

# 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展

郑博福<sup>1,2,3,4,5</sup>, 肖德利<sup>1,3,4,5</sup>, 万 炜<sup>2,3,4,5</sup>, 万子健<sup>1,3,4,5</sup>, 吴之见<sup>1,3,4,5</sup>, 朱锦奇<sup>2,3,4,5</sup>

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学资源与环境学院, 江西 南昌 330031;  
3. 流域碳中和教育部工程研究中心, 江西 南昌 330031; 4. 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室,  
江西 南昌 330031; 5. 南昌大学江西生态文明研究院, 江西 南昌 330031)

**摘要:**在梳理长江流域干旱相关研究成果的基础上,从气象干旱、水文干旱、农业干旱 3 个角度评述了当前长江流域干旱评估指标的研究现状,阐述了长江流域干旱的时空特征及成因。指出当前研究在区域干旱的精准识别和多因素交互作用方面仍面临严峻挑战,未来长江流域干旱的主要研究方向包括提高多源数据综合利用水平,增强干旱监测的时效性与准确性;完善干旱监测及预报体系,提高干旱预测的科学性与可靠性;深化人类活动对干旱的响应研究,揭示人类活动与自然因素在干旱事件中的相互作用机制。

**关键词:**干旱时空特征;干旱成因;干旱评估指标;长江流域

**中图分类号:**P344;X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)05-0018-11

**Research progress on assessment indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin**//ZHENG Bofu<sup>1,2,3,4,5</sup>, XIAO Deli<sup>1,3,4,5</sup>, WAN Wei<sup>2,3,4,5</sup>, WAN Zijian<sup>1,3,4,5</sup>, WU Zhijian<sup>1,3,4,5</sup>, ZHU Jinqi<sup>2,3,4,5</sup>(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Engineering Research Center of Watershed Carbon Neutralization, Nanchang 330031, China; 4. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resources Utilization, Ministry of Education, Nanchang 330031, China; 5. Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Based on the research results on drought in the Yangtze River Basin, the current research status of drought assessment indicators in the Yangtze River Basin was reviewed from perspectives of meteorological drought, hydrological drought, and agricultural drought, and the spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin were described. It was pointed out that the current research still faced serious challenges in the accurate identification of regional drought and the interaction of multiple factors. The main directions of drought research in the Yangtze River Basin in the future are put forward, including to improve the comprehensive utilization level of multi-source data and enhance the timeliness and accuracy of drought monitoring, to improve the system of drought monitoring and forecasting and enhance the scientificity and reliability of drought prediction, and to deepen the research on the response of human activities to drought and reveal the interaction mechanism between human activities and natural factors in drought events.

**Key words:** spatio-temporal characteristics of drought; causes of drought; drought assessment indicators; Yangtze River Basin

干旱是世界上分布最广且造成损失最为严重的常见自然灾害之一,即使在科技迅猛发展的今天,因旱致灾的后果仍无法完全避免<sup>[1]</sup>。在全球变化的大背景下,干旱导致的负面影响日益凸显,其造成的后果被广泛关注。已有研究表明,全球不同地区普遍出现干旱受灾情况,未来干旱事件发生的概率将会增大<sup>[2]</sup>。20 世纪 70 年代以来,中国大部分地区

高温天气发生次数增加,强度明显增强,加之特殊地理气候条件,导致区域降水和气温时空分布不均,致使干旱灾害出现频率随季节和地理位置变化。中国干旱灾害严重程度、持续时间和发生范围都呈现出增加的趋势<sup>[3]</sup>。

21 世纪以来,长江流域干旱事件频发,2006 年夏季川渝地区大旱;2009—2010 年华中春夏连旱,

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(42301091);江西省重点研发计划项目(20223BBG74S01,20223BBG71013)

