暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

联合GNSS大气可降水量与实测降水的气象干旱监测: 以湖北省GNSS站为例

刘火胜 姚朝龙 王瑞丽 秦鹏程 余乾慧 翟红楠 庞晶

Meteorological drought monitoring combined with GNSS precipitable water vapor and measured precipitation: a case study of GNSS stations in Hubei Province

LIU Huosheng，YAO Chaolong，WANG Ruili，QIN Pengcheng，YU Qianhui，ZHAI Hongnan，PANG Jing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-073

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

近62 a湖北省旱涝特征分析

Analysis of drought and flood characteristics in Hubei Province in recent 62 years

暴雨灾害. 2024, 43(1): 93-100 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-201

基于SPI指数的黄土高原区域旱涝特征分析

Temporal and spatial characteristics of droughts and floods in the Loess Plateau based on standardized precipitation index

暴雨灾害. 2020, 39(5): 524-531 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.011

内蒙古地区四季和年降水量趋势分析

Trend analysis of seasonal and annual precipitation in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2022, 41(4): 426-433 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.007

1961—2020年安徽省区域性暴雨和干旱过程识别及演变特征

Characteristics of identification and evolution of regional rainstorm and drought processes in Anhui Province during 1961-2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 671-678 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-088

江西省气象-水文-雷达小时雨量信息融合试验结果分析

Analysis of fusion test results on hourly precipitation from meteorological and hydrological stations and radar

暴雨灾害. 2020, 39(3): 276-284 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.008

台风“鲇鱼”强降水引发的地质灾害气象风险预警检验与分析

Verification and analysis of meteorological early warning of geological hazards during precipitation of Typhoon "MEGI"

暴雨灾害. 2019, 38(3): 221-228 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.004

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘火胜,姚朝龙,王瑞丽,等.2025.联合 GNSS 大气可降水量与实测降水的气象干旱监测:以湖北省 GNSS 站为例[J].暴雨灾害,44(2):236−245. LIU Huosheng, YAO Chaolong, WANG Ruili, et al. 2025. Meteorological drought monitoring combined with GNSS precipitable water vapor and measured precipitation: a case study of GNSS stations in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):236−245 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−073

联合 GNSS 大气可降水量与实测降水的气象干旱监测:以湖北省 GNSS 站为例

刘火胜[1],姚朝龙[2],王瑞丽[3],秦鹏程[4],余乾慧[1],翟红楠[1],庞晶[3]

(1. 武汉市公共气象服务中心,武汉 430040;2. 华南农业大学资源环境学院,广州 510642;
3. 武汉市气象台,武汉 430040;4. 武汉区域气候中心,武汉 430074)

摘　要:全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 反演的大气可降水量 (Precipitable Water Vapor, PWV) 为暴雨、干旱等气象灾害监测提供了新的数据。本文从大气水汽和降水的综合角度,联合 2011—2022 年湖北省 5 个 GNSS 台站的 PWV 和中国逐日降水数据构建了月尺度降水效率 (Precipitation Efficiency, PE) 气象干旱指数,并通过与常用的标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)、气象干旱综合监测指数 (Meteorological Drought Composite Index, MCI) 和标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 进行对比,分析 PE 气象干旱指数的特点和优势。结果表明:(1) 5 个 GNSS 站点大气水汽变化具有较好的空间一致性,而降水则具有较强的局地变化特征,站点间 PWV 的相关系数均大于 0.98,降水量相关系数在 0.66~0.90 之间。二者的融合将能同时反映干旱期间大范围水汽和局地降水的综合变化特征。(2) PE 气象干旱指数与 SPI、MCI、SPEI 具有较强的相关性,相关系数在 0.56~0.85 之间,表明 PE 监测干旱的有效性,但在反映干旱严重程度和空间分布特征方面表现出一定的差异。(3) GNSS 站点间 PE 的相关系数 (0.50~0.81) 是四种指数中最小的,说明 PE 气象干旱指数具备反映局地干旱特征差异的能力。采用 PE 气象干旱指数对湖北省 GNSS 站点干旱事件的监测结果显示,2011—2022 年间襄樊站发生严重干旱的频次最高,而武汉站伏秋旱发生次数多且持续时间较长。研究结果证实了 PE 气象干旱指数监测干旱演变过程及干旱空间分布特征的有效性和优势。

关键词:气象干旱;全球导航卫星系统;可降水量;降水效率气象干旱指数
中图法分类号:P468.0+24　　**文献标志码**:A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−073

Meteorological drought monitoring combined with GNSS precipitable water vapor and measured precipitation: a case study of GNSS stations in Hubei Province

LIU Huosheng[1], YAO Chaolong[2], WANG Ruili[3], QIN Pengcheng[4],
YU Qianhui[1], ZHAI Hongnan[1], PANG Jing[3]

(1. *Wuhan Public Meteorological Service Center*, *Wuhan* 430040; 2. *College of Natural Resources and Environment*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642; 3. *Wuhan Meteorological Observatory*, *Wuhan* 430040;
4. *Wuhan Regional Climate Center*, *Wuhan* 430074)

Abstract: The atmospheric precipitable water vapor (PWV) derived from Global Navigation Satellite System (GNSS) provides new data for monitoring meteorological disasters such as heavy rainfall. In this study, we constructed the monthly Precipitation Efficiency (PE) meteorological drought index from a comprehensive perspective of atmospheric water vapor and precipitation, based on daily PWV and precipitation data from five GNSS stations in Hubei Province during 2011-2022. The characteristics and advantages of the index were verified using the Standardized Precipitation Index (SPI), Meteorological Drought Composite Index (MCI), and Standardized Precipitation

收稿日期:2024−04−28;**定稿日期**:2024−09−20
资助项目:国家自然科学基金项目 (42474045);武汉市园林和林业局科技基金项目 (WHGF2022A05);武汉城市圈气象联合科技创新基金项目 (WHCSQY202312)
第一作者:刘火胜,主要从事天气预报服务与研究。E-mail: Liu376752469@163.com
通信作者:王瑞丽,主要从事天气预报技术研究和气候分析。E-mail: wangrl_06@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Evapotranspiration Index (SPEI). The results are as follows. (1) The variation of atmospheric water vapor in Hubei Province has good spatial consistency, while precipitation shows strong local variation characteristics. Among the five GNSS stations, the correlation coefficients of PWV are all greater than 0.98, while the correlation coefficients of rainfall are between 0.66 and 0.90. A combination of the two factors could reflect the comprehensive variations in large-scale PWV and local precipitation during the drought periods. (2) PE index shows strong correlations with SPI, MCI, and SPEI (with correlation coefficients ranging from 0.56 to 0.85), indicating the effectiveness of PE in monitoring drought, but still existing differences in reflecting the severity grades and spatial distributions. (3) The correlation coefficient of PE between GNSS stations (0.50~0.81) is the smallest among the four indexes, indicating that the PE meteorological drought index can reflect the difference in local drought characteristics. Using the PE meteorological drought index to monitor drought events at GNSS stations in Hubei provinces shows that during 2011-2022, the highest frequency of severe drought appeared in Xiangfan, while the drought events in the Wuhan site frequently occurred in the autumn season and lasted a long time. Results confirmed the effectiveness and advantages of the PE drought indices constructed from GNSS PWV in characterizing drought evolution and spatial distribution.

