

章程焱,包玲玲,叶亦舟等.基于三维识别的温州市气象干旱事件演变特征分析[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

# 基于三维识别的温州市气象干旱事件演变特征分析

章程焱<sup>1</sup>,包玲玲<sup>1</sup>,叶亦舟<sup>1</sup>,喻丹<sup>2,3\*</sup>

(1.温州市温瑞平水水系管理中心,浙江温州 325000;2.三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443000;3.三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北宜昌 443000)

**摘要:**为克服以往仅从时间或空间维度分析干旱演变特征的局限性,更好地识别出气象干旱事件发展演变过程,基于标准化降雨指数,运用结合时空特征的三维干旱识别方法,揭示温州市气象干旱事件时空动态演变规律。结果表明:温州市1961—2019年共发生131场气象干旱事件,其中以夏秋两季高发为特征,夏季占比27.53%、秋季26.96%。时间上气象干旱历时、面积和烈度整体呈波动下降趋势,空间上干旱中心多集中于距海较远区域,永嘉、瓯海等地长历时高强度干旱尤为突出,干旱事件分布特征与地形及海陆位置密切相关;通过选取典型干旱事件分析,本文研究结果与温州历史文献中关于干旱事件的记载高度一致,充分验证了基于标准化降雨指数的三维干旱识别方法在区域气象干旱研究中的可靠性,为区域干旱监测预警提供了新方法,研究成果可为温州市干旱风险防控提供科学依据。

**关键词:**SPI指数;三维识别;干旱演变;干旱中心;温州市

**中图分类号:**TV11 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-13

气象干旱作为4种干旱类型<sup>[1]</sup>中最早出现的干旱类型,且是其他类型干旱的主要诱因<sup>[2]</sup>,对其进行高精度监测,系统分析其特征与演变规律,对于提前发布干旱预警、制定抗旱预案具有关键的科学价值。在以往对干旱的研究中,重点聚焦于时间或空间上的单独演变规律<sup>[3-7]</sup>,但干旱发展作为一个渐变过程,应具有明确的时空连续性,其发生、发展与消失过程在时空两个维度上应是协同演进<sup>[8]</sup>。随着深入研究,探究干旱在时空维度下的三维动态演变特征成为新的研究热点<sup>[9]</sup>。邓翠玲等<sup>[10]</sup>为系统分析长江流域气象干旱事件,通过图像三维联通性识别方法,基于长江流域1960—2015年的相关数据开展研究,识别并提取了流域内281场气象干旱事件,并具体分析了其发展演变规律;冯凯等<sup>[11]</sup>利用改进三维

识别方法,对西北地区干旱事件进行分类并分析其时空演变模式;吕潇雨等<sup>[12]</sup>采用三维聚类算法,从时空联动的角度对中国近40年的干旱事件进行了识别,进而追踪并解析了其动态演变过程。

据预测,未来浙江省气候将呈现出干旱年占优势的阶段性特征<sup>[13]</sup>。在此背景下,深入开展干旱研究,能为区域抗旱工作的精准部署和有效实施提供科学依据与决策支持,具有重要的现实意义。近年来,已有学者针对浙江省气象干旱开展了相关研究,在内容上多集中于干旱指标的构建、时空变化趋势分析以及成因机理探讨等方面<sup>[14-16]</sup>。这些成果一定程度上推动区域干旱研究。但现有研究多依赖于站点数据或二维平面分析,从三维视角对气象干旱事件进行系统性识别与解析还不够深入。为

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52109058)

**收稿日期:**2025-12-24 **修回日期:**2026-01-27

**作者简介:**章程焱(1998—),男,硕士研究生,主要负责河网调度与水利工程运行管理的工作。

**通信作者:**喻丹(1988—),女,博士,副教授,研究方向为流域水文模拟及变化环境下水文响应方面的研究工作。

**联系作者:**致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

弥补这一研究缺口,精准揭示气象干旱的三维动态特征,本文选取温州市作为研究区域。该市为浙江东南沿海重要经济农业区,分布温瑞灌区等中型灌区,依赖珊溪水库等大型水源工程,气象干旱对其水资源配置、农业灌溉及工程调度影响显著。因此,厘清气象干旱三维时空演变规律,对优化区域水资源管理、提升抗旱调度能力至关重要。此外,温州地形复杂、海陆作用显著,降水时空异质性强<sup>[17]</sup>,本研究的研究结果也可为揭示沿海丘陵区干旱三维动态提供适宜的研究场景。

基于此,本研究采用三维识别方法,识别温州市1961—2019年气象干旱事件;选取典型干旱事件,探究其三维空间结构与发展路径,直观展示空间分布形态,系统解析时空协同演变规律。通过研究结果,旨在明晰区域干旱形成与演变规律,为研判旱情动态、预测发展趋势提供理论支撑,也为温州市制定精准高效的旱灾风险防控与应对策略提供科学依据。

## 1 研究区域与数据

温州市地理位置见图1,地处浙江省东南沿海,属亚热带季风气候,具有温暖湿润、四季分明的特征,地形自东南向西北倾斜,以山地地貌为主导,西北部为山地丘陵,中部为人工河渠发达的滨海平原,东部则是河道密布、岸线曲折的平原岛屿,温州市内降水丰富但分配不均,时间上年际变化显著,最丰与最枯年降水量之比可达2:1<sup>[17]</sup>。

本研究所用降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>),收集了温州市内与周边相邻地区的22个气象站点1961—2019年逐日降水数据,采用累加法将逐日数据计算为逐月数据。为提升降水数据空间插值的准确性,通过反距离加权(IDW)插值方法获取1 km分辨率的栅格数据。其中,IDW插值过程所引入的高程数据源自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的SRTM DEM产品,其原始空间分辨率为90 m。为保证高程数据与降水数据分辨率一致,利用双线性内插算法对DEM进行重采样,最终获得1 km空

间分辨率的高程数据集。

## 2 研究方法

### 2.1 标准化降水指数SPI

本研究选用标准化降水指数SPI进行干旱识别,该指标的优势为时间尺度灵活、时空可比性强,可消除降水数据在时空上的差异,被广泛用于监测地区干旱严重程度<sup>[18]</sup>。计算方法为将一段时间内的降水量累加,再通过 $\Gamma$ 分布概率密度,将累计概率进行正态标准化,最终得到该指数<sup>[19]</sup>。具体计算方法如下。

a)假设某一时间尺度下降水量为 $x$ ,通过 $\Gamma$ 分布概率密度式得到伽马分布降水概率密度。

$$f(x) = \int_0^x \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 均为参数, $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ ,采用极大似然法对参数进行估算。

b)计算一定时间内的降水量 $x$ 的累积概率。

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (2)$$

c)对各项的累积概率 $F(x)$ 进行正态标准化,得到相应的SPI。

当 $0 < F(x) \leq 0.5$ 时,令 $k = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{F(x)^2} \right]}$ ,则

$$SPI = - \left( k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (3)$$

当 $0.5 < F(x) \leq 1$ 时,令 $k = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{1 - F(x)^2} \right]}$ ,则

$$SPI = \left( k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (4)$$

式中: $c_0 = 2.515517$ ;  $c_1 = 0.802853$ ;  $c_2 = 0.010328$ ;  $d_1 = 1.432788$ ;  $d_2 = 0.189269$ ;  $d_3 = 0.001308$ 。

