

# 1979—2014 年秦巴山区 MSWEP 降水数据精度评估及变化特征分析

杨晓柳, 王 平, 高大威, 杨 幸, 丁智强

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

**摘 要:**为了探究多源加权集成降水数据集(MSWEP)降水产品在秦巴山区的适应性,利用秦巴山区范围内站点降水观测资料,应用相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)以及相对偏差(Bias)等指标,对秦巴山区 MSWEP 降水数据精度进行评估,并分析了 MSWEP 降水与站点降水多年变化。结果表明:MSWEP 降水产品在秦巴山区精度较高,具有较好的实用性,无论是年、季节、月尺度还是单个站点的精度评估,相关系数(CC)都在 0.8 以上,具有较高的一致性;从均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)来看,MSWEP 降水数据与站点实测值较接近;从相对偏差(Bias)来看,MSWEP 降水产品对实测值存在微弱的低估或高估。36 年来,除 MSWEP 数据春季呈增加趋势外,其余时段两种降水量均呈减少趋势;整个时段内,两种降水均呈“增多—减少”两个阶段变化,突变年份均发生在 1985 年;并且存在明显的“丰—枯”交替变化周期,其变化主周期都为中长时间周期,都是 20 年以上的时间尺度,其中站点实测数据的变化主周期比 MSWEP 降水产品数据短 2 年。

**关键词:**MSWEP 降水数据; 秦巴山区; 精度评估

**中图分类号:**P339

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)06-0146-07

## Accuracy Evaluation and Analysis on Change Characteristics of MSWEP Precipitation Data in Qinbashan Mountains Area from 1979 to 2014

YANG Xiaoliu, WANG Ping, GAO Dawei, YANG Xing, DING Zhiqiang

(School of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** To explore Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) precipitation product adaptability in Qinbashan Mountains, precipitation observation data within the use scope of Qinbashan Mountains sites, the correlation coefficient (CC), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and the relative deviation (Bias), and other indicators were used to evaluate MSWEP precipitation data accuracy, and analyze the site MSWEP precipitation and precipitation change for years. The results show that MSWEP precipitation product is of high precision and good practicability in Qinbashan Mountains area. Whether it is annual, seasonal, monthly scale or single site accuracy evaluation, the CC is above 0.8 with high consistency. With respect to RMSE and MAE, the MSWEP precipitation data is close to the measured value of the site. From the perspective of relative Bias, MSWEP precipitation product slightly underestimates or overestimates the measured value. In the past 36 years, except for the MSWEP data, which showed the increasing trend in spring, the precipitation of the other two periods showed the decreasing trend. During the whole period, both kinds of precipitation showed two stages of ‘increase—decrease’, and the abrupt year occurred in 1985. In addition, there is an obvious ‘rich—dry’ alternating change cycle, and the main change cycle is medium and long time period, which is more than 20 years. Among them, the main change cycle of site measured data is 2 years shorter than MSWEP precipitation.

**Keywords:** MSWEP precipitation data; Qinbashan Mountains area; accuracy evaluation

收稿日期:2019-11-29

修回日期:2020-01-06

资助项目:国家自然科学基金“森林植被影响岩溶水源地产流功能的观测研究”(41262013)

第一作者:杨晓柳(1994—),女,云南保山人,硕士研究生,研究方向为山地环境与自然灾害。E-mail:2495750785@qq.com

通信作者:王平(1965—),男,云南昭通人,副教授,主要从事土壤地理与区域自然地理研究。E-mail:ynwangping@163.com

降水作为全球水循环的基础组成部分,是气象学、水文学、生态学的重要参数,是地球和大气系统能量交换和物质循环的重要组成部分<sup>[1-5]</sup>。传统的降水数据主要通过地面站点观测获得,这种观测方式很大程度上受到地形条件的影响,特别是在地形复杂的山区和高原地区,地面观测点稀少导致降水数据相对缺乏<sup>[6-7]</sup>。因此,获取准确的降水信息对于研究全球气候变化及水循环等具有重要意义<sup>[8]</sup>。