Key words: meteorological drought; global navigation satellite system; precipitable water vapor; precipitation efficiency meteorological index

引　言

干旱问题不仅是地球科学研究的重大问题之一, 同时也是世界各国政府和社会公众关注的焦点问题 (秦大河, 2009)。然而, 由于干旱成因复杂, 其发生具有随机性、地域性和隐蔽性, 干旱监测一直是世界公认的难题。研究出理想的干旱指数是实现高精度干旱监测的基础和核心。

地表降水量主要取决于两个因素, 大气中的水汽含量以及导致凝结并产生降水的动态机制, 而这两个因素能从大气稳定性和降水过程的角度为干旱监测提供更多信息。鉴于此, Tuller (1971) 提出联合大气水汽含量和降水量建立降水效率 (Precipitation Efficiency, PE) 气象干旱指数的想法, 并认为这种指数能够反映大气稳定性程度和区域动态降水机制的效率。但是, 无线电探空、微波辐射计、地面湿度计等传统观测技术受观测模式、观测成本、观测条件的限制, 难以获得足够时空分辨率的大范围水汽信息 (李国平和黄丁发, 2004), 导致 PE 气象干旱指数在实际中未能得到有效应用。

自 GPS 气象学 (Bevis et al., 1992) 提出以来, 随着全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的现代化和数据处理理论的完善, GNSS 技术在气象业务中得到了更为广泛的应用。利用 GNSS 发射的无线电波信号穿过大气层时产生的对流层延迟量可精确反演大气水汽信息。近十几年来, 为满足人们对导航、定位等应用的海量需求, 各国建立了密集的 GNSS 地面站网。利用这些 GNSS 站网的观测数据反演得到的高精度 (1~2 mm)、高时空分辨率 (时间分辨率达小时甚至几分钟、空间分辨率可达几十千米) 水汽信息, 为构建气象干旱指数提供了可靠的数据。目前, 基于 GNSS 水汽的气象干旱研究主要有两种途径: 一是利用 GNSS 水汽信息获得高精度潜在蒸散发数据, 进而提高标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 的精度 (Zhao et al., 2019a); 二是直接联合 GNSS 水汽和降水信息建立新的干旱指数。第一种途径的干旱监测效果受模型经验参数的选取以及其他气象数据精度的影响较大, 而第二种途径基于高精度的水汽和降水实测数据具有较高的干旱监测精度, 而且计算更为简单。其中, PE 气象干旱指数就是基于 GNSS 水汽构建的一种新型干旱指数 (Bordi et al., 2015)。在该指数基础上, 又进一步发展出了可以反映干旱多尺度特征的标准化降水转换指数 (Zhao et al., 2020)。这类基于 GNSS 水汽的气象干旱指数具有良好的干旱监测效果, 在西班牙南部 (Schiettekatte et al., 2023) 和我国广东省 (Zhu et al., 2024) 等地区都得到了成功应用。因为这类指数通过量化大气水汽向降水的转化率, 有助于深入理解降水产生机制, 从而有效揭示地区极端干旱和潮湿事件的特征 (Zhu et al., 2024)。

湖北省受亚热带季风气候的影响, 降水充沛, 但由于降水时空分布不均, 省内各地都有季节性干旱发生。在全球气候变化背景下, 近年来湖北省极端干旱灾害频发 (邵末兰和向纯怡, 2009; 王海燕等, 2019)。因此, 开展湖北省干旱监测研究, 对该地区经济社会可持续发展具有重要意义。目前国内外干旱监测研究主要利用降水量、气温等常规观测要素构建干旱指数, 包括相对湿润指数、Z 指数、标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)、标准差降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、气象干旱综合监测指数 (Meteorological Drought Composite Index, MCI) 等。这些指数在干旱监测业务中发挥了重要作用, 其中 MCI 已嵌入国家气候中心干旱综合监测评估业务系统,

成为国家级和各省级干旱监测的主要监测指标 (秦鹏程等, 2014)。针对湖北省干旱监测, 不少学者对各种干旱指数在湖北省的适用性进行了评估分析, 并提出了改进方法, 例如, 基于气象台站观测数据的综合气象干旱指数 (刘可群等, 2012; 秦鹏程等, 2014; 陈家宁等, 2020)、联合气象站数据和遥感数据的修正复合干旱指数 (陈思和钟无双, 2021)、SPEI (赵林等, 2015)。由于各种指数考虑的因素不同, 它们在不同地区的适用性、探测到干旱事件的强度和频次等方面均存在一定差异。即使经过本地化修正, 各种指数仍存在不足之处。例如, 秦鹏程等 (2014) 研究指出, 经湖北本地化修正的 MCI 指数以及中国气象局的 MCI 指数均存在对冬季微量降水响应过于敏感以及有旱情突然加剧的不合理现象。因此, 构建更具适用性和更高准确性的干旱指数仍是一项挑战。

为充分发挥 GNSS 监测大气水汽具备的全天候、高精度等优势, 本文将结合降水与中国陆态网 GNSS 水汽数据构建湖北省 5 个地面站点的月尺度 PE 气象干旱指数, 并利用标准化降水指数 SPI、标准化降水蒸散发指数 SPEI 和我国国家气候中心发布的气象干旱综合监测指数 MCI 验证其监测气象干旱时空演变过程的有效性和优势。研究结果可为湖北省气象干旱监测提供新的技术手段和基础数据, 有望进一步提升该地区干旱监测水平。

1 资料与方法

1.1 数据说明

中国陆态网 5 个湖北 GNSS 台站 2011 年 1 月—2022 年 12 月逐小时的大气可降水量 PWV 数据, 该数据来自中国地震局 GNSS 数据产品服务平台 (https://ftp.cgps.ac.cn/), 这 5 个台站分别为恩施站 (HBES)、秭归站 (HBZG)、荆门站 (HBJM)、襄樊站 (HBXF) 和武汉站 (WUHN), 位置如图 1 所示, 可以看出 5 个站点空间分布较为均匀, 虽同属北亚热带季风气候带, 但是由于地形地貌不同, 各站点的局地气候具有显著差异, 在湖北省具有代表性。

中国陆态网 GNSS PWV 数据的有效性和精度已有许多研究进行了验证和评估 (Shi et al., 2017; Zhao et al., 2019b; Yang et al., 2024)。Zhao 等 (2019b) 利用 ECMWF 和探空水汽数据对 2015—2017 年间的中国陆态网 GNSS PWV 数据进行了对比研究, 结果表明湖北省的几个站点 GNSS PWV 数据精度优于 2 mm, 偏差小于 1 mm。朱彤彤 (2022) 也利用探空水汽数据评估了 2005—2018 年 GNSS PWV 数据的精度, 两种数据在湖北省内的相关系数超过 0.97, 平均

