

基于 TRMM 数据的西南地区年降水时空特征研究*

周李磊^{1,2}, 杨华^{1,2}, 刘睿^{1,2}, 嵇涛^{1,2}, 张伟伟^{1,2}, 周丽君^{1,2}, 全胜^{1,2}, 朱小龙^{1,2}, 李威³

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331;
3. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

摘要:【目的】深入了解中国西南地区(川、渝、黔、滇)降水资源变化的时空分布规律。【方法】利用 1998—2014 年 TRMM 3B43 V7 数据,采用非参数 Mann-Kendall 趋势检验、Sen-Median 趋势分析、变异系数和 Hurst 指数对西南地区降水进行了分析。【结果】1) 西南地区 TRMM 3B43 V7 月降水数据和年降水数据与地面 121 个实测站点数据间具有较高的相关性,TRMM 3B43 V7 数据在西南复杂地貌区域具有较高精度;2) 1998—2014 年西南地区的降水呈下降趋势,其中研究区内云南省下降最明显;3) 西南地区年均降水从西北往东南方向呈现出“低-高-低-高”的特征,研究区年均降水量主要集中在 500~1 500 mm 之间,占整个区域的 96.3%;4) 近 17a 西南降水量呈下降和增加趋势的面积分别占整个西南地区的 70.08%和 21.97%,稳定区域只有 7.95%;5) 降水的变异系数在 0.048~0.229 之间,西南地区年降水的波动变化较小;6) 西南地区 96.12%的区域呈现出正向持续性,68.15%区域降水将持续减少,只有 20.77%的区域降水将增加。【结论】TRMM 3B43 V7 降水数据在西南地区适应性较好,可以为西南地区水资源研究、极端天气灾害预警及水土流失等生态问题提供科学依据。

关键词: TRMM; 西南地区; 降水; 时空特征; 趋势分析; Hurst 指数

中图分类号: P344

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)01-0114-09

大气降水是地球水循环的重要过程,也是地表水和地下水资源的直接补给来源。近些年来在全球气候变化和人类活动的干扰下,极端天气气候事件频发,使得区域降水年际变化明显,直接影响区域农业生产和水资源的开发利用,严重制约区域经济社会可持续发展和生态文明建设水平的提高^[1-2]。中国西南地区(川、渝、黔、滇)生态环境脆弱^[3],降雨侵蚀强^[4],水土流失严重^[5-6],因此研究该区域降水量的分布及年际长时间序列变化的规律,对该区域的可持续发展、维系生态平衡以及预测极端天气气候事件都有着重要的意义^[7-8],同时也可以为滑坡泥石流等灾害研究提供参考依据^[4,9]。国内学者对西南地区的降水时空变化^[10-11]、极端天气^[12](主要指干旱^[13-16]和强降水洪涝灾害^[17])及降水侵蚀力^[4]进行了研究,这些研究成果对认识西南地区降水规律、预防极端天气的发生及水土流失等生态问题的研究提供了参考,但这些成果主要是基于地面实测站点的研究,在空间研究上存在不足,而且由于实测站点受到地形的局限,气象站点空间分布不均匀、密度不足,以及存在的人为因素等等的干扰,实测站点数据存在数据缺失的问题^[18],故基于实测站点数据的空间插值在局部存在较大偏差,不能很好地反映复杂区域降水的时空特征。目前空间分布连续的卫星降水数据可以弥补站点数据的短板,成为近期的研究热点,被广泛运用到雨情、旱情检测中^[19]。

国内外已有不少学者对热带降水测量计划卫星(Tropical rainfall measuring mission, TRMM)3B43 的降水数据产品在复杂地貌区的精度进行了验证^[20-21]。国内研究区域主要集中在西南复杂地貌区域及西北干旱区,包括青藏高原^[22-23]、天山山脉^[24-25]、横断山脉^[26]和川渝地区^[27]等气象站点稀少的区域,研究表明 TRMM 降水数据精度较高,在复杂地貌区域适应性较好,可以支持长时间序列的降水空间动态的分析,且被运用到干旱监测分析中^[19,28]。

* 收稿日期:2016-02-26 修回日期:2016-10-03 网络出版时间:2017-01-12 11:34

资助项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2014jcyjA1557);科技基础性工作专项项目(No. 2011FY110400);重庆师范大学研究生创新项目(No. YKC14010)

第一作者简介:周李磊,男,研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用研究,E-mail:zhoull_001@126.com;通信作者:杨华,男,副教授,E-mail:csyanghua@263.net

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20170112.1134.042.html>

青藏高原以东的西南地区(川、渝、黔、滇)境内分布着众多河流,喀斯特地貌分布广泛,受季风环流和复杂地理环境的影响显著^[2],是中国降水局部分布差异最大、变化最复杂的地方之一。该区域常发生局部强降水,因此深入了解该区域降水资源的时空特征分布规律,对认识该地区水资源变化、水资源安全以及干旱预测有重要作用。本文基于 1998—2014 年的 TRMM 3B43 降水数据对西南地区降水的时空分布特征进行了分析,旨在为区域水资源研究、极端天气灾害预警及水土流失等生态问题提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文研究的西南地区包括四川省(川)、重庆市(渝)、贵州省(黔)和云南省(滇),地理坐标东经 97.4°~110.2°,北纬 21.2°~34.4°,地处中国地势第一阶梯与第三阶梯的过渡区,同时也是中国生态过渡的重要地带^[3],研究区面积约 1.134 6×10⁶ km²,海拔高度多在 150~5 000 m(封三彩图 1)。该区域内高原、山地、丘陵、平原、河谷均有分布,是世界上地形最复杂的区域之一。该区域以亚热带季风气候为主,夏季高温多雨,冬季温和少雨,冬夏干湿分明。区域内水资源丰富,河流纵横,峡谷广布,是中国喀斯特地貌主要分布区及生态环境高度脆弱区。

