

基于标准化降水指数(SPI)的长三角地区旱灾危险性时空演变特征

王金虎^{1,2,3,4,5}, 吕瑶^{1,2}, 王静²

¹南京信大安全应急管理研究院, 江苏 南京

²南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京

³中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京

⁴南京信息工程大学减灾与应急管理研究院, 江苏 南京

⁵南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京

收稿日期: 2025年2月19日; 录用日期: 2025年4月20日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

这一研究揭示了长江三角洲地区旱灾险情的时空特征, 对长江三角洲地区农业生产、农业结构调整和灌溉管理防灾抗灾等方面都能提供科学依据, 具有较强的科学性。该研究是利用长三角地区气象站点数据, 通过地理信息系统(GIS)对近40年(1980~2020)干旱等级的时间和空间演化特征进行评价, 分析时空干旱灾害的危险性。分析结果显示: 以SPI分析结果为基础, 在波动中逐渐增强的年际尺度上表现为干旱趋势; 季节尺度上的旱灾风险在空间上的分布差异是明显的, 南方低北方高的变化特征是旱灾风险的表现; 时间尺度上连旱特征显著。

关键词

干旱, 标准化降水指数(SPI), 长三角地区干旱, 时空演变特征

Spatio-Temporal Evolution Characteristics of Drought Risk in Yangtze River Delta Based on Standardized Precipitation Index (SPI)

Jinhu Wang^{1,2,3,4,5}, Yao Lyu^{1,2}, Jing Wang²

¹Nanjing Xinda Institute of Safety and Emergency Management, Nanjing Jiangsu

²School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

³Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Chinese Academy of Sciences,

文章引用: 王金虎, 吕瑶, 王静. 基于标准化降水指数(SPI)的长三角地区旱灾危险性时空演变特征[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(4): 668-683. DOI: 10.12677/aep.2025.154076

Beijing

⁴Academy of Disaster Reduction and Emergency Management of Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

⁵Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Feb. 19th, 2025; accepted: Apr. 20th, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

This paper shows the temporal and spatial characteristics of drought risk in the Yangtze River Delta region, which can provide scientific basis for agricultural production, agricultural structure adjustment and irrigation management in the Yangtze River Delta region. Based on the data of meteorological stations in the Yangtze River Delta, this study evaluates the temporal and spatial evolution characteristics of drought levels in recent 40 years (1980~2020) through SPI, and analyzes the risk of temporal and spatial drought disasters through GIS. The analysis results show that: based on SPI analysis results, the drought trend on the interannual scale is gradually strengthened in fluctuations; The distribution difference of drought disaster risk on seasonal scale is obvious in space, and the risk of drought disaster is characterized by low in the south and high in the north. On the time scale, it is characterized by continuous drought.

Keywords

Drought, Standardized Precipitation Index (SPI), Drought in Yangtze River Delta Region, Temporal and Spatial Evolution Characteristics

Copyright © 2025 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

干旱灾害指因区域水循环失衡导致水资源短期匮乏，并对社会经济系统产生连锁负面效应的自然灾害类型。其区别于其他气象灾害的突出特征体现为发生过程的渐进性、影响范围的广域性以及持续时间的周期性，常引发农作物减产、生态系统退化及水资源危机等复合型灾害链效应[1]。根据国际干旱减灾研究框架，干旱可划分为气象、农业、水文、生态及社会经济五类亚型[2]，其中气象干旱作为致灾因子来源，以灾链级联动效应带动其他类型旱灾形成[3]。因此，构建科学评估体系量化干旱强度、空间分异及历时特征，对完善灾害预警机制与农业生产决策具有重要实践价值。

干旱指标是量化干旱严重程度的核心工具，通过数值模型实现旱情监测、预测及跨区域对比，是干旱评估系统的关键模块[4]。针对不同地域特征，学界已开发出多维度评估指标。例如，刘长虹等[5]基于1961~2019年四川省44个气象站数据，结合Mann-Kendall趋势检验和MLR方法，计算SPI和SPEI值，分析不同时空尺度下的干旱特征。张伟杰等[6]利用内蒙古达茂草原1961~2016年降水数据，通过SPI分析其56年旱情演变趋势。李虹雨等[7]采用SPI指数，基于1951~2014年内蒙古及邻近地区70个气象站数据，研究64年来气候干旱的时空变化。Luo等[8]利用1961~2011年我国中部干旱地区43个气象站数据，分析SPI指数在不同时间尺度的干旱特征。熊世为等[9]研究表明，安徽省以轻旱和中旱为主，夏季

干旱强于秋季,春季强于冬季。李大鹏等[10]基于西江流域 1960~2015 年降雨数据,采用 SPI 分析年尺度及季尺度的旱情趋势。屈艳萍等[11]结合层析分析法和 GIS 空间分析功能,评估云南省旱灾危险性。目前常用的干旱指标包括标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)和气象干旱综合监测指数[12]。其中, SPI 因其适用性广、时间尺度灵活、计算简便、数据要求低以及与其他干旱指数一致性高,成为表征干旱风险异质性的有效工具,能够科学评估旱灾发生风险[13]。

根据统计数据,江苏省在长江三角洲区域的旱灾多发生于 3~10 月,除秋季外,其他季节均可能形成大范围旱情。全省分为淮北、江淮和苏南三个区域,当某区域 4 个以上测站降水量低于常年同期 50%以上时,判定为该区域旱灾季[14]。例如,2008 年 11 月至 2009 年 2 月,沿淮淮北地区遭遇 50 年一遇的秋冬连旱,导致严重经济损失。历史上,20 世纪 60 年代中后期和 2003~2004 年为强旱期,浙江夏秋降水显著减少,气温偏高。长期趋势显示,浙江夏季降水增多,气温变化不大,而秋季降水减少,气温升高,旱情频发[15]。这表明长三角地区干旱趋势日益复杂,亟需明确灾害等级及变化特征。

SPI 是全球公认的气象干旱指数,其中 SPI3 适用于分析季节性干湿波动, SPI12 则用于评估长期水资源供需趋势。SPI3 可捕捉春旱、夏旱、秋旱和冬旱等季节性干旱, SPI12 则有助于分析区域整体湿润或干旱趋势。为此,本研究采用 SPI3 和 SPI12 分析长三角地区 1980~2020 年季节和年度尺度的旱灾等级及危险性时空变化规律,并利用 ArcGIS 技术清晰呈现旱灾变化趋势的空间差异,为长三角地区农业生产、防灾减灾、种植结构及灌溉提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

长江三角洲是长江注入东海前冲积而形成的冲积平原,地处长江下游,濒临黄海和东海,处于江海交汇之处。长三角包括 41 个城市,分别是上海市,江苏省,浙江省,安徽省。长三角地区以年平均气温和年均最高、最低气温明显升高的亚热带季风气候为主,冬春季节气温升高最快,夏季气温升高最低。