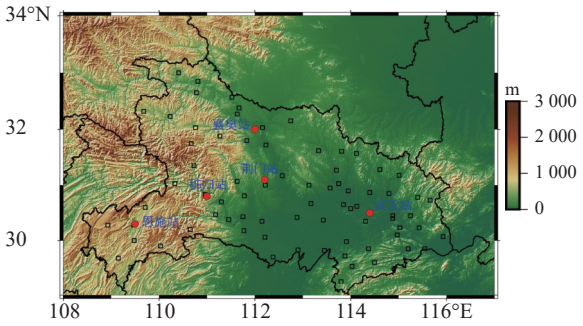


图 1 湖北省陆态网 GNSS 站 (圆点) 和气象干旱综合监测指数 (MCI) 站 (方形) 分布及地形 (填色, 单位: m) 分布

Fig. 1 Distribution of GNSS stations (circles) and Meteorological Composite Index (MCI) stations (squares) and the terrain (shaden, unit:m) in Hubei Province

偏差小于 3 mm, 均方根差在 2~3 mm 之间。为进一步验证 GNSS PWV 数据的可靠性, 本文以武汉站 2016 年和 2020 年两个降雨偏多年份的梅雨期 6—7 月为例, 利用 ERA5 再分析模式 PWV 数据进行了对比分析。图 2 显示的是 GNSS 与 ERA5 两种数据的差值, 绝对值大多小于 4 mm。统计结果表明这两个时间段的 GNSS PWV 相对于 ERA5 PWV 的平均偏差分别为−0.2 mm 和−0.07 mm, 均方根差为 2.01 mm 和 2.15 mm, 与前人的评估结果一致。

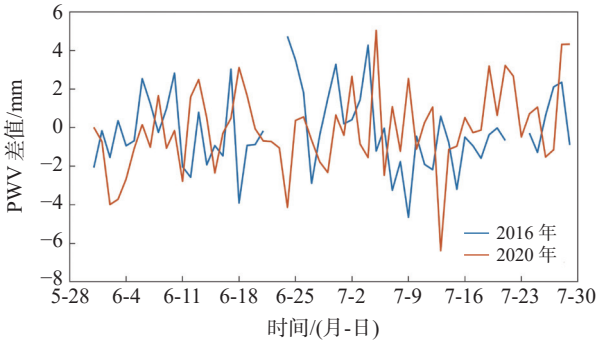


图 2 2016 年和 2020 年 6—7 月 GNSS 与 ERA5 模式 PWV 的差值

Fig. 2 Differences between GNSS PWV and ERA5 PWV during June and July in 2016 and 2020

降水数据采用国家青藏高原数据中心发布的中国逐日降水数据集 (缪驰远等, 2023), 该数据集是基于中国境内及周边 2 839 个站点的日降水观测获得的 1961—2022 年 0.1°×0.1°格网数据。

1.2 研究方法

1.2.1 PE 气象干旱指数的确定

基于 GNSS 水汽的 PE 气象干旱指数计算步骤可分为以下三步。由于受到多种自然 (气象、气候变化) 和人为 (如接收机硬件变化、站点电磁环境变化和处理策略更新等) 因素的影响, GNSS 水汽时间序

列不仅会存在观测噪声, 而且在某一历元前后会发生突变, 发生突变的点通常被称为阶跃点。因此, 本文首先通过 Butterworth 滤波削弱 PWV 时间序列中高频噪声的影响, 并剔除非连续粗差 (姚朝龙等, 2019)。从图 3 所示的襄樊站 PWV 的滤波结果可以看出, 滤波信号不仅很好地保留了 PWV 的变化特征, 而且可以有效探测 2020 年和 2021 年出现的粗差数据, 特别是消除了 2021 年 GNSS 水汽出现负值的不合理现象的影响。然后, 利用三次样条插值填补各 GNSS 站点缺失的数据。最后, 使用逐小时数据获得月平均值, 并计算 PE 气象干旱指数。PE 气象干旱指数 (记为 P_E) 的计算公式为:

$$P_E = \mathrm{norm}\left(\frac{P}{P_{wv}}\right) \tag{1}$$

式中: PWV(记为 P_{wv}) 为 GNSS 反演的大气可降水量, P 为 GNSS 站点的降水量, norm 表示标准化过程。本研究采用均值-标准差的标准化方法, 经过标准化后的 PE 指数与其他干旱指数量级相当, 便于比较。GNSS 站点的降水数据由格网数据 (缪驰远等, 2023) 通过内插得到, 并由日值数据计算得到月平均值。

结合已有的类似研究结果 (Zhu et al., 2024) 和 MCI 气象干旱综合指数等级划分标准 (GB/T 20481-2017), 基于 PE 指数的气象干旱等级划分如表 1 所示。

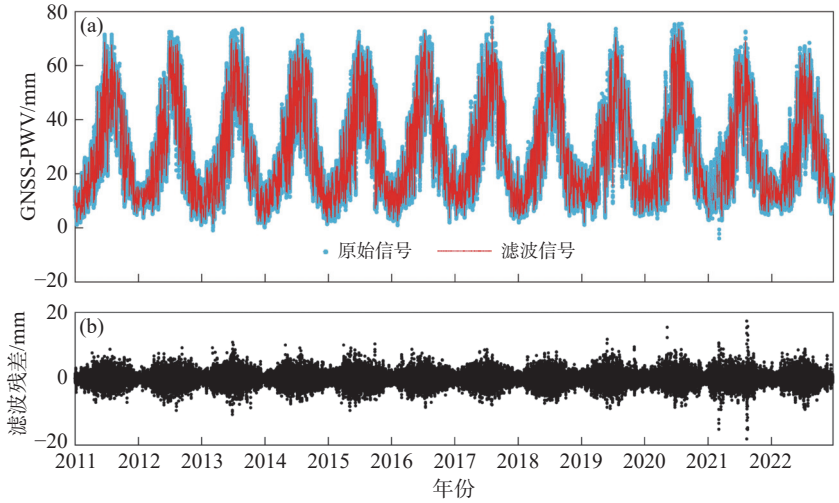


图 3 2011—2022 年襄樊站滤波前 (蓝色点)、滤波后 (红色线) 的大气可降水量 (GNSS-PWV) 时间序列 (a) 和滤波残差 (b)

Fig. 3 PWV time series before filtering (blue dots) and after filtering (red lines) (a) and the filtering residuals (b) of GNSS water vapor data at Xiangfan station from 2011 to 2022

表 1 PE 气象干旱指数等级划分表

Table 1 Categorization of drought severity grades by PE

类型	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
PE气象干旱指数	≤−1.59	(−1.59, −1.29]	(−1.29, −0.79]	(−0.79, −0.5]	>−0.5

1.2.2 其他气象干旱指数

选用 SPI、SPEI 和 MCI 三种气象干旱指数验证 PE 气象干旱指数监测 2011—2022 年湖北省气象干旱的有效性。其中, SPI 由下载的降水数据计算得到。SPEI 是在 SPI 的基础上, 结合降水和潜在蒸散发构建的指数。本文采用的 SPEI 数据下载自网站 https://spei.csic.es/database.html, 该数据空间分辨率为 0.5°×0.5°。MCI 指数 (记为 I_{MC}) 由相对湿度和降水指数计算得到, 其计算公式如下:

$$I_{MC} = a \times I_{SPW60} + b \times I_{M30} + c \times I_{SP90} + d \times I_{SP150} \tag{2}$$