不同时间尺度下的标准化降水指数对干旱事件识别的敏感性存在不同<sup>[20]</sup>,短时间尺度下干旱指数对降雨敏感性过强,其数值变化过快,在一定程度上,不能准确的进行干旱监测,而长时间尺度的干旱指数波动又过于缓慢<sup>[21]</sup>,本研究选用被广泛用于干旱监测的3个月尺度的标准化降水指数(即

SPI3)用于干旱识别<sup>[22-24]</sup>。干旱等级划分参考国家气象干旱等级划分标准<sup>[25]</sup>,具体干旱事件分类如表1所示。由于在实际生活中,社会对于旱较为严重的事件更为关注,因此本研究干旱阈值选为-1。

## 2.2 时空三维视角干旱事件识别

### 2.2.1 干旱斑块识别

基于二维干旱识别方法,逐月提取研究区域内的独立干旱斑块。具体步骤为:首先,将干旱指数

低于预设阈值的相邻栅格合并为同一干旱斑块,并为每个斑块赋予独立编号;随后,设定干旱面积阈值A,若某斑块的面积小于A,则判定其不构成一次独立的干旱事件,并在后续分析中予以剔除<sup>[26]</sup>。如图2,斑块A<sub>3</sub>与A<sub>5</sub>即因此被剔除。相关研究<sup>[27-30]</sup>表明干旱面积阈值A应约为研究区域面积的1.6%,本文中干旱面积阈值为193.6 km<sup>2</sup>,约为194个栅格。

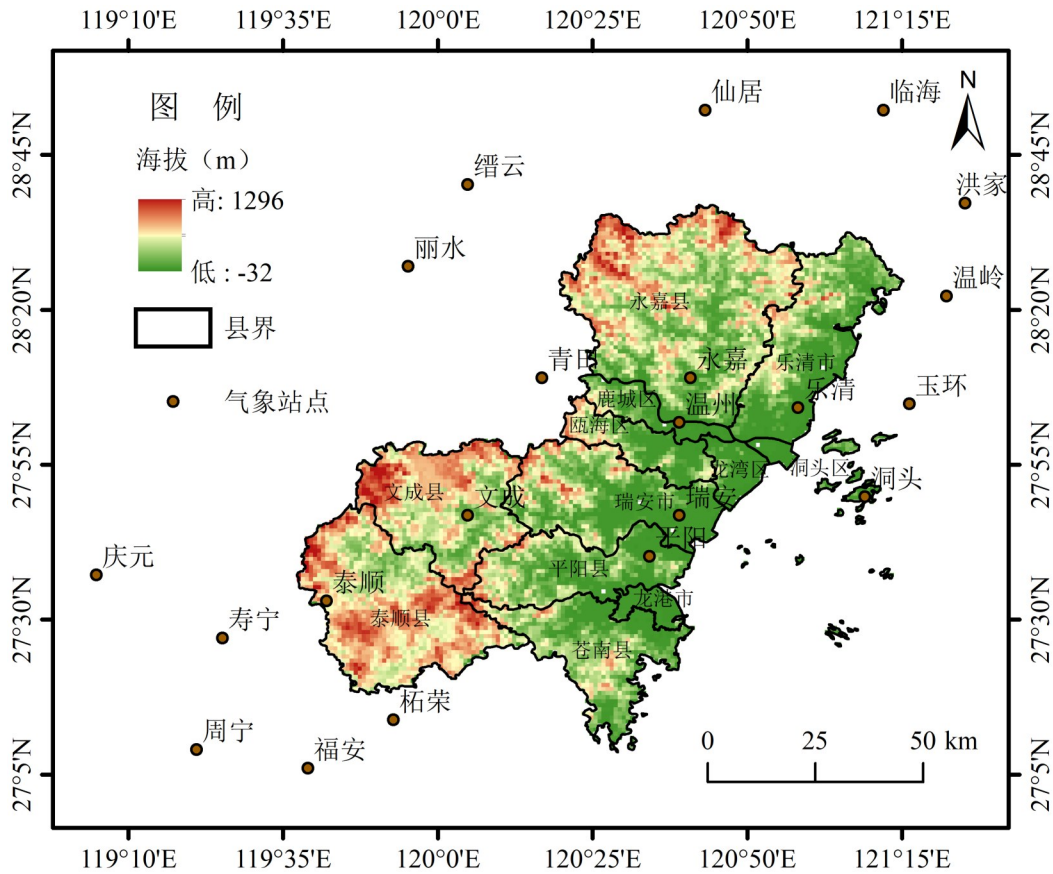


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview map of the study area

表1 SPI值干旱等级划分标准

Tab. 1 SPI value drought level classification standard

等级	无旱	轻旱	中旱	中旱	极端干旱
SPI值	(-0.5,+∞)	(-1.0,-0.5]	(-1.5,-1.0]	(-2.0,-1.5]	(-∞,-2.0]

### 2.2.2 干旱斑块时程连接

在逐月干旱斑块识别的基础上,需进一步判别相邻月份干旱斑块间的时空连续性,并将符合关联

条件的斑块归并为同一场干旱事件。具体而言,对于相邻时刻( $t$ 与 $t+1$ )的干旱斑块( $A_t$ 与 $A_{t+1}$ ),若其空间重合面积 $A_c$ 大于2.2.1节中设定的干旱面积阈值A,则认为二者属于同一场干旱事件<sup>[31]</sup>。例如图3中的 $A_3$ 与 $A_4$ ;反之则判定为不同事件,如图3中的 $A_1$ 与 $A_2$ 。依据该规则逐月计算相邻斑块的重合面积,直至重合面积低于阈值A,则标记该场干旱事件结束。

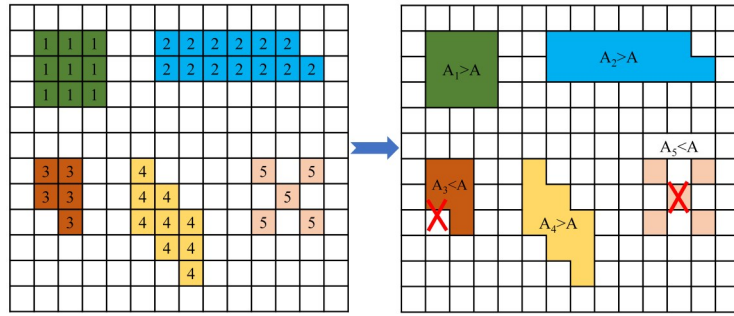


图2 干旱斑块识别示意

Fig. 2 Schematic diagram of drought patch identification

为构建具有连续性的干旱事件时空轨迹,需迭代执行前述判别与合并流程。通过该流程,不同空间位置(经纬度)的干旱斑块得以在时间序列上相互连接,从而整合为连续的时空聚合体。最终,由此获得一系列具有三维结构的气象干旱事件集合<sup>[27]</sup>。

