

基于 TRMM 和 NCEP-FNL 数据的降水估算研究

潘虹¹, 邱新法¹, 高婷², 何永健¹, 史建桥³

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 南京 210044; 2. 浙江省气象信息网络中心, 杭州 310017; 3. 94783 部队 61 分队, 浙江 长兴 313111)

摘 要:为了使 TRMM 数据在我国更好的应用, 该文基于 TRMM 降水产品, 耦合气象站观测资料和 DEM 数据, 利用 NCEP-FNL 数据计算得到各月高空盛行风向, 采用基于区域分月的逐步回归算法, 建立降水估算模型。得到 2000—2007 年全国 1 月、4 月、7 月、10 月降水空间分布图, 并对结果进行检验与分析。结果表明, 1 月、4 月、7 月、10 月平均绝对误差分别为 2.2, 5.8, 16.9, 6.0 mm, 平均相对误差分别为 19.3%, 14.2%, 13.4%, 18.9%, 模型估算结果较 TRMM 降水产品误差明显减小。模型估算的降水分布趋势不仅保持着原始 TRMM 降水产品的分布特征, 而且可以更好地体现出迎风坡和背风坡的降水分布规律。

关键词: TRMM; NCEP-FNL; 降水; 盛行风向; 地形

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0116-07

Study on the Estimation of Precipitation with the Data of TRMM and NCEP-FNL

PAN Hong¹, QIU Xin-fa¹, GAO Ting², HE Yong-jian¹

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Zhejiang Provincial Meteorological Information Network Center, Hangzhou 310017, China; 3. Unit 61, No94783 of PLA, Changxiang, Zhejiang 313111, China)

Abstract: In this paper, for the sake of TRMM data better application in our country, we presented a computational model for estimation of precipitation based on the data from TRMM and NCEP-FNL. With the prevailing wind direction of each month calculated by NCEP-FNL data, and coupled with the observational data of meteorological station and DEM data, a monthly stepwise regression algorithm for a certain region was constructed. By employing the estimation model, we obtained the spatial distribution of precipitation of China in January, April, July and October from 2000 to 2007. Further analysis and calculation showed that the averaged absolute errors for January, April, July and October were 2.2 mm, 5.8 mm, 16.9 mm and 6.0 mm, respectively; and the averaged relative errors are 19.3%, 14.2%, 13.4% and 18.9%, respectively. The estimated data significantly diminishes the errors of that from TRMM. Moreover, the global distribution of precipitation remains almost the same with that of the original TRMM data, while the results of our model nicely present the distribution pattern of precipitation for both windward and leeward slope.

Key words: TRMM; NCEP-FNL; precipitation; prevailing wind; terrain

降水是陆上水资源的直接来源和水循环的首要环节^[1], 长期以来, 降雨量的监测、预报和估算, 不仅是气象学的重要研究领域, 同时也是水文水资源和水利水电工程专家所关注的重大研究课题。降水因受地形、地貌等因素的影响, 在空间上分布很不均匀^[2], 但由于受站点位置、站网密度等限制, 地面观测不能准确把握降雨的空间分布和强度变化, 因此如何利用有限的站点资料, 融合其他多源数据, 实现降水量精

细化估算成为降水研究中的热点。

近几十年来, 随着气象卫星技术的发展, 通过卫星平台上的可见光、红外光和微波成像等遥感技术可以对降水进行探测、反演以及资料融合^[3]。美国 NASA (National Aeronautical and Space Administration) 和日本 NASDA (National Space Development Agency) 共同研制的热带降雨观测 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 卫星就是其中

收稿日期: 2013-07-28

修回日期: 2013-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“复杂地形下月平均气温分布式模型研究”(41175077); 黔科合重大专项字[2011]6003 号“贵州“两高”沿线特色农业气候精细化区划与气象灾害防控”

作者简介: 潘虹(1988—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事 GIS 在气象中的应用。E-mail: panhong_nuist@163.com

通信作者: 邱新法(1966—), 男, 浙江湖州人, 博士, 教授, 博士生导师, 现从事 3S 集成与气象应用方面的研究。E-mail: xfqiu135@nuist.edu.cn