其中, I_{M30}为近 30 d 的相对湿度指数, I_{SPW60}为近 60 d 的标准化权重降水指数, I_{SP90}和I_{SP150}分别是 90 d、150 d 的标准化降水指数, a、b、c、d为可根据当地气候条件和季节变化调整的权重系数。本文采用了国家气候中心发布的逐日 MCI数据集, 四个权重系数分别为 0.3、0.6、0.2、0.3 (陈家宁等, 2020)。为了方便对比, 将各站点插值得到的逐日 MCI 值转换为月均值, 其他指数也转换为月均值。

2 结果与分析

2.1 GNSS 水汽与降水变化特征

图 4 为湖北省 5 个 GNSS 站点的月平均 PWV 时间序列和降水时间序列。由图 4a 可以看出, 5 个

站点 PWV 季节变化规律具有很好的一致性。结合表 2 和图 4a 可知, 5 个站点 PWV 的均方根 (RMS) 相差较小 (最大、最小值仅相差 7% 左右), 站点间的相关系数均大于 0.98, 表明大气水汽变化规律具有大空间尺度特征。虽然各站点的 PWV 变化特征一致, 但是各站 PWV 值和变化幅度仍存在一定的差异。例如, 襄樊站和武汉站两个站点 PWV 的差值在 −9.7~6.2 mm 之间, 若以襄樊站 PWV 值为基准, 两站 PWV 值的相对差平均值为 12%, 最大差异可达 37%。与 PWV 较稳定的变化不同, 降水受地理位置、地形、天气系统等因素的影响更为严重, 站点间或同一站点不同年份降水的差异较明显 (图 4b)。同时, 降水的 RMS 最大、最小值相差达到 40%, 站点间相关系数在 0.66~0.90 之间 (图 5), 平均值为 0.81。以上相关系数均通过了 p<0.05 显著性检验。位于江汉平原东部的武汉站与其他四个站点的降水相关性最差, 而地处湖北省中部的荆门站与其他站之间相关性均较高, 这说明降水变化具有较小的空间尺度特征。因此, 联合 GNSS PWV 和降水数据构建的气象干旱指数可一定程度上综合大尺度水汽和局地降水的变化信息。

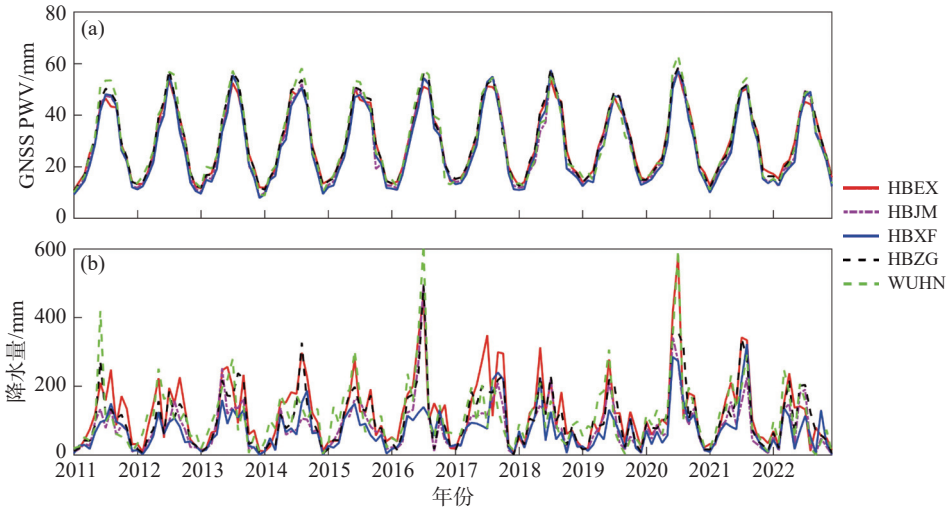


图 4 2011—2022 年恩施 (HBES)、荆门 (HBJM)、襄樊 (HBXF)、秭归 (HBZG) 和武汉 (WUHN) GNSS 站的月平均大气可降水量 (GNSS-PWV) 时间序列 (a) 和降水量时间序列 (b)

Fig. 4 Monthly average PWV time series (a) and precipitation time series (b) of GNSS stations in Enshi (HBES), Jingmen (HBJM), Xiangfan (HBXF), Zigui (HBZG), and Wuhan (WUHN) from 2011 to 2022

表 2 2011—2022 年湖北 5 个 GNSS 站(恩施、荆门、襄樊、秭归和武汉)月平均大气可降水量 (PWV) 和降水的均方根误差 (RMS)

Table 2 Root mean square error (RMS) of monthly average PWV and precipitationat five GNSS stations (HBES, HBJM, HBXF, HBZG and WUHN) in Hubei from 2011 to 2022

GNSS站点	RMS/mm	
	PWV	降水量
恩施	32.7	158.6
荆门	32.0	109.4
襄樊	31.4	95.2
秭归	33.6	138.0
武汉	33.8	150.3

2.2 基于 PE 气象干旱指数的湖北省干旱监测分析

利用 GNSS 水汽和降水数据计算得到 2011—2022 年湖北省 5 个 GNSS 站的逐月 PE 气象干旱指数监测的干旱等级以及平均值, 如图 6 所示, 湖北省干旱过程存在一定的地区差异。对比图 6a—d, 可以发现鄂西地区强度较大 (达重旱或以上等级) 的干旱主要出现在秋冬季, 而处于鄂东的武汉站干旱主要发生在 7 月至 12 月。2011—2022 年, 恩施站发生 6 次重旱或特旱事件, 在鄂西 4 站中发生频次最少, 由图 4b 和表 1 可知这可归因于鄂西南地区丰富的降水资源。图 6c 显示襄樊站有 11 个月份的 PE 小于 −1.29 (至少达到重旱等级), 是所有站中最多的, 表明鄂西北地区是近十几年来发生严重干旱的高频区, 与贺程程等 (2024) 的研究结论基本一致。图 6e 揭示了鄂东地区的武汉站伏秋旱发生次数多, 而且持续时间较长, 这与 SPEI 指数的分析结果一致 (赵林等, 2015)。由图 6f 给出的 5 个站点 PE 气象干旱指数平均值可见, 干旱主要发生在秋冬季, 其中 12 月份干旱频次最高。此外, 自 2018 年以来夏旱、秋旱显著增多, 且多次出现伏秋或伏秋冬连旱。

