

长江流域三维干旱事件演变特征

白文川

湖南师范大学地理科学学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年1月4日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年2月22日

摘要

气候变化背景下, 全球干旱事件频发, 严重制约社会经济可持续发展。以往研究大都忽略了干旱的动态过程, 本文将干旱事件三维识别方法应用于长江流域气象干旱事件的识别和提取。基于1980~2016年标准降水蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)用干旱的面积、历时、强度、烈度和中心5个特征变量对长江流域干旱事件进行分析。结果表明, SPEI3识别出97个历时3个月及以上的干旱事件。最严重的SPEI3型干旱(2011年1~10月)始于流域中部, 止于横断山脉, 席卷了长江流域一半以上的地区, 受干旱影响最严重的地区是云南北部、四川南部、湖北东南部。该研究有助于研究长江流域干旱事件发展演变进程。

关键词

干旱, 三维时空特征, 长江流域

Evolution Characteristics of Three-Dimensional Drought Events in the Yangtze River Basin

Wenchuan Bai

School of Geography, Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: Jan. 4th, 2024; accepted: Jan. 17^h, 2024; published: Feb. 22nd, 2024

Abstract

Against the backdrop of climate change, frequent global drought events seriously constrain sustainable socio-economic development. Previous studies have mostly overlooked the dynamic process of drought. In this paper, the three-dimensional identification method of drought events is applied to the identification and extraction of meteorological drought events in the Yangtze River Basin.

文章引用: 白文川. 长江流域三维干旱事件演变特征[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(1): 87-93.

DOI: 10.12677/aep.2024.141013

Based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) from 1980 to 2016, this study analyzes drought events in the Yangtze River Basin using five characteristic variables: area, duration, strength, intensity, and center of drought. The results showed that SPEI3 identified 97 drought events lasting for 3 months or more. The most severe SPEI3 drought (January-October 2011) began in the central part of the basin and ended in the Hengduan Mountains, sweeping over more than half of the Yangtze River basin. The areas most severely affected by the drought were northern Yunnan, southern Sichuan, and southeastern Hubei. This study contributes to the study of the development and evolution process of drought events in the Yangtze River Basin.

Keywords

Drought, Three-Dimensional Spatiotemporal Characteristics, Yangtze River Basin

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱是指长期无雨或少雨,使土壤水分不足、作物水分平衡遭到破坏而减产的农业气象灾害。其原因,是因为蒸发量和降水量的收支不平衡,而造成某时段水分支出大于水分收入的现象[1],具有发生频率高、影响面广、危害大等特征[2]。IPCC (2019)第六次报告表明干旱在全球变暖的影响下将会加剧[3]。因此,更好地了解干旱特征,明晰区域发生发展演变规律对于监测和预测干旱并最终为适应干旱灾害提供可靠的策略至关重要。然而,要想分析干旱的演变规律,最为关键的就是需要对干旱事件进行科学识别[4]。在具体思路,不仅要充分考虑其在时间上的连续性[5],同时也需观察其在空间上的三维动态变化特性,从而针对干旱事件构建出一个系统、全面的时空结构[6]。

据此,张家团(2008)对近30年来我国干旱灾害的特点和演变规律进行分析,并对减轻干旱灾害影响提出了相关建议[7]。韩冬梅(2015)围绕海河流域的干旱时空演变特征进行分析,得出流域内除大于600 mm年降水的面积显著减少外,其他等级年降水量面积均增加。全流域年SPI值呈下降趋势,干旱面积呈增加趋势。并基于当前研究成果对未来气候变化造成的降水、干旱做了预估分析[8]。刘晔(2020)以黄河流域为例,基于1970~2014年的气候数据,采用修正的帕默尔干旱指数方法,分析了农业干旱的时空演变规律。得出自进入21世纪以来,黄河流域的农业干旱恢复时间平均为136个月,其中42.68%的栅格的干旱恢复时间小于4个月,而57.32%的栅格的干旱恢复时间则超过4个月,并据此为开展旱涝保收工作提供了相关改进建议[9]。此外,也有不少研究方向围绕干旱事件的二维时空展开,而忽视了其三维特性,如应用游程理论从时间维度识别干旱特征[10];应用小波分析[11]、经验正交分解[12]等研究。因此,本文将围绕三维空间视角识别提取干旱事件,并对其动态规律进行分析是区域干旱研究的重要方向。