1.2 数据来源

研究数据主要包括 TRMM 3B43 降水数据和地面站点相应时期的监测数据。热带降水测量卫星于 1997 年 11 月 28 日发射,由美国国家航空航天局(NASA)地球科学办公室和日本国家空间发展署(NASDA)共同研制^[29-30]。TRMM 3B43 V7 降水数据由 NASA 网站(<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>)提供下载,且已在全球尺度用地面雨量站降水数据进行了订正,数据格式有 NetCDF 和 HDF,其降水信息为南北纬 50°之间 0.25°×0.25°空间分辨率的栅格月均降水速率信息。本文选用 NetCDF 格式数据,在 ArcGIS 中经行拼接、转投影和裁剪,得到研究区 1998—2014 年 TRMM 月降水原始数据。

气象站实测降水数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),包括 1998—2014 年研究区内 121 个气象站点各月降水数据,其中贵州 19 个站点,云南 30 个站点,四川 38 个站点,重庆 34 个站点,空间分布如封三彩图 1 所示。

1.3 研究方法

1.3.1 原始数据转换与处理 TRMM 3B43 V7 原始月降水数据是降水强度信息,按照下式转换为月降水量数据^[7]:

$$T_m = 24T_p d。$$

其中, T_m 为月降水量(单位:mm); T_p 为降水强度(单位:mm·h⁻¹); d 为该月的日数。将相应年份所对应的 TRMM 月降水数据相加得到对应年的 TRMM 年降水数据。

1.3.2 相关系数和相对偏差 根据 121 个地面站点 1998—2014 年实测降水数据,与站点所对应的格点 TRMM 月降水量和 TRMM 年降水量来计算相关系数(R)和相对偏差(B_s),计算公式如以下公式所示^[27,31]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, B_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \times 100\%。$$

其中, x_i, y_i 分别为气象站点实测数据和 TRMM 3B43 V7 降水量数据(单位:mm); $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, n 为样本容量; R 反映了 TRMM 降水量数据与站点实测降水值之间相关程度, R 越接近于 1,数据一致性越好; B_s 反映了 TRMM 降水量数据与站点实测降水值在数值上的偏离程度, B_s 越接近 0,则说明数据越精确。

1.3.3 趋势分析 通过 Sen-Median 趋势分析^[32-33]和 Mann-Kendall^[34-36]检验对西南地区年降水的变化趋势及变化的显著性水平进行计算;通过变异系数^[37]对西南地区年降水的稳定性进行检测;并用 Hurst 指数^[38-39]对西南地区降水的未来趋势变化进行预测。综合 Sen-Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数对西南地区年降水的演变进行划分,识别降水变化敏感区。

2 结果与分析

2.1 TRMM 数据的精度验证

分别利用 121 个实测站点的月降水数据和年降水数据验证 TRMM 3B43 V7 数据对应站点的 1998—2014 年月降水数据和年降水数据,将气象站点实测数据作为自变量,对应的 TRMM 3B43 V7 降水数据作为因变量,进行一元线性回归拟合(图 2),并分别计算研究区及研究区内各省市所对应气象站点实测数据与 TRMM 3B43 V7 数据的相关系数及相对误差(表 1)。

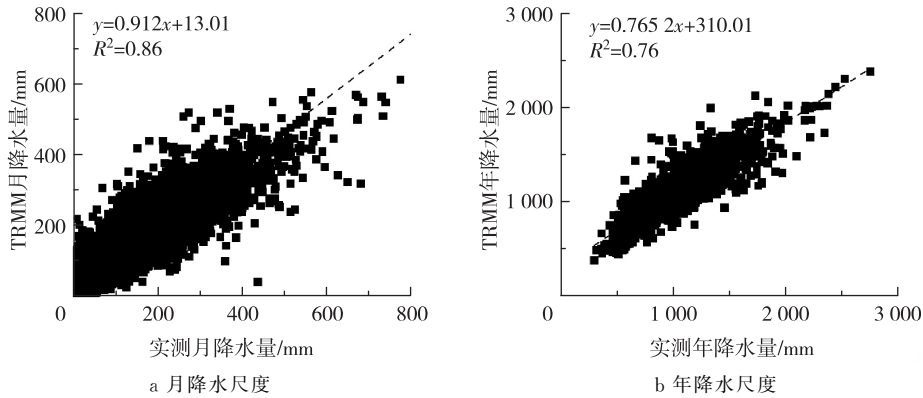


图 2 1998—2014 年 TRMM 3B43 V7 数据与实测站点降水数据散点图

Fig. 2 Scatter diagram of precipitation between TRMM 3B43 V7 and corresponding meteorological, 1998—2014