一个可以进行准全球尺度降雨观测的卫星,其利用微波雷达主动遥感和多波段微波被动辐射联合反演全球降水分布,开创了卫星定量化测量热带降雨的新阶段。

TRMM 卫星自 1997 年成功发射以来,已向陆地发回多种高时空分辨率探测数据,其降水产品在降水测量、降水预报、暴雨研究、资料同化等国内外很多领域都得到了广泛应用^[4-8]。前人研究多分布在海洋或地势相对较平坦的区域,而对下垫面较复杂的区域检验不足,为此曾红伟等^[9]利用相关系数法、散点斜率法对澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据的精度进行了检验,发现坡度和高程对 TRMM 数据精度有较大影响,坡度越大,数据精度越低,高程的影响小于坡度;Barros^[10]利用 TRMM 数据研究不同尺度上喜马拉雅山中部地形对降水的影响,研究发现云和降水的形成与地形有关,可见,在使用 TRMM 降水产品时需考虑地形的作用。Yin^[11-12]评估了 SSM/I 和 TRMM 3B42 V5 降雨量在青藏高原的误差,并提出了地形纠正方法;Ji 等^[13]通过建立最优回归模型,引入地理地形因子订正 TRMM 3B43 产品在天山中部地区的降水分布,改进了 TRMM 卫星估算降水结果。但是傅抱璞^[14]曾指出坡面与降水时盛行风向之间的夹角才是导致地形降水增加或减少的关键因素,上述研究只考虑坡向本身对降水的影响,均没有考虑风向的作用。

因此,本文利用气象站观测数据和 TRMM 降水产品,并耦合 NCEP-FNL 风向数据和 DEM 数据,以此引入地形因子。在前人研究的基础上,分析了 TRMM 3B43 降水产品在中国区域与地面观测降水的偏差;引入地形因子,基于 TRMM3B43 数据建立的降水估算模型,其中坡向因子用风向和坡向的结合项来代替,利用 NCEP-FNL 地面气压、经向风、纬向风数据计算盛行风向,并将风向空间化,结合全国坡向,得到坡向因子,以此来区分迎风坡和背风坡,最后采用基于区域分月的逐步回归分析方法计算模型系数,得到 2000—2007 年全国 1 月、4 月、7 月以及 10 月的降水分布图;对模型估算结果进行验证和局地分析。

1 资料与处理

研究所用的数据包括气象站降水观测数据、TRMM 3B43 数据、美国 NCEP-FNL 全球分析资料(Final Operational Global Analysis,以下简称“FNL 资料”)和 DEM 数据。

(1) 气象站观测数据。降水观测数据来自于中

国气象数据中心,经数据质量控制后,选取 2000—2007 年 1 月、4 月、7 月、10 月全国共 696 个国家基准与本站观测数据。依据空间均匀采样算法,将所有站点分为两部分,一部分为拟合站,共 639 个,另一部分为验证站,共 57 个,空间分布如图 1 所示,从图 1 可见验证站空间分布均匀,在三大阶梯上均有分布,能较客观地检验模型结果。

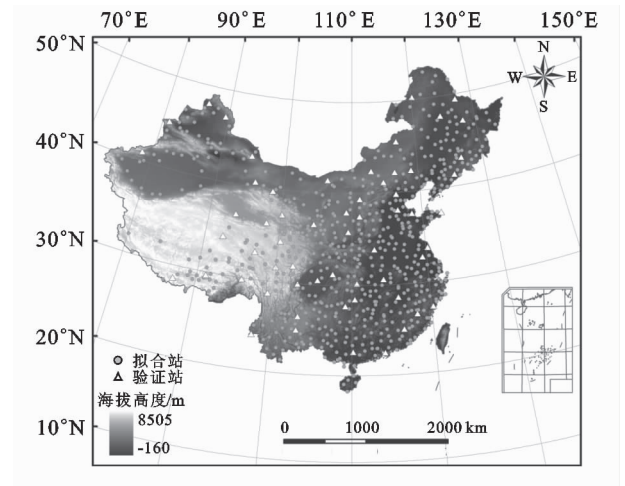


图 1 我国地势与观测站空间分布

(2) TRMM 3B43 数据。来自 NASA,是由 TRMM 3B42 产品联合 NOAA 气候预测中心气候异常监测系统(CAMS)的全球格点雨量测量器资料及全球降水气候中心(GPCC)的全球降水资料合成的数据产品。其空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 个月,选取的时段同降水观测数据,利用 ENVI 和 ArcGIS 平台,生成各月降水量。

(3) NCEP-FNL 数据。FNL 资料来自美国国家环境预报中心和美国大气研究中心(NCAR)的 NCEP-NCAR 的全球最终分析资料,其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间间隔 6 h(世界时 0:00, 6:00, 12:00, 18:00),包含 10~1 000 hPa 的 26 个标准等压层、地表边界层和对流层顶的要素信息,本文选用 2000—2007 年每 6 h 一次的地面气压和高空各层经纬向风数据。

(4) DEM 数据。选用空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 DEM 数据,如图 1 所示。利用 ArcGIS 平台,生成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的坡度、坡向数据,并对坡向数据进行规范化处理,即将坡向统一减去 180° ,处理后坡向的取值范围为 $[-181^\circ, 180^\circ]$ 其中 -181° 对应平地,正南为 0° ,正东为 -90° ,正西为 90° ,正北为 -180° 。

由于地面气象站点空间分布不均匀、部分区域分布稀疏,以及不同数据源数据的分辨率匹配问题,所以本文用降尺度的方法,将不同时间和空间分辨率数据源最终都统一到与 DEM 地形数据匹配的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的分辨率,时间尺度为 1 个月。