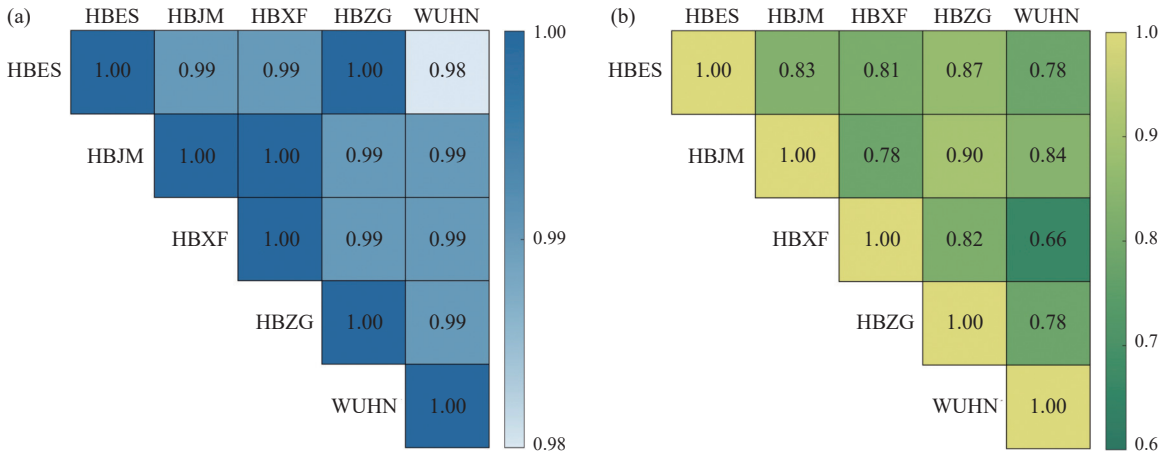


图 5 2011—2022 年恩施 (HBES)、荆门 (HBJM)、襄樊 (HBXF)、秭归 (HBZG) 和武汉 (WUHN) 之间月平均 PWV 的相关系数 (a) 和降水的相关系数 (b)

Fig. 5 Correlation coefficients of monthly average PWV (a) and correlation coefficient of monthly average precipitation (b) between Enshi (HBES), Jingmen (HBJM), Xiangfan (HBXF), Zigui (HBZG) and Wuhan (WUHN) from 2011 to 2022

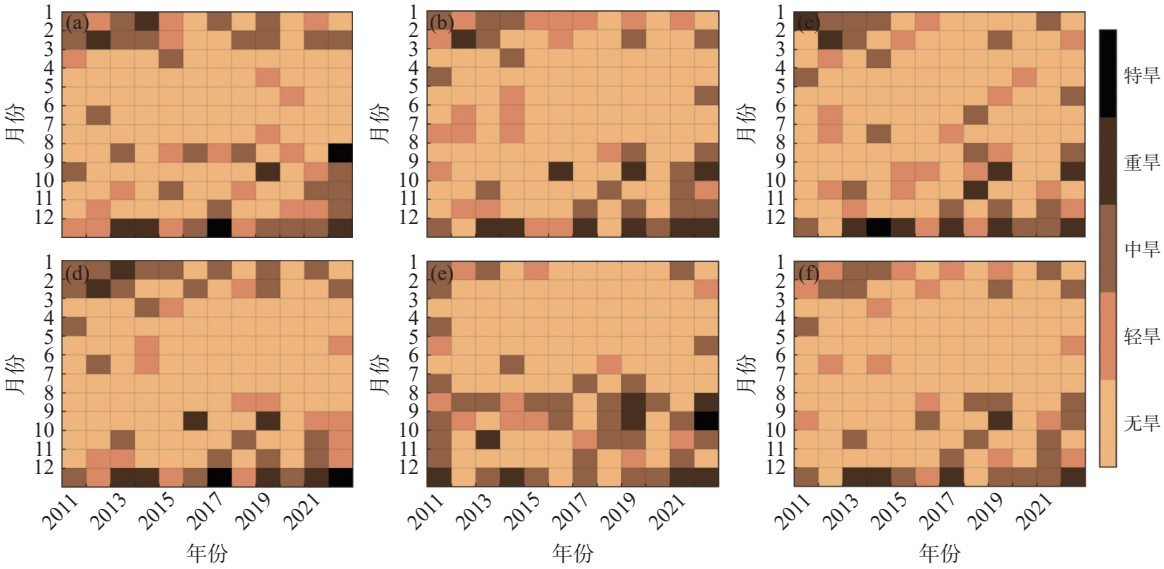


图 6 2011—2022 年恩施 (a)、荆门 (b)、襄樊 (c)、秭归 (d)、武汉 (e) 和五站平均 (f) 逐月 PE 指数热图

Fig. 6 The heat map of the monthly PE index at (a) HBES, (b) HBJM, (c) HBXF, (d) HBZG, (e) WUHN and (f) the mean values of those five stations from 2011 to 2022

由图 6 可知, 利用 PE 气象干旱指数可以成功监测到近 10 年来湖北省发生的严重干旱事件, 如 2011、2012、2013、2014、2017、2019 和 2022 年等年份。其中 2012 年 2 月的干旱, 恩施 (图 6a)、荆门 (图 6b)、襄樊 (图 6c) 和秭归 (图 6d) 四个站点均达到严重干旱等级, 而武汉 (图 6e) 没有出现干旱。荆门 (图 6b)、襄樊 (图 6c) 和秭归 (图 6d) 在 2013—2014 年期间发生了长达 4 个月 (2013 年 10 月—2014 年 1 月) 的干旱, 恩施 (图 6a) 的干旱也持续了 3 个月。2014 年, 湖北省全省范围均在 12 月出现严重或极端干旱。2017 年冬全省范围也发生了持续两个月的干旱事件, 其中恩施 (图 6a) 和秭归 (图 6d) 两个站达到了极端干旱等级, 其他三个站的干旱强度相对较弱。各站 PE 气象干旱指数均揭示了 2011 年冬春连旱以及 2022 年湖北省极端干旱过程。以 2022 年为例, PE 气象干旱指数显示 5 月份多站出现轻微干旱或中度干旱, 8 月份旱情严重升级, 且一直持续到 12 月份, 其中恩施 (图 6a)、武汉 (图 6e) 和秭归 (图 6d) 三个站更是分别在 8 月、9 月和 12 月出现特旱, 结果与武汉区域气候中心的评估结论相符 (范进进等, 2022)。

2.3 PE 与 SPI、MCI、SPEI 比较

图 7 为 5 个站点 PE、SPI、MCI、SPEI 指数的平均时间序列。从图 7 可以看出, PE 与 SPI、MCI、SPEI 具有很好的一致性, 5 个站点平均序列的相关系数分别为 0.81、0.56、0.72(均通过 p<0.05 的显著性检验)。四种干旱指数均能很好地监测研究时间段内

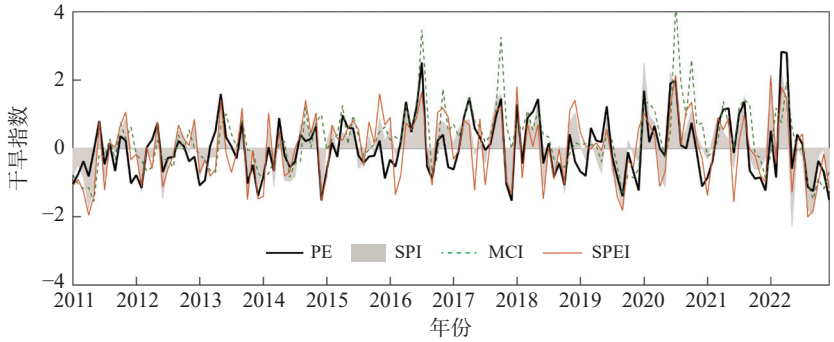


图 7 2011—2022 年恩施、荆门、襄樊、秭归和武汉 GNSS 站五站平均的 PE、SPI、MCI 和 SPEI 的年变化

Fig. 7 Monthly average time series of PE , SPI, MCI and SPEI at the five GNSS stations from 2011 to 2022