由图 2 可知,在月降水尺度上和年尺度上,TRMM 3B43 V7 数据与气象站点实测数据的拟合优度 R^2 分别为 0.86 和 0.76,全部通过 $\alpha=0.01$ 置信度水平检验,说明 TRMM 3B43 V7 数据与实测站点数据之间的相关性具有统计学意义。

由表 1 可知,同一时间尺度上,不同区域所对应的 TRMM 3B43 V7 数据与气象站点实测数据间的相关系数不同。月尺度上,西南地区的相关系数全部大于 0.9;而在年尺度上,云南省的相关性最大,相关系数为 0.90,重庆的最小,相关系数为 0.76。

表 1 1998—2014 年 TRMM 3B43 V7 数据与气象
实测站点数据相关分析结果

Tab. 1 Result of correlation analysis between TRMM 3B43 V7 and corresponding meteorological, 1998—2014

| | 西南地区 | 贵州 | 四川 | 云南 | 重庆 |
|---------|------|------|------|------|------|
| 相关系数(月) | 0.93 | 0.94 | 0.94 | 0.90 | 0.90 |
| 相关系数(年) | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.90 | 0.76 |
| 相对误差/% | 6.11 | 4.65 | 4.89 | 7.67 | 6.67 |

TRMM 3B43 V7 数据与气象站点实测数据间相对误差最大的是云南省,为 7.67%;贵州省相对误差最小,为 4.65%;四川省、重庆市相对误差分别为 4.89%,6.67%;西南地区整体相对误差为 6.11%;所有相对误差均小于 10%。TRMM 3B43 V7 数据与气象站点实测数据间偏离较小,结果表明 TRMM 3B43 数据在西南地区整体精度较高。

2.2 年际降水时间变化特征

根据 TRMM 3B43 V7 月降水数据累加得到西南地区 1998—2014 年年降水数据,分区统计年际降水量(图 3)。由图 3 可知,1998—2014 年西南地区年降水量拟合曲线的斜率 $k_5 = -6.34$,小于 0,呈减少趋势;西南地区年际间降水量波动明显,2003,2006,2009 和 2011 年降水量相对较少,对应年份均出现严重旱灾,2011 年西南地区年降水量

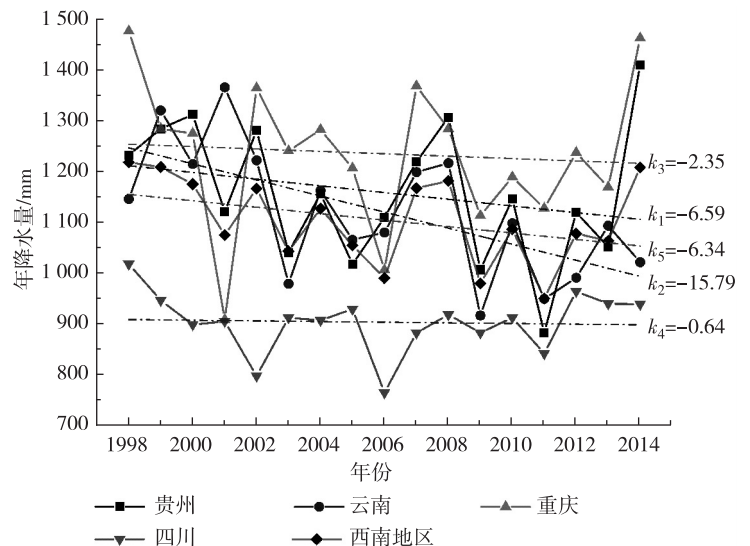


图 3 1998—2014 年西南地区年际降水量变化

Fig. 3 Variation of annual precipitation in Southwest China, 1998—2014

只有 951.8 mm;而降水量比较多的年份有 1998,1999 和 2014 年,年降水量都大于 1 200 mm,相应年份则出现严重洪涝灾害。从研究区域各省市降水量来看,4 省(市)年降水量全部呈减少趋势,拟合曲线斜率全部小于 0,与西南地区整体趋势一致,其中云南省年降水减少趋势最为明显,拟合曲线斜率 $k_2 = -15.79$;近些年来,西南地区几次异常干旱灾害如 2005 年春季云南异常干旱、2006 年夏季川渝地区特大干旱、2009 年秋~2010 年秋冬春连旱^[15,40]、2011 年西南地区秋冬连旱^[41]、1998 年川渝地区洪灾、2014 年重庆 9 月上旬的洪涝灾害等,在年际降水变化中得到很好的体现,TRMM 数据反映的情况与实际一致。