**作者简介:**郑博福(1973—),男,教授,博士,主要从事水环境与水生态研究。E-mail:bfzhen@ncu.edu.cn

**通信作者:**万炜(1993—),男,讲师,博士,主要从事资源环境遥感及干旱监测研究。E-mail:wanwei@ncu.edu.cn

致使灾区农作物减产,严重影响了地区生态平衡和生命财产安全<sup>[4]</sup>。2013年长江中下游发生高温伏旱,我国南方大片地区遭遇前所未有的高温热浪,对供水、供电等部门的生产活动造成了很大影响,高温也加重了旱情发展,给农业生产带来很大危害<sup>[5]</sup>。2019年长江中下游伏秋连旱为1961年以来同期最重<sup>[6]</sup>,2022年长江流域发生了极端干旱,长江流域干旱问题引发全国乃至全世界重点关注。

长江流域作为中国最重要的经济区域之一,是世界上水资源最丰富的流域之一,为长江经济带发展提供了有力支持,其优越的自然环境为社会经济发展提供了基础保障,而社会经济的快速发展也对长江流域抵御干旱风险的能力提出了更高要求。在全球变化背景下,长江流域旱灾发生的强度及频率呈现不断上升的趋势,干旱对该区域水资源、农业和社会经济都造成了严重影响<sup>[7]</sup>。厘清长江流域干旱的评价指标、时空特征和成因,可为该区域防旱减灾提供重要指导依据,并对维持该区域可持续发展具有重要的理论价值和现实意义。

## 1 干旱评估指标研究进展

长江流域(24°30'N~35°45'N、90°33'E~122°25'E)高质量发展与其生态环境之间存在相互依存、相互支撑的关系。该区域受季风气候影响显著,导致年内降水量差异明显;受高温气候影响,年内最高气温可达44.5℃,易出现极端复合型干旱现象,使长江流域生态环境安全保障及区域高质量发展面临严峻考验。干旱涉及领域众多,各部门及学科对于干旱概念的理解不尽相同,一般来说,干旱主要分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。目前国内外对于长江流域前3类干旱的研究成果较多,对于社会经济干旱仍处于探索阶段。

### 1.1 气象干旱评估指标

气象干旱评估是通过计算特定气象要素,评估区域内因气候异常造成的水分亏欠<sup>[8]</sup>。降水距平(precipitation anomaly, PA)百分率、降水异常指数(rainfall anomaly index, RAI)和Z指数是国内早期研究长江流域气象干旱的指数<sup>[9]</sup>,但皆未考虑环境变化下蒸散发对干旱的影响,且存在因降水时空分布不均导致的区域干旱评估准确性不足等问题<sup>[10]</sup>。标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)计算简单、数据易获取,且在多时间尺度下分析水资源影响具有独特优势,故而成为长江流域干旱评估更常用的指数<sup>[11]</sup>。联合其他干旱指数可弥补SPI仅考虑降水因素的不足,进而实现该区域干旱情况较为全面的评估及预测<sup>[12]</sup>。标准化降水蒸散

指数(standardized precipitation-*evapotranspiration* index, SPEI)克服了相对湿润指数(relative moisture index, MI)无法区分气候干燥和干旱的不足,其不仅考虑了蒸散发对干旱的影响,还具备多时间尺度的特性,使该指数成为气候变化背景下长江流域干旱研究的重要工具<sup>[13-14]</sup>,特别是在干旱传递研究中应用广泛<sup>[15]</sup>。修正后的帕默尔干旱强度指数(self-calibrating Palmer drought severity index, SC-PDSI)针对长江流域的气候特点进行了自适应优化,通过修正参数使其在不同区域之间的应用有较好的可比性,并引入自校准机制,能够减少由于固定参数设置导致的偏差,使结果更加平滑连续<sup>[16-17]</sup>,能更准确地反映长江流域气象干旱状况。鉴于气象干旱指标的计算原理和涉及要素各异,加之长江流域气候类型多样性和地表异质性强,综合多要素干旱指数至关重要。改进后的气象干旱综合指数(meteorological drought composite index, MCI)克服了传统气象干旱综合指数(comprehensive index, CI)在描述旱情时存在的偏轻和不连续性问题<sup>[18]</sup>,能够更精准地反映气候变化背景下长江流域的干旱现状及趋势,标准化综合干旱指数(standardized composite drought index, SCDI)相较于SPI在该区域干旱评估中有更好的适应性<sup>[19]</sup>。然而,以上研究计算的气象干旱指标多依赖于气象站点的观测数据,在监测长江流域局部地区快速发展的旱情时,可能存在缺乏空间连续性 & 代表性的问题<sup>[17]</sup>。