2.2. 数据来源

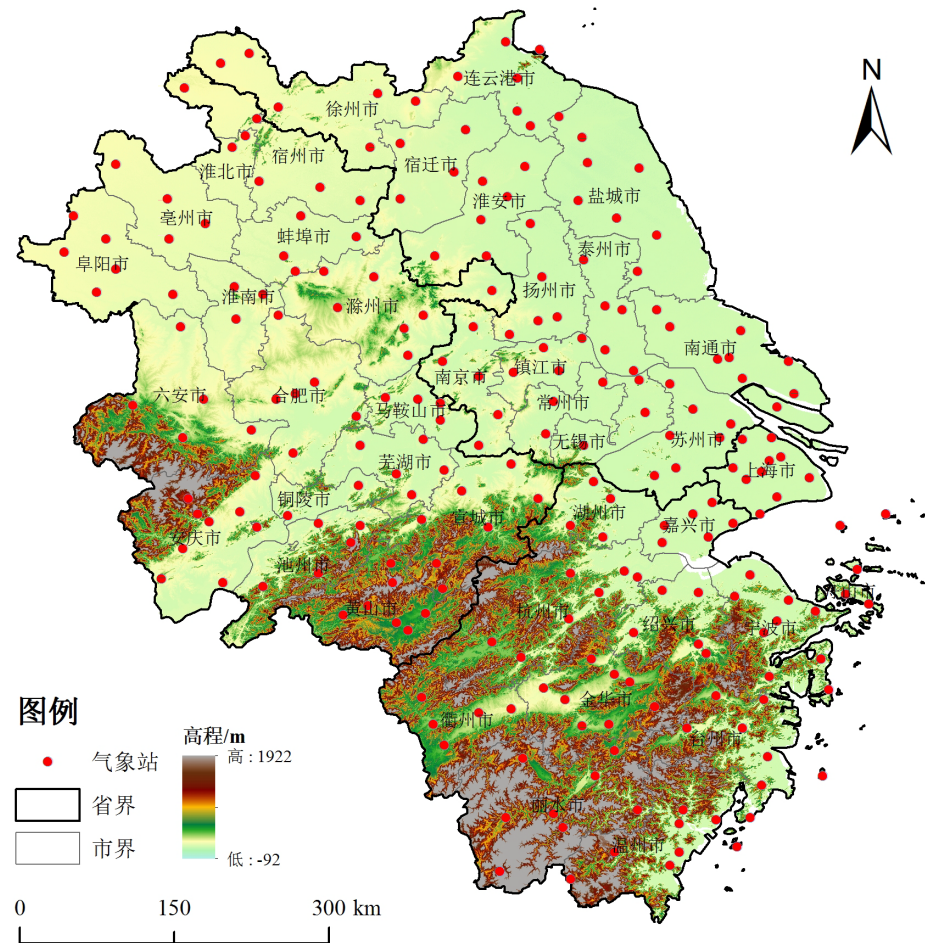
降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans>), 1 k 分辨率 1901~2021 逐月降水量数据集(0.0083333°即约 1 公里空间分辨率的 NETCDF 格式),数据质量验证采用独立气象站 496 个观测数据,数据可靠。降水单位为毫米(mm)。本文选用 1917~2017 逐月降水资料,用 python 计算了研究区域 45 个网格点的年尺度及季节尺度标准化降水指数(SPI)。长三角地区气象站高程行政区划如图 1 所示

2.3. 研究方法

本文利用 SPI 指数对长三角地区干旱强度和频率进行分析,利用气候倾向率和曼-肯达尔非参数检验对干旱演化趋势和变种点进行分析,并以 GIS 空间分析技术为基础,对长三角地区 1980~2020 年干旱灾害时空演化特征进行了再现。

2.3.1. 标准化降水指数

标准化降水指数(SPI) [16]是一种能够以统一的干旱指标反映不同时间尺度和区域干旱状况的方法,因此得到了广泛的应用[17] [18]。指数充分考虑降水服从偏态分布的特性,通过使用 Gamma 分布概率来描述降水变化,将偏态分布的降水数据正向处理,以消除降水在时间和空间分布上的差异[19]。最终,干旱等级的划分是通过累积频率分布的标准化降水来实现的。本研究以表征季节尺度旱灾的演化特征和年代尺度旱灾的演化特征,分别以 3 个月和 12 个月的时间尺度计算 SPI 值[20]。表 1 展示了基于 SPI 指数的干旱等级划分标准,具体计算公式如下:



该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改，下同。

Figure 1. Administrative division map of meteorological station elevation in the study area
图 1. 研究区气象站高程行政区划图

如果某个区域的降雨量数据为，那么相对应的 Γ 的分布概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad (2.1)$$

式中 $\beta > 0$ ， $\lambda > 0$ 分别代表着尺度参数与形状参数 β 、 λ 一般情况下主要通过采用极大似然估计法进行求解计算所获取。

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (2.2)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\bar{\gamma}} \quad (2.3)$$

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (2.4)$$

式中： x_i ：指的是降雨量数据值；

$\bar{x}$ ：指的是所对应的降雨量气候的平均值。

通过上述公式计算出概率密度函数中的各项参数值，对于某一年的降水量 x_0 ，计算某年随机降水量 x 小于 x_0 概率一般通过如下公式所获取。

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \tag{2.5}$$

通过利用统计学中的数值积分的方法结合式(2.1)和式(2.5)得到事件的概率近似估计值。
对于降水量为 0 的计算采用下列公式计算：

$$F(x = 0) = \frac{m}{n} \tag{2.6}$$

式中： m ：指的是降雨量为 0 的样本数据值；
 n ：指的是总的样本数。
对于 Γ 分布概率进行正态标准化处理，结合式(2.5)，(2.6)所求的概率值代入下面的公式中进行处理分析：

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-z^2/2} dz \tag{2.7}$$

然后对其求近似解可得：

$$Z = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \tag{2.8}$$

式中 $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}}$ ， F 为(2.5)或(2.6)中所求的值。当 $F > 0.5$ 时， $F = 1.0 - F$ ， $S = 1$ ；当 $F < 0.5$ 时， $S = -1$ 。 c_1

$$\begin{aligned} c_1 &= 2.515517; \quad c_2 = 0.802853; \quad c_3 = 0.010328; \\ d_1 &= 1.432788; \quad d_2 = 0.189269; \quad d_3 = 0.001308. \end{aligned}$$

通过对式(2.8)计算求解得到的 Z 值及最终所求的标准化降水指数，标准化降水指数气象干旱等级划分具体见表 1。

Table 1. Standardized precipitation index meteorological drought grading table
表 1. 标准化降水指数气象干旱等级划分表

SPI	等级	旱灾危险性权重
$1 < \text{SPI} \leq 2$	严重湿润	
$0.5 < \text{SPI} \leq 1$	中等湿润	
$0 < \text{SPI} \leq 0.5$	轻微湿润	
$-0.5 < \text{SPI} \leq 0$	无明显干旱	
$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	轻微干旱	1
$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	中等干旱	2
$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	严重干旱	3
$\text{SPI} \leq -2.0$	极端干旱	4

2.3.2. 干旱频率

表示某一地区某一时期的干旱频次较多，反映干旱事件统计规律和气候变率的统计指标，即以某一地区某一时期的干旱发生频次占时间长短板率的比值，即某一地区某一时期的干旱发生频次与总观测期

相比较的数值,表示该地区干旱频率分析可以识别并说明干旱时期与空间的分布特点,获得干旱的易发和脆弱地区,并可以为农业、水资源、生态保育等提供有用的参考信息。

$$P_i = \frac{S_i}{N} \times 100\% \quad (2.9)$$

式中: N 为累积期; S_i 为 i 站发生干旱现象的次数,根据不同的干旱等级分别计算发生频率。

本次研究计算了 3 个月、12 个月时间尺度下的 SPI 序列,并根据表 1 统计干旱等级出现的次数,计算平均干旱强度,分析轻度、中度、重度和特旱干旱等级的灾情发生时间、空间分布变化特征,其中 3 个月尺度分析季内频次干旱变化趋势,12 个月尺度分析年际频次干旱变化趋势。

