

doi: 10.13866/j.azr.2018.02.18

基于 TRMM 卫星数据的蒙古高原降水精度评估 与季节分布特征^①

秦福莹^{1,2}, 贾根锁³, 杨 劼¹, 那音太⁴, 侯美亭⁵, 包玉海²

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 内蒙师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;
3. 中国科学院大气物理研究所中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029;
4. 日本酪农学园大学酪农学研究所, 北海道 0698501; 5. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘 要: 采用蒙古高原 134 个气象站点的降水量数据作为地面验证数据, 对新一代 TRMM 卫星降水产品(3B43 V7)进行了精度评估, 并分析了最近 19 a 蒙古高原降水的空间和季节分布特征。结果表明: 月尺度 TRMM 3B43 数据与站点数据之间呈显著正相关, 拟合优度 R^2 达到 0.88 ($P < 0.01$), 具有较好的一致性; 近 19 a 基于 TRMM 的年均降水量总体上呈显著上升趋势, 上升速率为 $32.1 \text{ mm} \cdot (\text{10a})^{-1}$ ($P < 0.05$), 但存在一定的空间差异, 其中, 高原东北部、中北部和西南地区降水量呈增加趋势, 高原西部、东北部大兴安岭以西和东南部降水量呈减少趋势; 季节分布上, 除了冬季呈略微减少趋势外, 其他季节都呈增加趋势, 且四季降水量的年际变化也具有明显的空间分异。

关键词: 降水量; 精度评估; 季节分布; TRMM; 蒙古高原

蒙古高原位于北半球中纬度地带, 在行政区域上主要包括蒙古国和中国内蒙古自治区, 面积约 $2.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ⁽¹⁻²⁾, 在大气系统上处于西风带和东亚季风环流的过渡地带, 加之特殊的海陆位置以及复杂的地貌特征, 对气候变化的响应非常敏感⁽³⁻⁴⁾。由于蒙古高原大部分地区属于干旱半干旱区, 生态脆弱, 降水是影响其生态系统和环境演变的关键因素⁽⁵⁻⁶⁾。在全球气候变暖的背景下, 蒙古高原地区气温上升速率高于全球平均水平⁽⁷⁻⁸⁾, 加之受人类活动的影响⁽⁹⁾, 其区域降水正发生着显著的变化, 降水变化的波动性和不确定性, 无疑会对当地生态恢复和社会经济发展产生重要的影响⁽¹⁰⁻¹¹⁾, 因而引起了从事气候、水文、生态等学者的广泛关注^(6, 12-15)。

以往有关蒙古高原降水变化研究主要依赖于气象站点实测降水数据⁽¹⁶⁻¹⁹⁾, 而蒙古高原地域辽阔, 在广阔的沙漠、戈壁等人烟稀少的地区, 气象观测站点较少, 基于稀疏站点的空间插值具有很大的误差, 难以反映降水变化的细节信息。然而, 基于卫星的降水观测数据由于不受地形和气候条件限制、覆盖

范围广、时空分辨率高、获取方便等特点, 目前已成为降水观测数据的重要来源⁽²⁰⁻²²⁾, 尤其在气象观测数据缺乏的地区显示出较强的优越性, 如新一代 TRMM 3B43 V7 降水产品, 针对该数据的精度分析与应用也受到许多学者的关注⁽²³⁻²⁵⁾。过去由于受到蒙古国气象数据获取与共享的限制, 对整个蒙古高原 TRMM 数据的精度评价研究较少。蔡研聪等⁽²⁶⁾基于内蒙古 1998—2012 年 TRMM 3B42 V7 产品和 53 个气象站点数据, 评估其在内蒙古地区的精度, 揭示了精度评价指标的空间分布特征及其影响因子。杨艳芬等⁽²⁷⁾指出, TRMM 遥感降水数据在中国西北干旱区(包括内蒙古西部)应用时, 需要进一步精度评估与校正处理。而随着气候变化研究的不断深入, 该领域的研究超越了国界, 尤其是“一带一路”政策的实施, 为开展蒙古高原气候变化研究带来了契机。

本文以整个蒙古高原为研究区, 采用蒙古高原地区 134 个实测站点降水数据, 对不同时间尺度的 TRMM 3B43 数据进行了精度评估, 并更新分析了该地区最近 19 a 降水变化的时空变异规律, 这将有助

① 收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2017-12-19
基金项目: 中国科学院国际合作一带一路专项: 气候变化研究及观测计划(134111KYSB20160010); “海洋气候数据集成与分析”(2016YFA0600102_ZDW1704); 国家自然科学基金项目(61661045); 中国气象局气候变化专项(CCSF201706)资助
作者简介: 秦福莹(1982-), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为区域植被与气候变化研究。E-mail: nsdqinfuying@163.com
通讯作者: 贾根锁。E-mail: jiong@tea.ac.cn

于区域气候、生态、水文等模型的参数优化等,从而为制定科学合理的水资源利用、防灾减灾以及生态保护等提供科学支撑。

1 研究区概况

蒙古高原深居亚洲大陆中部,地理位置 $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'N$ 、 $88^{\circ}43' \sim 126^{\circ}04'E$,南北跨度大,东西延伸长,本研究选取了蒙古高原的主体部分蒙古国和中国内蒙古自治区,在行政区划上蒙古国包

括 21 个省,内蒙古包括 12 个盟市(图 1)。地势自西向东逐渐降低,大部分地区海拔在 $1\ 000 \sim 1\ 500\text{ m}$ 。西北部多山地,西南部为戈壁荒漠,中部和东部为大片丘陵草原。气候为典型的大陆性气候,大部分为干旱半干旱区,冬冷夏热。降水量远小于蒸发量,降水主要发生于 5—10 月,期间的降水量占到了年降水量的 90% 以上。由于高原北部和东部受北冰洋水汽和太平洋水汽的影响,降水量由北向南和由东向西逐渐减小。