### 1.2 水文干旱评估指标

水文干旱评估指标是在气象干旱评估指标的理论基础上,考虑了径流、水库或地下水位等因素建立起来的<sup>[20]</sup>。帕默尔干旱强度指数(Palmer drought severity index, PDSI)、SPI和SPEI等,也常用于评估长时间尺度下的水文干旱<sup>[21-23]</sup>。然而,由于长江流域年降水量大且时空分布不均,致使这些指标在直接应用于该区域水文干旱评估时精度存在局限性<sup>[24]</sup>。为弥补这一不足,基于SPI开发的标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)和径流干旱指数(streamflow drought index, SDI)能够较好地反映因季节变化导致的水分入渗滞后差异所引起的干旱时间变化<sup>[25]</sup>,因此被广泛应用于长江流域水文干旱的时空演变特征研究<sup>[26]</sup>。

当前研究不仅聚焦于典型干旱事件的评估,更关注水文干旱的概率性问题。例如,利用游程理论对长江流域干旱事件进行识别,提取该区域的干旱次数、干旱历时、干旱频率等特征变量<sup>[27]</sup>;通过构建不同种类的Copula函数探究一场水文干旱事件不同特征的联合概率<sup>[28]</sup>;借助小波分析<sup>[29]</sup>、线性回

归<sup>[30]</sup>、神经网络<sup>[31]</sup>等方法推测水文干旱事件的持续时间和影响范围等。此外,由于环境变化导致水文序列呈现非一致性,使得干旱概率评估变得愈发复杂<sup>[32]</sup>,而利用时变矩方法和基于位置、尺度和形状参数的广义加法模型(generalized additive models for location, scale, and shape, GAMLSS)<sup>[33]</sup>能够描述水文序列概率统计特征的非一致性,并对变异后的水文序列进行频率分析,在长江流域的干旱频率计算中应用广泛<sup>[34]</sup>。同时,通过引入时变参数开发的非一致标准化降水指数(non-stationary standardized precipitation index, NSPI)<sup>[35]</sup>和非一致标准化降水蒸散指数(non-stationary standardized precipitation evaporation index, NSPEI)<sup>[36]</sup>也为进一步构建适应长江流域环境变化的非一致干旱指数提供了新视角。然而,当前水文干旱研究仍侧重于自然条件下水文干旱要素及过程特征。随着全球变化的加剧,人类活动可能导致水文干旱的驱动因素呈现出更加复杂的不确定性<sup>[37]</sup>,这对现有评估方法提出了更严峻的挑战。

### 1.3 农业干旱评估指标

农业干旱的形成机制复杂,涉及自然与人为因素的交织影响,其评估指标的建立需综合考虑气象、土壤、作物等多要素。当前,农业干旱研究主要围绕两大类指标展开。第一类是利用地面观测数据(如气象、土壤和植被等)评估农业干旱。例如:利用干燥度指数(aridity index, AI)<sup>[38]</sup>和作物水分亏缺指数(crop water deficit index, CWDI)<sup>[39]</sup>等表征长江流域的干旱时空分布特征,但是在长江流域等地面观测站分布稀疏、地形复杂、空间异质性高的区域,这些指数的适用性较为有限。第二类是借助遥感反演干旱指数,虽然精度可能稍逊前者,但具有时空连续、监测空间范围广等优势。例如:PDSI和SPEI从气象角度反演长江流域农业干旱的空间趋势<sup>[40]</sup>,地表温度(land surface temperature, LST)<sup>[41]</sup>、标准化土壤湿度指数(standard soil moisture index, SSMI)<sup>[42]</sup>等则从土壤角度反演农业干旱。但是,此类指标难以体现作物本身对干旱胁迫的抗逆性,在长江流域干旱实际监测中存在局限。为此,部分学者选择通过植被反演的方式评估干旱,如归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)<sup>[19]</sup>和增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)等,但由于植被指数对外部环境因素的响应具有一定的滞后性,可能影响干旱监测的准确性。为了更全面地评估农业干旱状况,一些学者倾向于建立综合模型,结合气象、土壤、植被等多变量开发综合干旱指数,其中通过栅格提取LST和NDVI散点,构建