发生的干旱, 如 2011 年春、2013 年冬、2019 年冬、2022 年秋冬季的严重干旱事件。

虽然不同指数整体上呈现很好的一致性, 但在反映干旱严重程度等方面仍存在一定的差异。为了更好地揭示这些差异, 图 8 给出了每个 GNSS 站 PE、SPI、MCI、SPEI 指数的时间序列, 图中显示湖北省 5 个 GNSS 站的 PE 指数均低估了 2011 年春的干旱严重程度, 而 MCI 指数则没能探测到 2014 年冬和 2017 年冬的干旱事件。此外, MCI 指数在部分年份和站点呈现出显著高于其他指数的湿润程度, 例如, 2016 年恩施 (图 8a) 和武汉 (图 8e)、2017 年除了武汉的其他 4 个站 (图 8a—d)、2020 年除了荆门的其他 4 站 (图 8a、c、d、e)。这可能与 MCI 计算方案采用全国统一的权重系数有关, 这也是 MCI 在一些区域需要进行参数修订的原因 (秦鹏程等, 2014)。对于 SPEI 指数, 2016 年春季荆门 (图 8b)、襄樊 (图 8c) 和武汉 (图 8e)3 站的干旱强度被高估。而且 SPEI 指数错误地估计了 2017 年夏季荆门 (图 8b)、秭归 (图 8d) 和武汉 (图 8e) 三站以及 2021 年夏季襄樊 (图 8c) 和秭归 (图 8d) 的干旱事件。从图 8 可以看

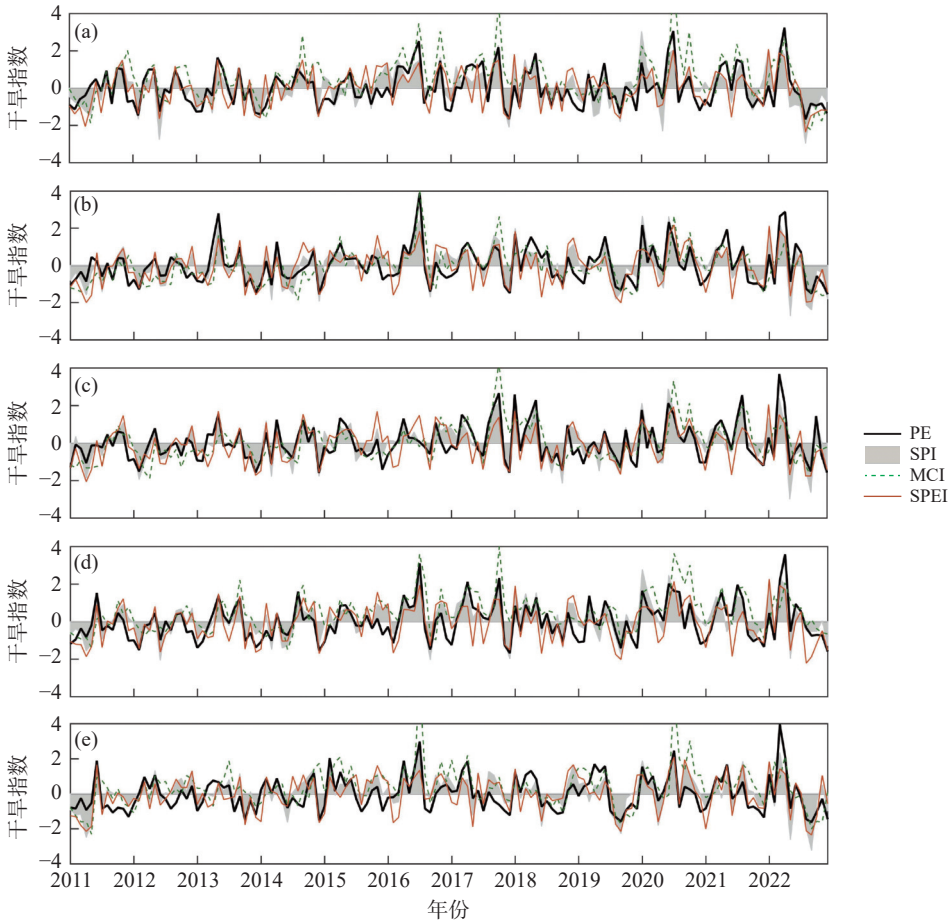


图 8 2011—2022 年湖北恩施 (a)、荆门 (b)、襄樊 (c)、秭归 (d) 和武汉 (e) 的 PE、SPI、MCI 和 SPEI 指数月平均时间序列

Fig. 8 Monthly average time series of PE, SPI, MCI and SPEI index in (a) HBES, (b) HBJM, (c) HBXF, (d) HBZG and (e) WUHN from 2011 to 2022

出, SPI 指数也存在高估干旱强度的情况, 例如 2022 年夏季各站点的 SPI 指数明显小于其它 3 个指数。值得注意的是, 由于考虑了大气水汽的变化, PE 气象干旱指数可以更早地探测到干旱的发生, 如 2012 年和 2013 年春、2021 年冬的偏干状态。

表 3 给出了湖北五个 GNSS 站点 PE 气象干旱指数与其他指数的相关性。可以看出, 由于 PE 和 SPI 主要取决于降水, 所以两者的相关性在 5 个站点均为最大, 相关系数在 0.74~0.85 之间。而 SPEI 不仅反映了降水, 还考虑了潜在蒸散发, 故其与 PE 气象干旱指数的相关性要小于 PE 和 SPI 之间的相关性。PE 与 MCI 之间的相关性最弱, 因为 PE 仅考虑当月的降水和 PWV 的变化情况, 而 MCI 考虑了过去 30 d 相对湿度、近 60—150 d 的降水, 强调干旱的累积效应、近期降水的重要性 (秦鹏程等, 2014)。

表 3 2011—2022 年湖北恩施、荆门、襄樊、秭归和武汉的 PE 与 SPI、MCI、SPEI 的相关系数

Table 3 The correlation coefficients of PE with SPI, MCI, and SPEI in Enshi, Jingmen, Xiangfan, Zigui, and Wuhan, Hubei from 2011 to 2022

站点	相关系数		
	PE与SPI	PE与MCI	PE与SPEI
恩施	0.77	0.63	0.64
荆门	0.83	0.62	0.67
襄樊	0.85	0.58	0.69
秭归	0.82	0.63	0.65
武汉	0.74	0.56	0.62