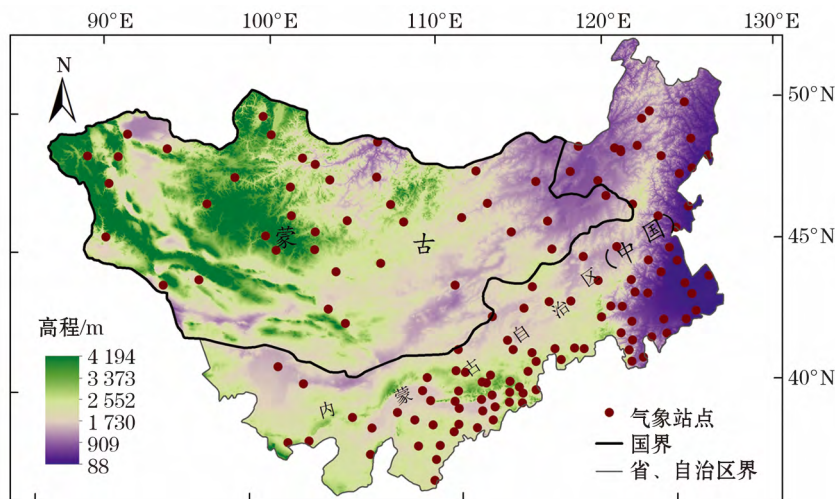


图 1 蒙古高原地理位置、行政区划和气象站点分布示意图

Fig. 1 Geographic location, administrative division and distribution of meteorological stations in the Mongolian Plateau

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文所采用的 TRMM 数据为 TRMM 卫星第 7 版 3 级产品 TRMM 3B43 V7 月降水数据,覆盖范围为 $50^{\circ}S \sim 50^{\circ}N$,时间范围为 1998—2016 年,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,数据来自 NASA (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)。

用于验证 TRMM 数据的实测降水数据选自蒙古高原 134 个气象站点 1998—2010 年月降水量资料,包括蒙古国境内 35 个站点(数据由蒙古国水文气象局提供),内蒙古境内 99 个站点(从内蒙古气象局获取),其空间分布见图 1。对每个站点数据资料进行了质量控制,缺失的数据量不到 0.1%,对个别月份缺失的降水量通过前后两年同一个月份的降水数据取平均代替^[28]。

2.2 研究方法

2.2.1 精度评价 使用相关系数 R (correlation coefficient)、平均误差 (mean error, ME)、均方根误差

(root mean square error, RMSE) 3 个误差评价指标对卫星降水数据进行精度评估。其中,相关系数 R 表示卫星降水数据与站点降水数据之间的线性相关程度;平均误差 ME 表示卫星降水数据与站点降水数据之间的平均误差大小;均方根误差 RMSE 用来评估误差的整体水平,其计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (2)$$

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

式中: x_i 为卫星数据降水量 (mm); y_i 为站点降水量 (mm); n 为数据记录的总个数; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为卫星数据降水量和站点降水量的均值 (mm)。

2.2.2 趋势分析与 Mann-Kendall 统计检验法 通过 Sen's 趋势分析和 Mann-Kendall 检验,分析了蒙

古高原区域平均和逐像元的年和四季降水量的变化。Mann-Kendall(简称为 M-K)法是一种非参数统计检验方法,变量可以不具有正态分布特征,因此,适用于水文变量的趋势检验⁽²⁹⁻³¹⁾。假定 X_1, X_2, \dots, X_n 为时间序列变量, n 为时间序列的长度, M-K 法定义了统计量 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (4)$$

其中,

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } (X_j - X_i) > 0 \\ 0, & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ -1, & \text{if } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: X_j, X_i 分别为 j, i 年的相应测量值,且 $j > i$ 。

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t(t-1)(2t+5) \right] \quad (7)$$

式中: Z 为一个正态分布的统计量; $\text{Var}(S)$ 为方差。在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。其变化趋势的大小用 Sen's 斜率表示,计算如下:

$$\text{Sen's 斜率} = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall i < j \quad (8)$$

若斜率 > 0 ,表示呈上升趋势;若斜率 < 0 ,表示呈下降趋势。

3 结果分析

3.1 TRMM 3B43 降水精度评估

由图 2 可知,在月尺度上,TRMM 降水量与实测降水量之间均呈显著正相关关系,拟合优度 R^2 为 0.88,通过了 0.01 水平的显著性检验,说明 TRMM 3B43 数据与实测站点数据之间具有很好的一致性。TRMM 降水量与实测降水量之间的平均误差和均方根误差分别为 2.26 mm 和 13.76 mm,TRMM 降水量略高于实测降水量。

由图 3a 可以看出,相关系数 R 介于 0.73 ~ 0.98,平均为 0.92,阿尔贝赫尔站(Arvaikheer)的 R 值最小,为 0.73,额尔德尼满都拉站(Erdenemandal)的 R 值最高,达到 0.98,其中大约 70% 的站点相关

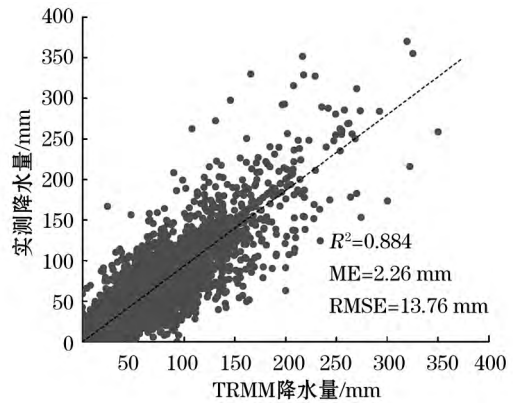


图 2 研究区 1998—2010 年 TRMM 月降水量与实测月降水量散点图

Fig. 2 Scatterplot between TRMM satellite and observation precipitation data over the Mongolian Plateau