近年来随着卫星观测的快速发展,在全球与区域尺度上已经形成了一系列的卫星降水数据产品,虽然卫星降水数据具有空间覆盖范围广、时空分辨率高的特点,但往往存在对实际降水高估或低估的现象,特别是在地形复杂、地势起伏大的地区,这种现象尤为明显<sup>[9-11]</sup>。而融合了站点降水、卫星降水和再分析数据的多源加权集成降水数据集<sup>[12-13]</sup> (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation, MSWEP) 充分结合了站点数据和卫星数据的优点,具有长时间序列、高精度和高时空分辨率特性,在全球尺度上提供了较为可靠的降水数据<sup>[14]</sup>。MSWEP 产品自发布以来,一些学者开展了精度评估研究,如学者 Jiang 等<sup>[15]</sup> 对该降水数据进行了精度检验,评估了 MSWEP 降水数据在不同时间尺度上的表现和不同降雨强度等级下对总降雨量的贡献率。Sahlu 等<sup>[16]</sup> 在埃塞俄比亚尼罗河流域,对比分析了 6 种卫星产品和再分析产品精度,包括 TMPA、CMORPH、PERSIANN、ECMWF、ERA-Interim 和 MSWEP。王园园等<sup>[17]</sup> 利用三峡库区及附近地区气象站点的降水数据对 MSWEP 月降水数据进行评估,采用 GAM 融合站点降水空间插值结果和 MSWEP 产品就三峡库区分析 1979—2014 年降水变化特征做了分析。邓越等<sup>[18]</sup> 基于 1979—2015 年中国大陆 824 个气象站点观测数据,评估 MSWEP 在中国大陆区域的精度。作为新的网格降水产品,MSWEP 降水产品在秦巴山区尚未有人对其进行研究。

秦巴山区是我国自然地理南北重要分界,是汉江、丹江、嘉陵江、渠江等重要河流的发源地,生态脆弱、气候敏感,一直以来都是气候变化研究的热点区域。对秦巴山区 MSWEP 降水数据进行精度评估,对 MSWEP 与站点降水多年变化进行对比分析,旨在探讨 MSWEP 降水数据在该地区的适用性,为 MSWEP 产品在该区域的应用,如气象预报、防灾减灾、流域生态环境管理、水情调度及社会经济发展等方面提供科学依据。

## 1 研究区概况

秦巴山区由秦岭和大巴山两大山区及之间的汉

江谷地等构成(30°29′—34°37′N, 103°44′—113°13′E),地处中国中部,横跨于华北与华南之间,位于四川、重庆、陕西、湖北、河南、甘肃 6 省市交界处(图 1),是我国人文、地理、气候等南北过渡区,也是气候变化的敏感区和脆弱区,是汉江中上游、嘉陵江上游、渠江上游等汇水区,在维系下游水安全、水生态、水环境等方面发挥着重要作用。以山地、丘陵、盆地为主,气候类型多样,四季分明,降水主要集中在夏秋季节,是亚热带和温带的分界线。该区域不仅是生物多样性保护生态功能区,同时也是重要的水源涵养地,是中国重要的生态安全保障区<sup>[19]</sup>。

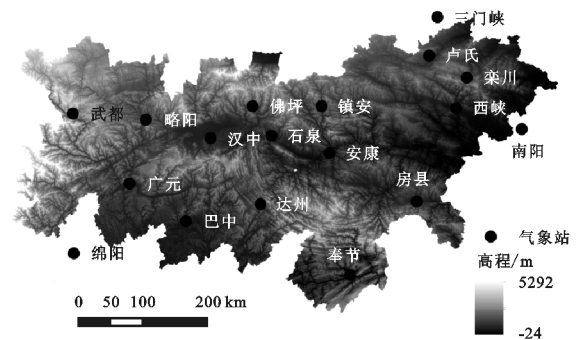


图 1 秦巴山区气象站点分布

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源

MSWEPV 2.1 数据是 Beck 等基于站点数据、卫星降水数据和再分析数据,制作的一款全新的多源加强集成降水数据集,该数据具有 3 小时的时间分辨率和 0.1°的空间分辨率,时间跨度为 1979—2016 年。提取研究区内格点上 MSWEP 降水数据时间序列,使用的降水数据从 <http://www.gloh2o.org> 下载,MSWEP 数据的储存格式为 nc 文件格式。使用 Matlab 软件对原始数据进行预处理,提取出流域内对应站点位置的月降水数据,再利用月降水数据进行累加得到季和年降水数据。

秦巴山区范围内的 18 个气象站点数据,来源于国家气象信息中心数据库,时间序列为 1979—2014 年,站点没有移动,数据资料序列连续完整,并通过 R 软件中的 RCLimDex 程序对数据进行处理,以达到检验和提高数据质量的目的,包括异常值和错误值的筛选,以保证结果的可靠性<sup>[20]</sup>。秦巴山区平均序列为 18 个站总算术平均值。按照气候统计上的春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—翌年 2 月)、雨季(5—10 月)、干季(11 月—翌年 4 月)统计各季降水量。