2.3.3. 气候倾向率

在这项研究中,通过气候倾向率来反映研究区域的整体和单站的旱变趋势和程度。气候倾向率通常用气象站多年的气候资料时间序列拟合直线的斜率(即线性回归系数)表示变化趋势,当 SPI 指标趋势线的斜率为负值时,表示旱级变强,发生干旱的风险度变大;相反,当 SPI 指标趋势线的斜率为正值时,则表示旱级变弱,旱灾风险度降低。最后使用 Origin2019 软件进行线性回归。

$$Y_i^t = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_2 + \cdots + a_m t_m \quad (m < n) \quad (2.10)$$

式中: Y_i 为气象要素时间序列, t 为时间,单位为 a 。

2.3.4. Mann-Kendall 趋势检验

本文使用 M-K 检验方法(Mann-Kendall test)对 SPI 指数变化趋势与突变特性进行了显著性检验[21]。这种方法是 M-K 检验方法,是一种能较好地反映一个时间序列变化趋势的、基于秩的非参数统计分析方法。在 M-K 检验方法中,通过显著性检验设定一个显著水平(α),根据检验后所得到的显著等级可知样本序列是否在该显著水平上具有显著差异。本文中用于 M-K 检验的软件为 R 语言,采用显著性 = 0.05 (95%置信水平),即样本显著则 95%置信水平上该样本的序列显著,不显著则 95%置信水平上该样本的序列不显著。

对于具有 n 个样本量的时间序列 X ,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad j=1,2,\dots,i \quad (2.11)$$

可见,秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k=1,2,\dots,n \quad (2.12)$$

式中: $UF_1 = 0$, $E(S_k)$, $\text{Var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,若 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是相互独立且有同一连续型分布,则有 $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 如下表达(其中):

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4}$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (2.13)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$,再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k$, $k=n, n-1, \dots, 1$, $UB_1 = 0$ [22]。

2.3.5. 旱灾危险性评价

本研究结合不同积累期的 SPI 指数,对长三角地区旱带不同等级的旱灾造成的危险性,在综合评价过程中应用加权方法进行分析。根据在研究期中不同干旱等级的发生频数及百分比,对每个干旱等级给以不同权重(表 1),对长三角地区不同尺度的干旱风险指数的计算,即用不同比例(权重)加总可得全年和季度干旱风险指数,本研究分析方法结合了空间分析工具 ArcGIS,不仅可以计算出旱带在空间位置上不同等级干旱的发生频数和频率,还可以直观地观察到干旱时空演变趋势。本研究计算公式为:

$$H_{ij} = \sum_{j=1}^n (M_{ij} \times W_j) \quad (2.14)$$

式中: H_{ij} 为旱灾危险性指数,其值越小,旱灾危险性越高; i 为气象站点; j 为干旱等级序号; M_{ij} 为 i 气象站处于干旱等级 j 中的 SPI 均值; W_j 为干旱等级 j 的权重,旱灾危险性权重获取方法参见文献[23]。Jenks 自然间断点分级方法是基于地图展示的数据分级算法,根据数据本身固有的自然间断分组,在数据差异较大的位置设置分类间隔,使组间差异最大化而组内差异较小,以实现最佳分组[24],故在 ArcGis10.6 中利用自然间断点分级法对长三角地区旱灾危险性指数进行等级划分。

3. 结果与分析

3.1. 年际旱灾时空演变特征

图 2 展示了 1980~2020 年长三角地区(上海市、江苏省、浙江省、安徽省) SPI12 的年际变化特征。上海市 SPI12 值波动明显,整体呈轻微上升趋势,湿润程度增加。1990 年前干旱频繁,1985 年附近出现明显干旱事件后逐渐转向湿润,2010 年后湿润化趋势显著,可能与全球变暖、东亚夏季风增强及城市化进程加快有关。江苏省 SPI12 值变化趋势与上海类似,1980~1990 年干旱波动显著,1990 年后湿润化特征增强,可能与副热带高压北抬及长江径流、沿海湿润气流的影响有关。浙江省 SPI12 波动幅度较大,2000 年前后分别表现为干旱加剧和湿润化增强的转折点,可能与 ENSO 事件及复杂地形导致的降水变化有关。安徽省 SPI12 年际波动相对稳定,1980 年干旱占优,2000 年后湿润化趋势明显,2010 年后进一步增强,可能与东亚冬季风减弱、季风降水增强及长江径流和水库调蓄作用有关。总体来看,长三角地区湿润化趋势与气候变化、季风系统调整及区域地形和水文特征密切相关。

图 3 展示了长三角地区 1980~2020 年间年际干旱等级的空间分布特征。总体来看,1980~2020 年间长三角地区的干旱状况表现出明显的时空差异:1980 年,研究区总体以无旱为主,仅在江苏省北部局部地区出现轻度干旱现象,显示区域干旱等级较低。1990 年 SPI12 值有所上升,干旱状况显著缓解,研究区表现为全域性的无旱状态,干旱等级进一步下降,显示出降水量的相对均匀性。2000 年 SPI12 值开始下降,干旱等级有所上升。空间上,研究区南部区域(如浙江省西部和安徽省南部)表现为轻度干旱,而中部和北部区域(如安徽省北部和江苏省西北部)则出现轻微湿润现象。这一阶段反映出研究区降水分布的空间差异增大。2010 年 SPI12 值显著上升,干旱等级大幅下降,研究区整体以无旱为主,部分区域表现为中度湿润,仅少数地区存在轻微干旱现象。尤其在研究区中部(如浙江省西部和安徽省南部),由原先的轻度干旱转变为轻微湿润,表明湿润化特征显著增强。

综合来看,长三角地区 SPI12 的变化受全球变暖、东亚季风变化、ENSO 事件、地形影响和人类活动(如城市化和水库调蓄)的共同作用影响。1990 年前,该地区干旱事件较多,主要由于东亚冬季风较强、夏季风较弱,而 1990 年后,受气候变化影响,东亚夏季风增强,长江流域降水增加,整体表现出湿润化趋势。同时,各省市因地理位置、地形特征和城市化进程的不同, SPI12 的年际波动和湿润化趋势有所差异。

Mann-Kendall 检验结果表明,长三角地区 SPI12 整体呈显著上升趋势, SPI12 的变幅范围为-2.22 至 1.78, 显示出逐渐向湿润化发展的趋势。其中, 轻度湿润级别的现象最为频繁, 2000 年是长三角地区干旱状况显著变化的转折点。其中, 浙江省和上海市的突变时间均为 2003 年, 江苏省为 2004 年, 安徽省则更早, 为 2001 年。这表明 2000 年初期, 区域干旱状况发生了较大的时空变化, 多地干旱程度出现显著加剧。

结合时间和空间的分析结果可知, 1980~2020 年间, 长三角地区的干旱状况呈现出先加剧后缓解的变化趋势。空间上, 干旱高发区域由北部(江苏省北部)逐渐向南部(浙江省和安徽省南部)转移, 且干旱等级逐渐降低, 区域湿润化趋势明显增强。这一变化反映了区域气候条件的改善以及降水分布的均匀性增强。