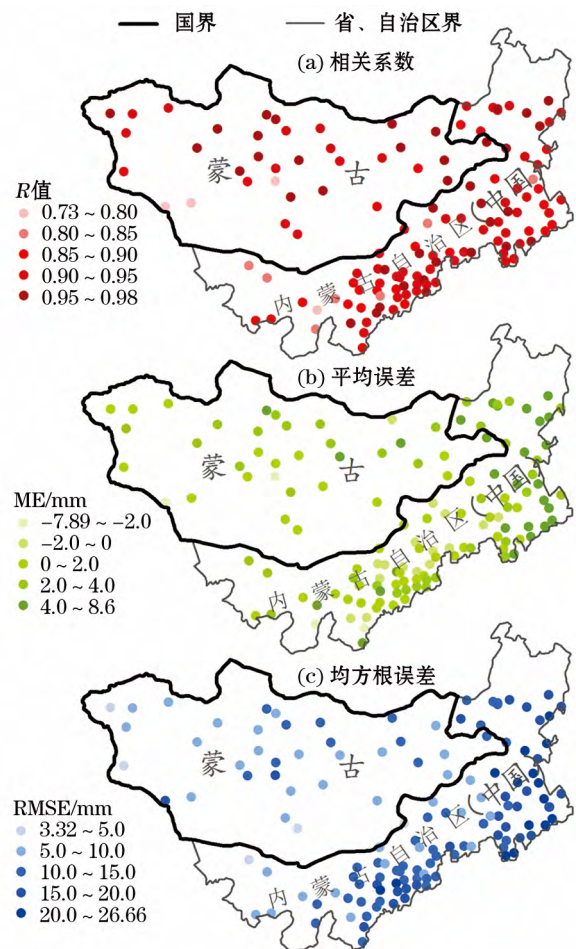


图 3 研究区月降水量误差评价指标的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of evaluation index of monthly precipitation error

系数高于 0.9 ,说明在本研究区域内 TRMM 数据与站点数据具有良好的相关性。从相关系数空间分布特征来看,高原北部和东部地区 R 值较高,西南部地区 R 值较低,表明 TRMM 数据在降水量少的地区与站点数据的相关性会有所降低。平均误差值介于 $-7.89 \sim 8.6 \text{ mm}$,整体上 TRMM 数据降水量高估情况较多,114 个站点 ME 值大于 0,占全部站点的 85.1%,主要分布于高原东部和东北部地区;只有 20 个站点 ME 值小于 0,占全部站点的 14.9%,主要分布于高原南部偏西地区(图 3b)。高原东部地区 RMSE 值较高,高于 20 mm;其次为高原北部、东北部和东南部地区,其 RMSE 值介于 10 ~ 20 mm;高原中部、西南部和西部地区 RMSE 值较低, RMSE 值小于 10 mm(图 3c)。整体上,在降水量较多的地区,TRMM 数据降水量高估情况较多,在降水量较少地区,TRMM 降水量往往较实测值偏低。总体而言,TRMM 3B43 卫星降水数据在蒙古高原地区具有良好的适用性,能够满足月尺度及以上的区域降水变

化研究。

3.2 年降水量变化规律

3.2.1 降水量年际变化 图 4 显示了 1998—2016 年蒙古高原降水量的年际变化趋势以及累积距平变化。可以看出,近 19 a 降水量呈显著的波动上升趋势,上升速率为 $32.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.05$)。研究区多年平均年降水量为 240.5 mm,介于 193.4 ~ 338.6 mm,整体上表现出以 1998 年、2003 年和 2012 年为波峰,以 2001 年、2007 年和 2014 年为波谷的波动过程。从年降水量的时间变化过程来看,年降水量呈现出阶段性变化特征,1998—2011 年整体上呈持续下降趋势,2011 年以后有所回升,呈持续上升的增加趋势。

3.2.2 降水空间分布 图 5a 给出了研究区多年平均降水量的空间分布,可以看出,由于蒙古高原北部和东部受来自北冰洋和太平洋水汽的影响,年降水量整体上由北部、东部、东南部逐渐向中心减少,形成一个环带状的特征,由湿润、半湿润过渡到半干旱

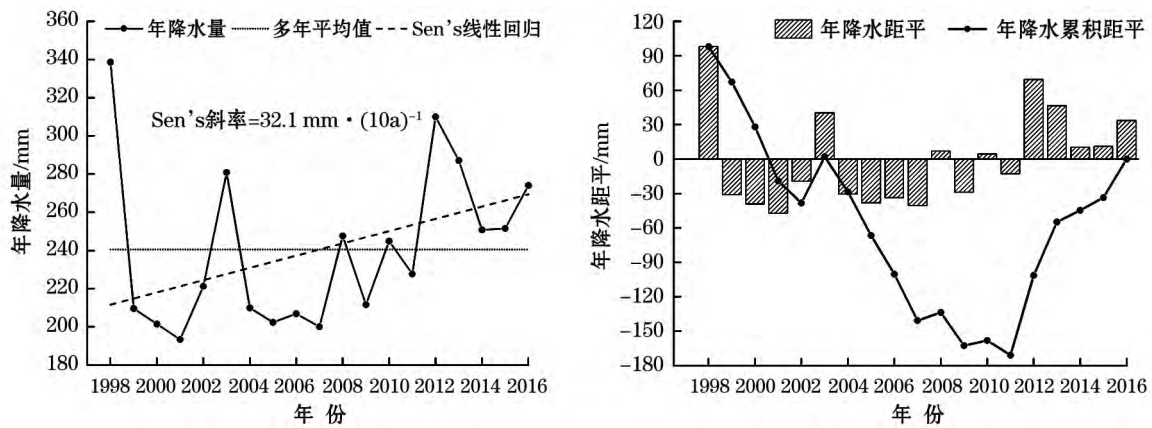


图 4 蒙古高原年降水量及其距平/累积距平年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations of annual precipitation and its anomaly/cumulative anomaly over the Mongolian Plateau