### 2.2 研究方法

2.2.1 精度评估方法 本文主要采用的是定量指标中的相关系数(CC)反映了两组数据之间的相关性程

度,CC 取值范围为 $[-1,1]$ ,相关系数绝对值越大,表示两者之间的相关性程度越高,相关性绝对值越接近 0,表明数据之间相关性越低;均方根误差(RMSE)表示两组数据之间的偏差,常用来评估误差的整体水平,数值越小,反映 MSWEP 降水与站点实测降水之间的误差越小;平均绝对误差(MAE)可以避免误差相抵的问题,可以准确反映 MSWEP 降水与站点实测降水之间的误差;相对偏差(Bias)映了一组数据相对于另一组数据的偏离程度,Bias 越接近 0,表明 MSWEP 数据越精确,两组数据的吻合度越高,Bias 为正值,表明 MSWEP 降水高于实测降水,Bias 为负值,表明 MSWEP 降水低于实测降水。运算公式如下所示<sup>[21-26]</sup>。

$$CC=\frac{\sum_{i=1}^n(G_i-\overline{G})(S_i-\overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(G_i-\overline{G})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(S_i-\overline{S})^2}} \tag{1}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(S_i-G_i)^2}{n}} \tag{2}$$

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(|S_i-G_i|) \tag{3}$$

$$Bias=\frac{\sum_{i=1}^n(S_i-G_i)}{\sum_{i=1}^nG_i}\times 100\% \tag{4}$$

式中: $n$  为降水系列长度; $S_i, G_i$  分别为 MSWEP 降水和站点实测降水数据; $\overline{S}, \overline{G}$  则分别对应两种降水数据时间序列均值。

2.2.2 两种降水量变化特征分析方法 线性趋势法,即把气候要素表达为时间  $t$  的线性函数  $x=at+b$ ,其中  $a, b$  为经验常数。根据所选的实际数据资料,运用最小二乘法,将  $a$  和  $b$  的数值演算出来,其中  $a$  表示的意义是线性函数的斜率,表征气候要素的线性趋势,如果  $a$  为正就表示的是增加趋势,如果  $a$  的值为负就代表减小趋势,如果  $a$  等于 0 则就说明没有变化趋势<sup>[27]</sup>。

Mann-Kendall 突变检验法,是一种非参数统计检验方法,它不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的影响和干扰,能够反映序列的变趋势,还能够找出序列是否有突变及其位置<sup>[28-29]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 MASWEP 产品精度分析

3.1.1 时间序列精度检验 秦巴山区 18 个气象站点降水的实测数据和对应网格位置上的 MSWEP 降水数据在年、季节和月尺度上的拟合结果及评价指标

见表 1。在年尺度上,MSWEP 降水数据与站点实测数据相关性较好,相关系数达到 0.83,均方根误差均值为 57.30 mm,平均绝对误差均值为 16.74 mm,从两者误差可以看出 MSWEP 降水和站点实测值较接近,相对偏差均值为 $-2.22\%$ ,表明 MSWEP 降水对实测降水有轻微的低估现象。

表 1 年、季节、月尺度上 MSWEP 降水数据精度指标评估结果

指标	年	春季	夏季	秋季	冬季	月
相关系数	0.83	0.86	0.85	0.92	0.89	0.94
均方根误差/mm	57.30	15.55	35.39	17.10	4.16	35.49
平均绝对误差/mm	16.74	4.45	10.47	4.57	1.04	27.19
相对偏差/%	-2.22	-7.55	-1.40	1.77	-9.69	-2.22

在季节尺度上,相关系数都大于 0.85,一致性较高,其中秋季一致性最高,其均值为 0.92,大于春季 0.86、夏季 0.85 及冬季 0.89。从均方根误差来看,MSWEP 降水在春、夏、秋、冬季的均值分别为 15.55、35.39、17.10、4.16 mm。从平均绝对误差看,MSWEP 降水在春、夏、秋、冬季的均值分别为 4.45、10.47、4.57、1.04 mm。从相对偏差来分析,MSWEP 降水在春、夏、秋、冬季的均值分别为 $-7.55\%$ , $-1.40\%$ , $1.77\%$ , $-9.69\%$ 。

在月尺度上,MSWEP 降水数据与站点实测数据间的相关系数均值为 0.94,均方根误差均值为 35.49 mm,平均绝对误差均值为 27.19 mm,相对偏差均值为 $-2.22\%$ 。月尺度上的 MSWEP 降水数据与气象站点实测数据一致性很高,误差也较小,对实测数据有轻微低估现象。