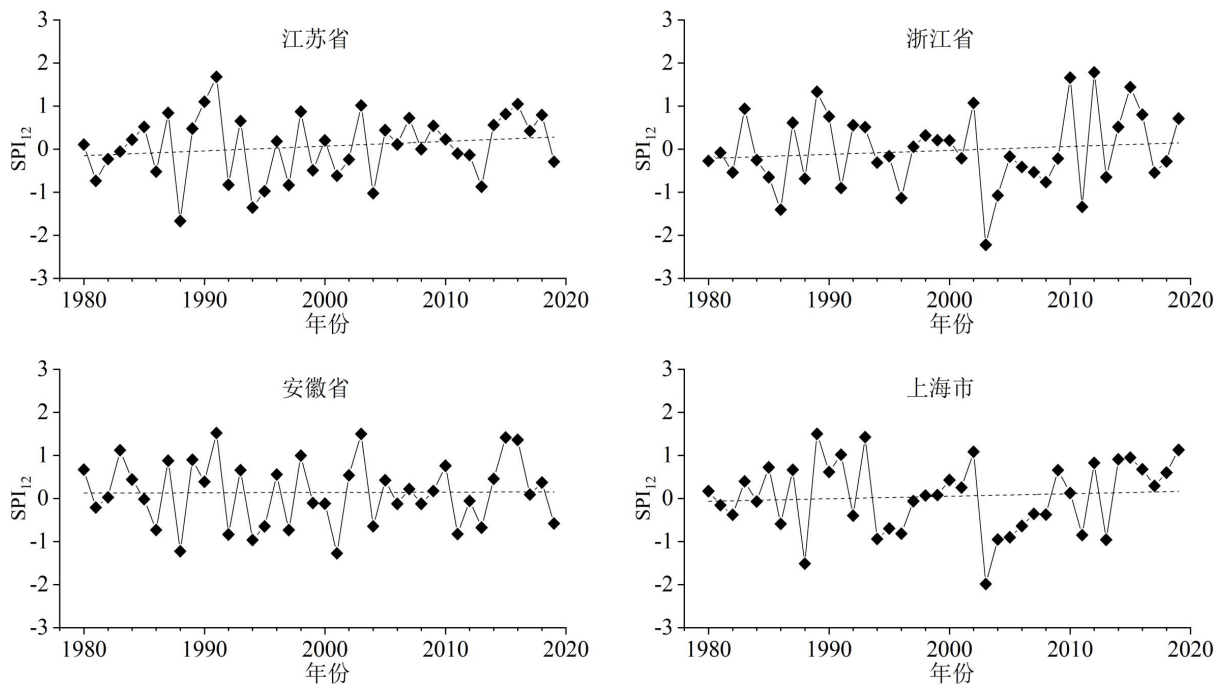


Figure 2. Characteristics of SPI₁₂ value change
图 2. SPI₁₂ 值变化特征

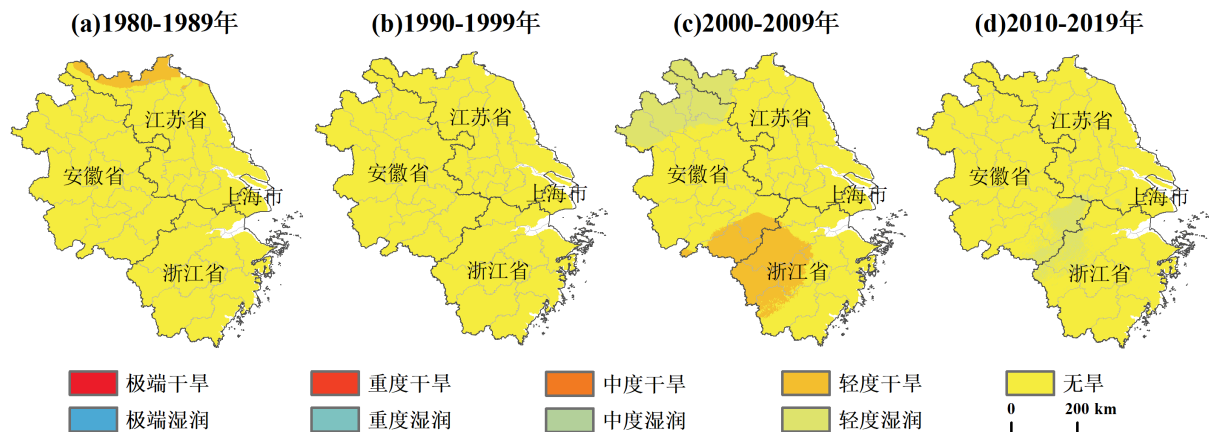


Figure 3. Distribution characteristics of interannual drought grades
图 3. 年际干旱等级分布特征

3.2. 年际旱灾频率变化特征

表 2 展示了 1980~2020 年研究区年代际干旱频率的变化特征。总体来看, 各时间段的干旱发生总频率均高于 19%, 不同地区和干旱等级的空间分布特征随时间变化显著。

1980 年研究区的干旱发生总频率较高, 部分地区干旱等级显著。干旱频率较高的区域集中在研究区北部(如江苏省北部)和南部(如浙江省地区), 其中浙江省轻度及以上等级的干旱发生总频率达 34.8%, 为全区最高, 显示出该区域的干旱易发性较强。1990 年研究区中部(如安徽省和江苏省地区)的干旱发生频率显著升高, 干旱总频率达 37.66%, 为四个年代际中最高。尽管干旱强度以轻度干旱为主, 但干旱现象的空间扩展范围较广, 中部地区在该时期的干旱风险有所增加。2000 年研究区整体表现出无旱显著的特征, 但局部区域仍存在较高的干旱发生频率。研究区中部(如浙江省中西部地区)干旱总频率最高, 达到 45.83%, 干旱等级主要以轻度干旱为主。而北部地区(如安徽省北部和江苏省西北部)的干旱发生频率略低于中部地区, 但仍维持较高水平, 表明这一时期降水空间分布的不均匀性较为突出。2010 年研究区干旱发生总频率有所下降, 其中江苏省地区的总频率为 15.20%, 显著低于其他地区; 但安徽省和浙江省等地的干旱频率仍高于 20.02%。从空间分布上看, 部分区域的轻度干旱现象较为普遍, 尤其是浙江省中西部和安徽省西部地区, 干旱情势相对严峻, 需引起重点关注。

从年际尺度分析, 1980 年研究区整体干旱等级较高, 1990~2000 年干旱程度逐步缓解, 但 2010 年部分地区的旱灾再次加剧, 表现出一定程度的反复性。SPI12 指数的变化趋势进一步表明, 浙江省中西部和安徽省西部带近年来的干旱风险较高, 易发生干旱灾害。这些结果表明, 长三角地区整体虽呈现湿润化趋势, 但区域性干旱的空间分异显著, 研究区全域仍需作为旱灾防范的重点地区。

Table 2. Characteristics of interdecadal drought frequency change
表 2. 年代际干旱频率变化特征

地区	时间段	轻旱频率/%	中旱频率/%	重旱频率/%	极旱频率/%	总旱频率/%
安徽省	1980~1989 年	13.18	9.78	1.09	0.05	24.11
	1990~1999 年	24.22	12.79	0.65	0.00	37.66
	2000~2009 年	17.86	10.59	2.35	0.17	30.96
	2010~2020 年	22.40	3.96	0.14	0.00	26.52
江苏省	1980~1989 年	9.02	5.97	6.60	1.78	23.38
	1990~1999 年	19.16	15.01	6.21	0.03	40.42
	2000~2009 年	13.23	10.49	1.49	0.06	25.25
	2010~2020 年	12.21	2.98	0.00	0.01	15.20
浙江省	1980~1989 年	20.20	9.98	4.28	0.35	34.80
	1990~1999 年	8.07	8.99	4.58	0.13	21.76
	2000~2009 年	26.01	10.16	2.41	7.25	45.83
	2010~2020 年	16.74	8.00	2.00	0.47	27.21
上海市	1980~1989 年	9.15	3.35	6.59	0.06	19.15
	1990~1999 年	25.49	5.70	0.00	0.02	31.20
	2000~2009 年	24.60	4.98	3.06	6.65	39.29
	2010~2020 年	13.17	6.85	0.00	0.01	20.02