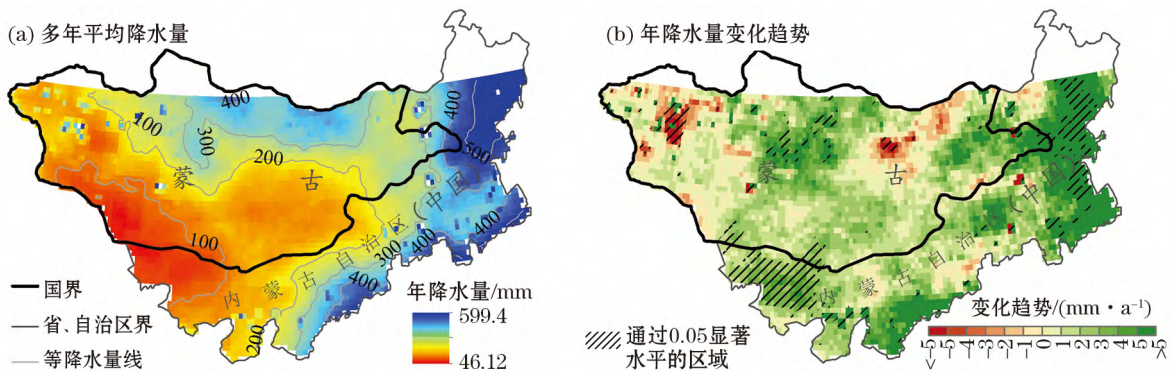


图 5 1998—2016 年蒙古高原多年平均降水量及变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean annual precipitation and its change trend over the Mongolian Plateau during the period of 1998 - 2016

和干旱气候。高原内只有小部分地区降水量超过 500 mm, 其中, 内蒙古大兴安岭及其东部平原地区年降水较多, 为 500 ~ 550 mm。随着与海洋距离的加大, 内蒙古东部、蒙古国北部和东部地区降水量在 300 ~ 400 mm, 高原中西部为干旱半干旱区, 年降水量介于 100 ~ 200 mm, 在两个洋面水汽很难到达的西南部地区降水量小, 仅 100 mm 左右, 在阿拉善盟中央戈壁地区年降水量最少, 约 50 mm。总体上, 年降水量空间分布呈现出由东北向西南、由北部向南部逐渐递减的变化趋势。

图 5b 显示了研究区 1998—2016 年降水量变化趋势的空间分布。可以看出, 蒙古高原东北部、中北部和西南地区降水量呈增加趋势, 蒙古高原西部地区、东北部大兴安岭以西地区和东南部地区降水量呈减少趋势。从高原内部来看, 内蒙古呼伦贝尔市大部、兴安盟、通辽市、赤峰市、锡林浩特市中部和东北部、鄂尔多斯市、阿拉善盟、蒙古国色楞格省、达尔

汗乌拉省、布尔干省、后杭爱省、前杭爱省、巴彦洪戈省东部、东方省东南部和苏赫巴托尔省北部地区年降水量呈增加趋势; 而内蒙古呼伦贝尔市西部、乌兰察布市、呼和浩特市北部、巴彦淖尔市西部、锡林浩特市南部、蒙古国扎布汗省、戈壁阿尔泰省、乌布苏省、巴彦乌列盖省、科布多省、肯特省、东方省北部和中央省东南部地区年降水量呈减少趋势。

3.3 降水量季节变化

3.3.1 四季降水年际变化 蒙古高原属于典型的温带大陆性气候, 四季分明, 春季干旱多风, 夏季高温多雨, 秋季凉爽, 冬季寒冷干燥。受东亚夏季风的影响, 降水主要集中在夏季, 降水季节分配不均匀, 年平均降水的变化不足以反映气候变化的全貌。将研究区 3—5 月划为春季, 6—8 月划为夏季, 9—11 月划为秋季, 12 月至次年 2 月划为冬季, 然后对各季降水量进行分析。

表 1 列出了研究区四季降水量的基本特征以及

表 1 蒙古高原四季降水量的基本特征及 Mann-Kendell 统计检验结果

Tab. 1 Basic characteristics and Mann-Kendell test results of seasonal precipitation over the Mongolian Plateau

| 季节 | 平均值/mm | 最小值/mm | 最大值/mm | 极差/mm | 标准差/mm | 变异系数/% | Z 值 | β 值/(mm · (10a) ⁻¹) |
|----|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|---------------------------------------|
| 春季 | 40.0 | 27.3 | 83.6 | 56.3 | 13.4 | 33.5 | 0.63 | 2.1 |
| 夏季 | 150.6 | 116.9 | 244.0 | 127.1 | 33.4 | 22.1 | 1.4 | 14.0 |
| 秋季 | 41.5 | 23.7 | 67.0 | 43.3 | 12.0 | 28.9 | 2.03 | 11.2* |
| 冬季 | 10.0 | 5.1 | 13.6 | 8.5 | 2.7 | 26.8 | -0.14 | -0.1 |

注: * 表示通过 0.05 显著水平的统计检验。

Mann-Kendell 统计检验结果。可见, 春季降水多年平均值为 40.0 mm, 占年降水量的 16.6%, 最大值为 83.6 mm(2003 年), 最小值为 27.3 mm(2006 年), 两者相差 56.3 mm, 标准差和变异系数分别为 13.4 mm 和 33.5%, 表明春季降水年际波动大。春季降水在年际变化上呈现出上升趋势, 上升速率为 2.1 mm · (10a)⁻¹, 但上升趋势不显著。夏季降水多年平均值为 150.6 mm, 占年降水量的 62.6%, 最大值为 244.0 mm(1998 年), 最小值为 116.9 mm(2001 年), 两者相差 127.1 mm, 标准差和变异系数分别为 33.4 mm 和 22.1%。夏季降水量呈增加趋势, 增加速率为 14 mm · (10a)⁻¹, 上升趋势也不显著。秋季多年平均值为 41.5 mm, 占年降水量的 17.3%, 最大值为 67.0 mm(2012 年), 最小值为 23.7 mm(1966 年), 两者相差 43.3 mm, 标准差和变异系数分别为 12.0 mm 和 28.9%。秋季降水年际波动较大。秋季降水量呈显著上升趋势 ($P <$