3.1.2 单个站点精度检验 由于降水受多种气象和地理因素影响,因此,除了需要对整个区域时间序列上的 MSWEP 数据进行精度评估外,还需进一步在单个站点尺度上对 MSWEP 数据进行精度检验。由表 2 可知:(1) 18 个气象站点实测数据与 MSWEP 降水数据之间在月尺度上存在明显的线性相关性,相关系数都在 0.90 以上,其中汉中站相关系数最高 0.99。(2) 18 个气象站点实测数据与 MSWEP 降水数据均方根误差都在 11.5 mm 以下,超过 10 的站点仅有 4 个,分别是房县站、广元站、万源站、奉节站,万源站最大为 11.48 mm,卢氏站最小为 3.62 mm。气象站点实测数据与 MSWEP 降水数据平均绝对误差都在 2.4 mm 以下,超过 2 mm 的站点仅有 3 个,分别是房县站、万源站、奉节站,其余站点均小于 2 mm,房县站最大为 2.39 mm,卢氏站最小为 0.67 mm。(4) 18 个站点中,有 11 个站点相对偏差小于 0,7 个站点大于 0,表明 MSWEP 降水数据相对于站点实测降水数据,有 11 个站点存在轻微低估现象,7 个站点存在轻微的高估现象。在所有站点中,有 16 个站点相对偏差的绝对值



|Bias| 在 20% 以内, 占到 18 个站点总数的 88.9%, 其中 |Bias| 最小的站点为西峡站 -0.70%, 仅有 2 个站点 |Bias| 在 20% 以上, 分别为武都站和房县站。说明

各个站点 MSWEP 降水数据在月尺度上与气象站点实测降水数据之间具有很好的一致性, 在一定程度上能够反映区域内真实的降水情况。

表 2 单个站点月尺度 MSWEP 数据精度评价指标

站点	CC	RMSE/mm	MAE/mm	Bias/%	站点	CC	RMSE/mm	MAE/mm	Bias/%
武都	0.98	7.42	1.60	-29.32	佛坪	0.95	9.49	1.65	15.10
栾川	0.94	8.14	1.44	-9.47	安康	0.98	5.55	1.03	-9.86
三门峡	0.94	5.43	0.97	-1.46	石泉	0.94	8.76	1.54	4.74
卢氏	0.98	3.62	0.67	-4.15	镇安	0.94	7.03	1.17	-0.84
南阳	0.94	8.10	1.59	-7.90	巴中	0.96	9.91	1.89	10.71
西峡	0.94	7.26	1.41	-0.70	广元	0.94	11.14	1.89	3.86
房县	0.97	10.54	2.39	-25.80	绵阳	0.98	6.33	1.18	-6.60
略阳	0.95	7.30	1.23	3.33	万源	0.99	11.48	2.10	19.86
汉中	0.99	3.91	0.78	1.92	奉节	0.95	11.19	2.37	-17.53

3.2 站点与 MSWEP 降水量变化趋势分析

秦巴山区 36 a 来, 站点年平均降水量为 851.1 mm, 年降水量最多的年份是 1983 年为 1 220.2 mm, 最少的年份是 1997 年为 599.2 mm, 并且呈波动减少趋势变化(图 2), 倾向率为 -27.3 mm/10 a。MSWEP 年平均降水量为 872.7 mm, 年降水量最多的年份是 1983 年为 1 180.2 mm, 最少的年份是 1997 年为 608.8 mm, 降水量呈波动减少趋势变化, 倾向率为 -23.1 mm/10 a。站点和 MSWEP 降水量季节变化大(表 3), 均呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季、雨季 > 干季, 各季节降水量最多的年份, 两种降水均出现在同一年, 春、夏、秋、冬、雨、干季分别为 1998 年、1981 年、2011 年、1989 年、1983 年、1989 年。降水量最少的年份除夏季(站点降水 2006 年, MSWEP 降水 1997 年)外, 其余季节均相同, 并且都是在 20 世纪 90 年代中后期, 春、秋、冬、雨、干季分别是 1995 年、1998 年、1999 年、1995 年、1997 年。从整体变化来看, 除 MSWEP 降水夏季呈增多趋势变化外, 其他各季两种降水均呈减少趋势变化, 但春、秋、冬季 MSWEP 降水量的变化幅度大于站点降水量, 而夏、雨、干季则是站点降水量变化幅度大于 MSWEP 降水量。

