

TRMM 数据在京津冀地区干旱监测适用性研究

赵安周^{1,2}, 王冬利¹, 范倩倩¹, 王金杰¹

(1. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 基于气象站点实测降水数据和热带降雨卫星(Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM) 3B43 Version 7 (V7)降水产品,计算了京津冀地区 1998–2017 年多时间尺度标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI) ($SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$)。结果表明:TRMM 3B43 数据与站点观测月和年降水数据在时空上具有良好的一致性;从时间变化趋势来看,基于 TRMM 3B43 数据和站点降水数据计算的不同时间尺度的 SPI 值存在高度一致性;从空间变化趋势来看,基于两种数据计算的京津冀地区 25 个站点多时间尺度 SPI 的相关系数均大于 0.7, POD 值大于 0.6, 80% 以上的 FAR 值小于 0.3, 70% 以上站点的 FBI 值在 0.9~1.1 之间;两种数据计算的干旱的面积百分比基本一致, 1、3、6 和 12 个月的干旱面积的 CC 值分别为 0.93、0.95、0.96 和 0.96。

关键词: 干旱监测; 标准化降水指数 SPI; TRMM 3B43; 降水; 京津冀地区

中图分类号: S127; P332.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0235-08

Evaluating the applicability of TRMM data in monitoring drought events in Beijing – Tianjin – Hebei region

ZHAO Anzhou^{1,2}, WANG Dongli¹, FAN Qianqian¹, WANG Jinjie¹

(1. School of Mining and Mapping Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101, China)

Abstract: The standardized precipitation indexes (SPI , including $SPI-1$, $SPI-3$, $SPI-6$, and $SPI-12$) at multi-temporal scales from 1998 to 2017 in Beijing – Tianjin – Hebei region were calculated based on the monitored precipitation data of meteorological stations and Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) V7 3B43 products. The results showed that the monthly and annual precipitation data of TRMM 3B43 products were consistent with that of the meteorological stations in Beijing – Tianjin – Hebei region in terms of time variation and space distribution. The SPI calculated by these two data sources agreed quite well at different time scales. In terms of spatial distribution, the SPI based on monthly TRMM 3B43 data showed a consistent variability compared with the actual monitored data of the 25 stations. The values of correlation coefficients were more than 0.7 and probability of detection (POD) values were more than 0.6. More than 80% of the false alarm ratio (FAR) values were less than 0.3, and more than 70% of the stations had frequency bias index (FBI) values ranging from 0.9 to 1.1. Moreover, the mean drought area percentage calculated by these two data sources matched well, and the Pearson correlation coefficient (CC) values were 0.93, 0.95, 0.96, and 0.96 at the different time-scales ($SPI-1$, $SPI-3$, $SPI-6$, and $SPI-12$), respectively.

Key words: drought monitoring; standardized precipitation index (SPI); TRMM 3B43; precipitation; Beijing – Tianjin – Hebei region

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-10-05

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJCZH257); 河北省普通高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2018043); 河北省自然科学基金项目(D2017402159); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目

作者简介: 赵安周(1985-), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业干旱评价等方面的研究。

通讯作者: 王冬利(1979-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事农业遥感方面的研究。

1 研究背景

干旱是影响全球农业生产和经济社会发展最为严重的气象灾害之一^[1]。随着全球气候变暖,干旱事件发生的频率和强度均有增加的趋势,对生态系统和农业生产的影响越来越严重^[2]。据统计,自 1950 年以来中国平均每年因干旱导致的粮食损失达到 1.58×10^{10} kg^[3]。地球系统模式预测表明,全球干旱发生的风险与损失在 21 世纪将进一步增加,会严重影响农业生产和生态系统的健康发展^[4]。因此,在全球气候变暖背景下精确监测与合理评估干旱的发生及其演变过程对地区农业生产具有重要的意义^[4]。

目前对干旱的监测评估多采用各种干旱指数,其中标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)的计算因其仅需降水数据且可以进行多时间尺度干旱监测而被世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐,被广泛应用于干旱研究中^[5]。然而计算该指数所采用的降水数据主要来源于国家标准气象台站或雨量站的观测,易受到站点稀少、分布空间不均以及站点迁移等因素的影响,容易造成观测数据缺失、历史观测数据和现有观测数据衔接困难等问题,进而使得计算得到的干旱指数在分析大面积干旱事件的时候会存在较大误差^[4]。虽然已有空间插值方法可以将站点数据转为大范围连续曲面,但是其精度会受到站点密度、参数设置等因素的影响^[6]。

随着遥感技术的发展,基于卫星遥感的反演降水产品成为监测全球及区域降水变化、旱涝监测的重要数据来源^[7]。卫星遥感反演降水产品可以有效弥补国家标准气象台站或雨量站空间分布不均及时间序列缺失等不足^[5]。目前已有包括 MSWEP (multi-source weighted-ensemble precipitation)、PERSIANN (precipitation estimation from remote sensing information using artificial neural network)、TMPA (tropical rainfall measurement mission (TRMM) multi-satellite precipitation analysis) 等 10 多种卫星遥感降水反演数据被用于全球和区域降水、旱涝灾害监测等领域^[8]。其中由美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和日本宇宙开发事业团(NASDA)共同发布的热带降雨卫星(TRMM)数据产品是目前应用最广泛的降水产品^[9-10]。国内外众多学者采用雨量站等实测站点数据对不同气候带、不同地形的 TRMM 数据精度进