2. 数据与研究区

2.1. 研究区域

长江流域自西向东横贯中国中部,总面积达180万 km^2 ,地下垫面因素复杂,加之东亚季风、西风带、西太平洋副热带高压等环流系统影响,因此产生了昆明准静止锋、西南涡、江南梅雨和伏旱等复杂多样的天气系统和天气现象,呈现出全年气温和降水时空分布特征的复杂性。

2.2. 数据来源及研究方法

2.2.1. 数据来源

本文选取长江流域 1979~2016 年逐日气象资料(降水、气温、风速、湿度、大气压等数据)用于计算干旱指数。数据来源于中国科学院青藏高原研究所全球数据同化与建模中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/data/7a35329c-c53f-4267-aa07-e0037d913a21>)。

2.2.2. 干旱指数的计算

本研究采用月尺度降水和气温的标准化降水蒸散指数(SPEI)，由于 3 个月的季节尺度是研究季节性干旱传播广泛使用的时间尺度，因此本文采用 3 个月周期的 SPEI 进行计算。考虑到本文的研究周期较短，本文选择 Farahmand 等人提出的非参数框架即标准化干旱分析工具箱(SDAT)来计算 SPEI [13]。其中，潜在蒸散发采用国际粮农组织推荐的 Penman-Monteith 方法[12]计算得到。研究采用的干旱程度根据国家气象局制定的《气象干旱等级》标准划分[14]。SPEI 在-1 以下表明发生干旱。具体流程如下：

首先，是计算逐月降水与蒸散的差值

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

其中， D_i 代表降水与蒸散量的差值， P_i 代表月降水量， PET_i 代表月蒸散量。

然后，通过对式 1 进行正态化，由此得到概率分布的累积函数：

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-y} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (2)$$

其中， α 、 x 、 y 具体计算方法如下：

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (4)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \quad (5)$$

其中， Γ 代表阶乘函数，基于以上原始序列 D_i 的概率加权，最终得到 SPEI 在-1 以下发生干旱的计算结果：

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3} \quad (6)$$

2.2.3. 干旱事件三维识别方法

本文应用了干旱事件的三维识别方法[14]，以经度、纬度和时间为观测指标，由此构建时空结构，其矩阵记为 $X(Lon, Lat, t)$ ，该矩阵的尺寸为 $n_{lon} \times n_{lat} \times n_t$ ， n 为各个方向的网格数量。步骤如下：

1) 识别干旱斑块

首先对每个月的干旱斑块进行识别并用不同编号标记，将和 X 尺寸相符的干旱编号矩阵设为 L ，未被识别设为 0。

2) 判断干旱斑块之间的时间连续性

Wang [14]等人检查了干旱识别结果对阈值面积的敏感性，发现全国尺度的干旱研究最小面积以 15 万 km^2 为宜。因此，本文研究中设置阈值为 2.5 万 km^2 。

如图 1 所示, 图 1(a)为干旱斑块在二维空间中的示意图, 图 1(b)为干旱斑块三维空间中的识别示意图。在每个时刻 t 都有一个干旱斑块 A_t (图中的灰色斑块), 其在二维平面上的投影间重叠面积为 A_{overlap} 。比较 A_{overlap} 与设定的阈值 A_0 , 若 $A_{\text{overlap}} > A_0$, 则认为两个相邻斑块属于一场干旱, 反之则认为不是同一场干旱。分别对比 t 与 $t-1$ 相邻时刻任意斑块, 以确定所有三维干旱事件。