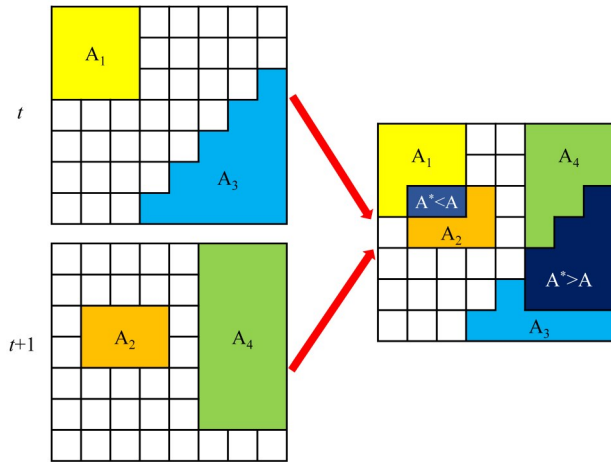


图3 干旱斑块时程连接示意

Fig. 3 Schematic diagram of time history connectivity of drought patches

### 2.3 干旱特征变量计算

三维干旱识别方法虽较传统二维方法更为复杂,但其优势在于能更全面地表征干旱的时空连续演变。因此,为充分描绘此演变性,本研究选用干旱历时、面积、烈度和中心等作为核心特征参数。各干旱特征计算原理<sup>[31]</sup>如下。

a) 干旱历时(D,月):某一干旱事件的持续时间对应于其三维空间形态在垂直方向上的延伸尺度,

具体表现为该立体结构的时间轴跨度,见图4中标识D。

b) 干旱面积(A, km<sup>2</sup>):将三维干旱空间结构体沿垂直方向正交投影至二维平面,所获投影范围的大小即定义为该干旱事件的覆盖面积。

c) 干旱烈度(S, km<sup>2</sup>·月):干旱事件的干旱程度,在本研究采用的三维识别方法来看,即是三维干旱空间结构体的体积。

d) 干旱中心(C):三维干旱空间结构体的中心,如图4中的(Clon、Clat、C)所示,表征了单场干旱事件在三维时空中的综合位置。此外,连续干旱事件中的单次干旱过程也存在干旱中心,将每个时刻的干旱中心连接,即可表示单场干旱事件的迁移规律。单次干旱过程的中心计算公式如下:

$$X_{am} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i x_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

$$Y_{am} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i y_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (6)$$

单场干旱事件的中心计算公式如下:

$$X_a = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^t S_{im} x_{im}}{\sum_{i=1}^n S_{im}} \quad (7)$$

$$Y_a = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^t S_{im} y_{im}}{\sum_{i=1}^n S_{im}} \quad (8)$$

$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^t S_{im}}{\sum_{i=1}^n S_{im}} \quad (9)$$

式中:  $S_i$  是第  $m$  个月第  $i$  个栅格的干旱值;  $x_i$  是第  $m$  个月第  $i$  个栅格的经度;  $y_i$  是第  $m$  个月第  $i$  个栅格的纬度。

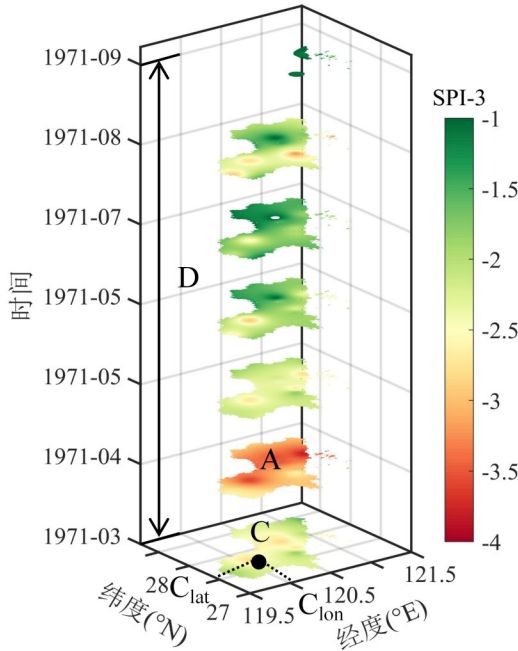


图4 三维干旱特征相关变量示意

Fig. 4 Schematic diagram of three-dimensional drought characteristics and related variables

### 3 结果分析

#### 3.1 温州气象干旱事件识别结果

基于 SPI3 的三维识别算法,共提取了温州市 1961—2019 年内共计 131 场气象干旱事件,为使研究具有代表性,选取了 10 场最严重气象干旱事件特征(表 2),并定量描述了各项特征,包括起止时间、历时、影响面积、烈度以及干旱中心的经纬度与时间。

对温州市 1961—2019 年的气象干旱历时、干旱烈度、干旱面积的变化趋势进行分析,整体变化趋势见图 5。根据相关学者的研究,浙江省春季降雨在 1995 年前后发生了突变<sup>[32]</sup>,且在 1995 年浙江省

的暴雨年代际特征发生变化,在 1995 年之前存在明显的短主周期,1995 年之后暴雨为较弱的长副周期<sup>[33]</sup>,综合考虑,本文将 1995 年作为研究干旱的分界点。由图 5 可知,在 1965—1995 年这段时间内,干旱历时、干旱强度与干旱面积虽有波动,但整体呈显著下降趋势,干旱历时在 1965 年出现峰值,干旱烈度分别在 1965 和 1975 年出现峰值,干旱面积在 1970 年出现峰值;在 1995—2005 年间,干旱特征呈现先增后减态势,这与前人<sup>[34]</sup>的研究基本一致;2005 年后,干旱历时和烈度变化较为平稳,干旱面积波动较大,表明易出现面积广但烈度小、历时短的气象干旱事件。整体而言,温州市 1961—2019 年各干旱特征指标呈波动下降趋势,但不同年代演变规律不同。

#### 3.2 温州气象干旱事件变化特征

通过上部分得到的温州市近 60a 内的 131 场气象干旱事件三维识别结果,提取各干旱事件的结构体,进一步计算其时空特征变量,参照气象学标准,划分 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、11—次年 2 月为冬季,若干旱事件发生事件横跨多个季节,横跨的季节均被认定为发生了 1 次干旱事件,统计得到温州市近 60 a 内气象干旱的月份和季节分布特征,具体结果如图 6 所示。在发生月份分布上,气象干旱在 10 月份发生的频率最高,达到 18 次,占比 13.7%,其次是 7 月份,发生了 17 次,占比 13.0%,3 和 4 月份发生频率最低为 12 次,占比 9.2%。在发生季节分布上,夏季干旱发生占比最大,达到 27.53%,其次是秋季发生干旱,占比 26.96%,春冬两季气象干旱发生频次相对较低,其中春季发生频次最低,占比 21.91%。整体而言,夏秋两季为温州市最容易发生气象干旱的两个季节,这与前人的研究结果较为吻合<sup>[35]</sup>。