2 研究方法

2.1 TRMM 3B43 降水产品的性能评价

图 2 给出了 2000—2007 年期间所有地面站点和 TRMM 3B43 之间月平均降水量的差异。由于 TRMM 卫星在 50°N 以上没有观测数据,所以剔除无数据的站点,使用剩下的 663 个站点。在降水较少的冬季,1 月 TRMM 3B43 降水会稍许高估站点的降水,其他月份则会低估站点的降水,对于 7 月,卫星估算降水与地面观测值之间的偏差较大,范围在-130~122 mm,相对于 1 月偏差则较小,范围在-37~26 mm,可见,TRMM 卫星对降水极值估计不足。

TRMM 3B43 与地面观测数据相对误差的空间分布如图 3 所示,在站点分布密集地区(如 100°E 以东),TRMM 降水与地面观测降水具有很好的一致性,在站点分布稀疏区域(如 100°E 以西),TRMM 与

站点之间的误差较大。其中 1 月、4 月、10 月的相对误差明显较大,所以在使用这几个月的 TRMM 降水产品时需要注意,而 7 月夏季相比其他月份相对误差要小的多。特别在地形复杂的天山地区,各月的相对误差均比较大。此外,通过计算 TRMM 降水与站点降水之间的相关系数,可知各月相关系数都接近 0.9。