3.3. 季度旱灾时空演变特征

1980~2020 年研究区内 SPI3 的季节变化特征如图 4 所示, SPI3 反映了研究区在季尺度上的干湿波动及其变化趋势。综合来看, SPI3 指数变幅为-2.73 至 2.35, 极端干旱水平为 2011 年夏季出现的最低值; 最高值的出现在 1997 年春天, 当时的水润程度达到了极致。SPI3 对单次降雨事件较为敏感, 表现出显著的波动性变化, 不同季节的干旱频率和程度差异显著, 这是因为长三角地区降水具有显著的季节性分布特征。显著性测试结果显示, 无论是季节性 SPI3 的变化趋势, 还是研究区域内的统计数据都是显著性的。

图 5 展示了长三角地区 1980~2020 年间季度干旱等级的空间分布特征。从季节变化来看, 春季 SPI3 呈现显著的干旱化趋势(趋势线斜率为 0.0256), 变幅为-1.64 至 2.35, 干旱等级涵盖严重干旱至极端湿润。1980 年和 2010 年为干旱最严重年份, SPI3 值分别为-1.59 和-1.64, 均达到严重干旱级别; 而 1997 年春季为极端湿润年, SPI3 值为 2.35。春季干旱化趋势可能与全球变暖导致的蒸发增强有关, 尽管降水年际变化较大, 但水分亏缺逐渐加剧。东亚春季风强度变化影响水汽输送, 导致降水不稳定, 部分年份出现极端干旱或异常湿润。浙江省中西部和安徽省西部是春季干旱高发区, 可能与地形特征(如山区阻挡水汽输送)及长江径流对区域水分供应的影响有关。夏季 SPI3 变化最为剧烈, 变幅为-2.73 至 1.61, 干旱等级范围为极端干旱至严重湿润。2000 年、2001 年和 2011 年发生极端干旱事件, SPI3 值分别为-1.65、-2.21 和-2.73, 表明夏季干旱事件集中且强度大, 与长三角雨旱分明的气候特征密切相关。东亚夏季风减弱导致降水减少和年际波动增大, 加剧了干湿交替现象。厄尔尼诺和拉尼娜事件的变化也是关键因素, 例如 2000~2001 年拉尼娜事件导致东亚季风偏弱, 长江中下游降水减少, 夏季干旱加剧。此外, 西太平洋副热带高压的强度和位置变化影响降水格局, 部分年份高压偏强导致降水减少, 进一步增强了夏季干旱化趋势。

秋季 SPI3 的波动相对较小, 变幅为-0.96 至 1.03, 对应的干旱等级范围为轻微干旱 - 中等湿润, 其中 1998 年为最严重干旱年份, SPI3 值为-0.96, 而 1980 年则为最湿润年份, SPI3 值为 1.03。显著性检验表明, 2004 年秋季发生突变, 干旱化趋势逐渐显现。秋季降水相对均匀, 干旱程度不及春季和夏季, 整体变化幅度较小, 但 2004 年之后的突变可能与全球变暖背景下东亚季风系统的变化有关, 季风的不稳定性加大了降水的年际变化。此外, 秋季降水在一定程度上受到台风活动的影响, 部分年份因台风路径偏移导致内陆地区降水减少, 使得局地干旱加剧。

冬季 SPI3 表现为显著的干旱化趋势(趋势线斜率为 0.0048), 变幅为-1.996 至 1.51, 对应的干旱等级范围为严重干旱 - 严重湿润, 其中 1996 年为最严重干旱年份, SPI3 值为-1.996, 而 1994 年冬季则成为显著突变的时间节点, 标志着冬季气候干旱化趋势的形成。这一趋势的形成可能受到东亚冬季风减弱、北极涛动(AO)和西风带环流的变化影响。冬季风的减弱减少了西伯利亚高压对长三角的影响, 使得水汽输送减弱, 进而减少了冬季降水。同时, 极端气候事件的增多, 如厄尔尼诺/拉尼娜现象对西风带波动的影响, 也可能导致某些年份降水异常偏少。此外, 冬季冷空气活动的变化也对区域降水产生影响, 不同年份的冷空气强度和南下路径的不同会影响水汽输送, 使得冬季降水出现不稳定性, 并加剧了冬季干旱化趋势。

从空间分布来看, 不同季节的平均干旱等级均以无旱为主, 说明长三角地区整体湿润程度略高于干旱程度。然而, 春季和夏季的干旱频率较高, 尤其在浙江省中西部和安徽省西部地区, 这些区域成为干旱高发区, 这可能是由于地形阻挡水汽输送、降水在局地分布不均所致。而秋季和冬季的干旱强度相对较低, 但冬季的干旱化趋势在时间尺度上更加显著, 表明该地区未来可能会面临更长时间尺度上的水资源短缺风险。综合来看, 1980~2020 年间, 长三角地区在季节尺度上呈现出显著的干湿交替特征, 各季节的干旱演变规律存在明显差异。春季和夏季干旱频率和强度较高, 特别是夏季的极端干旱事件集中爆发,

与气候系统的长期变化密切相关，而冬季尽管干旱频率较低，但干旱化趋势逐渐加剧。

结合时间和空间的分析结果，浙江省中西部和安徽省西部地区需要重点关注季节性干旱现象，特别是春季和夏季的干旱风险，这对未来的防灾减灾工作提出了更高的要求。同时，长三角地区未来需要加强对东亚季风系统、ENSO 影响以及极端天气事件的监测，以便更好地预测和应对区域性的季节性干旱风险，保障农业生产和水资源安全。