图 7 显示了温州市 1961—2019 年 131 场气象干旱事件中心的空间分布情况,以圆形标记的尺寸表征干旱烈度,以标记的色彩区分干旱历时长短。由图 7 可知,干旱中心主要集中在距海较远的区域,其中长历时、强烈度的气象干旱事件主要集中在永嘉、瓯海、瑞安以及平阳等地。整体来看,气象干旱

表 2 温州市 1961—2019 年 10 场最严重气象干旱事件特征

Tab. 2 Characteristics of the 10 Most Severe Meteorological Drought Events in Wenzhou City from 1961 to 2019

序号	干旱时间(年-月)	干旱历时 (月)	干旱面积( $10^4$ $\text{km}^2$ )	干旱烈度 ( $10^4\text{km}\cdot\text{月}$ )	干旱中心		
					经度(E)	纬度(N)	时间(年-月)
1	1971-03 至 1971-09	7	1.21	14.85	120.43	27.91	1971-06
2	1980-08 至 1981-02	7	1.21	7.69	120.52	27.99	1980-12
3	1979-06 至 1980-02	9	0.87	6.10	120.69	28.15	1979-10
4	1963-01 至 1963-06	6	0.64	5.93	120.14	27.63	1963-03
5	1964-04 至 1964-09	6	1.21	5.11	120.43	27.85	1964-06
6	1963-01 至 1963-06	6	0.57	4.86	120.73	28.21	1963-03
7	2011-03 至 2011-07	5	0.57	4.34	120.73	28.23	2011-05
8	1967-08 至 1967-11	4	0.63	4.32	120.16	27.63	1967-09
9	2008-10 至 2009-02	5	1.19	4.19	120.50	27.95	2009-01
10	1967-07 至 1967-11	5	0.57	4.08	120.72	28.21	1967-09

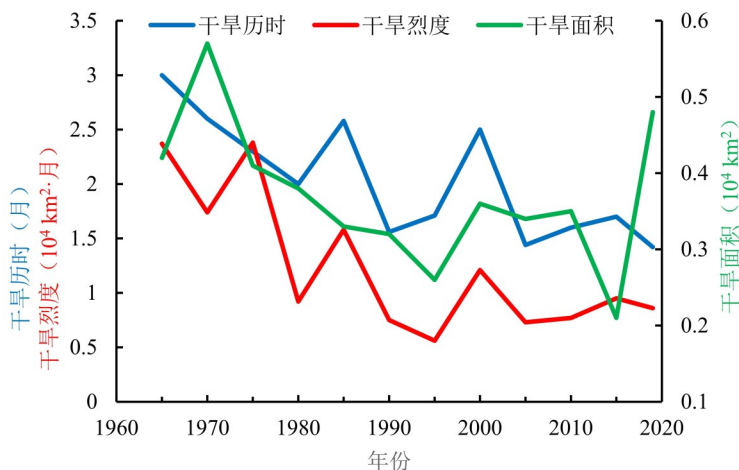


图 5 温州市 1961—2019 年气象干旱相关特征变量年代际变化

Fig. 5 Interdecadal variation of meteorological drought-related characteristic variables in Wenzhou City from 1961 to 2019

事件的分布与地形及距海远近密切相关,山区和平原地区的干旱特征存在显著差异。

### 3.3 典型三维干旱事件分析

为分析典型气象干旱事件的时空演变特征,本研究在最严重的 10 场典型气象干旱事件中,选取干旱历时最长(序号 3)、干旱面积最大(序号 2 和 6)、干旱烈度最大(序号 1)作为典型干旱事件进行分析,对典型干旱事件的三维结构与特征变量的时间趋势进行展示,结果分别如图 8 和图 9 所示,由图 9 可知,在温州市各典型气象干旱事件中,干旱烈度

与干旱面积逐月变化趋势基本一致。进一步分析各典型干旱事件的三维结构变化,由图 8 展示了研究时段内最严重的气象干旱事件,本场干旱事件在干旱强度和干旱面积上都较大,发展方向为从温州西南部出发,逐步发展至北部,最终在东北部消失,全市都在影响范围内,且在干旱事件持续时间内影响面积基本没有变化,只在干旱事件结束时,覆盖面积下降。此次干旱事件覆盖了温州全市,历时 7 个月,干旱烈度在 4 月达到峰值,之后逐渐下降。整体来看,本次干旱事件的覆盖面积与持续时间基本

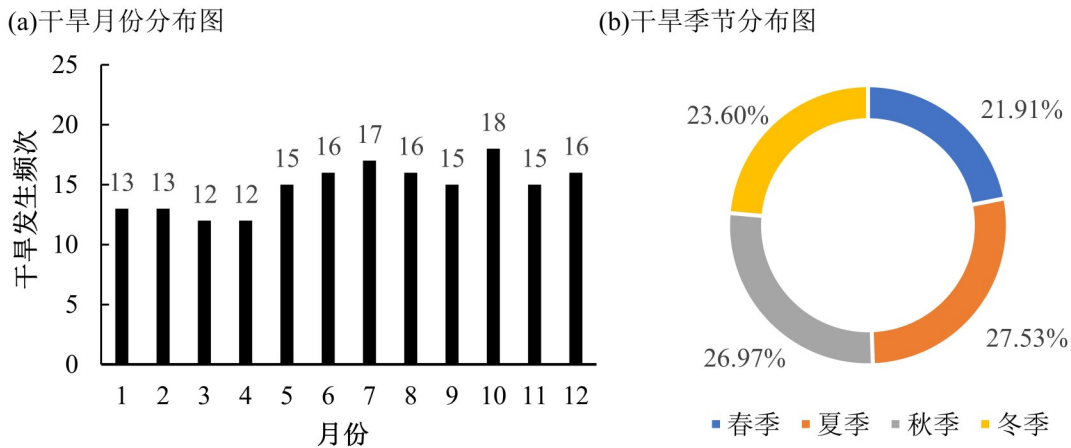


图 6 温州市 1961—2019 年气象干旱季节性变化特征

Fig. 6 Seasonal variation characteristics of meteorological drought in Wenzhou City from 1961 to 2019