简化三角形的温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)<sup>[43]</sup>和干旱严重指数(drought severity index, DSI)<sup>[44]</sup>等能够有效监测长江流域等大尺度下的农业干旱,在评估长江中下游农业主产区干旱情况中取得了良好效果<sup>[45]</sup>。近年来,骤旱现象频发在农业干旱研究领域引起广泛关注,短历时干旱再次成为有待深入探讨的热点<sup>[5]</sup>。由于其形成机理和演变过程的研究较为模糊<sup>[46]</sup>,且对作物影响较大,加上时空异质性等因素的作用,骤旱评估成为农业干旱亟待解决的难题。

长江流域不同干旱类型的影响因素和评估指标如图1所示,不同干旱指标的构建原理和特点如表1所示。

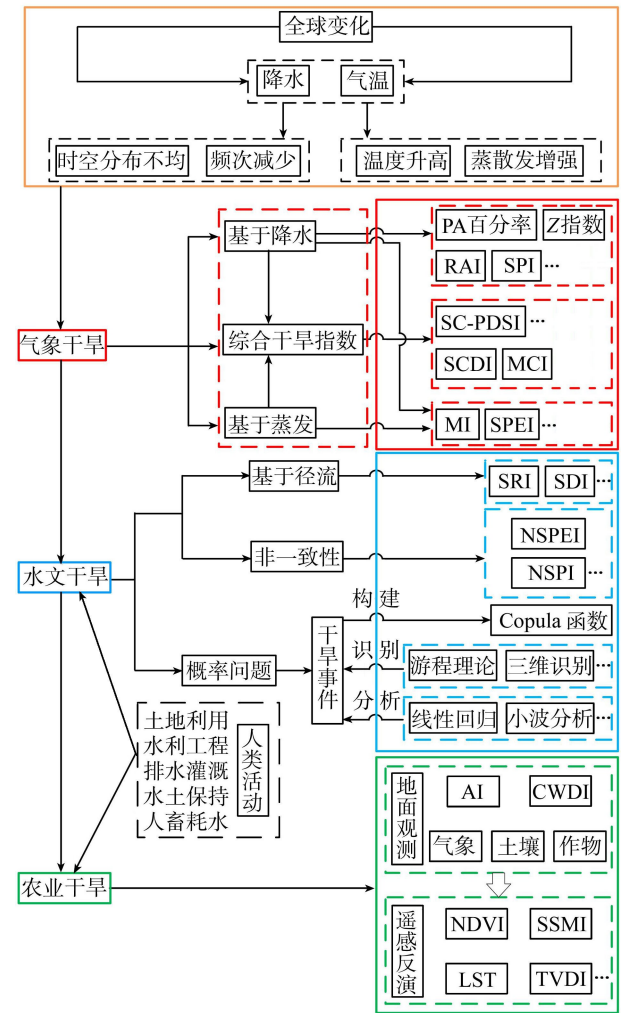


图1 长江流域不同干旱类型的影响因素和评估指标  
Fig. 1 Influencing factors and assessment indicators of different drought types in the Yangtze River Basin

## 2 干旱时空特征研究进展

长江流域干旱研究框架如图2所示。

### 2.1 干旱时间特征

20世纪70年代以来,长江流域的干旱时期主

表 1 不同干旱评估指标的构建原理和特点

Table 1 Construction principles and characteristics of different drought evaluation indexes