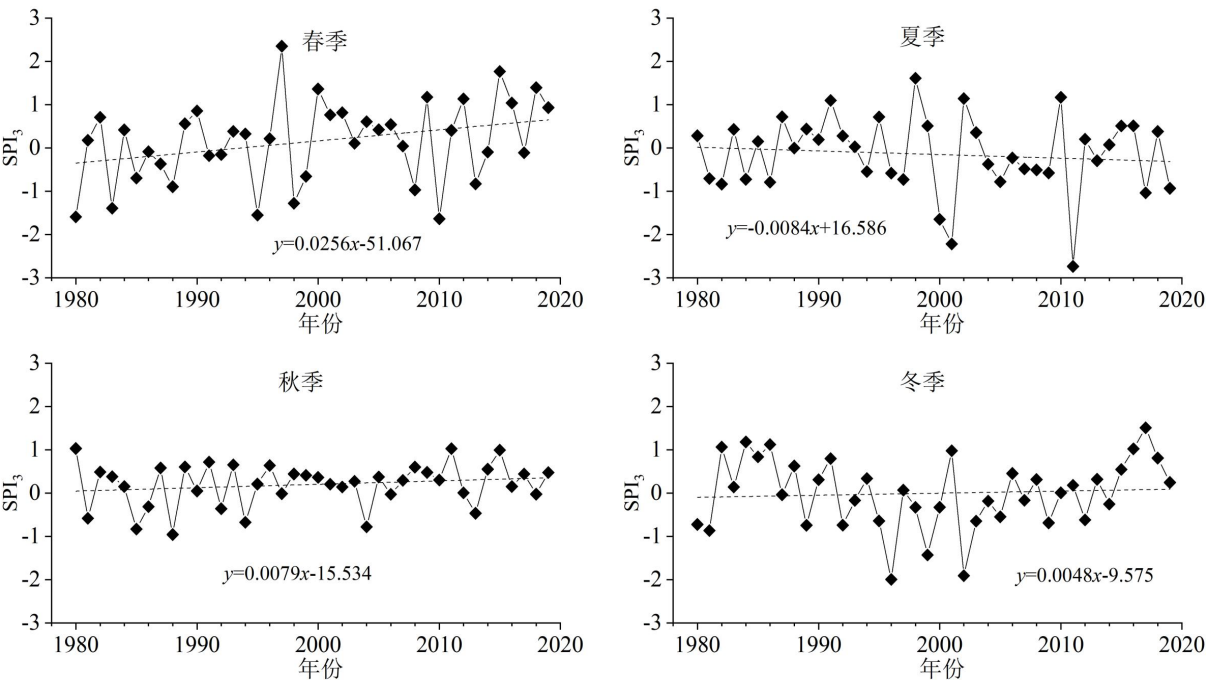


Figure 4. Characteristics of SPI₃ value change
图 4. SPI₃ 值变化特征

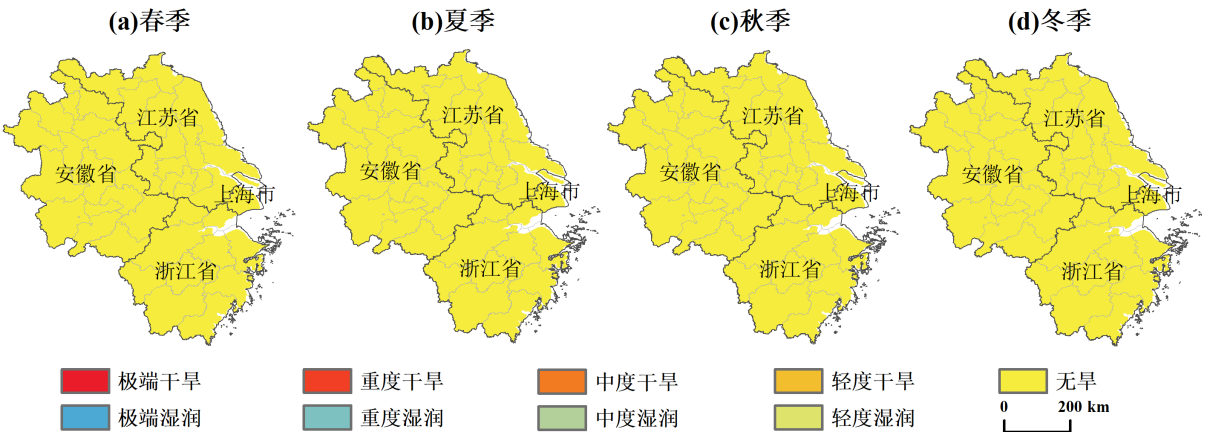


Figure 5. Characteristics of seasonal drought grade change
图 5. 季度干旱等级变化特征

3.4. 季度旱灾频率变化特征

季度干旱频率变化特征如表 3 所示。研究区内季尺度干旱频率表现出显著的时间特征，春、夏、冬三季干旱等级和发生频率较高，而秋季干旱等级和发生频率较低。春季干旱发生总频率为

24.79%~26.68%，以轻微干旱为主。夏季干旱发生总频率最高，变幅为 28.22%~38.99%。其中，安徽省和江苏省干旱等级以轻微干旱为主，发生频率分别大于 17.16%和 15.01%；而浙江省中等干旱现象相对较突出，中旱发生频率为 13.19%。秋季干旱发生总频率最低，仅为 16.21%~21.22%，干旱等级以轻微干旱为主。冬季干旱发生总频率为 28.09%~30.29%，与夏季接近，同样以轻微干旱为主。

总体来看，研究区春、夏、冬三季干旱频发，干旱发生频率均超过 25%，易出现冬春夏连旱现象，是旱灾重点防治的时段。而秋季干旱发生频率较低，气候较为稳定。研究结果表明，SPI3 能够准确反映季尺度干旱等级的变化特征，尤其对春、夏、冬季干旱频率较高的现象具有良好的适应性。该指标可为研究区旱灾防控提供科学依据。

Table 3. Characteristics of seasonal drought frequency change
表 3. 季度干旱频率变化特征

地区	季节	轻旱频率/%	中旱频率/%	重旱频率/%	极旱频率/%	总旱频率/%
安徽省	春季	9.49	6.72	7.24	3.23	26.68
	夏季	17.16	8.03	3.39	4.50	33.08
	秋季	12.71	6.62	1.26	0.00	20.59
	冬季	11.03	8.39	4.47	4.20	28.09
江苏省	春季	7.30	6.72	7.23	3.54	24.79
	夏季	15.01	7.21	3.74	4.21	30.17
	秋季	11.31	7.69	2.17	0.06	21.22
	冬季	13.79	7.74	3.39	4.45	29.37
浙江省	春季	16.19	8.94	1.24	0.01	26.38
	夏季	14.43	13.19	6.40	4.97	38.99
	秋季	4.50	5.53	3.18	3.00	16.21
	冬季	12.29	9.87	6.21	1.92	30.29
上海市	春季	17.04	4.52	4.17	0.01	25.74
	夏季	10.71	8.63	4.42	4.46	28.22
	秋季	14.29	3.53	0.91	0.11	18.84
	冬季	12.78	6.42	7.04	2.21	28.46

3.5. 年际旱灾危险性时空演变特征

旱灾危险性评价综合反映了研究区内干旱强度与发生范围的时空分布特征，能够科学评估区域旱灾风险，为防灾减灾提供重要的指导依据。图 6 展示了 1980~2020 年长三角地区年代际尺度旱灾危险性的时空演变特征。

从时间尺度来看，研究期内年际旱灾危险性表现出“先升高后降低”的趋势。1980 年和 1990 年，研究区旱灾危险性整体较高，尤其是 1980 年的江苏省北部和 1990 年的江苏省中北部地区，均表现为高危险性甚至极高危险性区域。到 2000 年，旱灾危险性在空间上出现显著转移，南部地区(如浙江省中南部)逐渐成为高危险性区域，而中北部地区(如安徽省北部和江苏省)危险性显著下降。2010 年后，研究区整体旱灾危险性明显降低，呈现出以低危险性和极低危险性为主的特征，其中安徽省地区在 1980 年、1990 年和 2010 年均表现出极低危险性，这与该地区干旱平均等级较低、极端与严重干旱现象稀少有关。

从空间尺度来看,旱灾危险性在不同年代呈现出显著的空间分异特征。1980年和1990年,旱灾危险性主要集中在研究区北部(如江苏省北部和中部),表现为“北高南低”的分布格局;2000年代,危险性区域向南转移,浙江省中南部成为高危险性区域,空间分布特征由“北高南低”转变为“南高北低”。2010年代,全域危险性降低,危险性等级的空间分布差异减弱,但浙江省南部局部区域仍需重点关注。

基于 SPI12 的旱灾危险性指数能够识别研究区在较长时间序列内的旱灾风险,但在时空演变特征上的显著性较低,尤其在极端和严重干旱现象较少的区域(如安徽省)体现为全域性低危险性等级。这表明研究区整体旱灾风险随时间逐步降低,但局部区域(如浙江省南部)的持续高危险性仍需警惕。此外,不同年间危险性分布的显著变化也反映了气候系统调整及降水分布的复杂性,为区域化防灾措施的制定提供了科学依据。