2.3 年降水空间变化特征

2.3.1 年降水空间分布 封三彩图 4a 是西南地区年均降水 TRMM 数据。1998—2014 年西南地区年均降水空间分布从西北往东南方向呈现出“低-高-低-高”的特征,即:四川西部的川西高原降水量较少,往东南方向,四川盆地则降水开始增加;继续往东南到云贵高原则降水开始减少;再往东南到贵州东部丘陵区则降水又开始增加。这与海拔与地貌有关。区域多雨区主要出现在 3 个区域:1) 西南部多雨区,主要包括云南省西部和南部的德宏傣族景颇族自治州和西双版纳傣族自治州,年均降水量在 1 300~2 000 mm,是西南地区年均降水量最多的区域,这主要与纬度有关,受热带季风影响降水较多;2) 东部多雨区,主要包括重庆东部及贵州南部,年均降水量在 1 100~1 300 mm;3) 中部多雨区,主要包括四川盆地中部以雅安为中心的多雨区,年均降水在 1 200 mm 左右。区域少雨区主要出现在四川省西部川西高原和云南东部云贵高原,主要受海拔地貌及亚热带季风的影响,夏季东南季风由东南向西北推进受阻,使降水主要集中在重庆东部及贵州南部,而四川西部川西高原降水较少。西南地区年降水空间格局分布与气候带分布一致,四川西北部高原高山气候区降水最少,云南南部热带季风气候区降水最多。西南地区年降水量主要集中在 500~1 500 mm 之间,占整个区域的 96.3%;研究区 55.49% 的区域年均降水量大于 1 000 mm,区域水资源较为丰富。

封三彩图 4b 是西南地区实测站点空间插值数据,该降水空间分布格局与 TRMM 遥感监测数据在整体上是—致的。其中区别在于 TRMM 数据能反映出更多细节,而空间插值受站点分布密度的影响,很多细节被平滑处理。如云南省昆明市其降水量较周围区域较高,TRMM 能反映出来而空间插值数据则将结果平滑;大理市降水受洱海的影响较周围有明显的增加,TRMM 数据能反映出来而空间插值数据则不明显;四川中部以乐山市、峨眉山、雅安等为中心的区域降水较周围高,往西到康定县则明显降低——TRMM 数据能体现出来,而空间插值结果在该区域的误差偏大。对比可知,TRMM 数据在反映降水空间分布特征的同时,细节部分也能很好地体现,故 TRMM 数据包含的降水信息更多。

2.3.2 年降水空间趋势特征 将 Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验结合起来,可以有效地反映 1998—2014 年西南地区降水的变化趋势的空间分布特征。由于没有严格意义上的 $\beta=0$ 的区域,所以在研究降水变化的时候,根据实际情况,将 β 介于 $-1 \sim <1$ 的区域划分为稳定不变区域,将 β 小于 -1 的区域划分为降水减少下降区域,将 β 大于或等于 1 的区域划分为降水增加上升区。在 $\alpha=0.05$ 置信水平上,检验西南降水数据的统计学意义。将 Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验的结果叠加,得到象元尺度上的降水空间趋势变化数据(表 2)。由表 2 可知,西南地区 70.08% 的区域,年降水量呈下降的趋势,其中极显著下降区域占 16.98%,弱显著下降区域占 53.1%;只有 21.97% 的区域降水量是增加的趋势,其中极显著上升只占 0.36%。西南地区降水整体上呈下降趋势,这与年降水时间变化分析的结论一致。

由封三彩图 5a 年降水空间变化趋势可知,整体上西南地区南部降水呈下降趋势,而北部呈上升趋势。从地区内部看,云南、贵州、四川南部,重庆南部及东部全部呈下降趋势;只有四川西北部的石渠县,四川北部的阿坝藏族羌族自治州、成都市、德阳市、绵阳市、广元市、资阳市、遂宁市、南充市、巴中市、达州、广安市以及重庆市内的潼南县、梁平县、开县和城口县的降水有增加上升的

表 2 降水空间趋势变化

Tab.2 The spatial trend of precipitation

| β | Z | 变化趋势 | 像元个数 | 百分比/% |
|--------------|--------------------|-------|------|-------|
| <-1 | <-1.96 | 极显著下降 | 282 | 16.98 |
| <-1 | $-1.96 \sim <1.96$ | 弱显著下降 | 882 | 53.10 |
| $-1 \sim <1$ | $-1.96 \sim <1.96$ | 稳定不变 | 132 | 7.95 |
| ≥ 1 | $-1.96 \sim <1.96$ | 弱显著上升 | 359 | 21.61 |
| ≥ 1 | ≥ 1.96 | 极显著上升 | 6 | 0.36 |

趋势,云南和贵州只有几个零散象元降水量有增加趋势。由封三彩图 5b 可知,极显著下降区主要出现在云南省西北部和四川西南部;极显著上升区只有零散的 6 个像元,云南省有 1 个,其余 5 个在四川省,云南省降水极显著增加区域在会泽县新街乡附近,四川省的在九寨沟县和黄龙乡附近;贵州省有 5 个像元呈极显著下降的趋势,涉

及主要乡镇包括桐梓县芭蕉乡和庙塘镇、凤冈县土溪镇以及湄潭县洗马乡;重庆降水则相对稳定,没有出现极显著上升或者极显著下降的地区。

2.3.3 年降水空间波动特征 1998—2014 年西南地区年降水变异系数(封三彩图 6)在 0.048~0.229 之间,说明西南地区年降水的波动变化较小。变异系数最大值出现在云南中部、云南省西北部与四川交界处,这些地方是恰好是地貌变化过渡带,云南中部是由河谷向云贵高原过渡,贵州四川西部交界处是云贵高原像青藏高原区过渡。过渡带地貌复杂,高程落差大,地势垂直变化显著,且受西南季风的影响,导致降水波动明显,变异系数相对较大。而变异系数最小区域在四川中部平原向川西高原过渡带,该区域西部南部全部是高山,西南季风对该区域的影响会相对减弱,故降水会相对稳定,变异系数较小。