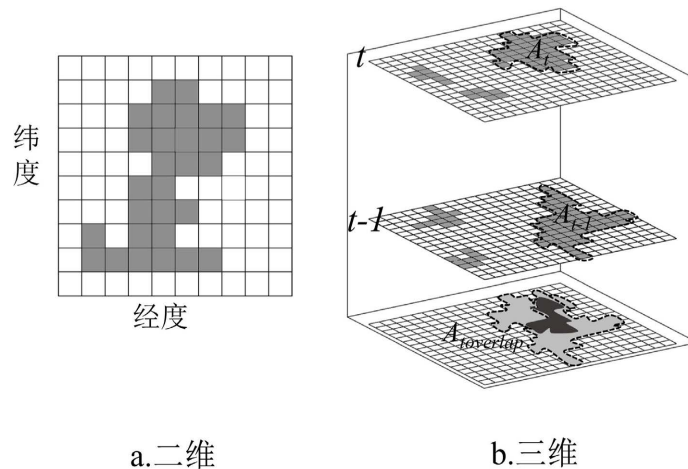


Figure 1. Schematic diagram of three-dimensional drought identification
图 1. 三维干旱识别示意图

3) 识别并提取三维干旱事件

在三维干旱指标空间中, 聚集相互连通的干旱指标要素成一个干旱集合, 即三维干旱事件。从 $t = 2$ 重复步骤 2 直到 $t = n_t$ 结束, 最终所有时空连通的干旱斑块都被赋予相同且唯一的编号, 不同的编号代表不同的三维干旱事件。

2.2.4. 干旱事件的特征变量

选取干旱历时、干旱影响面积、干旱烈度、干旱强度和干旱中心作为本研究的特征指标。同时, 本文采用 Matlab 中 regionprops 提取干旱中心。

3. 结果

3.1. 干旱事件的识别

根据上文中三维干旱识别方法进行识别, 基于 1980~2016 年长江流域 SPEI3 (以下简称 SPEI3 干旱), 长江流域发生 557 次干旱事件, 其中持续 3 个月以上的干旱事件有 97 场。

3.2. SPEI 变化趋势

图 2 展示了长江流域 1980~2016 年 SPEI 变化趋势。从空间上看, 1980~2016 年长江上下游地区 SPEI 值呈现上升趋势, 说明在这部分地区的干旱程度相对较小。中部大部分地区 SPEI 呈下降趋势, 表明这些地区以干旱化趋势为主: 其中四川盆地和云南省部分区域高强度的干旱涉及面积较大。

从图中可以看出, 长江流域年际 SPEI 呈波动趋势, 上升与下降趋势交替出现。为了进一步对更长尺度的时间变化特征进行分析, 做 7 年滑动平均分析。长江流域的 7 年滑动 SPEI 值在 1980 到 1990 年为负值且呈平稳波动趋势, 1990~2005 年先增加至正值而后稳定变化之后下降至负值, 2005~2016 年干旱程度削减。