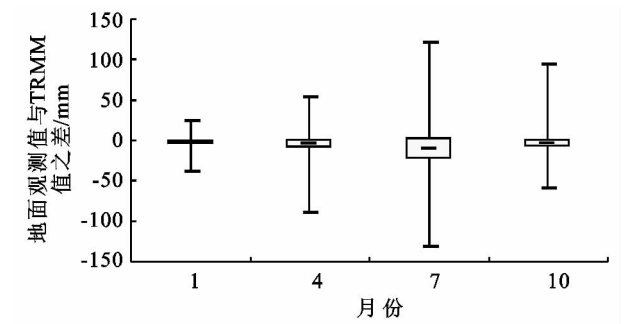


图 2 地面观测站与 TRMM 3B43 降水之间偏差月变化箱线

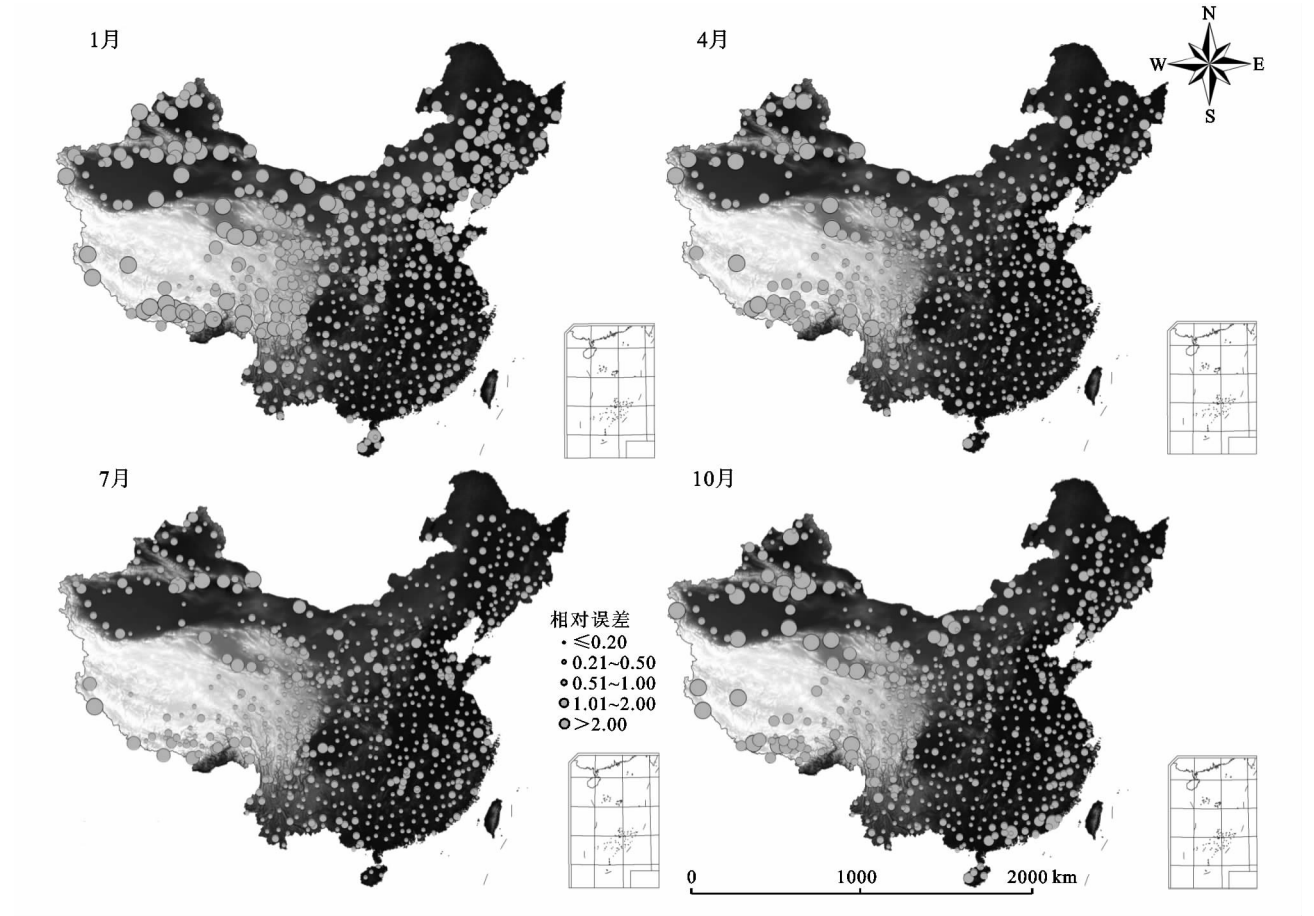


图 3 TRMM 3B43 降水与地面观测站之间相对误差空间分布

总体而言,TRMM 3B43 降水数据与地面观测数据具有很强的相关性,但对下垫面较复杂的区域,特别是山区,及站点稀少的地区存在相对较大的偏差,这种差异可能来自两方面:一方面是下垫面状况和地面观测站点分布的疏密程度;另一方面是季节性差异。因此,TRMM 3B43 产品在中国的应用还需要考

虑地形因子的作用,对地理细节进行适当纠正。

2.2 模型的建立

本文在经反距离加权插值成 1 km×1 km 分辨率的 TRMM 卫星数据的基础上,结合地形因子,考虑海拔高度、坡度、坡向和风向对降水的综合影响作用,建立基于 TRMM 降水产品的降水估算模型:

$$P=b_0+b_1\text{TRMM}+b_2h+b_3\cos(\theta-\beta)\sin(2\alpha)\quad(1)$$

式中: h ——地形高程; β ——坡向; α ——坡度; θ ——降水时盛行风向; b_0 ——常数项, b_1 — b_3 ——各项系数。 $\cos(\theta-\beta)$ ——降水的坡向因子项,是坡向和风向对降水影响的具体形式; $\sin(2\alpha)$ ——坡度对降水的影响,具体影响机理见文献[14]。

但降水时盛行风向 θ ,是一个瞬时变量,对于任意一场雨,其值可能都不相同。故在月尺度下,如何获取降水时盛行风向是首先需要解决的问题。对于局部小范围地区,可以利用系数隐含、经验取值等方法获得^[15-17],但逐网格解算全国风向坡向角的问题一直没有解决,也无法系统地分析坡向与降水之间的定量关系,故通过 FNL 资料计算得到我国各月高空盛行风向,利用 FNL 盛行风向代替降水时盛行风向 θ 。

2.3 盛行风向的计算

盛行风向是指在某地,具有出现频率明显高于其他风向频率的风。利用 2000—2007 年每 6 h 一次的 FNL 资料,根据其中的地面气压及各层经纬向风数据,获取 8 a 间我国各月高空盛行风向,计算步骤如下:(1) 逐网格读取 FNL 的地面气压数据,获取各网格所属气压层号 k ;(2) 从 FNL 的第 k 层资料读取各格点的经向风、纬向风数据,计算风向角;(3) 对 2000—2007 年各月各时次的数据进行①,②步骤,得到各月所有时次的风向角,统计各月所有时次中出现次数最多的风向,即为 2000—2007 年间各月盛行风向;(4) 利用风向空间化算法,将水平分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$ 的矢量风向数据进行空间插值,生成全国范围 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 分辨率下各月风向栅格图。

盛行风向的数值范围在 $[-180^\circ, 180^\circ)$ 之间,采用箭头指示其方向,其中 -180° 为北风,用 \downarrow 表示; -90° 为东风,用 \leftarrow 表示; 0° 为南风,用 \uparrow 表示; 90° 为西风,用 \rightarrow 表示。以 7 月为例,其盛行风向如图 4 所示。