3.3 站点与 MSWEP 降水量突变分析

用 M-K 突变检验, 对秦巴山区 1979—2014 年年降水量进行检验。结果显示(图 3), 站点年降水量呈“减少—增多”两个阶段变化, 1979—1986 年 UF 曲线 > 0, 该时段降水量呈增多趋势变化, 但没有超过 95% 置信区间, 证明该时段降水量增多趋势不显著, 1986—2014 年 UF 曲线 < 0, 该时段降水量呈减少趋势, 并在 1993—2005 年超出 95% 置信区间, 该时段降水量减少显著, UF 和 UB 曲线 1985 年, 表明 1985 年是突变年。MSWEP 降水量也呈“增多—减少”阶段变化, 1979—1985 年 UF 曲线 > 0, 降水量呈增多

趋势变化, 该阶段 UF 曲线处于置信区间内, 降水量增多不显著, 1985—2014 年 UF 曲线 < 0, 降水量呈减少趋势, 其中 1996—2002 年超出 95% 置信区间, 该时段降水量减少显著, 1985 年 UF 和 UB 曲线相交, 1985 年为突变年。

3.4 站点与 MSWEP 降水量变化周期分析

由 1979—2014 年秦巴山区站点及 MSWEP 年降水量小波变化系数实部图和小波方差可知(图 4), 站点年降水量, 存在 4~7 a 和 20~25 a 时间尺度的“丰—枯”交替变化周期。在 20~25 a 时间尺度上存在 3 个准震荡周期, 站点年降水量经历了丰→枯→丰的循环交替, 20 世纪 80 年代中期前秦巴山区处于多雨期, 而 1987—2000 年处于少雨期, 进入 21 世纪后降水量较前一阶段有所增加为多雨期, 但没有 20 世纪 80 年代中期前的降水量多, 而到 2014 年等值线还没有闭合, 证明未来一段时间降水量将继续偏多; 4~7 a 的周期震荡主要在 20 世纪 90 年代前和 1997 年以后比较活跃, 存在降水较丰富和较少交替循环交替。小波方差表明, 该时段站点年降水量存在两个峰值, 分别为 5 a 和 23 a, 其中 23 a 的时间周期峰值最显著, 所以为站点年降水量变化的主周期。

MSWEP 年降水量, 存在 3~5 a, 6~10 a, 19~26 a 时间尺度的“丰—枯”交替变化周期。在 29~26 a 时间尺度上存在 3 个准震荡周期, 站点年降水量经历了丰→枯→丰的循环交替, 1987 年前处于多雨期, 1987—2000 年处于少雨期, 2000 年以后降水较前一时段增多, 为多雨期, 但降水量不如 1987 年前多, 而到 2014 年等值线还没有闭合, 证明未来还有一段时间降水量将继续偏多; 6~10 a 的周期震荡主要在 21 世纪以前比较活跃, 存在降水量较多和较少交替变化; 3~5 a 的短时间尺度的降水变化, 存在降水量较