2.3.4 年降水未来趋势特征 Hurst 指数用于根据长时间序列持降水数据预测未来降水的持续性,计算结果如封三彩图 7 所示。西南地区 1998—2014 年降水的 Hurst 指数最小值为 0.362 9,最大值为 0.967 3,均值为 0.705 7;其中 Hurst 指数大于 0.5 像元占 96.12%,说明西南地区降水变化具有正向持续性,未来的变化与过去的变化趋势一致。将 Hurst 指数、 β 指数和 Z 统计量叠加得到西南地区年降水演化态势图(封三彩图 8)。

由封三彩图 8 可知,区域内云南中北部及四川南部,降水整体呈现减少趋势,趋势明显,且未来将持续减少;研究区中南部包括四川省中西部、重庆市南部、贵州省大部分以及云南省东部及南部在内的降水整体呈现减少趋势,但趋势不明显,未来将持续减少;研究区北部包括四川省北部以及重庆市北部与四川省邻界处,降水整体呈现增加趋势,但趋势不明显,未来将持续增加;降水稳定区主要出现在四川西北部、贵州东南部以及云南东北部邵通市。需要注意的是,云南西部德宏市,重庆万州区、石柱县、巫溪县、奉节县,酉阳县以及秀山县和四川省新龙县 1998—2014 年的降水呈下降趋势,但未来可能会发生逆转;四川省石渠县南部及重庆市万州区西部 1998—2014 年的降水呈上升趋势,但未来可能会发生逆转;四川省邻水县和重庆市合川区东部区域 1998—2014 年的降水相对稳定,但未来可能会发生逆转。

具体统计象元个数可知,研究区内降水两级分化严重,研究区内降水减少,未来会持续减少的区域(包括变化趋势显著和趋势不显著的)占整个研究区 68.15%,即研究区一半以上的区域降水呈减少趋势,且未来将继续减少;降水增加,未来会持续增加的区域(包括变化显著和变化趋势不显著的)占整个区域的 20.77%;而降水稳定的,未来将继续稳定的区域只占研究区的 7.41%。与表 2 相比,可以发现弱显著下降区域有 32 个象元未来可能发生逆转;稳定区域有 9 个象元未来会发生逆转;弱显著上升区域有 20 个象元未来可能会发生逆转;会发生逆转区域占整个研究区的 3.67%,对研究区降水变化的整体趋势影响不大(表 3)。

表 3 年尺度降水演化特征统计

Tab. 3 Characteristics of annual precipitation evolution

| β | Z | Hurst 指数 | 降水演化特征 | 像元个数 | 百分比/% |
|--------------|--------------------|----------|---------------------|------|-------|
| <-1 | <-1.96 | >0.5 | 过去减少,趋势显著,未来将持续减少 | 282 | 16.98 |
| <-1 | $-1.96 \sim <1.96$ | >0.5 | 过去减少,但趋势不显著,未来将持续减少 | 850 | 51.17 |
| <-1 | $-1.96 \sim <1.96$ | <0.5 | 过去减少,但趋势不显著,未来可能逆转 | 32 | 1.93 |
| $-1 \sim <1$ | $-1.96 \sim <1.96$ | >0.5 | 降水稳定,但趋势不显著,未来将持续稳定 | 123 | 7.41 |
| $-1 \sim <1$ | $-1.96 \sim <1.96$ | <0.5 | 降水稳定,但趋势不显著,未来可能逆转 | 9 | 0.54 |
| ≥ 1 | $-1.96 \sim <1.96$ | >0.5 | 过去增加,但趋势不显著,未来将持续增加 | 339 | 20.41 |
| ≥ 1 | $-1.96 \sim <1.96$ | <0.5 | 过去增加,但趋势不显著,未来可能逆转 | 20 | 1.20 |
| ≥ 1 | ≥ 1.96 | >0.5 | 过去增加,趋势显著,未来将持续增加 | 6 | 0.36 |

3 讨论

本文利用 1998—2014 年的 TRMM 3B43 V7 降水数据对西南地区年降水时空特征进行了研究,发现这一时期西南地区年降水呈下降趋势,与冯海涛等人^[19]的研究结果一致,即发生旱灾的趋势较大^[40]。加强对降水显著减少且未来会继续减少的区域、降水显著增加且未来会继续增加的区域以及未来变化不稳定的区域的监测,防止发生旱灾及洪涝灾害等极端天气,对进一步完善抗旱抗涝减灾体系的建设,减少区域损失具有一定的指导意义。

TRMM 3B43 V7 降水数据在西南地区适应性较好,克服了传统的气象站点插值结果中局部误差较大的缺

点^[18],结果真实有效地反映了西南地区的降水变化,有助于西南地区的水资源的开发利用^[42-43],农业生产管理^[44]和生态系统^[45]的保护。相关学者对 TRMM 数据进行了降尺度研究^[30,46],将原始 0.25°(约 25 km)分辨率的数据降到 1 km 空间分辨率,用 TRMM 数据替换气象站点空间插值数据可以进一步提高降水侵蚀模型^[47]、水土流失模型^[48]、综合干旱指数^[49]等生态问题评价模型的计算结果精度,为极端天气的预测乃至滑坡泥石流等灾害研究提供依据。