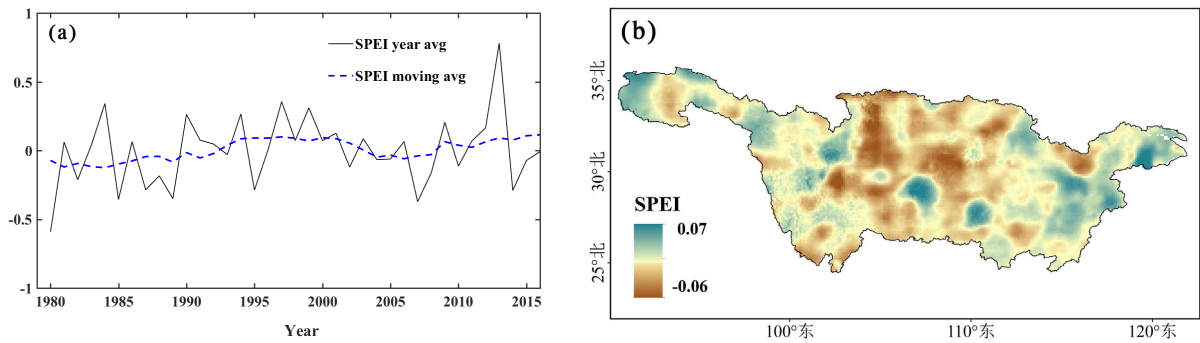


Figure 2. Trend of SPEI changes
图 2. SPEI 变化趋势

3.3. 典型干旱事件分析

总体来说,识别出的干旱事件与官方报告记载和相关文献一致性较高[15],如图3所示,干旱事件的时间和影响范围与记载的相符合[16],表明该方法可以有效识别长江流域干旱事件。按干旱烈度排序,长江流域过去37年中最严重的干旱事件(2011.1~2011.11),历时长达10个月,覆盖面积为 $11.54 \times 10^5 \text{ km}^2$,是37年来覆盖面积最大的干旱事件,达流域面积的70%。

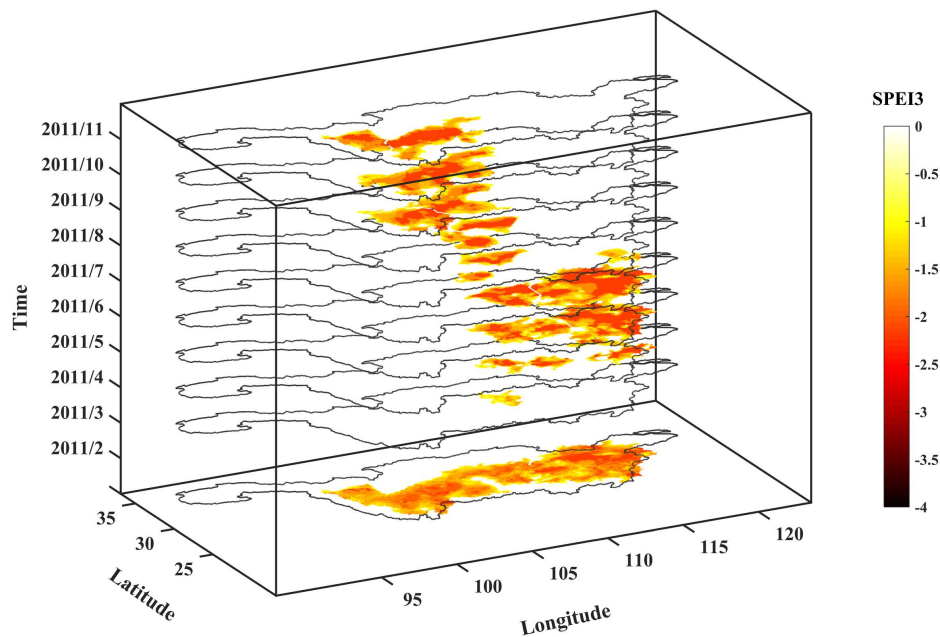


Figure 3. Three dimensional slice of typical drought events
图 3. 典型干旱事件三维切片

为了直观地呈现干旱事件和相应的内部结构,图3显示了该干旱事件的三维空间切片图。将以上相关信息投影于二维平面后,对所有空间网格的SPEI值相加(见图4),形成干旱的迁移路径。图3的切片图和图4干旱平面迁移路径图显示,该干旱事件于2011年1月从湖南中部开始,之后向东南方向移动,在浙江省西部徘徊3个月向西延伸,5月蔓延到整个中下游,此时干旱最严重,覆盖面积也最大,6月干旱强度有所减弱,并逐渐向西南地区移动,干旱面积先增大后减小,最后于2011年11月消失于云贵高原。