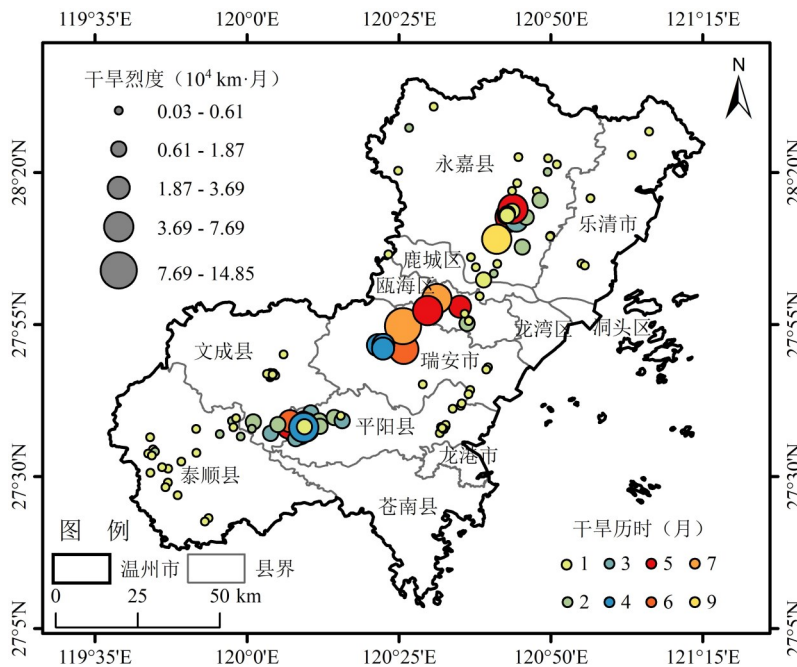


图 7 温州市 1961—2019 年气象干旱中心空间分布

Fig. 7 Spatial distribution map of meteorological drought centers in Wenzhou City from 1961 to 2019

与温州历史记载的情况基本相符<sup>[36]</sup>。图 8c 展示了 1961—2019 年近 60 a 来发生的历时最长的气象干旱事件, 本场干旱事件共历时 9 个月。在本次气象干旱事件中, 干旱面积及干旱烈度呈现“增-减-增”的趋势, 1979 年 12 月干旱面积与烈度达到最大, 主要影响区域为瑞安、文成、平阳等县。在温州历史旱灾记录表中<sup>[36]</sup>, 1979 年温州秋冬大旱, 瑞安、文成、平阳、永嘉四县出现严重旱灾, 其描述的干旱事

件持续时间与范围与本研究得出的结论基本一致。图 8a 与图 8d 的干旱面积为典型干旱事件中影响面积最大的典型事件, 两者不同的地方在于图 8a 中的干旱事件覆盖面积由大到小, 并在干旱事件结束时面积达到最小, 并且从干旱烈度整体成波动变化, 而图 8d 中的干旱事件的覆盖面积由小到大, 在 1980 年 12 月达到峰值并持续到干旱事件结束, 此外干旱烈度也呈波动上升。总的来看, 以上对温州典型干

旱事件的三维结果研究与温州历史文献<sup>[36]</sup>记载的相关结果基本符合,干旱事件的持续时间与影响范围这两个关键特征,与历史记载的一致性得到了较

高度的验证,进一步验证了本研究利用三维识别的温州市气象干旱演变结果的可靠性。

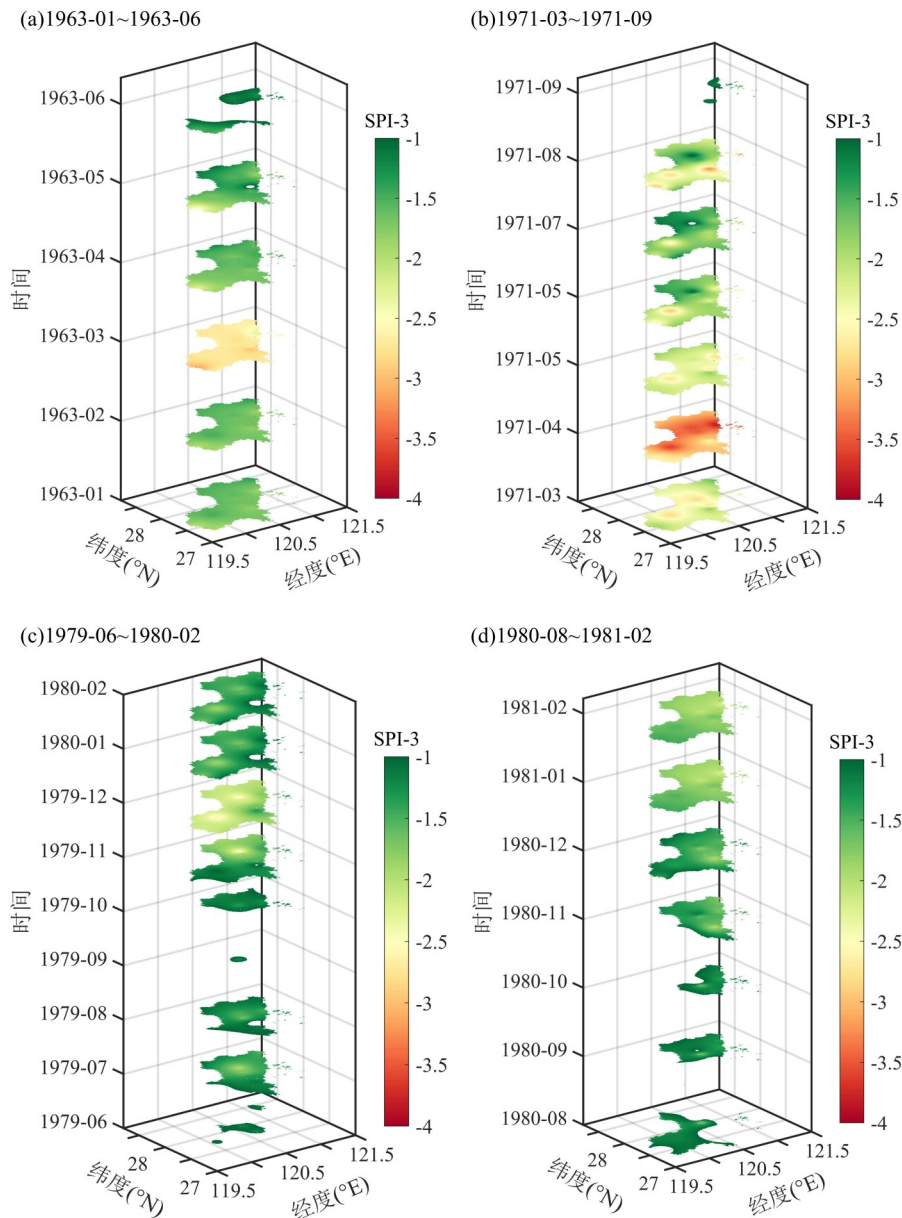


图8 温州市典型气象干旱事件三维结构

Fig. 8 Three-dimensional structure diagram of typical meteorological drought events in Wenzhou

为更好地展示典型干旱事件的发展过程、逐月空间影响范围等特征,选取气象干旱事件(1980年8月至1981年2月)作为代表,其时空演变过程结果见图10,图中以点表示各月干旱事件的中心位置,以连接点的箭头示意其逐月迁移路径,二者共同展