行了验证,认为该数据可替代站点实测数据应用在水文模型模拟、洪涝灾害监测等领域中^[11-12]。如陈少丹等^[5]、Yan 等^[10]基于 TRMM 数据评估了中国河南省以及西南地区的干旱事件,认为基于 TRMM 数据构建的干旱指数与基于站点计算的 SPI 指数具有较好的一致性;Sahoo 等^[13]在全球尺度评估了准实时数据 3B42RTV7、再分析数据 3B42V6 和 3B42V7 在干旱监测中的精度,认为 3B42V6 和 3B42V7 降水产品可以有效识别干旱事件,而准实时 3B42RTV7 降水产品则表现较差;王兆礼等^[14]利用站点实测数据评估了 3B42V7 在中国大陆的监测效果,认为该数据产品可以有效识别近些年来中国的干旱事件。

京津冀地区地处海河流域中心地带,干旱频发,严重制约着当地的农业生产和生态环境,虽然已有研究对该地的干旱事件时空演变进行了分析,但是多是基于站点的观测降水数据^[15-16],将基于 TRMM 3B43 产品和站点的观测降水数据计算的多时间尺度 SPI 干旱指数进行时空对比,系统分析 TRMM 数据在该地区干旱监测中应用效果的研究较少。鉴于此,以京津冀地区为例,对比分析利用 TRMM 3B43 产品和站点的观测降水数据计算的 SPI 干旱指数,评估 TRMM 3B43 数据在该地区干旱监测的效果,以期京津冀地区的农业生产、干旱监测与评估提供科学参考依据。

2 数据来源和研究方法

2.1 研究区概况

京津冀地区位于 $36.1^{\circ} \sim 42.7^{\circ} \text{N}$, $113.5^{\circ} \sim 119.8^{\circ} \text{E}$ 之间,包括北京、天津两个直辖市以及河北省的 13 个地市,总面积达 $21.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势由西北向东南倾斜,北部为燕山、太行山脉,东部为华北平原北端,平均海拔 500 m 以上^[17]。降水波动较大,70% 以上的降水集中在 6-9 月,冬季受西伯利亚高压控制,寒冷干燥少降水,春季多大风,气温升温快,蒸发量较大,易发生干旱事件^[17]。自 20 世纪 80 年代以来,该地区呈现暖干化的趋势,使得干旱等气象灾害频发,对地区农业生产及生态环境造成重大影响。京津冀地区 TRMM 3B43 数据格网点及其气象站点空间分布见图 1。

2.2 数据来源

目前最新的 TRMM 多卫星降水分析包括 3B42RT(3-hour)、3B42(daily)和 3B43(monthly)3 种不同时间尺度的产品数据,其中 TRMM 3B42 和

TRMM 3B43 数据的精度相较于准实时 TRMM 3B42RT 产品与站点观测数据更加接近^[9]。所选用的 TRMM 3B43V7 月降水数据空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (约 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$), 其覆盖范围为全球南北纬 50° 、东西经 180° 之间, 时间长度为 1998–2017 年, 数据格式为 HDF。利用遥感软件将 TRMM 3B43 降水速率层从 HDF 文件中提取出来, 然后与各月的总时间相乘得到月降水数据, 利用京津冀矢量数据对其进行裁剪最终得到研究区的 TRMM 3B43 数据。1998–2017 年京津冀地区 25 个气象站点的逐月降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。

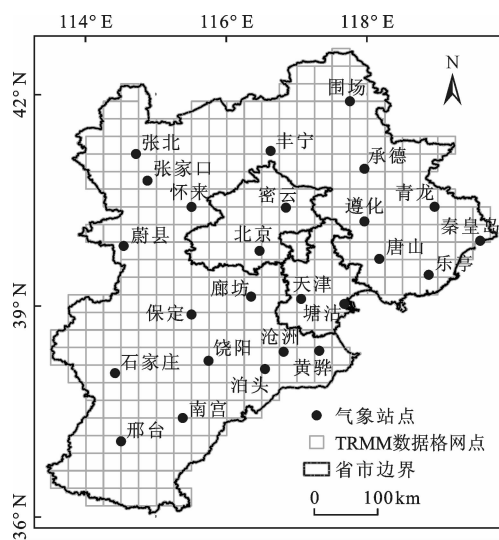


图1 京津冀地区 TRMM 3B43 数据格网点及其气象站点空间分布

2.3 研究方法

SPI 具有多时间尺度特征, 选取京津冀地区 1、3、6 和 12 个月尺度的 SPI 值进行分析, 其具体计算公式和干旱等级表可参考文献[5, 10]。

为验证 TRMM 3B43 数据在京津冀地区的应用效果, 采用皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, CC)、均方差误差 (root mean square error, $RMSE$) 以及相对偏差 (relative mean bias, RB) 3 个指标对其进行评价, 具体公式可参考文献[9–10]。

此外, 采用 CC 、探测率 (probability of detection, POD)、空报率 (false alarm ratio, FAR) 以及预报偏差 (frequency bias index, FBI) 来表示基于 TRMM 3B43 数据计算的 SPI 对于干旱事件的探测能力, 其具体计算公式如下^[18–19]:

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (2)$$

$$FBI = \frac{a + b}{a + c} \quad (3)$$

式中: a 为 TRMM 3B43 数据和站点观测降水数据计算的 SPI 干旱事件出现的个数; b 为 TRMM 3B43 计算的 SPI 出现干旱而站点观测数据计算的 SPI 无干旱的次数; c 为站点观测降水数据计算的 SPI 出现干旱而 TRMM 3B43 计算的 SPI 无干旱的次数。POD 和 FAR 的取值范围均为 $[0, 1]$, POD 值越接近 1, FAR 的值越接近 0, 表明基于 TRMM 3B43 数据计算的 SPI 对于干旱事件的探测精度越高; FBI 的最优值为 1, 大于 1, 表示基于 TRMM 3B43 计算的 SPI 值偏大, 低估了干旱事件, 反之表明计算的 SPI 值偏小, 高估了干旱事件。

3 结果分析

3.1 1998–2017 年 TRMM 3B43 降水数据评价分析

3.1.1 总体评估 1998–2017 年基于站点观测数据和 TRMM 3B43 数据的京津冀地区年降水量、月平均降水量以及散点图见图 2。分析图 2(a) 可知, 基于站点观测数据和 TRMM 3B43 数据的年降水量均值分别为 506.64 mm 和 539.64 mm, 且近 20 年以来该地区降水量呈现增加的趋势, 增加幅度分别为 5.49 mm/a 和 5.61 mm/a, 二者变化趋势相似, 但均未通过 95% 显著性水平检验; 由图 2(b) 可看出, 站点观测数据与 TRMM 3B43 数据具有相似的变化趋势, 70% 以上的降水量集中在 6–9 月, 降水量峰值出现在 7 月份, TRMM 3B43 数据对降水量较多的月份 (5–8 月) 较站点观测数据均存在一定的高估现象, 7 月份的误差最大 (9.68 mm), 11 月份误差最小 (0.88 mm); 由图 2(c) 可看出, 站点观测数据与 TRMM 3B43 数据的月降水量存在高度的一致性, TRMM 3B43 和站点观测数据均分布在 1:1 线附近, 其 $CC = 0.9904$, $RMSE = 7.31 \text{ mm}$, $RB = 6.46\%$ (图 2)。总体来看, TRMM 3B43 产品数据与站点观测数据在年和月变化上均具有很高的 consistency。

3.1.2 空间评估 站点观测的月降水量数据与其对应的格网 TRMM 3B43 数据的 CC 、 $RMSE$ 和 RB 的空间分布如图 3 所示。

从图 3 整体上看, 所有站点的月降水量观测数据与对应格网的 TRMM 3B43 数据均具有很高的相关性 ($P < 0.01$), 平均相关系数为 0.94 (0.88~0.97), 最大值出现在保定站, 最小值出现在秦皇岛站 (图 3

(a))。二者的 $RMSE$ 均值为 20 mm (11.88 ~ 33.79 mm), 呈由东向西递减的态势, 最大值出现在东北部的秦皇岛站, 最小值出现在西北部的张家口站, 进一步证实了 TRMM 3B43 数据产品对于降水量强度较大的站点探测能力有限(图 3(b))。 RB 的均值为 8.93%

(-1.18% ~ 19.88%), 除黄骅站外, 其他所有格网的 TRMM 3B43 数据均存在高估实测降水量数据的现象(图 3(c))。以上分析结果表明 TRMM 3B43 降水量数据产品与站点观测降水量数据具有良好的空间匹配性。