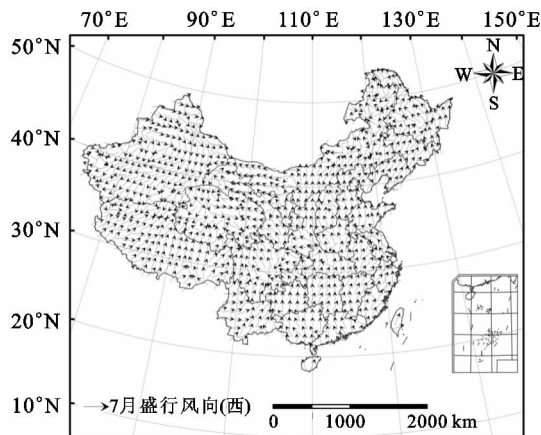


图 4 2000—2007 年 FNL 计算 7 月盛行风向分布

由图 4 可知,从整体趋势上看,7 月夏季我国盛行风向以南至东南为主。其中由东北平原经华北平原直到华南和云贵高原,多吹南至西南风;北疆盛行西北和西风,南疆多东北风;青藏高原大约以唐古拉山为界,以南地区盛行东南风,以北地区吹东至东北风。

3 结果与分析

3.1 模型降水估算结果

我国幅员辽阔、地形特征复杂,各种地理、地形因子对降水的影响存在着明显的地域差异^[18],因此,在某些地区(如平原)式(1)中有的因子可能对降水的影响不大,此时应采用逐步回归分析法。逐步回归分析将对每个自变量进行假设检验,当某一自变量对因变量影响不显著时,则把它剔除,最终筛选出具有显著影响的因子作为自变量。此外,本文选择基于区域分月算法对系数进行优化,其核心思想是将站点数据按月分组,相同月份的数据在一起建模,在建模过程中,设定一搜索矩形框,通过在一定范围内,不断改变矩形框的大小及形状,利用最小二乘法,筛选出拟合误差最小、相关系数最高的一组最优回归系数。通过此算法,可使各站各月拥有其独特的一组系数,体现了降水在不同季节、不同地理、地形环境下的时空差异性。最后利用反距离加权插值法将各项系数进行空间化,根据公式(1)生成我国 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 分辨率下 2000—2007 年 1 月、4 月、7 月、10 月降水空间分布图,如图 5 所示。

根据图 5,1 月全国模型估算降水量为 $0\sim 150\text{ mm}$,其中长江中下游平原及其以南地区为降水的高值区,降水低值区位于我国西北干旱区的新疆南部、内蒙古西北部及青藏高原北部。4 月,全国模型估算降水量为 $0\sim 295\text{ mm}$,降水的高低值区与 1 月相近,但降水的最高区位于华南地区,较 1 月偏南,且随盛行风向的变化,西风冷湿气流无法顺额尔齐斯河谷东来,原本降水丰富的新疆西部和北部变成干旱区,只有局部有一些降水。7 月,全国模型估算降水量为 $0\sim 704\text{ mm}$,在空间上分布很不均匀,其中降水的高值区为地势较为平坦的黄淮平原及距离海洋较近的云南、广东等南方部分地区,降水的低值区在北疆的吐鲁番盆地和塔里木盆地,由于远离海洋,周围受高山的阻挡,西来的弱气流难以翻越,强气流虽能过山,但常多下沉气流,是我国降水最少的地区,形成塔克拉玛干等沙漠。10 月,降水明显减少,全国模型估算降水量为 $0\sim 320\text{ mm}$,其中云南的西南部及海南全省的降水量较大,除天山及其以北外的我国其他西北地区以及内蒙古部分地区,10 月降水量仍很小。