0.05), 上升速率为 11.2 mm · (10a)⁻¹。冬季多年平均值为 10.0 mm, 占年降水量的 4.2%, 最大值为 13.6 mm(2012 年), 最小值为 5.1 mm(1998 年), 两者相差 8.5 mm, 标准差和变异系数分别为 2.7 mm 和 26.8%, 冬季降水年际波动最大。冬季降水量呈下降趋势, 下降速率为 -0.1 mm · (10a)⁻¹, 下降趋势不显著。

从四季降水量年际变化趋势来看, 除了冬季降水量呈减少趋势外, 其他季节降水量均呈增加趋势, 其中夏季和秋季降水量增加趋势较明显, 尤其秋季降水量的增加趋势显著 ($P < 0.05$), 说明夏季和秋季降水量对年降水量增加的贡献最大(图 6)。

3.3.2 四季降水空间分布 从图 7 可以看出, 春季和冬季降水量呈减少(增加)趋势的面积分别占总面积(指研究区 TRMM 覆盖区域总面积, 下同)的 53.9%(46.1%) 和 54.0%(46.0%), 呈减少趋势的面积略高于呈增加趋势的面积, 其中呈显著减少(增

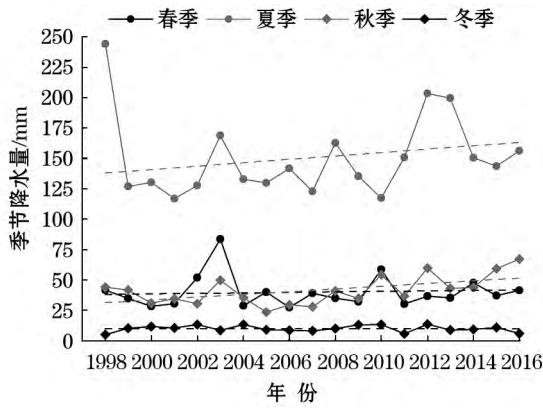


图6 1998—2016年蒙古高原四季降水量的年际变化

Fig. 6 Variation of seasonal precipitation over the Mongolian Plateau during the period of 1998 - 2016

加) 趋势 ($P < 0.05$) 的面积仅占总面积的 1.9% (3.6%) 和 1.5% (0.3%)。夏季和秋季降水量呈增加(减少)趋势的面积分别占总面积的69.2% (30.8%) 和 81.8% (18.2%)。夏季和秋季降水大部分地区增加,呈显著增加(减少)趋势 ($P < 0.05$) 的面积分别占总面积的 6.6% (0.8%) 和 21.8% (0.4%)。

由 1998—2016 年四季降水量变化趋势的空间

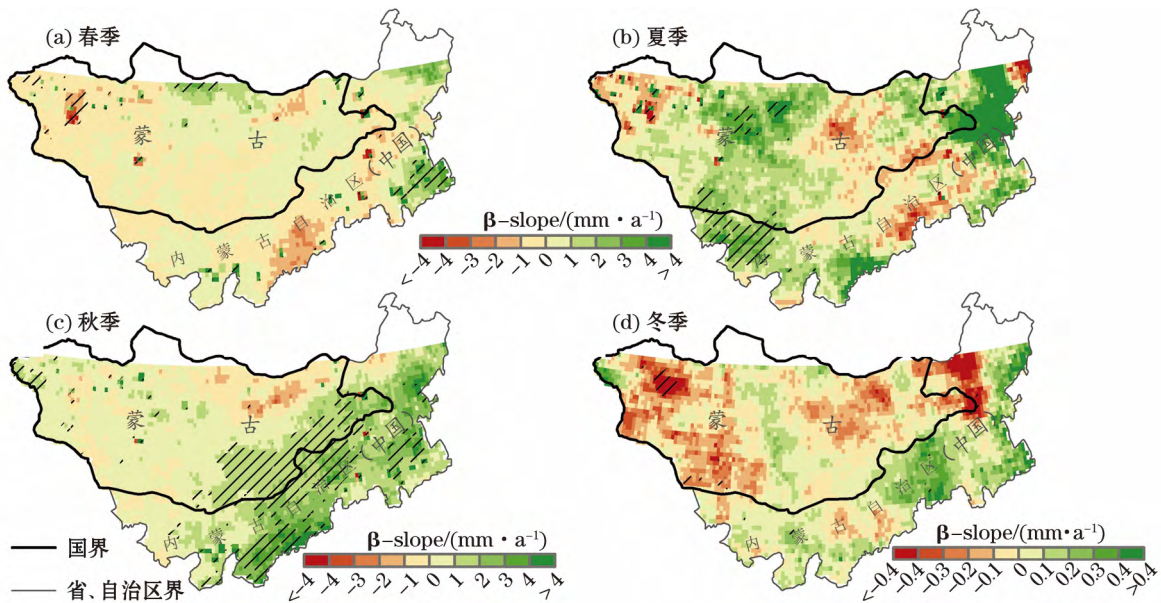


图8 1998—2016年蒙古高原四季降水量年际变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of inter-annual change trend of seasonal precipitation over the Mongolian Plateau during the period of 1998 - 2016

的区域主要分布于蒙古高原北部地区。冬季大部分地区降水量呈减少趋势,尤其是蒙古高原西部、东部大兴安岭山脉以西以及中部地区;呈增加趋势的区域主要分布于内蒙古东中部地区。