受篇幅限制,本文并没有对年内月降水、季节降水变化进行比较分析;对区域降水变化与全球气候变化的响应,揭示降水呈下降趋势的成因,有待进一步深入研究。

4 结论

本文利用 1998—2014 年 TRMM 3B43 V7 降水数据,结合 Mann-Kendall 趋势检验、Sen-Median 趋势分析以及 Hurst 指数未来趋势分析,对整个西南地区的年降水进行了分析,得到如下结论:

1) TRMM 数据能弥补实测站点空间分布不均的现状以及数据存在较大误差的问题。西南地区 TRMM 3B43 V7 月降水数据和年降水数据与 121 个实测站点数据具有较高的相关性,月相关系数为 0.93,年相关系数为 0.87,相对误差为 6.11%,TRMM 3B43 V7 数据在西南复杂地貌区域具有较高精度。

2) 从时间变化上分析,1998—2014 年 TRMM 3B43 V7 年降水数据显示,西南地区的年降水呈下降趋势,与研究区域内各省市的降水下降趋势一致。

3) 从空间分布上分析,西南地区年均降水空间上从西北往东南方向呈现出“低-高-低-高”的特征,研究区年降水量主要集中在 500~1 500 mm 之间,占整个区域的 96.3%;区域内 55.49%的年均降水量大于 1 000 mm,区域水资源较为丰富。

4) 从降水变化趋势上分析,1998—2014 年西南降水量整体呈下降趋势,呈下降和增加趋势的面积分别占整个西南地区的 70.08%和 21.97%,稳定区域只有 7.95%。从降水空间波动分析上看,1998—2014 年西南地区年降水变异系数在 0.048~0.229 之间,西南地区年降水的波动变化较小。

5) 从降水可持续性上分析,96.12%的区域呈现出正向持续性,降水持续性较强。由变化趋势与可持续数据叠加可知:降水将持续减少的区域占整个研究区的 68.15%,降水增加的区域占 20.77%,而降水稳定的区域只占 7.41%。只有 3.88%的区域降水未来变化趋势无法确定。

参考文献:

- [1] ASHIQ M W, ZHAO C, NI J, et al. GIS-based high-resolution spatial interpolation of precipitation in mountain-plain areas of Upper Pakistan for regional climate change impact studies[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3): 239-253.
- [2] 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 我国西南地区 1960—2000 年降水资源变化的时空特征[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 783-792.
LIU X R, LI G P, FAN G Z, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in southwest China during 1961—2000[J]. *Journal of natural resources*, 2007, 22(5): 783-792.
- [3] 黄成敏, 艾南山, 姚建, 等. 西南生态脆弱区类型及其特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(5): 467-472.
HUANG C M, AI N S, YAO J, et al. Characterization of fragile eco-regions in southwest China [J]. *Resources and Environment in Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 467-472.
- [4] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 499-509.
LIU B T, TAO H P, SONG C F, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in southwest China from 1960 to 2009[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5): 499-509.
- [5] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6353-6362.
FAN F D, WANG K L, XIONG Y, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [6] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征[J]. *地理学报*, 2008, 63(5): 475-486.
LI Y C, LIU C X, ZHAO C Y, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(5): 475-486.
- [7] 常远勇, 侯西勇, 毋亭, 等. 1998—2010 年全球中低纬度降水时空特征分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(4): 475-484.
CHANG Y Y, HOU X Y, WU T, et al. On spatial-temporal dynamics of precipitation in global mid-low latitudes from 1998 to 2010[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 475-484.