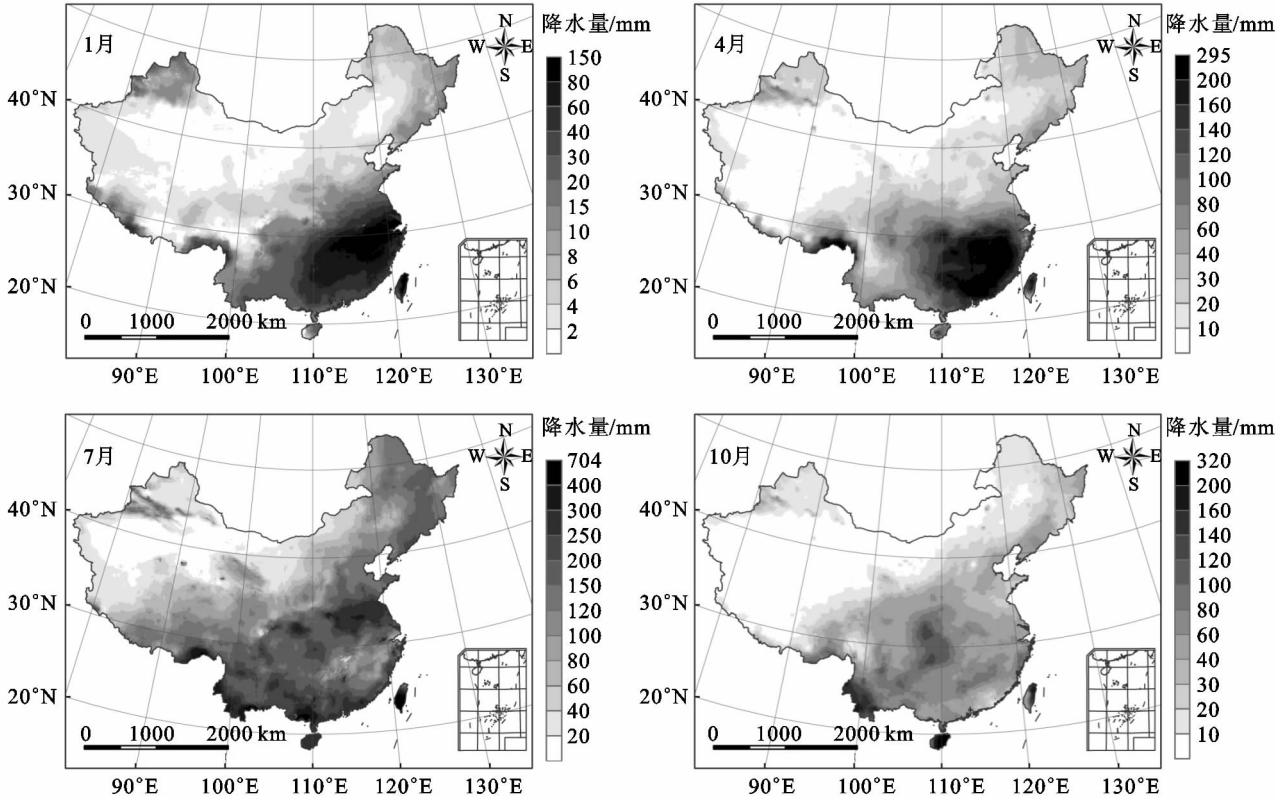


图 5 2000—2007 年 8 a 平均下估算我国月降水量空间分布

从降水空间分布上看,1月、4月、7月、10月模型估算值与地面观测值都十分相似,既体现出我国降水东多西少、南多北少的宏观分布特征,也体现出降水值在各地的差异情况,符合客观事实,并且较 TRMM 卫星降水值更加接近地面观测值,一定程度上弥补了 TRMM 卫星空间分辨率低以及在 50°N 以上无观测数据的问题;从降水时间分布上看,模型估算结果不仅体现了我国冬季降水量少,夏季降水量大的季节特点,而且表现出降水高、低值区在季节上的移动与转变。总体而言,模型估算结果既保持了原始 TRMM 卫星的降水分布趋势,又体现了一些局部地理细节规律。

3.2 模型验证

充分考虑到空间分布相对均匀和代表地形特征两方面因素,在中国范围内选取 57 个气象观测站点作为模型估算结果的验证点,以便更好地说明模型估算结果在空间的优劣及差异。图 6 给出了 57 个验证站各月实际降水量与 TRMM 卫星和模型估算降水量的点聚图。从图中可以看出除少数几个站点外,其余站点都聚集在 $y=x$ 直线附近,且经地形纠正后,TRMM 降水更接近真实值,说明模型估算效果较好。

为了定量分析验证误差大小,以各站真实降水量与模型估算降水量之间的相关系数 R 、平均绝对误差 MBE 和平均相对误差 MRE 的大小作为衡量订正结

果优劣的指标。表 1 列出了地形纠正前后 TRMM 3B43 降水量的估计偏差。从表中可以看出,模型估算误差较 TRMM 降水本身均有所减小,相关性也增大。其中 7 月平均绝对误差最大,约为 16.9 mm,1 月平均绝对误差最小,为 2.2 mm;从相对误差上分析,1 月平均相对误差最大,为 19.3%,4 月、7 月平均相对误差较小,分别为 14.2%和 13.4%。总体来说,经过地形纠正后 TRMM 估算降水的相对误差都控制在 20%以内,即纠正后卫星反演降水在中国区域的量值接近于地面观测降水量值,说明模型计算结果较可靠。

3.3 局地分析

降水受坡向的影响显著,在迎风坡降水丰富,在背风坡降水稀少^[19],因此需对模型估算结果进行局地分析,选取降水量受坡向影响显著的山体(如天山西部伊犁河谷年降水量为 200~400 mm,而其背风面的艾丁湖一带降水约只有 90 mm),分析其估算的降水量结果能否体现降水量在不同坡向间的分布差异,这是作为检验模型估算结果真实性与精细化的重要指标。本文以 7 月为例,选取天山、武夷山为检验区,分析模型估算降水量与山体坡向间的定量关系,给出了模型估算降水量随坡向变化的曲线图,如图 7 所示。