注: 相关系数均通过0.05显著性水平检验

图 9 给出了不同指数在任意两个 GNSS 站点的相关系数及相应的距离, 以分析各种指数随距离的变化。可以看出, 除 MCI 外的其他 3 个指数均呈现出相关性随距离增加而减弱的趋势 (p<0.001)。SPEI 指数的相关性整体较强, 大部分站点间的相关系数均大于 0.8, 仅相距最远的恩施和武汉两站相关性为 0.77, 其中荆门、襄樊两站的相关系数达 0.98。SPEI 指数的强相关性表明它反映区域干旱特征差异的能力较差, 这可能与数据集较低的格网空间分辨率 (0.5°×0.5°) 有关。利用高分辨率 (0.1°×0.1°) 降水数据集计算的 SPI 指数能较好反映区域干旱的特征差异, 相关系数在 0.58~0.83 之间, 相关性与距离呈现很强的线性关系, 即站点距离越近相关性越强, 反之越弱。MCI 指数能更好地反映局地干旱特征, 最大相关系数 (0.82) 并未出现在最近的两个站点, 最小相关系数 (0.52) 也并非出现在距离最远的两个站点。但是, MCI 指数的相关性随站点间距增加而减弱的趋

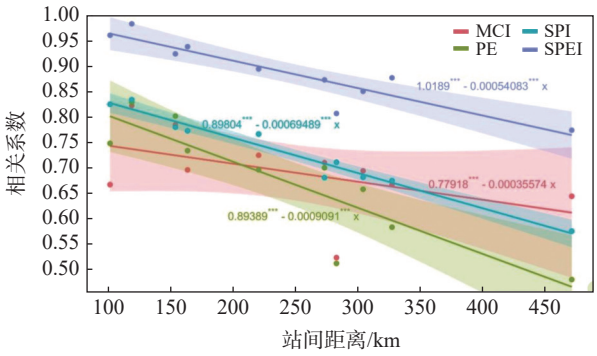


图 9 不同干旱指数 MCI、PE、SPI、SPEI 在任意两个 GNSS 站点之间的相关性随站间距离的变化

Fig. 9 The correlation coefficients of different indices varying with the distance between two arbitrary GNSS stations: MCI (red line), PE (green line), SPI (blue line), SPEI (purple line)

势不明显, 未通过 p<0.05 显著性检验。PE 气象干旱指数相关性的平均值在所有指数中最小 (0.67), 相关性随距离衰减的程度也最大, 表明 PE 具有 SPI 和 MCI 的综合特性, 既能反映大尺度干旱特征, 也能反映局地干旱的特征差异。

为了检验 PE 气象干旱指数的逐日滚动监测效果, 以湖北省 2022 年伏秋干旱为例做进一步对比分析。图 10 给出了 2022 年 7—9 月 5 个 GNSS 站点逐日 PE(利用过去 30 日平均的日降水量和 PWV 计算) 与 MCI 日监测干旱程度值热图。虽然 5 个站点 PE 和 MCI 表现出很强的相关性, 相关系数在 0.93~0.97 之间 (通过了 0.05 显著性水平统计检验), 二者均监测到 2022 年 7 月份干旱的发生以及 8 月份干旱程度的快速增加。其中, PE 和 MCI 监测结果均显示, 恩施站发生了持续的极端干旱, 秭归站受该干旱事件的影响最小。然而, 二者监测干旱发展过程也

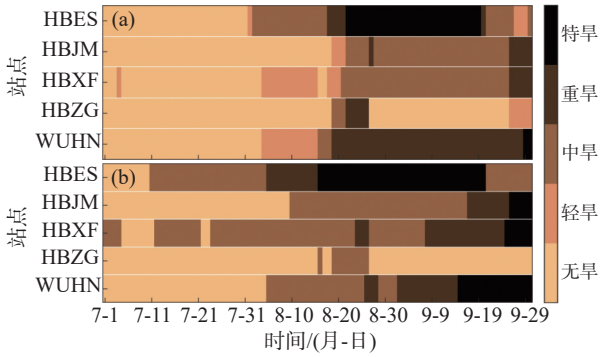


图 10 2022 年 7—9 月湖北恩施 (HBES)、荆门 (HBJM)、襄樊 (HBXF)、秭归 (HBZG) 和武汉 (WUHN)5 个 GNSS 站点逐日 PE 指数 (a) 与 MCI 指数 (b) 热图

Fig. 10 The heat map of daily (a) PE and (b) MCI for the five GNSS stations in Enshi (HBES), Jingmen (HBJM), Xiangfan (HBXF), Zigui (HBZG), and Wuhan (WUHN) in Hubei province from July to September 2022

存在一定的差异。其中, MCI 由于考虑了前期降水等因素的贡献, 其探测干旱发生的时间更早。同时, MCI 还反映了干旱的累积效应, 其监测的干旱严重程度比 PE 更强。与 MCI 日监测值对比分析表明, PE 气象干旱指数具有良好的日监测效果, 但在探测干旱发生时间和干旱累积效应方面存在一定的不足。

3 结论与讨论

本文利用湖北省陆态网 5 个 GNSS 台站的 PWV 和中国逐日降水数据集构建了降水效率 (PE) 气象干旱指数, 利用 PE 指数分析了 2011—2022 年湖北省的干旱时空演变特征, 并用标准化降水指数 (SPI)、气象干旱综合监测指数 (MCI) 和标准化降水蒸散发指数 (SPEI) 验证其有效性。得出以下主要结论:

(1) 湖北省大气水汽变化具有较好的空间一致性, 而降水则具有较强的局地变化特征, 5 个 GNSS 站点间 PWV 的相关系数均大于 0.98, 降水量相关系数在 0.66~0.90 之间。

(2) 利用 5 个 GNSS 站的 PE 气象干旱指数可以有效监测干旱, PE 与 SPI、MCI、SPEI 等指数具有显著相关。四种干旱指数在区域和单站干旱事件监测中既表现出一致性, 也表现出明显差异。

(3) 干旱指数相关性随空间间距变化的分析表明, PE 气象干旱指数具有一定的优势, 同时具备反映大范围和局地干旱特征的能力。5 个站的 PE 指数显示过去 12 年湖北东部和西部地区的气象干旱具有一定差异, 其中, 襄樊站是近十几年来发生严重干旱的高频区, 而武汉站伏秋旱发生次数多且持续时间较长。通过分析湖北省 2022 年 7—9 月伏旱逐日发展过程, 表明 PE 气象干旱指数具有良好的逐日滚动监测效果。

本文证实了融合 GNSS PWV 和降水数据构建气象干旱指数的有效性和优势, 可为干旱监测提供新的方法。随着我国北斗卫星定位系统的建成和地面站点的增加, GNSS 将能提供实时高时空分辨率、高精度 GNSS 的 PWV 数据, 为气象干旱监测业务应用提供新的参考依据。鉴于本文构建的 PE 气象干旱指数与 SPI、SPEI 指数存在较好的一致性, 同时也表现出一定的差异性, 结合 GNSS 数据和传统气象观测将能进一步提升气象干旱监测的水平。需要指出的是, 目前的 PE 气象干旱指数没有考虑前期降水和蒸散发等因素的影响, 在体现干旱灾害的缓变过程方面存在一定不足, 因此, 如何综合这些因素改进 PE 气象干旱指数是值得进一步探讨的课题。