干旱指数	构建原理	优势	不足
SPEI	利用 log-logistic 分布拟合降水蒸散差序列,再标准化处理	综合考虑降水和蒸散作用对干旱的影响,具有多时间尺度性	对降水过于敏感,开始、结束时间不明确,描述干旱过程易中断和提前结束,冬季效果欠佳
SPI	利用 Gamma 分布拟合累积降水量,再进行标准化处理	资料获取容易,计算简单、稳定性高,具有多时间尺度特征	未考虑蒸散发对干旱的影响,忽略了降水量年内分布不均的问题
MI	降水蒸散差与蒸散量的比值	资料易获取,适用于作物生长季节、旬以上尺度干旱监测	无法将气候干燥和干旱区分开
MCI	考虑了不同时间尺度的干旱,由近 30 d 的 MI 和近 60、90、150 d 的 SPI 构成,同时添加了季节调节系数	改善了其他气象干旱指数对降水过程反应过于灵敏、干旱发展过程出现不合理跳跃问题,也改善了对重大干旱过程反应偏轻的问题	在实际应用中通常需根据当地旱情修正各组合分量系数
PA 百分率	降水距平与降水均值之比	资料易获取,计算简单	响应慢,反映干旱程度偏轻
Z 指数	利用 Pearson III 型分布拟合降水量,再进行标准化处理	资料易获取,计算简单,不涉及具体干旱机理,时空适应性强	未考虑气候变化下蒸散发对干旱的影响,时空差异大
SRI	假设径流量满足 Gamma 分布,进行标准化处理	资料易获取,计算简单,具备多时间尺度特性,可预测水文干旱	存在模型率定和检验问题
SDI	基于水文监测断面的历史月流量,利用 Gamma 分布拟合流量,再进行标准化处理	资料易获取,计算简单,具备多时间尺度特性,准确性较高	无法标识干旱频率发生地区
CWDI	基于蒸散发数据,以能量平衡为原理,充分考虑下垫面植被覆盖状况和地面风速、水汽压等气象要素	适用范围广、精度高,综合考虑了冠层温度及冠层与大气的微气象条件,适用于植被覆盖度高及小尺度区域旱情监测	蒸散发数据和计算参数难以获取,很大程度受气象条件影响
AI	潜在蒸散量与降水的比值	考虑了潜在蒸散发,包含了气温、辐射和风速等因素对水分的影响,物理意义明确,能更好地表达水分耗散程度	未考虑地形、土壤类型等因素的影响,对干旱格局的刻画存在误差,评估干旱程度偏重
TVDI	基于光学与热红外遥感数据进行植被覆盖区表层土壤水分反演	具有明确物理意义,计算简单,输入信息易获取,适合大尺度干旱监测	各种反演模型中的参数在不同季节和地区不够稳定,反演模型受其他因素影响较大

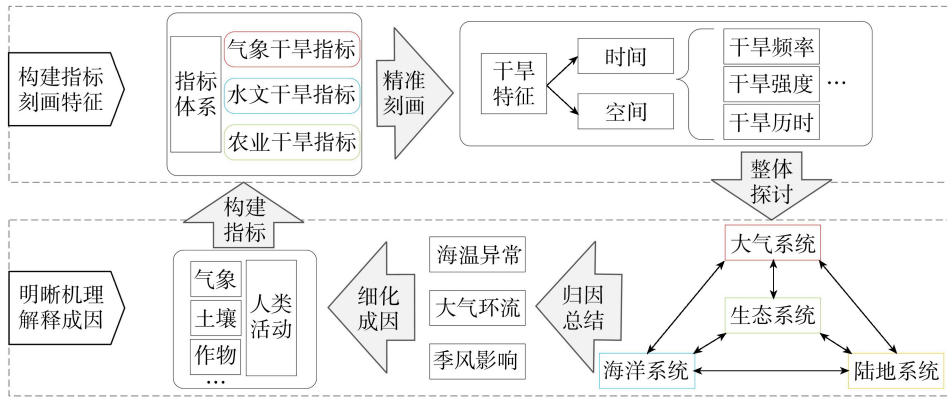


图 2 长江流域干旱研究框架

Fig. 2 Framework for drought study in the Yangtze River Basin

要集中在 1986—1988 年和 2006—2013 年,特别是 1986 年、1988 年和 2006 年均发生了较大强度的干旱;2013 年、2019 年和 2022 年均发生了严重的高温干旱复合事件;2022 年更是叠加全流域骤旱,使得多时间尺度下的干旱特征研究再次成为热点<sup>[47]</sup>。对于年际尺度而言,有研究表明 1956—2018 年长江流域干旱频率呈现上升趋势,多年平均干旱率为 18.21%;特别是 2001—2010 年,干旱率高达 26.5%,为多年平均值的 1.5 倍<sup>[48]</sup>。干旱历时和干旱强度也呈逐年增加的趋势,2022 年干旱重现期为 120 年一遇,平均干旱强度为 250 年一遇,如果同时