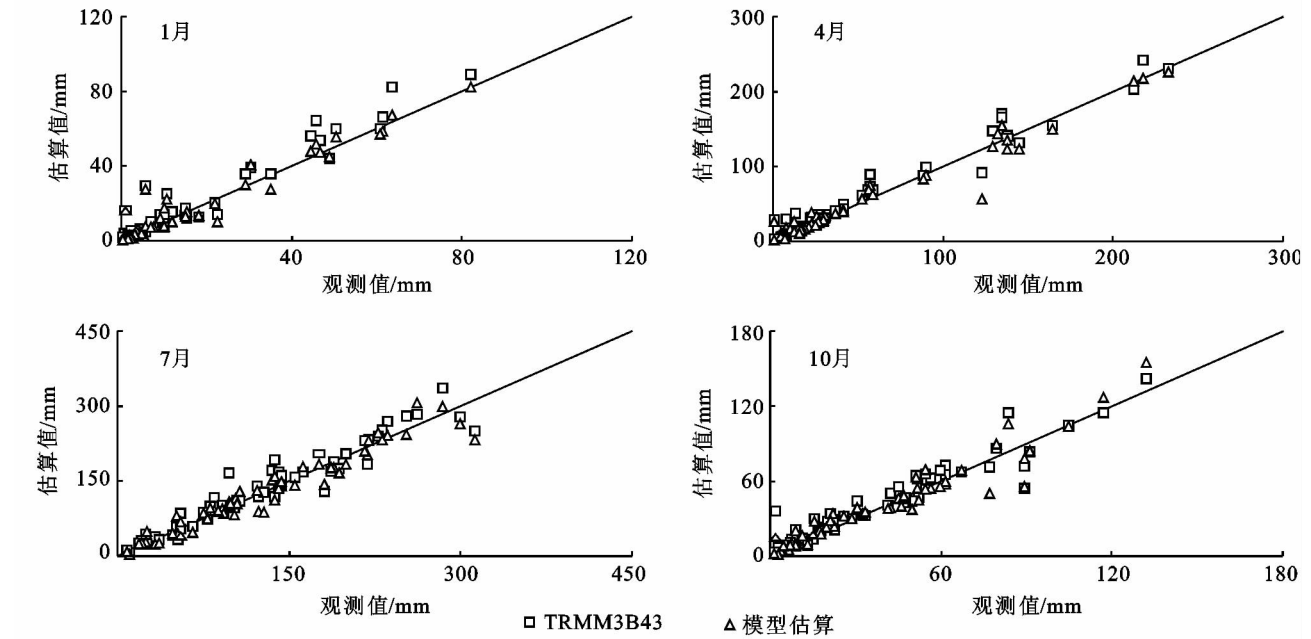


图 6 TRMM 初始值与模型估算降水值和地面观测值散点图

表 1 TRMM 初始值与模型估算结果误差对比

| 月份 | TRMM 3B43 | | | 模型估算 | | |
|----|-----------|--------|-------|-------|--------|-------|
| | R^2 | MBE/mm | MRE/% | R^2 | MBE/mm | MRE/% |
| 1 | 0.966 | 4.0 | 36.2 | 0.980 | 2.2 | 19.3 |
| 4 | 0.965 | 9.2 | 23.5 | 0.974 | 5.8 | 14.2 |
| 7 | 0.879 | 21.5 | 17.6 | 0.903 | 16.9 | 13.4 |
| 10 | 0.918 | 7.1 | 28.9 | 0.922 | 6.0 | 18.2 |

对于天山地区,如图 7a 所示:模型估算天山东南坡最小、在西北坡最大,两坡最大降水差在 30 mm 以上。从变化趋势上看,降水量从北坡到东坡,一直减小,到东南坡时,达到最小;从东南坡到南坡再到西坡,降水一直增大;到西北坡时,达到最大值;从西北坡转北坡时,降水又在缓慢减少。这种变化与天山水汽主要来自西北方向吻合,说明该模型估算结果可以

反映天山地区降水的局部精细化分布特征。

对于武夷山地区,见图 7b:模型估算降水量在西南坡最大,在东北坡最小,最大降水差在 50 mm 左右。从随坡向变化的趋势上看,降水从北坡到东北坡减小,从东北坡开始到西南坡,降水逐渐增大,从西南坡到北坡,又有减小的趋势。这种变化趋势与武夷山夏季盛行南风,水汽主要来自南方吻合,说明模型反映了降水在武夷山地区随坡向变化的细节特征。对于 TRMM 卫星降水产品,由于其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,其降水产品无法体现 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率下降水随坡向的变化情况。通过以上验证和分析,可知在降水的回归模型中引入 FNL 风向可以提高 TRMM 卫星估算降水的精度和可靠性。