- [8] 王晓霞,徐宗学,阮本清.天津市降水量变化趋势的时空分布特征[J].干旱区资源与环境,2008,22(9):92-96.
WANG X X,XU Z X,RUAN B Q. Spatiotemporal trend of precipitation in Tianjin City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2008,22(9):92-96.
- [9] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
XIONG K N,LI J,LONG M Z. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating Karst rocky desertification[J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(7):878-888.
- [10] 刘晓冉,李国平,范广洲,等.我国西南地区1960—2000年降水资源变化的时空特征[J].自然资源学报,2007,22(5):783-792.
LIU X R,LI G P,FAN G Z,et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in southwest China during 1961—2000[J]. Journal of Natural Resources,2007,22(5):783-792.
- [11] 张琪,李跃清.近48年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(2):372-383.
ZHANG Q,LI Y Q. Climatic variation of rainfall and rain day in southwest China for last 48 years[J]. Plateau Meteorology,2014,33(2):372-383.
- [12] 罗玉,范广洲,周定文,等.西南地区极端降水变化趋势[J].气象科学,2015,35(5):581-586.
LUO Y,FAN G Z,ZHOU D W,et al. Extreme precipitation trend of southwest China in recent 41 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2015,35(5):581-586.
- [13] 李永华,徐海明,刘德.2006年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J].气象学报,2009,67(1):122-132.
LI Y H,XU H M,LIU D. Feature of the extremely severe drought in the east of southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer[J]. Acta Meteorologica Sinica,2009,67(1):122-132.
- [14] 蒋兴文,李跃清.西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子[J].地理学报,2010,65(11):1325-1335.
JIANG X W,LI Y Q. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in southwestern China and the possible influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica,2010,65(11):1325-1335.
- [15] 贺晋云,张明军,王鹏,等.近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J].地理学报,2011,66(9):1179-1190.
HE J Y,ZHANG M J,WANG P,et al. Climate characteristics of the extreme drought events in southwest China during recent 50 years[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(9):1179-1190.
- [16] 王斌,李跃清.2010年秋冬季西南地区严重干旱与南支槽关系分析[J].高原山地气象研究,2010,30(4):26-35.
WANG B,LI Y Q. Relationship analysis between south branch trough and severe drought of southwest China during autumn and winter 2009/2010[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2010,30(4):26-35.
- [17] 冯水志,罗德富.西南地区洪涝灾害区划[J].山地学报,1995,13(4):255-260.
FENG S Z,LUO D F. Division of flood-waterlogging hazard in southwest China[J]. Mountain Research,1995,13(4):255-260.
- [18] 石志华,刘梦云,常庆瑞,等.基于优化参数的陕西省气温、降水栅格化方法分析[J].自然资源学报,2015,30(7):1141-1152.
SHI Z H,LIU M Y,CHANG Q R,et al. Comparison of temperature and precipitation rasterization methods based on optimized parameters in Shaanxi province[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(7):1141-1152.
- [19] 冯海涛,于国荣,杨具瑞.基于TRMM 3B43 V7数据的云南降水与干旱监测及精度评价[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):89-96.
FENG H T,YU G R,YANG J R. Precipitation and drought monitoring based on TRMM 3B43 V7 data and precision evaluation in Yunnan[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2014,25(4):89-96.
- [20] DINKU T,CECCATO P,GROVER-KOPEC E,et al. Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography[J]. International Journal of Remote Sensing,2007,28(7):1503-1526.
- [21] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等.基于TRMM 3B43V7的赣江流域月径流过程模拟[J].水力发电学报,2014,33(5):6-12.
HU Q F,YANG D W,WANG Y T,et al. Monthly runoff simulation in Gan river basin using rainfall TRMM 3B43V7[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(5):6-12.
- [22] 程珂,朱祯,李铭,等. TRMM 3B43降水产品在西藏地区的精度检验和应用[J].水利水电技术,2014,45(1):44-46.
CHENG K,ZHU Z,LI M,et al. Application and accuracy testing of TRMM 3B43 rainfall product in Tibetan Region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2014,45(1):44-46.
- [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 W W,ZHANG B P,PANG Y,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] 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.
- [25] ZHANG T,HE Y,MA J,et al. Spatial and temporal dis-

- tribution of precipitation based on corrected TRMM data around the Hexi corridor, China[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014, (2): 159-167.
- [26] 朱国锋, 蒲焘, 张涛, 等. TRMM 降水数据在横断山区的精度[J]. *地理科学*, 2013, 33(9): 1125-1131.
ZHU G F, PU T, ZHANG T, et al. The accuracy of TRMM precipitation data in Hengduan mountainous region, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(9): 1125-1131.
- [27] 嵇涛, 杨华, 刘睿, 等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1375-1386.
JI T, YANG H, LIU R, et al. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(10): 1375-1386.
- [28] 臧文斌, 阮本清, 李景刚, 等. 基于 TRMM 降雨数据的西南地区特大气象干旱分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2010, 8(2): 97-106.
ZHANG W B, RUAN B Q, LI J G, et al. Analysis of extraordinary meteorological drought in southwest China by using TRMM precipitation data[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2010, 8(2): 97-106.
- [29] AGHAKOUCHAK A, NASROLLAHI N, HABIB E. Accounting for uncertainties of the TRMM satellite estimates[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 606-619.
- [30] XU S, WU C, WANG L, et al. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 119-140.
- [31] 吴建峰, 陈阿林, 嵇涛, 等. TRMM 降水数据在复杂山地的精度评估—以重庆市为例 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 201-207.
WU J F, CHEN A L, JI T, et al. Accuracy evaluation of Tropical Rain Fall Measuring Mission precipitation data in complex mountainous areas-taking Chongqing city as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(4): 201-207.
- [32] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 24(24): 7798-7806.
YUAN L H, JIANG W G, SHEN W M, et al. The spatio-temporal of vegetation cover in the Yellow river basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [33] SEN P K. Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1386.
- [34] BURN D H. Climatic influences on streamflow timing in the headwaters of the Mackenzie river basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1): 225-238.
- [35] 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 312-320.
LI J F, ZHANG Q, BAI Y G, et al. Spatio-temporal probability behaviors of the maximum consecutive wet days in Xinjiang, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 312-320.
- [36] 张鑫, 吴艳红, 张鑫. 1972—2012 年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化[J]. *地理学报*, 2014, 69(7): 993-1001.
ZHANG X, WU Y H, ZHANG X. Water level variation of inland lakes on the south-central Tibetan plateau in 1972—2012 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 993-1001.
- [37] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
LIU X F, PAN Y Z, ZHU X F, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba mountains in relation to environmental factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705-716.
- [38] 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立. 中国近 50 年降水变化趋势及突变的 Hurst 指数试验[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 859-866.
FENG X L, LUO L C, FENG Z L. Hurst index experiment on precipitation change trend and mutation of China in the near 50 years [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 859-866.
- [39] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
XU J H. *Mathematical methods in modern geography* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.
- [40] 刘建刚, 谭徐明, 万金红, 等. 2010 年西南特大干旱及典型场次旱灾对比分析[J]. *中国水利*, 2011, (9): 17-19.
LIU J G, TAN X M, WAN J H, et al. Comparative analysis between the 2010 severe drought in southwest China and typical drought disasters [J]. *China Water Resources*, 2011, (9): 17-19.
- [41] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 85-92.
WANG M T, WAN X, HUANG W H, et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(19): 85-92.
- [42] 李景刚, 黄诗峰. 基于 TRMM 数据的汉江流域 1998 年—2010 年降水变化特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(6): 48-53.
LI J G, HUANG S F. Variation characteristics analysis of the precipitation from 1998 to 2010 in Hanjiang basin based on the TRMM data [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 48-53.