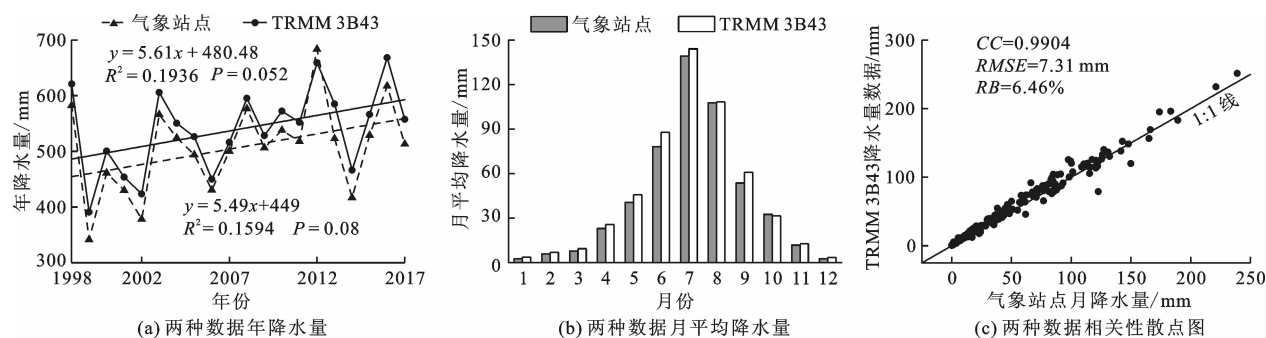


图2 1998-2017年京津冀地区站点观测数据和 TRMM 3B43 数据的年降水量、月平均降水量及相关性图

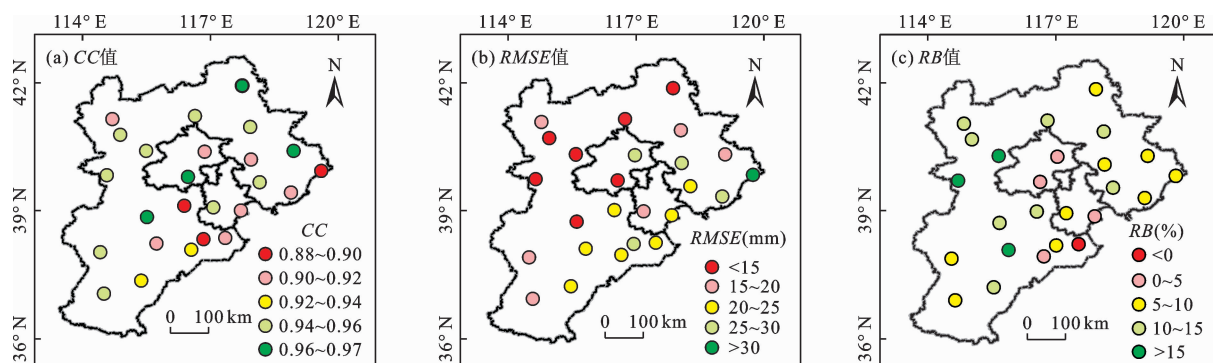


图3 1998-2017年京津冀地区站点实测月降水量数据与 TRMM 3B43 数据的 CC 、 $RMSE$ 及 RB 的空间分布

3.2 基于 TRMM 3B43 产品的 SPI 多时间尺度评估

3.2.1 多时间尺度 SPI 的时间变化 为进一步评估 TRMM 3B43 降水量产品在京津冀地区干旱监测中的应用, 分别依据站点观测降水量数据和 TRMM 3B43 数据计算了 1998-2017 年该地区不同时间尺度(1、3、6 和 12 个月)的 SPI 值(分别表示为 $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$)的时间变化, 计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 基于 TRMM 3B43 降水量数据和站点实测降水量数据计算的 SPI 具有高度的一致性, 两种数据计算的多时间尺度的 SPI 的相关系数 CC 值均高于 0.95, 表明 TRMM 3B43 产品可以很好地监测京津冀地区干湿变化。同时采用 POD 、 FAR 和 FBI 3 个指标进一步评价 TRMM 3B43 数据对于干旱事件的探测能力, 不同时间尺度的 POD 值在 0.9142 ~ 0.9583 之间, 表明 90% 以上由站点观测数据监测到的干旱事件均可以由 TRMM 3B43 数据探测到。 FAR 的值随时间尺度的增大呈变小的趋势, $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 的 FAR 值分别为 0.1000、0.1266、

0.0990 和 0.0588。 FBI 的值在 1.0143 ~ 1.0972 之间, 表明 TRMM 3B43 数据对 $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 的值均存在高估的现象。

3.2.2 多时间尺度 SPI 的空间变化 同时为评价 TRMM 3B43 降水量数据计算的不同时间尺度 SPI 值的空间适用性, 根据 25 个站点观测数据和对对应格网的 TRMM 3B43 数据计算得到 $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 的值, 并进一步计算得到二者的 CC 、 POD 、 FAR 和 FBI 的空间分布, 计算结果如图 5 所示。通过对图 5 的分析比较可知, $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 相关系数 CC 的均值分别为 0.867 (0.788 ~ 0.921)、0.872 (0.766 ~ 0.944)、0.851 (0.724 ~ 0.932) 和 0.839 (0.694 ~ 0.960), 所有站点均通过了 0.01 显著性水平检验。相关系数较高的站点主要分布在京津冀地区的中部, 较低的站点主要分布在东部和西部地区, 表明 TRMM 3B43 数据在估算沿海和海拔较高地区的干旱事件存在较大的不确定性。同时随着时间尺度的增大, 其 CC 小于 0.8 的站点数目开始增多, 表明 TRMM 3B43 数