丰富和较少的交替变化。小波方差表明,该时段 MSWEP 年降水量存在两个峰值,分别为 8 a 和 24 a,

其中 24 a 的时间周期峰值最显著,所以为 MSWEP 年降水量变化的主周期。

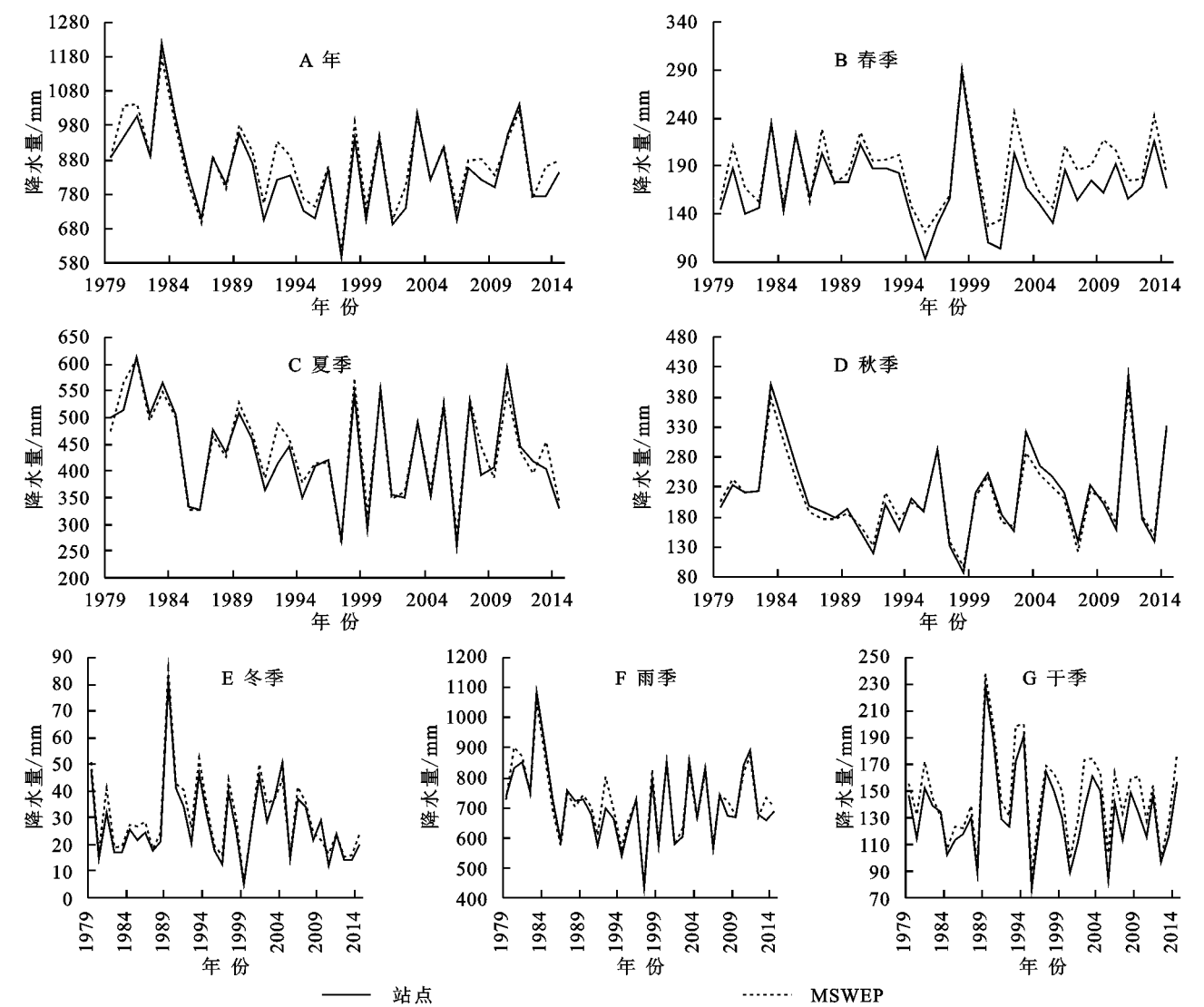


图 2 站点与 MSWEP 降水量变化趋势

表 3 1979—2014 年站点与 MSWEP 降水量年、季节变化趋势及其倾向率

降水量类型	项目	年	春	夏	秋	冬	雨	干
站点降水量	多年平均值/mm	851.1	170.4	435.0	217.9	27.8	717.2	133.9
	倾向率/(mm/10a)	-27.3	-1.6	-23.1	-0.7	-1.9	-24.5	-2.8
MSWEP 降水量	多年平均值/mm	872.7	186.2	441.8	214.3	30.5	726.1	146.7
	倾向率/(mm/10a)	-23.1	3.3	-22.2	-1.3	-3.0	-22.8	-0.3