- [43] 袁飞, 赵晶晶, 任立良, 等. TRMM 多卫星测雨数据在赣江上游径流模拟中的应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(7): 611-616.
YUAN F, ZHAO J J, REN L L, et al. Streamflow simulation in the upper Ganjiang river basin using the TRMM multi-satellite precipitation data[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(7): 611-616.
- [44] 张峰. 川渝地区农业气象干旱风险区划与损失评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHANG F. Regionalization of agricultural meteorological drought risk and loss evaluation in Sichuan-Chongqing area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [45] 王旭阳, 张显峰, 赵杰鹏, 等. 基于 MODIS 和 TRMM 数据的准格尔南缘植被净初级生产力估算与分析[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 21-25.
WANG X Y, ZHANG X F, ZHAO J P, et al. Estimation of vegetation net primary productivity in the south border of Junggar Basin using MODIS and TRMM data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(2): 21-25.
- [46] 嵇涛, 刘睿, 杨华, 等. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究—以川渝地区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 108-117.
JI T, LIU R, YANG H, et al. Spatial downscaling of precipitation using multi-source remote sensing data: a case study of Sichuan-Chongqing region[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(1): 108-117.
- [47] 严冬, 范建容, 郭芬芬, 等. 西藏地区降水侵蚀力时空分布研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 17-21.
YAN D, FAN J R, GUO F F, et al. Spatiotemporal distribution of precipitation erosivity in Tibet Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 17-21.
- [48] 张海筱. 黄土高原丘陵沟壑区植被覆盖度空间格局及其控制因子研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
ZHANG H X. Study on the spatial pattern and its controlling factors of vegetation coverage in the Hilly Region of the Loess Plateau a case in valley of Gushanchuan [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [49] 嵇涛. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究及其应用[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2014.
JI T. Spatial Downscaling of precipitation by using multi-source remote sensing data: a case study of Sichuan-Chongqing region[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2014.

Spatial-temporal Characteristics of Annual Precipitation in Southwest China Based on TRMM 3B43 V7 Data

ZHOU Lilei^{1,2}, YANG Hua^{1,2}, LIU Rui^{1,2}, JI Tao^{1,2}, ZHANG Weiwei^{1,2}, ZHOU Lijun^{1,2},
QUAN Sheng^{1,2}, ZHU Xiaolong^{1,2}, LI Wei³

(1. College of Geographical Science and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

2. Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331; 3. Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Purposes] To study the temporal and spatial distribution of precipitation in Southwest China (SWC) (Sichuan, Chongqing, Guizhou and Yunnan). [Methods] The methods of non-parametric Mann-Kendall test, Sen-Median trend analysis, coefficient of variation, and Hurst index were calculated to analyze the precipitation resource based on the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B43 precipitation data from 1998—2014. [Findings] The main results show that: 1) TRMM 3B43 V7 precipitation data in SWC region had a high precision and correlation (R), the correlation between monthly precipitation and measured data at 121 meteorological stations was 0.93, the correlation between annual precipitation and measured data was 0.87. 2) Annual precipitation in SWC had a decrease trend in recent 17 years, especially Yunnan Province. 3) In terms of spatial-temporal variation, annual precipitation rendered out a “low-high-low-high” features from northwest to southeast direction in SWC region; average annual rainfall was concentrated between 500~1 500 mm, accounting for 96.3% of the entire region, so water resource was rich in SWC region. 4) Annual rainfall decrease area in SWC was larger than increased area, account for 70.08% and 21.97%, while stable area was 7.95%. 5) The coefficient of variation of precipitation was between 0.048~0.229, the fluctuation of annual precipitation was smaller in SWC. 6) About 96.12% areas in SWC had a very self-similarity and long-range dependence, 68.15% of the entire study area's precipitation was predicted to decline in future, only 20.77% of the regional's precipitation would follow a continuous increasing trend. [Conclusions] The TRMM 3B43 V7 precipitation data had good adaptability in SWC, which could provide scientific basis for ecological problems such as water resources research, early warning of extreme weather disasters and soil and water loss in SWC.

Keywords: TRMM; southwest China; precipitation; spatial-temporal characteristics; trend analysis; Hurst index

(责任编辑 许 甲)