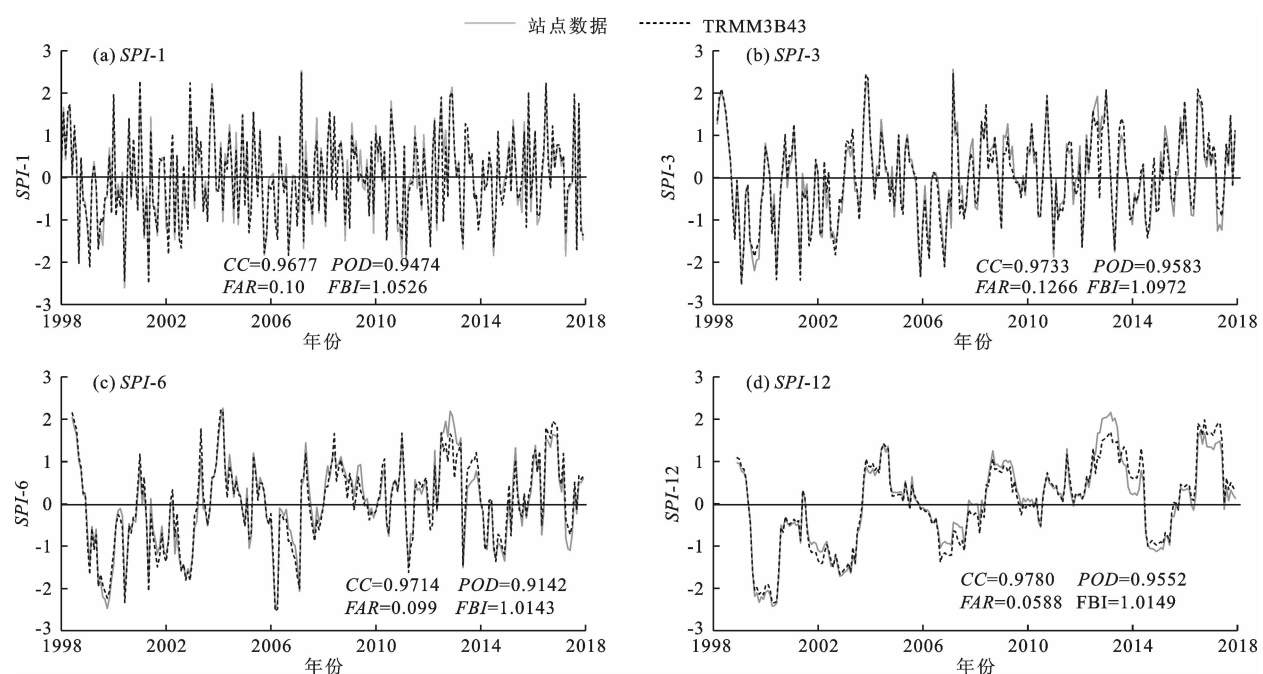


图 4 1998 – 2017 年京津冀地区站点实测降水量数据与 TRMM 3B43 数据的各时间尺度 SPI 值随时间变化曲线

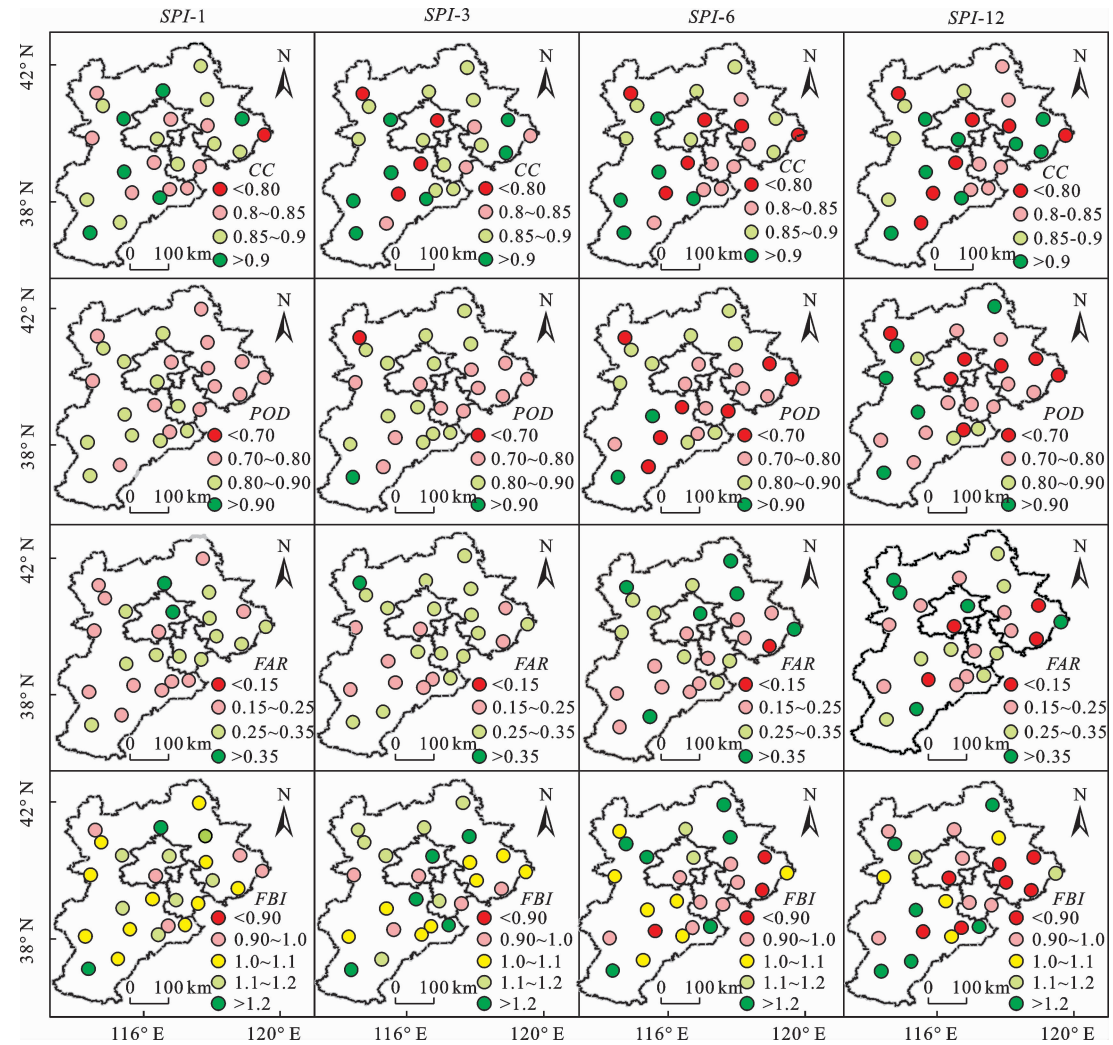


图 5 1998 – 2017 年京津冀地区各时间尺度 SPI 值的 CC 、 POD 、 FAR 以及 FBI 值的空间分布

据对于短时间尺度的干旱的探测能力更强。不同时间尺度 POD 的均值分别为 0.820 (0.711 ~ 0.909)、0.802 (0.722 ~ 0.90)、0.778 (0.667 ~ 0.957) 和 0.775 (0.609 ~ 0.948), POD 值随着时间尺度的增大而减小。对于京津冀地区的 25 个气象站点来说,基于 TRMM 3B43 数据计算的 SPI 可以正确探测 60% 以上的干旱事件。 FAR 在 $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 的均值分别为 0.264 (0.133 ~ 0.417)、0.221 (0.130 ~ 0.329)、0.247 (0.133 ~ 0.40) 和 0.262 (0.044 ~ 0.536), 80% 以上站点的 FAR 值小于 0.30。不同时间尺度 FBI 的均值分别为 1.096 (0.949 ~ 1.371)、1.031 (0.922 ~ 1.188)、1.035 (0.885 ~ 1.25) 和 1.063 (0.804 ~ 1.38), 表明基于 TRMM 3B43 数据计算的 SPI 值略高 (图 5)。