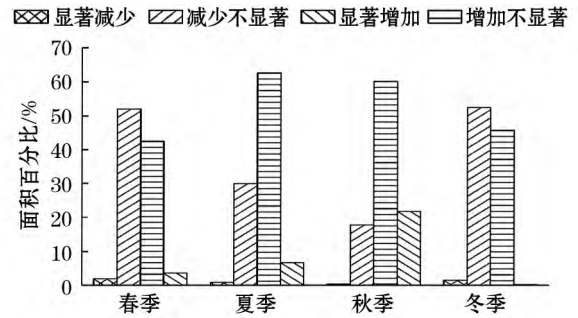


图7 不同显著水平的四季降水量的面积变化

Fig. 7 Area change of seasonal precipitation at different significance levels

分布图(图8)可以看出,不同季节降水量变化趋势的区域差异显著。春季降水量呈显著增加趋势的区域主要分布于内蒙古东部通辽市、赤峰市以及蒙古国北部布尔干省地区,呈显著减少趋势的区域主要分布于蒙古国西部地区。夏季降水量呈减少趋势的区域整体上分布于内蒙古中部、蒙古国东部和西部地区,而呈增加趋势的区域主要分布于蒙古高原中北部和西南部地区。秋季降水量呈增加趋势的区域广泛分布于整个蒙古高原地区,尤其高原东部和东南部地区秋季降水量的增加趋势显著;呈减少趋势

4 结论

(1) 在月尺度上,TRMM 降水数据与气象站点实测降水数据之间具有极显著的正相关关系,拟合

优度 R^2 为 0.88 ($P < 0.01$), 两者的一致性高; 两者之间的平均误差和均方根误差分别为 2.26 mm 和 12.46 mm, 存在一定的空间差异, 在降水量较多的地区, TRMM 降水量往往较实测值偏高, 在降水量较少地区, TRMM 降水通常偏低。总体而言, TRMM 3B43 卫星降水数据在蒙古高原地区具有良好的适用性, 能够满足月尺度及以上的区域降水变化研究。

(2) 基于 TRMM 数据的蒙古高原年平均降水量介于 193.4 ~ 338.6 mm, 多年平均值为 240.5 mm, 整体上以 1998 年、2003 年和 2012 年为波峰, 以 2001 年、2007 年和 2014 年为波谷的波动过程。多年平均降水量的空间分布格局表现出由高原北部、东部和东南部逐渐向中心递减的环带状空间格局, 由湿润、半湿润过渡到半干旱和干旱气候。年际变化趋势上, 近 19 a 降水呈显著上升趋势, 上升速率为 $32.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 但变化趋势的区域差异较大, 高原东北部、中北部和西南部地区年降水量呈增加趋势, 高原西部、东北部大兴安岭以西和东南部地区年降水量呈减少趋势。

(3) 从季节降水的时间变化特征看, 降水季节分配极不均匀, 主要集中在夏季, 春季和秋季降水较少, 冬季降水最少。除了冬季降水呈现减少趋势外, 其他季节降水都呈增加趋势, 其中夏季和秋季降水增加趋势明显, 尤其秋季降水的增加趋势显著 ($P < 0.05$)。

(4) 季节降水变化的区域差异显著, 春季降水量呈减少趋势的区域占总面积的 53.9%, 其中呈显著增加趋势的区域主要分布于内蒙古东部通辽市、赤峰市以及蒙古国北部布尔干省地区, 呈显著减少趋势的区域主要分布于蒙古国西部地区; 夏季降水呈增加趋势的区域占 69.2%, 主要分布于蒙古高原中北部和西南部地区; 秋季降水呈增加趋势的区域占总面积的 81.8%, 这些区域广泛分布于整个蒙古高原, 特别是高原东部和东南部地区秋季降水量的增加尤为显著; 冬季降水呈减少趋势的区域占 54.0%, 主要分布于蒙古高原西部、东部大兴安岭山脉以西以及中部地区。

5 讨论

5.1 TRMM 降水与实测降水之间的比较

本文针对蒙古高原气象观测站点稀疏、空间插值误差较大的状况, 利用密度更高的地面实测降水

数据, 对 TRMM 3B43 V7 卫星降水产品在该区域的精度与适用性进行了评估。与过去基于站点插值的降水空间分布特征相比^(16-18, 32), TRMM 表征的年降水和季节降水的空间分布与站点插值的空间分布格局基本一致, 而 TRMM 降水空间分布图更好地刻画了降水变化的空间细节特征, 如在高原边缘地区能够更加精确地提取等降水量的变化曲线, 对于研究气候变化背景下的气候区界限的变迁具有参考价值; 季节(春、秋、冬)降水空间分布上, 蒙古南部戈壁荒漠地区较周围地区降水较少的局部降水特征更为明显。

另外, 在站点尺度上, TRMM 降水量略微高于站点实测降水量, 且误差较小, 相对误差均小于 6%, 能够满足月尺度及以上的区域降水变化研究; 在区域尺度上, 基于 TRMM 的区域平均降水量略低于所有气象站点平均的降水量, 但 TRMM 和实测降水量反映的年、季节降水的年际变化趋势和波动特征完全一致。

