 761-766. (in Chinese))

- ding, DING Yong-jian, YE Bai-sheng, et al. Precipitation variations on the southern and northern slopes of the Tianger range in Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 761-766. (in Chinese))
- [21] 蓝永超, 吴素芬, 韩萍, 等. 全球变暖情境下天山山区水循环要素变化的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(6): 99-104. (LAN Yong-chao, WU Su-fen, Han Ping, et al. Change of water cycle factors in the Tianshan Mountain under global warming [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(6): 99-104. (in Chinese))
- [22] 耿雷华, 黄永基, 酃建强, 等. 西北内陆河流域水资源特点初探[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 496-501. (GENG Lei-hua, HUANG Yong-ji, LI Jian-qiang, et al. Analysis on water resources characters of endorheric drainage in Northwest China [J]. *Advances in Water Science*. 2002, 13(4): 496-501. (in Chinese))
- [23] SOKOL Z, BLIZNAK V. Areal distribution and precipitation-altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 652-662.
- [24] 胡江林, 张人禾, 牛涛. 长江流域 0.1° 网格逐日降水数据集及其精度[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 136-149. (HU Jiang-lin, ZHANG Ren-he, NIU Tiao. A daily precipitation grid dataset with 0.1° resolution in Changjiang river valley and its precision [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 136-149. (in Chinese))
- [25] 高歌, 龚乐冰, 赵珊珊, 等. 日降水量空间插值方法研究[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 732-736. (GAO Ge, GONG Le-bing, ZHAO Shan-shan, et al. Spatial interpolation methods of daily precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(5): 732-736. (in Chinese))
- [26] MCCUEN R H, KNIGHT Z, CUTTER A G. Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, 11(6): 597-602.
- [27] 张杰, 李栋梁, 何金梅, 等. 地形对青藏高原丰枯水年雨季降水量空间分布的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 319-326. (ZHANG Jie, LI Dong-liang, HE Jin-mei, et al. Influence of terrain on precipitation distribution in Qingzang tableland in wet and dry year [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 319-326. (in Chinese))
- [28] 张文纲, 李述训, 庞强强. 青藏高原 40 年来降水量时空变化趋势[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 168-176. (ZHANG Wen-gang, LI Shu-xun, PANG Qiang-qiang. Changes of precipitation spatial-temporal over the Qinghai-Tibet Plateau during last 40 years [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 168-176. (in Chinese))
- [29] 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探[J]. *科技导报*, 2003(2): 54-57. (SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping. Signal, impact of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. *Science and Technology Review*, 2003(2): 54-57. (in Chinese))
- [30] 蓝永超, 沈永平, 苏宏超, 等. 全球变暖情景下新疆降水的变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(10): 66-71. (LAN Yong-chao, SHEN Yong-ping, SU Hong-chao, et al. Study on precipitation variations in Xinjiang region under global warming [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(10): 66-71. (in Chinese))

Spatial distribution of precipitation in Tianshan Mountains and its estimation *

ZHAO Chuan-cheng, DING Yong-jian, YE Bai-sheng, ZHAO Qiu-dong

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Using precipitation retrieved from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and 31 meteorological stations surrounding the areas in 1998-2008, a series of spatial and temporal distribution of monthly precipitation is constructed for Tianshan Mountains. The series is validated using the cross-validation method. The Nash-Sutcliffe coefficient is greater than 0.5 and the corresponding correlation coefficient is higher than 0.9. The result illustrates the applicability of using TRMM satellite to monitoring precipitation in northwestern China, especially in mountainous regions with insufficient meteorological stations. The precipitation series can be used to drive distributed hydrological models for water resources studies.

Key words: Tianshan Mountains; precipitation; TRMM satellite; cross-validation; spatial distribution

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2007CB411502) and the National Non-Profit Research Program of China (No. 200701046).