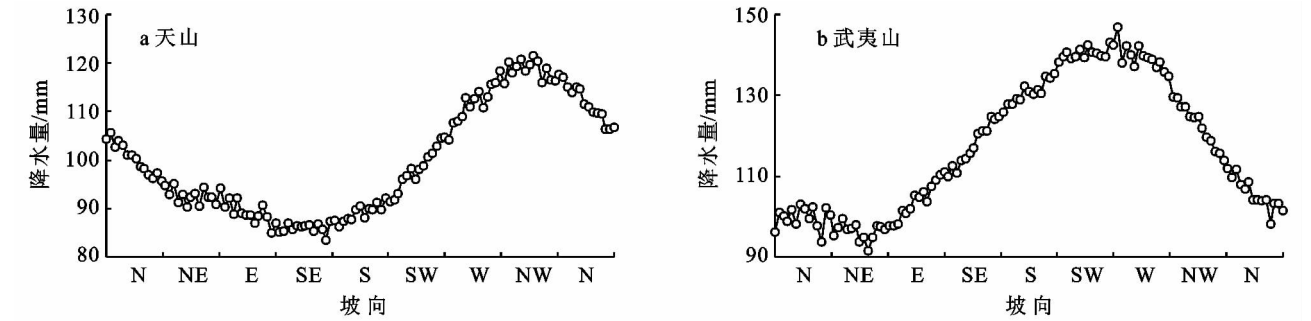


图 7 模型估算 7 月降水量随坡向变化的曲线

4 结论

本研究在分析 TRMM 3B43 估算中国区域月降水量与地面观测值偏差的基础上,利用 NCEP-FNL 风向数据,得到我国 2000—2007 年 1 月、4 月、7 月、10 月盛行风向,并基于 TRMM 卫星降水产品,利用

站点资料、DEM 数据、FNL 资料建立多元回归模型,通过区域分月的逐步回归分析法,生成我国月降水量空间分布图,并对结果进行了检验和分析。主要结论如下:

(1) TRMM 3B43 降水产品和地面观测值在月尺度上具有较好的相关性,但在地形复杂的地区和站

点分布稀疏的地区数值上存在明显偏差。

(2) 在 TRMM 降水产品的基础上,耦合 NCEP-FNL 风向数据和 DEM 数据,提高了降水估算模型的精度。

(3) 本文提出的降水估算模型具有良好的精度,各月的相对误差均在 20% 以下,且符合迎风坡降水大于背风坡的客观规律,模型结果较可靠。

降水的影响因素很多,模型中只考虑了其中部分因素,忽略了其他因素的影响(如风速、气团远离水汽源的距离、植被盖度^[20]等),这也是造成模型估算误差的原因之一。多数据源卫星数字产品的订正、集成与应用研究,是本文后续研究应着力工作的方向,融合多种数据,发挥不同数据的优势,可能是进一步提高模型估算降水精度的重要途径。

参考文献:

- [1] 侯兰功,肖红浪,邹松兵,等.黑河流域水循环特征研究[J].水土保持研究,2010,17(3):254-258.
- [2] 陈贺,李原园,杨志峰,等.地形因素对降水分布影响的研究[J].水土保持研究,2007,14(1):119-122.
- [3] 徐晶,毕宝贵.卫星估计降水量产品的优化处理及分区检验[J].气象,2005,31(2):27-31.
- [4] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38-55.
- [5] Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(7): 689-701.
- [6] Nesbitt S W, Zipser E J. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements[J]. Journal of Climate, 2003, 16(10): 1456-1475.
- [7] 闵爱荣,游然,卢乃锰,等. TRMM 卫星微波成像仪资料的陆面降雨反演[J]. 热带气象学报, 2008, 24(3): 265-272.
- [8] 白爱娟,方建刚,张科翔. TRMM 卫星资料对陕西及周边地区夏季降水的探测[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 41-45.
- [9] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM3B43 数据精度检验[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004.
- [10] Barros A P, Lettenmaier D P. Dynamic modeling of orographically induced precipitation[J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(3): 265-284.
- [11] Yin Z Y, Liu X D, Zhang X Q, et al. Using a geographic information system to improve Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) precipitation estimates over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D03110, doi: 10. 1029/2003JD003749.
- [12] Yin Z Y, Zhang X, Liu X, et al. An assessment of the biases of satellite rainfall estimates over the Tibetan Plateau and correction methods based on topographic analysis[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(3): 301-326.
- [13] Ji X, Chen Y. Characterizing spatial patterns of precipitation based on corrected TRMM 3B43 data over the mid Tianshan Mountains of China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(5): 628-645.
- [14] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 302-314.
- [15] Guan H, Wilson J L, Makhnin O. Geostatistical mapping of mountain precipitation incorporating autosearched effects of terrain and climatic characteristics[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 1018-1031.
- [16] 孙鹏森,刘世荣,李崇巍. 基于地形和主风向效应模拟山区降水空间分布[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1910-1915.
- [17] 张宏群,马晓群,范伟,等. 基于 GIS 的大别山区东段雨季降水空间分布模拟[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 152-157.
- [18] 韩雪云,杨青,姚俊强. 新疆天山山区近 51 年来降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 139-144.
- [19] 林之光. 地形降水气候学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [20] 穆兴民,陈国良,徐学选. 黄土高原降水量与地理因素关系分析[J]. 水土保持研究, 1992, 16: 80-86.