示了干旱事件从发生到消亡的完整时空过程。由图10可知,本场干旱始于温州西部,中心位于永嘉县。9月干旱主要影响北部,烈度减弱、中心北移;10—11月向东蔓延、强度递增,中心南移;12月基本覆盖全市,中心向西南迁移;次年1—2月干旱面积

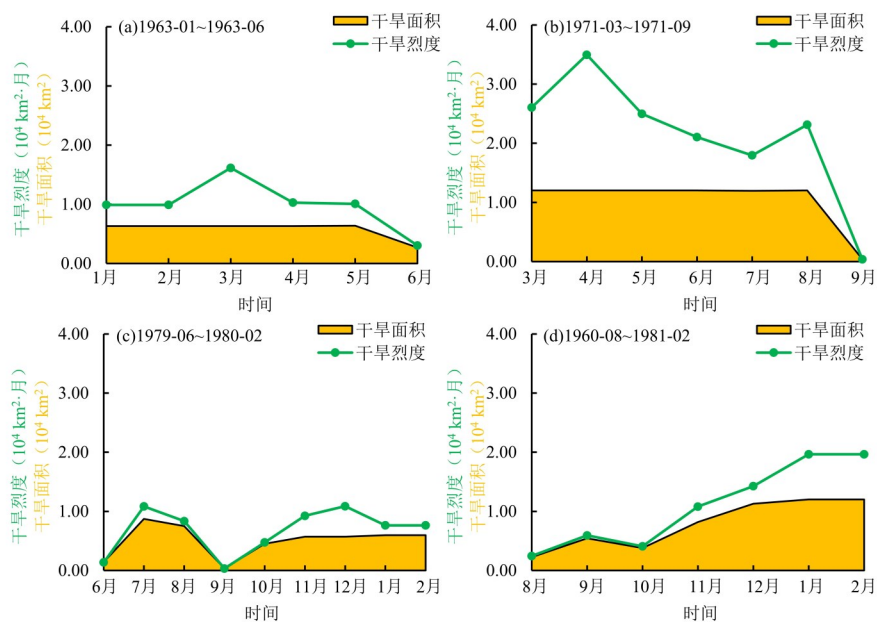


图 9 温州市典型气象干旱事件特征的时间变化

Fig. 9 Temporal variation diagram of typical meteorological drought events in Wenzhou

与烈度达峰值,覆盖全市。此次干旱事件在3月份干旱骤消,主要原因在于3月份温州市及周边普降大雨,各气象站点降雨量相较于2月份平均增长了约90 mm,而SPI指数唯一受降雨影响,3月骤增,干旱随之解除。综合来看,此次干旱事件发生于1980

年8月至1981年2月,持续时间为7个月。干旱过程先后经历了形成、减弱、增强和峰值4个阶段,干旱中心的迁移轨迹在内陆中部地区呈现环状分布。

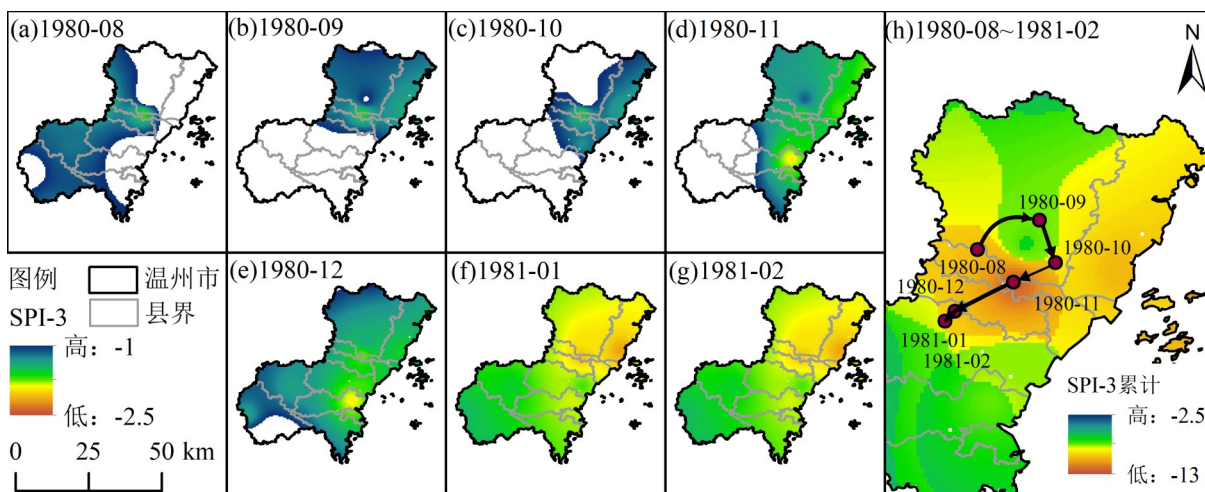


图 10 1980 年 8 月至 1981 年 12 月气象干旱时空动态演变过程及其逐月迁移路径

Fig. 10 The spatiotemporal dynamic evolution of meteorological drought from August 1980 to December 1981 and its monthly migration path

#### 4 结论

本研究基于SPI3指数与三维识别方法系统识

别了1961—2019年温州市气象干旱事件,并从时空维度揭示其演变特征,主要结论如下。

a)温州市1961—2019年共识别出131场气象干旱事件,干旱历时、面积及烈度时间上整体呈波动下降趋势。1995年前,干旱事件历时较长,干旱特征均呈显著下降趋势,1995—2005年期间,干旱特征呈现先增后减趋势,2005年后干旱历时和烈度变化较为平稳,干旱面积波动较大,更易发生面积广但烈度低历时短的气象干旱事件。

b)干旱事件发生时间上呈明显季节差异,夏、秋两季为高发季节,其中夏季占比27.53%,秋季26.96%。空间分布上,干旱中心多分布于距海较远的内陆区域,与地形分布特征一致,永嘉、瓯海等地强烈度与长历时干旱集中出现,干旱风险较高。

c)通过典型干旱事件对比分析,不同干旱事件在演变路径和结构特征上存在显著差异,长历时或大范围干旱均与地方历史记录吻合,验证了三维识别方法在监测干旱过程中的可靠性。总体而言,该方法能直观呈现干旱事件的动态演化,对提升区域气象干旱监测与风险识别能力具有重要参考价值。