参考文献 (References):

陈家宁,孙怀卫,王建鹏,等.2020.综合气象干旱指数改进及其适用性分析[J].农业工程学报,36(16):71−77. Chen J N, Sun H W, Wang J P, et al. 2020. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,36(16):71−77 (in Chinese). doi:10.11975/j.issn.1002−6819.2020.16.009

陈思,钟无双,Muhammad W,等.2021.基于修正复合干旱指数的干旱综合监测及其在湖北省的应用[J].长江流域资源与环境,30(11):2726−2735. Chen S, Zhong W S, Muhammad W, et al. 2021. A modified composite drought index for comprehensive drought monitoring and its applications in Hubei province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,30(11):2726−2735 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj.202111015

范进进,秦鹏程,史瑞琴,等.2022.气候变化背景下湖北省高温干旱复合灾害变化特征[J].干旱气象,40(5):780−790. Fan J J, Qin P C, Shi R Q, et al. 2022. Characteristics of compound hot and drought disasters in Hubei under the background of climate change [J]. Journal of Arid Meteorology,40(5):780−790 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−05−0780

贺程程,秦鹏程,刘诗慧,等.2024.近 62 a 湖北省旱涝特征分析[J].暴雨灾害,43(1):93−100. He C C, Qin P C, Liu S H, et al. 2024. Analysis of drought and flood characteristics in Hubei Province in recent 62 years [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):93−100 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−201

李国平,黄丁发.2004. GPS 遥感区域大气水汽总量研究的回顾与展望[J].气象科技,32(4):201−205. Li G P, Huang D F. 2004. Reviews and prospects of researched on remote sensing of regional atmospheric water vapor using ground-based GPS [J]. Meteorological Science and Technology,32(4):201−205 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2004.04.001

刘可群,李仁东,刘志雄,等.2012.基于 CI 指数的湖北干旱及其变化特征分析[J].长江流域资源与环境,21(10):1274−1280. Liu K Q, Li R D, Liu Z X, et al. 2012. Characteristics and variations of drought in Hubei based on comprehensive meteorological drought index [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,21(10):1274−1280 (in Chinese)

缪驰远,韩静雅,苟娇娇.2023.中国逐日降水数据集 (1961-2022,0.1°/0.25°/0.5°)[DB]. 国家青藏高原数据中心. Miao C Y, Han J Y, Gou J J. 2023. A new daily gridded precipitation dataset for the Chinese mainland based on gauge observations [DB]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center (in Chinese). doi:10.11888/Atmos.tpdc.300523

秦大河.2009.气候变化与干旱[J].科技导报,27(11):3. Qing D H. 2009. Climate change and drought [J]. Science and technology review, 27(11):3 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−7857.2009.11.001

秦鹏程,刘敏,万素琴,等.2014.气象干旱综合监测指数在湖北的本地化应用及其适用性分析[J].气象科技,42(2):341−347. Qin P C, Liu M, Wan S Q, et al. 2014. Modification and applicability evaluation of comprehensive monitoring index of meteorological drought in Hubei province [J]. Meteorological Science and Technology,42(2):341−347 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−6345.2014.02.028

邵末兰,向纯怡.2009.湖北省主要气象灾害分类及其特征分析[J].暴雨

灾害,28(2):179−185. Shao M L, Xiang C Y. 2009. Analysis and classification of meteorological disasters in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,28(2):179−185 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2009.02.015

王海燕,温泉沛,王珊珊,等.2019. 2014 年 6-7 月湖北地区干旱特征及其异常环流分析[J].沙漠与绿洲气象,13(6):82−87. Wang H Y, Wen Q P, Wang S S, et al. 2019. Drought characteristics and abnormal circulation in Hubei province from June to July in 2014 [J]. Desert and Oasis Meteorology,13(6):82−87 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2019.06.010

姚朝龙,罗志才,胡月明,等.2019.利用 GPS 垂向位移监测西南地区干旱事件[J].测绘学报,48(5):547−554. Yao C L, Luo Z C, Hu Y M, et al. 2019. Detecting droughts in Southwest China from GPS vertical position displacements [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 48(5):547−554 (in Chinese). doi:10.11947/j.AGCS.2019.20180308

赵林,于家烁,薄岩,等.2015.基于 SPEI 的湖北省近 52 年干旱时空格局变化[J].长江流域资源与环境,24(7):1230−1237. Zhao L, Yu J S, Bo Y, et al. 2015. Temporal and spatial distribution of drought in Hubei province during 1961-2012 based on SPEI [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,24(7):1230−1237 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj201507021

朱丹彤. 2022. 中国区域多源水汽融合算法及其气候应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学. Zhu D T. 2022. Study on Multi-source precipitable water vaper fusion method and its climatic applications in China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology (in Chinese)

Bevis M, Businger S, Herring T, et al. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System [J]. Journal of Geophysical Research,97(D14):15787−15801. doi:10.1029/92JD01517

Bordi I, Raziei T, Pereira L, et al. 2015. Ground-based GPS measurements of precipitable water vapor and their usefulness for hydrological applications [J]. Water Resources Management,29:471−486. doi:10.1007/s11269−014−0672−5

Schiettekatte R L, Selmira G M, Clara D L M. 2023. Use of GNSS and ERA5 precipitable water vapor based standardized precipitation conversion index for drought monitoring in the Mediterranean coast: a first case study in Southern Spain [J]. Advances in Space Research, 72(9):3946−3959. doi:10.1016/j.asr.2023.08.030

Shi H, Zhang R, Nie Z, et al. 2017. Inversion precipitable water vapor by GPS observation of CMONOC [J]. Journal of Civil Engineering and Architecture,11(6):595−607. doi:10.17265/1934−7359/2017.06.006

Tuller S. 1971. The world distribution of annual precipitation efficiency [J]. Journal of Geography,70(4):219−223. doi:10.1080/00221347108981623

Yang F, Gong X, Li Z, et al. 2024. Spatiotemporal distribution and impact factors of GNSS-PWV in China based on climate region [J]. Advances in Space Research,73(8):4187−4201. doi:10.1016/j.asr.2024.01.022

Zhao Q, Ma X, Yao W, et al. 2019a. Improved drought monitoring index using GNSS-derived precipitable water vapor over the Loess Plateau Area [J]. Sensors,19(24):5566. doi:10.3390/s19245566

Zhao Q, Ma X, Yao W, et al. 2020. A drought monitoring method based on precipitable water vapor and precipitation [J]. Journal of Climate, 33(24):10727−10741. doi:10.1175/JCLI−D−19−0971.1

Zhao Q, Yao Y, Yao W, et al. 2019b. GNSS-derived PWV and comparison with radiosonde and ECMWF ERA-Interim data over mainland China [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,182:85−92. doi:10.1016/j.jastp.2018.11.004

Zhu H, Chen K, Chai H, et al. 2024. Characterizing extreme drought and wetness in Guangdong, China using global navigation satellite system and precipitation data [J]. Satellite Navigation,5(1):1−17. doi:10.1186/s43020−023−00121−6

(责任编辑　闵爱荣)