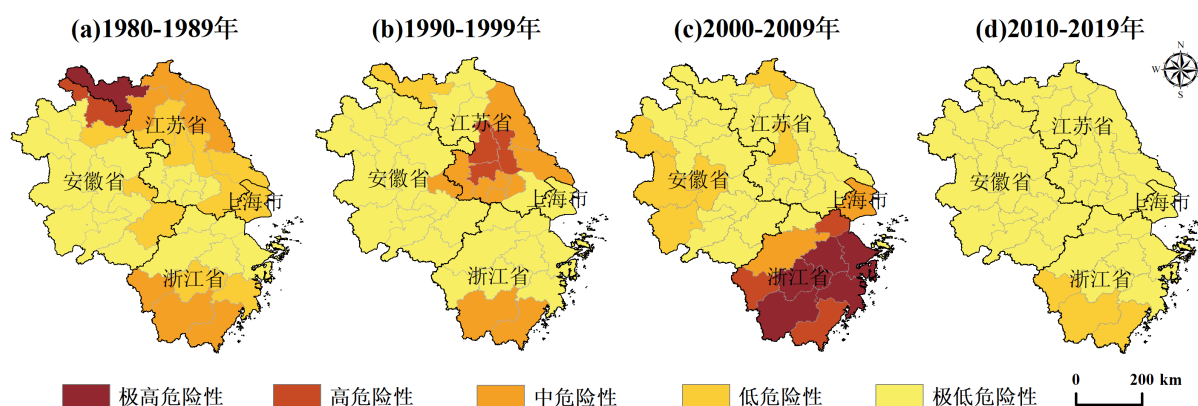


Figure 6. Distribution characteristics of drought risk on interannual scale

图 6. 年际尺度旱灾危险性分布特征

3.6. 季度旱灾危险性时空演变特征

图 7 展示了 1980~2020 年长三角地区四季旱灾危险性的空间分布特征,表明不同季节的危险程度和高发地区在季节尺度、不同季节的分布上都有显著的旱灾危险时空分异特征。从总体上看,夏季干旱危害最大、波及空间最广的地区主要是夏季干旱;各地的分布模式也大同小异,春冬季旱灾险情次之;秋季干旱风险最低,总体上以低风险为特征。

春季(图 7(a)),研究区旱灾危险性较高,西北部地区表现为高危险性,部分区域(如江苏省北部、安徽省北部)达到极高危险性等级。南部地区(如浙江省南部)整体为中低危险性,危险性分布格局呈现“西北高、东南低”的特征。这一特征与春季降水空间分布不均密切相关。夏季(图 7(b)),研究区旱灾危险性达到全年最高水平,且危险性等级和范围显著扩大。安徽省中南部、江苏省中北部和浙江省中南部形成极高危险性核心区域,其中浙江省的危险性等级和覆盖范围最为显著。夏季危险性分布呈现“西南高、东北低”的特征,反映了夏季降水不均和干旱高发的显著特点。秋季(图 7(c)),旱灾危险性显著降低,研究区整体以低危险性和极低危险性为主,仅在安徽省南部和浙江省中部少数区域出现中危险性等级。秋季降水条件较为稳定,干旱事件发生频率较低,整体呈现“全域低危险性”的分布特征。冬季(图 7(d)),旱灾危险性较高,仅次于夏季。高危险性区域集中在研究区的北部和西部(如江苏省北部和安徽省北部),局部地区(如安徽省中部)达到极高危险性等级,而南部地区(如浙江省南部)危险性相对较低,分布格局再次呈现“西北高、东南低”的特征。

从季节尺度来看,长三角地区旱灾危险性显著的季节性变化与区域降水的时空分布高度相关。夏季是旱灾高风险季节,特别是在浙江省中南部和安徽省南部等极高危险性区域,需作为防灾减灾的重点关

注区域；冬季和春季的危险性次之，主要集中在北部和西北部地区；而秋季总体危险性较低，是研究区内旱灾风险最低的时段。这表明，研究区旱灾危险性在夏季和冬季具有更强的时空异质性，而秋季的气候相对稳定。

基于 SPI12 的旱灾危险性评价能够有效识别季节性旱灾的时空演变特征，并揭示研究区内旱灾危险性的显著季节性和区域性差异。研究结果表明，未来应加强对春季、夏季和冬季高危险性区域的监测和预警，尤其是浙江省和安徽省的局部区域，以提高区域旱灾防控的科学性和针对性。

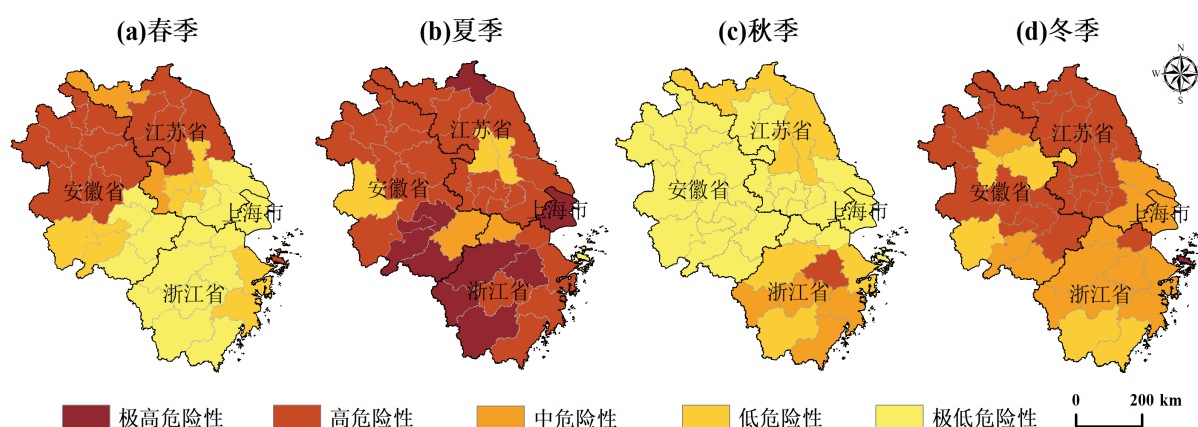


Figure 7. Distribution characteristics of seasonal drought risk

图 7. 季尺度旱灾危险性分布特征

4. 讨论

本研究从季节性与长期性出发，将多尺度视角与干旱特征相结合，分析探讨了长三角地区旱灾危险性演变特征。通过统计各等级旱情事件发生频率和次数的比例，并以 SPI3 和 SPI12 干旱指数为基础分析各等级旱情的影响范围。研究发现，在秋季旱情呈递减趋势的情况下，该地区春、夏、冬三季发生旱情的机率较高，旱情等级较高。这主要与气温下降和冬春夏增温明显，秋季降水增多有一定关系，这两个方面的原因都与气温下降有一定的关系。

康俊等[25]发现，江苏省秋季是干旱的高发季节，且秋季干旱化趋势在全省范围内最为显著，而夏季干旱化趋势不明显。这一结果与本文对长三角地区的分析部分契合：秋季干旱发生频率显著，但本文进一步发现冬、春、夏三季的干旱危险性较高，尤其夏季表现出全域性高危险性干旱。不同之处在于，江苏省的夏季干旱化趋势较小，而长三角地区的夏季高危险性干旱可能与区域降水空间分布不均密切相关。江苏省的秋季干旱显著性可能与其降水变差系数在秋季最大有关，而长三角整体特征更多体现为多季连旱现象的空间叠加。任杰等[26]通过研究江苏省干旱风险分布特征，利用江苏省 95 个县级行政区面雨量数据，计算了平均过境水依赖度，结论显示江苏省干旱灾害风险苏北高于苏南，与本文旱灾危险性分布特征一致。常伊婷等[27]基于综合评价模型指出，安徽省的干旱危险性总体上呈现由北向南逐渐降低的趋势，这与本文的研究结果一致。此外，常伊婷等的研究强调了降水和水资源量对于干旱危险性的关键作用，与本文的驱动机制分析具有较高的相似性。涂玉虹等[28]的研究发现，浙江夏旱发生频率较高，旱情总体略有减弱趋势，旱情时空迁移速率总体呈上升趋势，这与本文对浙江长三角地区旱情风险分布特征相吻合。章卫华等[29]研究利用 SPI 和降水距平百分率(Pa)对长三角地区的干旱特征进行对比分析，发现两种指标在描述干旱程度上具有较高的一致性，尤其在突变点和趋势变化的检测上均表现出显著的吻合性。这一结论与本文基于 SPI 对长三角地区干旱时空变化特征的分析结果高度一致。