#### 参考文献:

- [1] DIKSHIT A, PRADHAN B, HUETE A. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 283:11979.
- [2] VROCHIDOU A E K, TSANIS I K, GRILLAKIS M G, et al. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476:290-301.
- [3] 顾杨畅,赵文吉,吴舒祺. 1980—2020年黄河流域气象干旱时空变化特征[J]. *中国农业气象*, 2025, 46(8):1192-1205.
- GU Y Y, ZHAO W J, WU S Q. Spatiotemporal variation characteristics of meteorological drought in the Yellow River Basin from 1980 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Agricultural Meteorology*, 2025, 46(8): 1192-1205. (in Chinese)
- [4] 杨辉辉,冯德程,彭莹,等. 近60年雷州半岛气象干旱变化特征及驱动因素分析[J]. *人民珠江*, 2024, 45(11):108-114.
- YANG H H, FENG D C, PENG Y, et al. Analysis of the characteristics and driving factors of meteorological drought in Leizhou Peninsula in the past 60 years [J]. *People's Pearl River*, 2024, 45(11):108-114. (in Chinese)
- [5] 谷桂华,李红明,火寿华. 抚仙湖流域1964—2021年气象干旱演变特征分析[J]. *人民珠江*, 2023, 44(S1):27-32.
- GU G H, LI H M, HUO S H, et al. Analysis of the evolution characteristics of meteorological drought in the Fuxian Lake Basin from 1964 to 2021 [J]. *People's Pearl River*, 2023, 44(S1):27-32. (in Chinese)
- [6] 姚宁,蒋昆昊,谢文馨,等. 气候变化背景下山西省气象干旱时空演变特征[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(1):270-281.
- YAO N, JIANG K H, XIE W X, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of meteorological drought in Shanxi Province under the background of climate change [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(1):270-281. (in Chinese)
- [7] 李梦婷,李春光. 1961—2020年黄土高原地区气象干旱时空演变特征研究[J]. *人民珠江*, 2023, 44(11):1-10.
- LI M T, LI C G. Study on the spatiotemporal evolution characteristics of meteorological drought in the Loess Plateau region from 1961 to 2020 [J]. *People's Pearl River*, 2023, 44(11):1-10. (in Chinese)
- [8] 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.
- FANG G H, TU Y H, WEN X, et al. Study on the development process and evolution characteristics of meteorological drought in the Huaihe River Basin from 1961 to 2015 [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5):598-611. (in Chinese)
- [9] WENX, TUYH, TANQF, et al. Construction of 3D droughts structures of meteorological drought events and their spatio-temporal evolution characteristics[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590(6):125539.
- [10] 邓翠玲,余敦先,张利平,等. 基于图像三维连通性识别方法的长江流域干旱事件特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11):131-139.
- DENG C L, SHE D X, ZHANG L P, et al. Characteristics of drought events in the Yangtze River Basin based on image three-dimensional connectivity recognition method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11):131-139. (in Chinese)
- [11] 冯凯,李彦彬,王飞,等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1):63-72.
- FENG K, LI Y B, WANG F, et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional recognition method [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1):63-72. (in Chinese)
- [12] 吕潇雨,郭浩,孟翔晨,等. 基于三维识别的中国干旱事件演变特征分析[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(06):849-862.
- LYU X Y, GUO H, MENG X C, et al. Analysis of the evolution

- characteristics of drought events in China based on three-dimensional recognition [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(06):849-862. (in Chinese)
- [13] 冯利华,陈雄. 浙江干旱的变化趋势[J]. *农业系统科学与综合研究*,2001,(03):177-179.  
FENG L H, CHEN X. The changing trend of drought in Zhejiang Province [J]. *Agricultural Systems Science and Comprehensive Research*, 2001, (03): 177-179. (in Chinese)
- [14] 曹永强,苏阳,张兰霞,等. 基于AWTP指数的浙江省干旱规律时空分析[J]. *自然资源学报*,2012,27(07):1233-1240.  
CAO Y Q, SU Y, ZHANG L X, et al. Spatiotemporal analysis of drought patterns in Zhejiang Province based on AWTP index [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27 (07) : 1233-1240. (in Chinese)
- [15] 金新芽,邵学强,劳国民. 浙江省历史旱情评估及成因分析[J]. *水文*,2012,32(06):75-79.  
JIN X Y, SHAO X Q, LAO G M. Assessment and analysis of historical drought conditions in Zhejiang Province [J]. *Hydrology*, 2012, 32(06):75-79. (in Chinese)
- [16] 丁伯良,张兰霞,王淑英,等. 近50年来浙江省干旱规律时空分析[J]. *水力发电*,2011,37(09):25-28.  
DING B L, ZHANG L X, WANG S Y, et al. Spatiotemporal analysis of drought patterns in Zhejiang Province over the past 50 years [J]. *Hydropower*, 2011, 37(09):25-28. (in Chinese)
- [17] 毕可心,董增川,李大勇,等. 温州市不同海拔极端降水时空演变[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2025,53(01):31-40+130.  
BI K X, DONG Z G, LI D Y, et al. Spatiotemporal evolution of extreme precipitation at different altitudes in Wenzhou City [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2025, 53 (01):31-40+130. (in Chinese)
- [18] 王辉,李明志,龚柔艳,等. 基于标准化降水指数(SPI)的洞庭湖区多时空尺度气象干旱特征解析[J]. *节水灌溉*,2025(5):104-111.  
WANG H, LI M Z, GONG R Y, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in Dongting Lake area at multiple temporal and spatial scales based on standardized precipitation index (SPI) [J]. *Water Saving Irrigation*, 2025(5): 104-111. (in Chinese)
- [19] SEILER R A, HAYES M, BRESSAN L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring [J]. *International journal of climatology*,2002,22(11):1365-1376
- [20] 刘丛伟,胡珊珊,张涛,等. 基于SPI指数的白洋淀流域干旱演变特征分析[J]. *水土保持研究*,2022,29(6):254-259,267.  
LIU C W, HU S S, ZHANG T, et al. Analysis of drought evolution characteristics in Baiyangdian watershed based on SPI index [J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2022, 29 (6):254-259,267. (in Chinese)
- [21] 王飞,王宗敏,杨海波,等. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格局研究[J]. *中国科学:地球科学*,2018,48(9):1169-1183.  
Wang Fei, Wang Zongmin, Yang Haibo, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48 (9) : 1169-1183. (in Chinese)
- [22] 张璇,许杨,郝芳华,等. 滦河流域气象干旱向水文干旱传播特征及风险分析[J]. *水利学报*,2022,53(2):165-175.  
ZHANG X, XU Y, HAO F H, et al. Characteristics and risk analysis of meteorological drought propagation to hydrological drought in the Luanhe River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(2):165-175. (in Chinese)
- [23] 武晶. 闽江流域特大洪涝干旱风险识别[J]. *人民珠江*,2024,45(4):115-123.  
WU J. Risk Identification of Extreme Flood and Drought Events in the Minjiang River Basin [J]. *Pearl River*, 2024, 45(4):115-123. in Chinese
- [24] 冯鑫,刘艳菊,童宏福,等. 基于海表温度和随机森林的珠江流域干旱预报模型研究[J]. *人民珠江*,2024,45(5):96-102.  
FENG X, LIU Y J, TONG H F, et al. Research on a drought forecasting model for the Pearl River Basin based on sea surface temperature and random forest [J]. *People's Pearl River*, 2024, 45(5):96-102.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级:GBT 20481-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. *Meteorological Drought Levels: GB/T 20481-2017* [S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (in Chinese)
- [26] 许凯. 我国干旱变化规律及典型引黄灌区干旱预报方法研究[D]. 北京:清华大学,2015.  
XU K. *Research on Drought Variation Patterns in my country and Drought Forecasting Methods for Typical Yellow River Irrigation Districts* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [27] 冯凯,粟晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系[J]. *农业工程学报*,2020,36(8):103-113.  
FENG K, SU X L. Spatiotemporal response relationship of agricultural drought to meteorological drought based on a three-dimensional perspective[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8):103-113. (in Chinese)