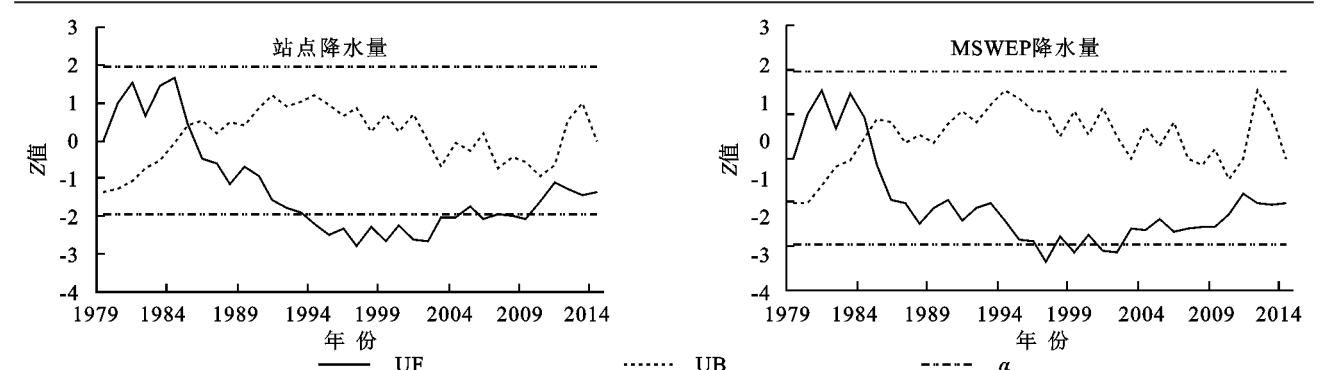


图 3 站点与 MSWEP 年降水量 M-K 检验

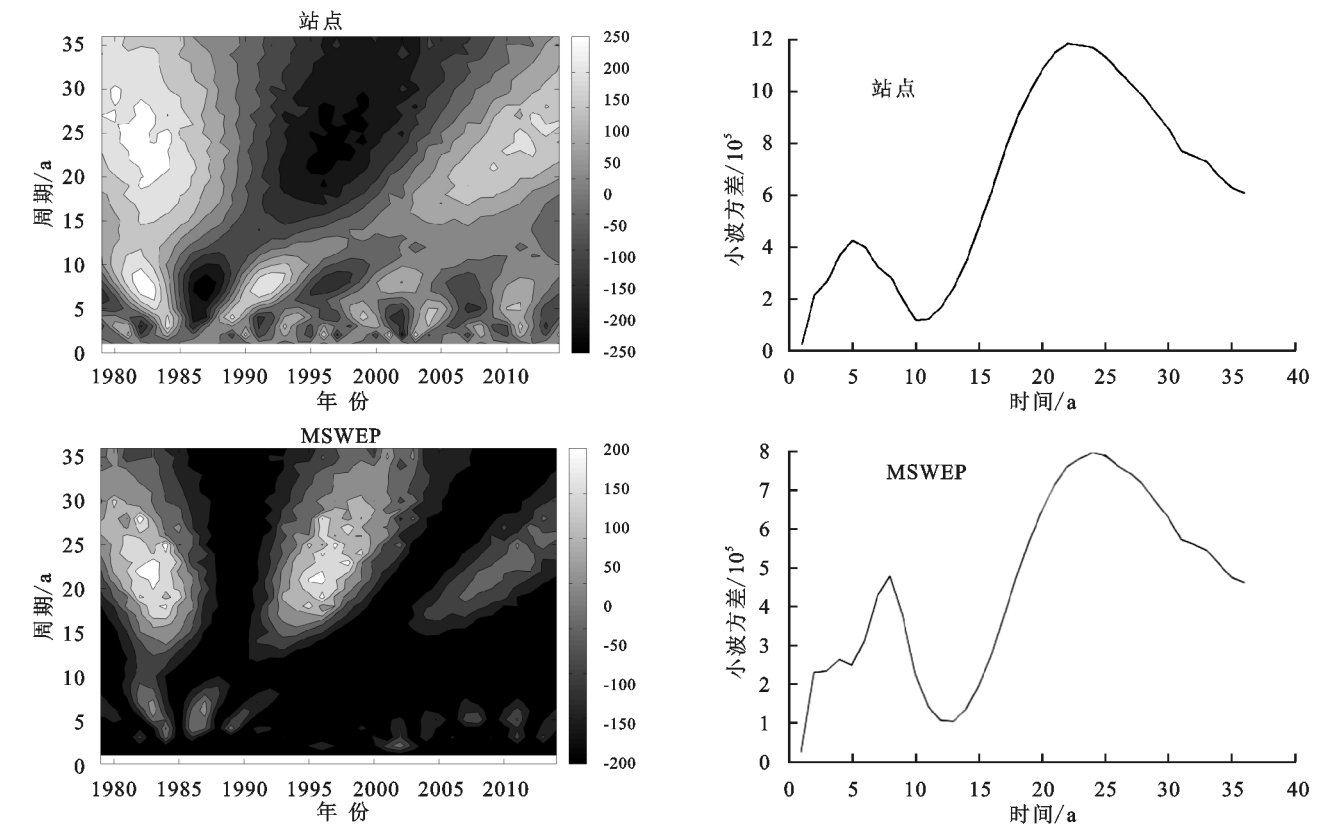


图 4 站点与 MSWEP 降水量变化周期

## 4 结论

(1)从精度检验结果来看,首先站点降水与 MSWEP 降水在年、季节、月尺度上相关系数均在 0.8 以上,具有较高的一致性,月尺度和秋季一致性最高,相关系数在 0.9 以上;均方根误差,年尺度为 57.3 mm、月尺度为 35.5 mm,季节尺度春、夏、秋、冬季分别为 15.6,35.4,17.1,4.2 mm;平均绝对误差,年尺度为 16.7 mm,月尺度为 27.2 mm,季节尺度春、夏、秋、冬季分别为 4.4,10.5,4.6,1.0 mm;相对偏差,年尺度为-2.22%,月尺度为-2.22%,季节尺度春夏秋冬分别为-7.55%,-1.40%,1.77%,-9.69%。其次,各个站点 MSWEP 降水数据在月尺度上与气象站点实测降水数据之间也具有很好的一致性,在一定程度上能反映区域内真实的降水情况。