5.2 降水时空变化特征探讨

本研究时段该地区年降水呈上升趋势, 与 Dore⁽³³⁾ 的北半球中高纬度地区陆地降水量将增加的研究结果一致。Jiang 等⁽⁴⁾ 和 Sato 等⁽³⁴⁾ 对蒙古高原地区的未来降水趋势的模拟结果也表明, 蒙古高原地区降水未来将要增加, 本文的研究结果正好印证了模式模拟的结果。从时间变化过程来看, 2011 年开始年降水量呈现出有所增加的趋势, 2011 年前整体呈减少的趋势, 这一时段的降水减少趋势与刘兆飞等⁽³²⁾、丹丹⁽¹⁶⁾ 的研究结果一致。值得关注的是, 近些年的降水虽然呈现增加趋势, 但由于气温增高导致地面蒸发量也增加, 能够被有效利用的降水未必增加。而且, 在气候变暖背景下, 由于降水不均衡分配而导致的极端降水事件可能增加。如 Goulden 等⁽³⁵⁾ 的研究表明, 在蒙古国北部和东部地区呈现短时强降雨增加的趋势, 白美兰等⁽³⁶⁾ 也发现 1961—2010 年内蒙古地区极端降雪量呈微弱的增加趋势。极端降水事件虽然对年降水增加有贡献, 但对生态系统的影响是负面的, 有关气候变暖背景下的降水分配规律的异质性研究, 有待结合更高时空分辨率的数据进一步深入研究。

参考文献(References):

(1) 刘钟龄. 蒙古高原景观生态区域的分析(J). 干旱区资源与环

- 境,1993,7(3/4):256-261. (Liu Zhongling. Analysis of the landscape ecological area of Mongolian Plateau (J). Journal of Arid Land Resources and Environment,1993,7(3/4):256-261.)
- (2) 包刚,包玉海,覃志豪,等.近10年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应(J).地理科学,2013,33(5):613-621. (Bao Gang, Bao Yuhai, Qin Zhihao, et al. Vegetation cover changes in Mongolian Plateau and its response to seasonal climate changes in recent 10 years (J). Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 613-621.)
- (3) 冯兆东.蒙古高原过去4万年来的植被与气候变化(M).兰州:甘肃科学技术出版社,2015. (Feng Zhaodong. Vegetation Changes and Associated Climate Variations in the Mongolian Plateau during the Past 40 000 Years (M). Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 2015.)
- (4) Jiang L G, Yao Z J, Huang H Q. Climate variability and change on the Mongolian Plateau: Historical variation and future predictions (J). Climate Research, 2016, 67(1): 1-14.
- (5) Miao L J, Liu Q, Fraser R, et al. Shifts in vegetation growth in response to multiple factors on the Mongolian Plateau from 1982 to 2011 (J). Physics & Chemistry of the Earth, 2015, 87(8/8): 50-59.
- (6) John R, Chen J Q, Kim Y, et al. Differentiating anthropogenic modification and precipitation-driven change on vegetation productivity on the Mongolian Plateau (J). Landscape Ecology, 2016, 31(3): 547-566.
- (7) 王菱,甄霖,刘雪林,等.蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究(J).地理研究,2008,27(1):171-180. (Wang Ling, Zhen Lin, Liu Xuelin, et al. Comparative studies on climate changes and influencing factors in central Mongolian Plateau region (J). Geographical Research, 2008, 27(1): 171-180.)
- (8) Dagvadorj D, Batjargal Z, Natsagdorj L. Mongolia Second Assessment Report on Climate Change 2014 (M). Ulaanbaatar: Ministry of Environment and Green Development of Mongolia, 2014.
- (9) 师华定,周锡饮,孟凡浩,等.30年来蒙古国和内蒙古的LUCC区域分异(J).地球信息科学学报,2013,15(5):719-725. (Shi Huading, Zhou Xiyin, Meng Fanhao, et al. Mongolia and Inner Mongolia LUCC regional differentiation over the past 30 years (J). Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(5): 719-725.)
- (10) Nandintsetseg B, Greene J S, Goulden C E. Trends in extreme daily precipitation and temperature near Lake Hövsgöl, Mongolia (J). International Journal of Climatology, 2007, 27: 341-347.
- (11) Vandandorj S, Munkhjargal E, Boldgiv B, et al. Changes in event number and duration of rain types over Mongolia from 1981 to 2014 (J). Environmental Earth Sciences, 2017, 76: 70-81.
- (12) Kang S, Gyoungbin L, Chuluun T, et al. Characterizing regional precipitation-driven lake area change in Mongolia (J). Journal of Arid Land, 2015, 7(2): 146-158.
- (13) Fang J, Bai Y, Wu J. Towards a better understanding of landscape patterns and ecosystem processes of the Mongolian Plateau (J). Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1573-1578.
- (14) 魏宝成, 银山, 贾旭, 等. 蒙古高原植物生长期土壤水分时空变化特征 (J). 干旱区研究, 2016, 33(3): 467-475. (Wei Baocheng, Yin Shan, Jia Xu, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture content in the Mongolia plateau in plant growing season (J). Arid Zone Research, 2016, 33(3): 467-475.)
- (15) Tao S, Fang J, Zhao X, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau (J). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(7): 2281-2286.
- (16) 丹丹. 蒙古高原近35年气候变化(D). 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014. (Dan Dan. Climate Changes in Mongolia Plateau during Last 35 Years (D). Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.)
- (17) Lu N, Wilske B, Ni J, et al. Climate change in Inner Mongolia from 1955 to 2005-trends at regional, biome and local scales (J). Environmental Research Letters, 2009, 4(4): 045006.
- (18) Hu Q, Pan F, Pan X, et al. Spatial analysis of climate change in Inner Mongolia during 1961-2012, China (J). Applied Geography, 2015, 60: 254-260.
- (19) 朱利凯, 蒙吉军. 内蒙古中部地区近40年来降水时空变化 (J). 干旱区研究, 2010, 27(4): 536-544. (Zhu Likai, Meng Jijun. Spatiotemporal variation of precipitation in the central Inner Mongolia in recent 43 years (J). Arid Zone Research, 2010, 27(4): 536-544.)
- (20) 吕洋, 杨胜天, 蔡明勇, 等. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析 (J). 自然资源学报, 2013, 28(8): 1414-1425. (Lv Yang, Yang Shengtian, Cai Mingyong, et al. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River Basin (J). Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1414-1425.)
- (21) Maggioni V, Meyers P C, Robinson M D. A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the tropical rainfall measuring mission (TRMM) era (J). Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4): 1101-1117.
- (22) Zhu G F, Qin D H, Liu Y F, et al. Accuracy of TRMM precipitation data in the southwest monsoon region of China (J). Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(2): 353-362.
- (23) 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 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, 2013, 33(8): 999-1005. (Qi Wenwen, Zhang Baiping, Pang Yu, et al. TRMM-Data-Based Spatial and Seasonal Patterns of Precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau (J). Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(8): 999-1005.)
- (24) 李琼, 杨梅学, 万国宁, 等. TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的适用性评价 (J). 冰川冻土, 2016, 38(3): 620-633. (Li Qiong, Yang Meixue, Wan Guoning, et al. Analysis of the accuracy of TRMM 3B43 precipitation data in the source region of the Yellow River (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 620-633.)
- (25) Ning L K, Liu H L, Bao A M, et al. Adaptability evaluation of TRMM over the Tianshan Mountains in central Asia (J). MAUSAM, 2016, 67(3): 625-632.
- (26) 蔡研聪, 金昌杰, 王安志, 等. 中高纬度地区 TRMM 卫星降雨数据的精度评价 (J). 应用生态学报, 2014, 25(11): 3296-3306. (Cai Yancong, Jin Changjie, Wang Anzhi, et al. Accuracy evaluation of the TRMM satellite-based precipitation data over the mid-high latitudes (J). Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3296-3306.)
- (27) 杨艳芬, 罗毅. 中国西北干旱区 TRMM 遥感降水探测能力初步评价 (J). 干旱区地理, 2013, 36(3): 371-382. (Yang Yanfen, Luo Yi. Evaluation on detective ability of TRMM remote sensing precipitation in arid region of Northwest China (J). Arid Land Geography, 2013, 36(3): 371-381.)