总体来看,基于两种数据计算的 25 个站点多时间尺度 SPI 的相关系数均大于 0.7, POD 值大于 0.6, 80% 以上的 FAR 值小于 0.3, 70% 以上站点的 FBI 值在 0.9 ~ 1.1 之间, 进一步表明 TRMM 3B43 产品可以替代站点观测降水量数据用

于对区域干旱事件的监测和研究。

基于站点观测降水量数据和 TRMM 3B43 数据计算的 1998 ~ 2017 年京津冀地区不同时间尺度的极端干旱、严重干旱、中等干旱以及干旱的面积百分比及相关系数见图 6 和表 1。由图 6 可看出,短时间尺度 SPI ($SPI-1$ 和 $SPI-3$) 不能够清晰地描述连续干旱事件的发生,而长时间尺度的 SPI ($SPI-6$ 和 $SPI-12$) 可以确定持续干旱的时间,如发生在 1999 ~ 2004、2006、2010 年等年份的中等、严重以及极端干旱事件在 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 中均可以较好地显示出来;由表 1 可看出,两种数据计算的干旱面积百分比基本一致, $SPI-1$ 、 $SPI-3$ 、 $SPI-6$ 和 $SPI-12$ 的干旱面积相关系数分别为 0.93、0.95、0.96 和 0.96。就不同干旱等级来看,两种数据计算的中等干旱、严重干旱及其极端干旱的相关系数在 0.50 以上,均通过了 95% 显著性水平检验。总体来看,京津冀地区发生轻微及其中等干旱的面积最大,发生极端干旱的面积最小。