SPI12 的评估结果显示 1980~2020 年间,研究区整体旱情呈现波动缓慢加剧的趋势。研究表明,长三角地区的干旱空间格局与气候暖干化导致的干旱加剧现象密切相关。此外, SPI12 较好地表征了长时间尺度上的干旱变化趋势,为干旱长期影响评估提供了有力支持。与之相比, SPI3 的评估结果揭示了干旱动态的特征,其时间尺度更短。研究发现, SPI3 指数在秋季出现小幅回落,而在冬、春和夏三个季节则出现上升趋势。这表明 SPI3 对干旱发生频率和影响范围的捕捉能力在短时间尺度下更为敏锐。此外, SPI3 对季节性干旱的反映更为精确,特别是在评估干旱频次和空间分布的变化时展现出更好的适用性。这一点进一步证实了该研究区评估季节性干旱的风险。春冬高危旱区主要集中在安徽省北部、苏北一带,夏季则以全域性高危旱区为主要特征,其中高危旱区尤为显著,安徽省南部、浙江省西北地区的高危旱区尤为突出。相较之下,秋季干旱风险普遍较低。这些结果不仅强调了 SPI3 在短期干旱风险评估中的适用性,还突显了其在识别季节性干旱空间格局方面的重要作用。此外,旱灾年际评估显示,1980~1990 和 2000~2010 年间,全域性干旱事件频繁发生,但旱情等级主要为无旱性和轻度旱情,总体旱情风险较低。而 1990~2000 年和 2010~2020 年期间,安徽省和浙江省中部以北地区表现为低风险区域,其余区域的干旱等级和风险则显著较高。结合 GIS 技术的分析表明,这种旱灾时空分异特征能够有效支持区域性干旱风险管理和防灾减灾措施的制定。

综上所述,本研究通过对 SPI12 和 SPI3 的综合应用,验证了两种指标在不同时间尺度上对干旱特征的敏感性和适用性。其中, SPI12 适用于长期干旱变化趋势的评估,而 SPI3 更适合短期和季节性干旱风险的监测与预测。本研究结果为长三角地区旱情管理提供了可靠的科学依据,同时对旱情的动态监测工作起到了很好的促进作用。

5. 结论

1) 总体看,长江三角洲地区旱情呈现出冬春夏旱情增强、连旱现象突出、秋季趋缓的态势,旱情在波动中缓慢加剧。整个研究的时间范围内,旱灾等级在 2010~2020 年间呈现明显的全域性下降趋势。

2) 研究期内年尺度旱灾危险性指数表现出先升高后降低的特征,在空间尺度上呈现东南高西北低的空间差异。

3) 季节尺度旱灾危险指数在研究期间,表现为冬、春、夏季节较高,而秋季较低,对干旱灾害中时空差异的表现更为敏感,表现出显著的空间异质性。从空间尺度上看,它的特点是秋旱影响范围小,冬春夏危害指数高,影响范围大。春秋两季安徽省北部和苏北地区旱险相对较高,其中浙江省秋季表现为旱情中高危险区,南部和西北地区夏季旱险极高。

参考文献

- [1] 张翔, 韦燕芳, 李思宇, 等. 从干旱灾害到干旱灾害链: 进展与挑战[J]. 干旱气象, 2021, 39(6): 873-883.
- [2] 郑金涛, 彭涛, 董晓华, 等. 三峡库区气象干旱演变特征及致灾因子危险性评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 213-220.
- [3] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996(4): 8-19.
- [4] 赵丽, 冯宝平, 张书花. 国内外干旱及干旱指标研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 345-348.
- [5] Liu, C., Yang, C., Yang, Q., et al. (2021) Spatiotemporal Drought Analysis by the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11, Article No. 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3>
- [6] 张伟杰, 陈晓俊, 王文君, 等. 基于不同时间尺度标准化降水指数的荒漠草原近 56 年干旱特征分析——以内蒙古包头达茂草原为例[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5): 32-37.
- [7] 李虹雨, 马龙, 刘廷玺, 等. 基于标准化降水指数的内蒙古地区干旱时空变化特征[J]. 水文, 2018, 38(5): 47-51, 90.

- [8] Luo, Y.Q., Zou, B. and Qiu, Y.H. (2013) Spatial-Temporal Evolution Characteristics of Drought Disaster in East China. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 27, 58-64.
- [9] 熊世为, 邱阳阳, 郁凌华, 等. 基于 SPI 的安徽省 1961-2019 年干旱演变特征分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(6): 56-60, 65.
- [10] 李大鹏, 慕鹏飞, 白涛, 等. 基于标准化降水指数 SPI 的西江流域多尺度干旱特征及其驱动力分析[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(1): 41-50.
- [11] 屈艳萍. 旱灾风险评估理论及技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [12] 豆俊川, 代建君, 张代洪. 彭水县干旱气候特征分析[J]. 科技风, 2021(6): 116-117.
- [13] 丛士翔, 王融融, 常文静, 等. 基于标准化降水指数(SPI)的宁夏中部干旱带旱灾危险性时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 223-232.
- [14] 吴孝祥. 江苏省主要气象灾害概况及其时空分布[J]. 气象科学, 1996(3): 291-297.
- [15] 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, 36(2): 180-184.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GBT20481-2017 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [17] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于历史相似案例的农业旱灾灾情快速评估方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(z1): 77-81.
- [18] 王翠玲. 辽西北地区玉米干旱灾害动态风险评价研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [19] 关静, 梁川, 赵璐, 等. 3 种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 122-127.
- [20] 高燕俐, 刘小刚, 冷险险, 等. 基于主成分分析的广西省干旱时空格局[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5591-5601.
- [21] 梅晓丹, 李丹, 田静, 等. 2000-2018 年黑龙江省干旱时空特征分析[J]. 测绘工程, 2022, 31(3): 16-22.
- [22] 彭思晴. 利用气溶胶垂直廓线和地面水平能见度反演气溶胶光学厚度的方法[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [23] 金令, 王永芳, 郭恩亮, 等. 基于 SPEIbase v.2.6 数据集的内蒙古旱灾危险性评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 695-705.
- [24] 卢瑜, 向平安, 余亮. 中国有机农业的集聚与空间依赖性[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3): 440-452.
- [25] 康俊, 邱新法, 程炳岩. 江苏干旱分布及趋势分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会干旱与减灾——第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集. 2008: 7.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Conference/Article/zgqx200811009067.html>
- [26] 任杰, 李士军, 徐毅, 等. 江苏省水资源利用与干旱风险分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 46-54.
- [27] 常伊婷, 蒋尚明, 崔毅, 等. 安徽省干旱危险性评价及等级划分[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 41-48, 73.
- [28] 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.
- [29] 章卫华, 黄少山, 王有德. 长三角地区近 60a 不同干旱指标的对比分析[J]. 低碳世界, 2018(5): 374-375.