- [28] WANG A H, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J. Soil moisture drought in China, 1950—2006 [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3257–3271.
- [29] XU K, YANG D W, YANG H B, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961—2012: A climatic perspective [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 253–264.
- [30] LIU Y, ZHU Y, REN L, et al. Understanding the spatiotemporal links between meteorological and Hydrological droughts from a three-dimensional perspective [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(6): 3090–3109.
- [31] 丽娜·托库, 门宝辉, 刘楠, 等. 基于三维视角的京津区域干旱事件识别 [J]. *水力发电学报*, 2024, 43(11): 49–58.  
LINA T K, MEN B H, LIU N, et al. Identification of drought events in the Beijing–Tianjin region based on a three-dimensional perspective [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(11): 49–58. (in Chinese)
- [32] 王可欣, 楼俊伟, 俞涵婷. 近 50a 浙江降水分布的时空特征 [J]. *浙江气象*, 2021, 42(1): 11–16.  
WANG K X, LOU J W, YU H T. Spatiotemporal characteristics of precipitation distribution in Zhejiang Province over the past 50 years [J]. *Zhejiang Meteorology*, 2021, 42(1): 11–16. (in Chinese)
- [33] 贾安琪, 姚佳骏, 李美琳, 等. 近 50 年浙江省暴雨时空分布特征及对农业的影响 [J]. *农业灾害研究*, 2023, 13(6): 73–75.  
JIA A Q, YAO J J, LI M L, et al. Spatiotemporal Distribution Characteristics of Heavy Rainfall in Zhejiang Province in the Past 50 Years and Its Impact on Agriculture [J]. *Agricultural Disaster Research*, 2023, 13(6): 73–75. (in Chinese)
- [34] 樊高峰, 苗长明, 毛燕军, 等. 浙江干旱特征及其与区域气候变化关系 [J]. *气象科技*, 2008(2): 180–184.  
FAN G F, MIAO C M, MAO Y J, et al. Characteristics of drought in Zhejiang and its relationship with regional climate change [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008(2): 180–184. (in Chinese)
- [35] 涂玉虹, 刘进宝, 吕振平, 等. 1960–2019 年浙江省气象干旱时空演变特征研究 [J]. *浙江水利水电学院学报*, 2022, 34(2): 32–39.  
TU Y H, LIU J B, LYU Z P, et al. Study on the spatiotemporal evolution characteristics of meteorological drought in Zhejiang Province from 1960 to 2019 [J]. *Journal of Zhejiang Water Resources and Hydropower Institute*, 2022, 34(2): 32–39. (in Chinese)
- [36] 浙江省温州市温瑞塘河水系管理委员会. 温瑞灌区志 [Z]. 温州市: 浙江省温州市温瑞塘河水系管理委员会, 1999.  
Wenzhou Wenrui Tanghe River System Management Committee, Wenzhou City, Zhejiang Province. *Wenrui Irrigation District Chronicle* [Z]. Wenzhou City: Wenrui Tanghe River System Management Committee, Wenzhou City, Zhejiang Province, 1999. (in Chinese)

## Analysis of the evolution characteristics of meteorological drought events in Wenzhou City based on three-dimensional recognition

ZHANG Chengyan<sup>1</sup>, BAO Lingling<sup>1</sup>, YE Yizhou<sup>1</sup>, YU Dan<sup>2,3\*</sup>

(1. Wenzhou Wenruiping Water System Management Center, Wenzhou 325000, China; 2. College of Water Conservancy and Environment, Three Gorges University, Yichang 443000, China; 3. Engineering Research Center for Ecological Environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443000, China)

**Abstract:** To overcome the limitations of previous analyses examining drought evolution from solely temporal or spatial perspectives and to better capture the complete developmental process of meteorological drought events, this study employs a three-dimensional (3D) drought identification method integrating spatiotemporal connectivity, based on the SPI-3, to systematically reveal the spatiotemporal dynamic evolution patterns of meteorological drought events in Wenzhou City, a pivotal coastal area in southeastern China. The methodology involves defining drought events as coherent spatiotemporal clusters where the SPI-3 is below the moderate drought threshold (-1), meticulously tracking their initiation, migration, expansion, contraction, and termination. The analysis utilizes high-quality monthly precipitation data (1961–2019) from 22 meteorological stations, spatially interpolated to a 1-km resolution grid, alongside SRTM DEM data for topographical context. The core 3D identification process comprises two key steps: first, identifying independent drought patches in each month by merging contiguous drought grids and applying an area threshold ( $\approx 1.6\%$  of the study

area, 193.6 km<sup>2</sup>); second, temporally connecting patches across consecutive months based on spatial overlap exceeding this threshold, thereby constructing 3D drought structures characterized by duration, area, intensity (volume), and centroids. Results identify 131 distinct meteorological drought events in Wenzhou from 1961 to 2019. Temporally, overall trends in drought duration, area, and intensity show a fluctuating decline, with distinct phases: a significant decrease before 1995, an increase followed by a decrease between 1995 and 2005, and relatively stable duration/intensity but fluctuating area post-2005, indicating a shift towards more widespread but less intense/short-lived events. Seasonally, droughts exhibit high incidence in summer (27.53%) and autumn (26.96%), with October (13.7%) and July (13.0%) being the peak months. Spatially, drought centers are predominantly concentrated in inland areas farther from the coast, with Yongjia, Ouhai, Ruian, and Pingyang districts experiencing particularly long-duration and high-intensity events, highlighting a clear correlation with topography and land-sea position. Analysis of the ten most severe events and detailed 3D case studies demonstrates that the reconstructed spatiotemporal evolution—including development paths, changing spatial footprints, and centroid migration—aligns remarkably well with historical drought records from Wenzhou. This consistency robustly validates the reliability and practical utility of the proposed SPI-based 3D identification method. Consequently, this study not only provides novel insights into the intricate spatiotemporal dynamics of droughts in a complex coastal environment but also offers a refined methodological framework for improved regional drought monitoring, dynamic tracking, and early warning. The findings furnish a detailed scientific basis for formulating targeted drought risk prevention, control strategies, and resilience enhancement in Wenzhou and similar monsoonal coastal regions.

**Keywords:** SPI index; Tree-dimensional recognition; Drought evolution; Drought center; Wenzhou City

(责任编辑:高天扬)