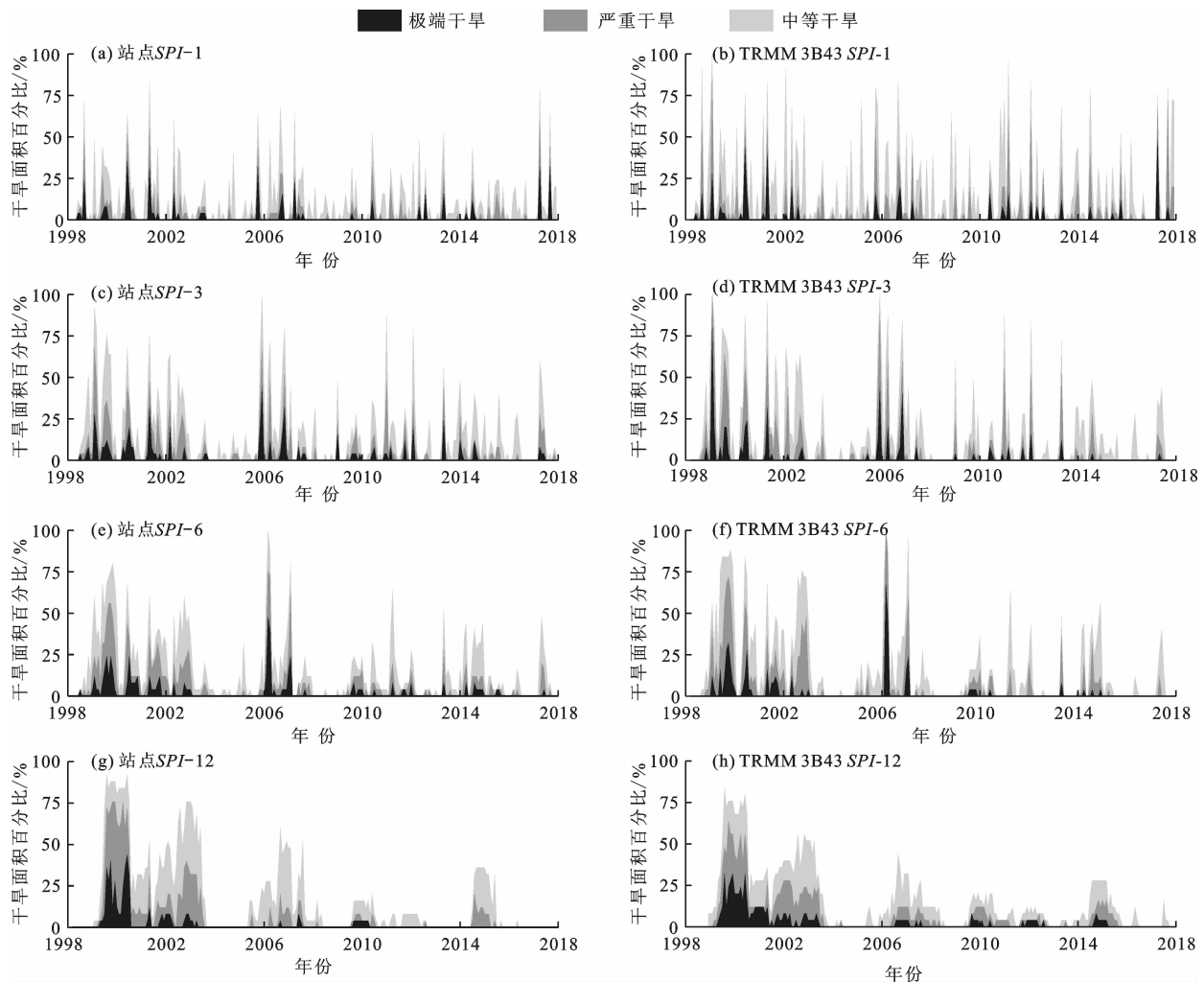


图 6 1998 ~ 2017 年京津冀地区站点观测数据与 TRMM 3B43 数据的各时间尺度不同干旱等级面积百分比

表 1 1998 – 2017 年京津冀地区站点观测月降水量以及 TRMM 3B43 数据的不同等级干旱面积百分比均值及其相关系数

SPI 值 时间尺度	干旱		中等干旱		严重干旱		极端干旱	
	面积/%	CC	面积/%	CC	面积/%	CC	面积/%	CC
SPI – 1	29.35/32.13	0.93	7.33/11.01	0.59	2.47/4.38	0.50	1.70/1.80	0.81
SPI – 3	30.64/31.53	0.95	9.51/9.21	0.76	4.40/4.82	0.84	2.37/2.05	0.82
SPI – 6	30.54/31.42	0.96	8.77/9.26	0.77	5.09/5.29	0.86	2.28/1.94	0.90
SPI – 12	30.13/31.51	0.96	8.28/10.36	0.78	5.05/5.57	0.80	2.76/2.03	0.81

注:表中面积百分比表示站点观测数据计算值/TRMM 3B43 数据计算值。

4 结论与讨论

4.1 结 论

基于 TRMM 3B43 产品和站点实测降水数据,计算了 1998 – 2017 年京津冀地区多时间尺度 SPI(*SPI* – 1、*SPI* – 3、*SPI* – 6 和 *SPI* – 12) 干旱指数,并对干旱时空演变进行了对比研究,研究结果表明:

(1)在年和月时间尺度上,TRMM 3B43 产品与站点观测降水量数据存在高度的一致性,其 $CC = 0.9904$, $RMSE = 7.31\text{ mm}$, $RB = 6.46\%$ 。

(2)在空间上,25 个站点观测降水量数据与对应格网的 TRMM 3B43 数据的 $CC = 0.94$ (0.88 ~ 0.97)、 $RMSE = 20\text{ mm}$ (11.88 ~ 33.79 mm)、 $RB = 8.93\%$ (– 1.18% ~ 19.88%)。

(3)基于多时间尺度 SPI 变化,CC 和 POD 均大于 0.90, FAR 均小于 0.15, FBI 均接近 1,表明 TRMM 3B43 数据能够替代站点观测降水量数据进行京津冀地区干旱的监测与评估。

(4)基于多时间尺度 SPI 的空间变化,两种数据计算的 25 个站点及其对应格网的多时间尺度 SPI 的相关系数均大于 0.7, POD 值大于 0.6, 80% 以上站点的 FAR 值小于 0.3, 70% 以上站点的 FBI 值在 0.9 ~ 1.1 之间,表明基于 TRMM 3B43 数据计算的 SPI 值可以有效地弥补站点分布不均或插值带来的不确定性。

(5)两种数据计算的干旱面积百分比基本一致,计算的中等干旱、严重干旱和极端干旱的相关系数在 0.5 以上,均通过了 0.05 显著性水平检验。

4.2 讨 论

将 TRMM 3B43 降水量数据产品应用到京津冀地区不同时间尺度的干旱监测中,通过与站点观测降水量数据对比表明,基于 TRMM 3B43 数据构建的干旱指数 SPI 可以有效的监测不同时间尺度 (*SPI* – 1、*SPI* – 3、*SPI* – 6 和 *SPI* – 12) 干旱的时空演变,但是由于 TRMM 降水量数据的空间分辨率较

低,对小范围地区发生的干旱事件监测能力有限^[20],虽然已有研究采用多种升尺度方法提高了其空间分辨率,但是对于高海拔等地形复杂地区的不确定性仍然较大^[7,21]。同时应指出计算 SPI 干旱指数需要长时间尺度的降水量数据,利用短时间序列的降水量可能导致参数估计的不稳定^[5],但是由于 TRMM 降水量数据产品是 1998 年开始发布,因此选取了 1998 – 2017 年共计 20a 的数据,随着时间的推移,其数据时间序列将会进一步延长。此外,京津冀地区是我国水资源最为短缺以及干旱频发的地区,以往的研究多是基于气象站点观测数据计算干旱指数,然后利用反距离加权、克里金等插值方法得到干旱的空间分布^[15–16],气象站点的密度及其分布都会影响到插值的精度,而 TRMM 数据可以有效地弥补由于站点插值以及分布不均带来的计算误差^[6]。因此,对于气象站点分布不均甚至无气象站点的地区,可以使用 TRMM 产品替代站点观测数据进行干旱监测和评估^[5]。

参考文献:

[1] YAO Ning, LI Yi, LEI Tianjie, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961 – 2013[J]. Science of the Total Environment, 2018,616:73 – 89.