(2)从变化趋势来看,站点和 MSWEP 年降水量均呈波动减少趋势变化,倾向率分别为-27.3,-23.1 mm/10 a,季节降水量除春季 MSWEP 呈增加趋势外,其余各季节两者降水数据均呈减少趋势变化,其中降水量减少最显著的季节无论是站点还是 MSWEP 降水都是夏季(站点倾向率:-23.1 mm/10 a,MSWEP 倾向率:-22.2 mm/10 a)和雨季(站点倾向率:-24.5 mm/10 a,MSWEP 降水倾向率:-22.7

mm/10 a)。从突变分析来看,站点和 MSWEP 降水量在该时段均有突变现象,并且突变年份都为 1985 年。从变化周期上看,站点数据与 MSWEP 数据均出现“枯—丰”周期性变化规律,但站点降水量变化主周期比 MSWEP 降水量短 2 a。

参考文献:

[1] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis(TMPA)[J]. Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, 2010,8(1): 38-62.

[2] 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]. Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, 2007,8(3):38-55.

[3] Immerzeel W W, Rutten M M, Droogers P. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula[J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(2):362-370.

[4] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2000,228(1):113-129.

[5] Li M, Shao Q X. An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data[J]. Journal of Hydrology, 2010,385:51-64.

- [6] Goodrich D C, Faures J M, Woolhiser D A, et al. Measurements and analysis of small-scale convective storm rainfall variability [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 17(3): 283-308.
- [7] Tobin K J, Bennett M E. Adjusting satellite precipitation data to facilitate hydrologic modeling [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 966-978.
- [8] Duan Z, Bastiaanssen W G M, First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling calibration procedure [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131(5): 1-13.
- [9] Nair A, Indu J. Performance assessment of Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) product over India [J]. *Climate*, 2017, 5(1): 2-22.
- [10] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [11] 孟清, 白红英, 郭少壮. 基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 1-7.
- [12] 费明哲, 张增信, 原立峰, 等. TRMM 降水产品在鄱阳湖流域的精度评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1322-1330.
- [13] Beck H E, Van D A I J M, Vincenzo L, et al. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979—2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017, 21(1): 589-615.
- [14] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. A review of global precipitation data sets: data sources, estimation, and intercomparisons [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1): 79-107.
- [15] Jiang D J, Zhang H, Li R Z. Performance evaluation of TMPA version 7 estimates for precipitation and its extremes in Circum Bohai-Sea region, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(3/4): 1021-1033.
- [16] Sahlu D, Moges S A, Nikolopoulos E I, et al. Evaluation of high-resolution multisatellite and reanalysis rainfall products over east Africa [J]. *Advances in Meteorology*, 2017, 206(5): 1-14.
- [17] 王圆圆, 郭微, 李贵才, 等. 基于广义加性模型估算 1979—2014 年三峡库区降水及其特征分析 [J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1207-1220.
- [18] 邓越, 蒋卫国, 王晓雅. MSWEP 降水产品在中国大陆区域的精度评估 [J]. *水利水电快报*, 2018, 29(4): 455-464.
- [19] 章金城, 周文佐. 2006—2015 年秦巴山区植被光合有效辐射吸收比例的时空变化特征 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1453-1463.
- [20] 原立峰, 张增信, 刘星飞, 等. 鄱阳湖流域近 49 年降雨序列一致性检验与分析 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(2): 732-735.
- [21] 费明哲, 张增信, 原立峰, 等. TRMM 降水产品在鄱阳湖流域的精度评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1322-1330.
- [22] 刘洁, 夏军, 邹磊, 等. 多卫星遥感降水数据在塔里木河流域的适用性分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 1-8.
- [23] 原立峰, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 近 50 年来鄱阳湖流域降雨多时间尺度变化规律研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3): 434-440.
- [24] 季璇, 罗毅. TRMM 降水数据在中天山区域的精度评估分析 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 253-262.
- [25] 金秋, 张增信, 黄钰瀚, 等. 基于 TRMM 卫星产品的长江流域降水精度评估 [J]. *人民长江*, 2017, 48(19): 48-52.
- [26] 沈彬, 李新功. 塔里木河流域 TRMM 降水数据精度评估 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(4): 703-712.
- [27] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [28] Pandey D K, Kumar A, Mohanty S. Recent trends in sediment load of the tropical (Peninsular) river basins of India [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(3): 108-118.
- [29] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(4): 107-122.
- [30] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.