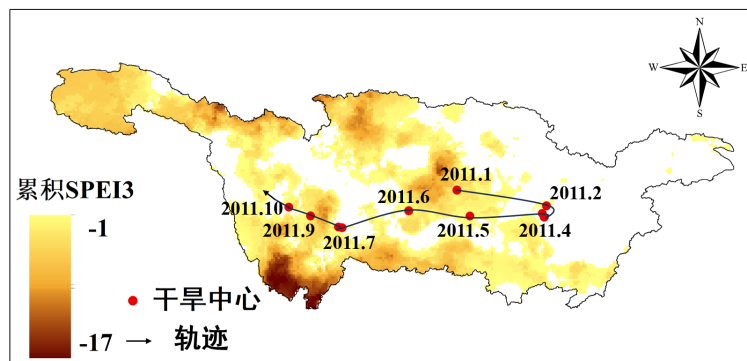


Figure 4. Development process of typical drought events

图 4. 典型干旱事件发展过程

此次干旱具有强度高、持续时间长、范围广等问题，在这场干旱中，流域中部及上游地区都受到干旱影响，总体呈现“西南部增多、东北部减少”，其中受旱灾影响最严重的地区位于云南北部与四川南部(图中颜色最深的区域)。从图 4 也可以看出，长江流域干旱中心点迁移路径整体上向西南迁移，可能与区域降水和水汽输送等因素有关[17]。

4. 结论

- (1) 三维干旱识别方法能有效捕捉长江流域干旱事件的时空结构，对分析干旱时空特征具有重要意义。
- (2) 1980~2016 年，SPEI3 识别出 97 个历时 3 个月及以上的干旱事件。最严重的 SPEI3 型干旱(2011 年 1~10 月)始于流域中部，止于横断山脉，面积约为 $11.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。受干旱影响最严重的地区是云南北部、四川南部、湖北东南部。

参考文献

- [1] Gu, Z., Qi, Z.M., Ma, L.W., et al. (2017) Development of an Irrigation Scheduling Software Based on Model Predicted Crop Water Stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, **143**, 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.023>
- [2] Chen, L., Singh, V.P., Guo, S., et al. (2012) Drought Analysis Using Copulas. *Journal of Hydrologic Engineering*, **18**, 797-808. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000697](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000697)
- [3] Tsakiris, G. (2017) Drought Risk Assessment and Management. *Water Resources Management*, **31**, 3083-3095. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1698-2>
- [4] Guo, H., Bao, A.M., Ndayisaba, F., et al. (2018) Space-Time Characterization of Drought Events and Their Impacts on Vegetation in Central Asia. *Journal of Hydrology*, **564**, 1165-1178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.081>
- [5] Lloyd-Hughes, B. (2012) A Spatio-Temporal Structure-Based Approach to Drought Characterisation. *International Journal of Climatology*, **32**, 406-418. <https://doi.org/10.1002/joc.2280>
- [6] Yevjevich, V.M. (1967) An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts. Colorado State University, Fort Collins.
- [7] 张家团, 屈艳萍. 近 30 年来中国干旱灾害演变规律及抗旱减灾对策探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2008, 18(5): 47-52.
- [8] 韩冬梅. 海河流域干旱事件演变规律及发展趋势预估[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- [9] 刘晔, 薛万来. 黄河流域农业干旱时空演变规律及其自然恢复期特征[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 213-221.
- [10] Kim, S., Kim, B., Ahn, T.J., et al. (2011) Spatio-Temporal Characterization of Korean Drought Using Severity-Area Duration Curve Analysis. *Water and Environment Journal*, **25**, 22-30. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00184.x>
- [11] 方国华, 涂玉虹, 闻昕, 等. 1961-2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 598-611.

-
- [12] 裴琳, 严中伟, 杨辉. 400 多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系[J]. 科学通报, 2015, 60(1): 97-108.
- [13] Farahmand, A. and Agha Kouchak, A. (2015) A Generalized Framework for Deriving Nonparametric Standardized Drought Indicators. *Advances in Water Resources*, **76**, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.012>
- [14] Vicenteserrano, S.M. and Beguerias, L.R. (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, **23**, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- [15] 徐翔宇, 许凯, 杨大文, 等. 多变量干旱事件识别与频率计算方法[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 373-381.
- [16] 段海霞, 王素萍, 冯建英. 2011 年全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2012, 30(1): 136-147.
- [17] 曹博, 张勃, 马彬, 等. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 280-289.