[2] ZHAO Anzhou, ZHANG Anbing, CAO Sen, et al. Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China[J]. CATENA, 2018,163:165 – 171.

[3] 翁白莎,严登华. 变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J]. 资源科学, 2010,32(2):309 – 316.

[4] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015,70(11):1835 – 1848.

[5] 陈少丹,张利平,郭梦瑶,等. TRMM 卫星降水数据在区域干旱监测中的适用性分析[J]. 农业工程学报, 2018,34(15):126 – 132.

[6] XIA Lang, ZHAO Fen, MAO Kebiao, et al. SPI – based analyses of drought changes over the past 60 years in China’s major crop-growing Areas[J]. Remote Sensing, 2018,10(2):171.

- [7] 范雪薇, 刘海隆. 天山山区 TRMM 降水数据的空间降尺度研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 478–488.
- [8] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. 赣江流域高分辨率卫星降水数据的精度特征与时空变化规律[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(4): 447–459.
- [9] TAN M L, TAN K C, CHUA V P, et al. Evaluation of TRMM product for monitoring drought in the Kelantan River Basin, Malaysia[J]. Water, 2017, 9(1): 57.
- [10] YAN Guixia, LIU Yi, CHEN Xi. Evaluating satellite-based precipitation products in monitoring drought events in southwest China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(10): 3186–3214.
- [11] BAI Yongqing, WANG Juanle, WANG Yujie, et al. Spatio-temporal distribution of drought in the belt and road area during 1998–2015 based on TRMM precipitation data[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(6): 559–570.
- [12] 田苗, 李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 252–257.
- [13] SAHOO A K, SHEFFIELD J, PAN M, et al. Evaluation of the tropical rainfall measuring mission multi-satellite precipitation analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 159: 181–193.
- [14] 王兆礼, 钟睿达, 陈家超, 等. TMPA 卫星遥感降水数据产品在中国大陆的干旱效用评估[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 163–170.
- [15] 苗正伟, 徐利岗, 路梅. 基于 SPEI 指数的京津冀地区干旱特征分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 51–57+62.
- [16] 张丽艳, 杨东, 马露. 京津冀地区气象干旱特征及其成因分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(12): 28–38.
- [17] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 面向非过程的多灾种时空网络建模——以京津冀地区干旱热浪耦合为例[J]. 地理研究, 2017, 36(8): 1415–1427.
- [18] 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.
- [19] MICHOT V, VILA D, ARVOR D, et al. Performance of TRMM TMPA 3B42 V7 in replicating daily rainfall and regional rainfall regimes in the amazon basin (1998–2013)[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 1879.
- [20] 李景刚, 阮宏勋, 李纪人, 等. TRMM 降水数据在气象干旱监测中的应用研究[J]. 水文, 2010, 30(4): 43–46.
- [21] 范科科, 段利民, 张强, 等. 基于多种高分辨率卫星数据的 TRMM 降水数据降尺度研究——以内蒙古地区为例[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1411–1421.

(上接第 234 页)

- [13] BRONFENBRENER L. The modelling of the freezing process in fine-grained porous media: Application to the frost heave estimation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 56(2–3): 120–134.
- [14] THOMAS H R, HE Y. Analysis of coupled heat, moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 1995, 45(4): 677–689.
- [15] BESKOW G. Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads[J]. Soil Science, 1948, 65(4): 355.
- [16] KINOSITA S. Effects of initial soil–water conditions on frost heaving characteristics[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1–4): 41–52.
- [17] 彭丽云, 刘建坤, 田亚护. 粉质粘土的冻胀特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(06): 62–67.
- [18] 黄继辉, 夏才初, 韩常领, 等. 考虑围岩不均匀冻胀的寒区隧道冻胀力解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3766–3774.
- [19] 胡坤, 周国庆, 李俊俊, 等. 不同约束条件下土体冻胀规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1653–1658.
- [20] 王永涛, 王大雁, 郭妍, 等. 青藏粉土单向冻结冻胀率变化特性研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 409–415.
- [21] 马宏岩, 张锋, 冯德成, 等. 单向冻结条件下饱和粉质黏土的冻胀试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5): 926–932.
- [22] ЧЬЛТОВИЧ Н А, 张长庆, 朱元林. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [23] 袁堃. 岛状多年冻土地区路基差异沉降控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [24] 白楠. 人工冻土强制解冻融沉控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [25] 张晨, 蔡正银, 徐光明, 等. 冻土离心模型试验相似准则分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1236–1244.
- [26] 陈湘生, 濮家骝, 殷昆亭, 等. 地基冻–融循环离心模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(4): 531–534.
- [27] 黄英豪, 蔡正银, 张晨, 等. 渠道冻胀离心模型试验设备的研制[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 615–621.