- (28) 任国玉, 战云健, 任玉玉, 等. 中国大陆降水时空变异规律 I. 气候学特征 (J). 水科学进展, 2015, 26(3): 299 - 310. (Ren Guoyu, Zhan Yunjian, Ren Yuyu, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China I. Climatology (J). Advances in Water Science, 2015, 26(3): 299 - 310.)
- (29) Mann M E. On smoothing potentially non-stationary climate time series (J). Geophysical Research Letters, 2004, 31: L07 214.
- (30) Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series (J). Journal of Hydrology, 2002, 259(1/4): 254 - 271.
- (31) 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析 (J). 资源科学, 2009, 31(3): 501 - 508. (Kang Shuyuan, Zhang Bo, Liu Jingfeng, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye City using Mann-Kendall method (J). Resources Science, 2009, 31(3): 501 - 508.)
- (32) 刘兆飞, 王蕊, 姚治君. 蒙古高原气温与降水变化特征及 CMIP5 气候模式评估 (J). 资源科学, 2016, 38(5): 956 - 969. (Liu Zhaofei, Wang Rui, Yao Zhijun. Air temperature and precipitation over the Mongolian Plateau and assessment of CMIP 5 climate models (J). Resources Science, 2016, 38(5): 956 - 969.)
- (33) Dore M H I. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? (J). Environment International, 2005, 31(8): 1 167 - 1 181.
- (34) Sato T, Kimura F, Kitoh A. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model (J). Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 144 - 154.
- (35) Goulden C E, Mead J, Horwitz R, et al. Interviews of Mongolian herders and high resolution precipitation data reveal an increase in short heavy rains and thunderstorm activity in semi-arid Mongolia (J). Climatic Change, 2016, 136(2): 1 - 15.
- (36) 白美兰, 郝润全, 李喜仓, 等. 1961—2010 年内蒙古地区极端气候事件变化特征 (J). 干旱气象, 2014, 32(2): 189 - 193. (Bai Meilan, Hao Runquan, Li Xicang, et al. Variable characteristics of extreme climate events during 1961 - 2010 in Inner Mongolia (J). Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(2): 189 - 193.)

Accuracy Evaluation and Seasonal Distribution of Precipitation over the Mongolian Plateau Based on TRMM Data

QIN Fu-ying^{1, 2}, JIA Gen-suo³, YANG Jie¹, NA Yin-tai⁴, HOU Mei-ting⁵, BAO Yu-hai²

(1. College of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China;

2. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China;

3. CAS Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Graduate School of Dairy Sciences, Rakuno Gakuen University, Hokkaido 069-8501, Japan;

5. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Accuracy of the latest version satellite product TRMM 3B43 V7 for precipitation over the Mongolian Plateau was evaluated based on the observational precipitation data from 134 meteorological stations, and the spatial and seasonal distribution of precipitation in recent 19 years was analyzed. The results showed that there was a significant positive correlation between TRMM and observational precipitation data at monthly scale, and the determination coefficient R^2 was 0.88 ($P < 0.01$), which indicated a good consistency between them. The inter-annual variation of annual precipitation showed a significant upward trend at the rate of $32.1 \text{ mm} (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.05$) in recent 19 years. However, there were certain spatial differences: an increase trend of precipitation was observed in the northeast, north and southwest of the Mongolian Plateau, but a decrease trend in the west and southeast of the plateau and in the region west of the Greater Khingan Mountains. Regarding the inter-annual variation of seasonal precipitation, winter precipitation was in a decrease trend, while precipitation in other three seasons was in an increase trend, especially in summer and autumn, the 69.2% and 81.8% areas of the total area were in an increase trend in summer and autumn respectively. There was an obvious spatial differentiation in seasonal precipitation, the decrease of spring precipitation occurred mainly in the west of the plateau, and the significant increase of that in the eastern and northern parts of the plateau; the significant increase of summer precipitation occurred mainly in the southwestern and western-northern parts of the plateau; the significant increase of autumn precipitation occurred mainly in the southern and southeastern parts of the plateau; and the significant decrease of winter precipitation occurred mainly in the west plateau.

Key words: precipitation; accuracy evaluation; seasonal distribution; TRMM; Mongolian Plateau