考虑干旱历时和平均强度,则预计为 400 年一遇,其规模远比 2006 年、2011 年、2013 年、2019 年长江流域干旱严重<sup>[49]</sup>;2000 年后长历时干旱事件发生次数明显增多,2000—2015 年累计发生长历时干旱事件 21 场,平均每年 1.5 场,平均干旱持续时间为 7.6 月<sup>[50]</sup>。有研究表明该区域短历时干旱风险在年尺度上呈进一步加剧的趋势<sup>[5]</sup>。对于季尺度而言,春、夏季干旱频率从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初均呈上升趋势,冬季干旱化趋势尤为明显;春、秋季干旱化趋势与降水量减少及气温上升相关;夏、冬季降水量增加使流域呈湿润化趋势,而干旱强度和



干旱历时呈增加趋势<sup>[51-52]</sup>。在未来演变趋势方面,多数学者认为尽管长江流域过去一段时间发生了严重干旱事件,但该地区正朝着湿润化方向转变,且降水与高温的复合干旱事件呈增加趋势。这种非典型干旱区的复合干旱现象应引起重视<sup>[52-53]</sup>。

## 2.2 干旱空间特征

从空间角度上看,长江流域干旱特征具有明显的空间异质性。就干旱频率而言,呈现出从上游向下游递减的趋势,长江流域北部地区干旱呈现短期高频发展趋势,而长江流域南部则呈现长期低频发展趋势,其中干旱频发地区主要位于上游的岷江流域<sup>[48]</sup>;1961—2019年长江上游的四川盆地及周边、云南和贵州北部地区干旱频率和强度呈逐渐上升趋势<sup>[51]</sup>,这无疑加剧了该区域水资源压力和生态风险。就干旱历时而言,长江源头和四川盆地西南部干旱历时较长,而金沙江和雅砻江上游及鄱阳湖南部干旱历时较短<sup>[34]</sup>,有研究表明未来长江流域将更易遭受短历时干旱的侵袭<sup>[54]</sup>。就干旱强度而言,汉江流域、嘉陵江流域、长江源头、金沙江流域下游区域干旱强度相对较高,这些地区在干旱事件发生时可能遭受更为严重的生态和经济影响<sup>[55]</sup>。在干旱季节变化方面,长江中下游年尺度、春季和秋季均呈干旱化趋势,季尺度下的干旱变化尤为显著;洞庭湖流域和鄱阳湖流域春季干旱频率最高,而汉江流域和金沙江流域中部地区冬季干旱频率最高<sup>[56]</sup>;夏、冬季长江中下游地区均呈湿润化趋势,冬季干旱累计发生频率大体呈西北向东南递减趋势。累计干旱历时和累计干旱强度分布相似,长江流域南部,包括洞庭湖流域南部、金沙江流域南部和鄱阳湖流域南部地区干旱历时呈缩短趋势。在未来趋势方面,多数研究认为长江流域西北部的干旱中心正以明显速度变旱,东北部的干旱中心未来有可能演变成湿润中心<sup>[48,52]</sup>。

## 3 干旱成因研究进展

干旱灾害的形成和发展过程不仅包含复杂的动力学过程及多尺度水分、能量循环机制,还涉及气象、农业、水文、生态和社会经济等多个领域(图2)。长江流域大部分区域既处于东亚季风的两类子系统——东亚热带季风和东亚副热带季风重叠影响区,又受西风环流、青藏高原季风的共同影响,加之生态系统的敏感性以及高强度人类活动等因素的影响,使长江流域干旱灾害具有明显的区域性和复杂性特征<sup>[57]</sup>。长江流域干旱事件的发生和发展通常涉及多时空尺度的交互耦合问题,导致干旱形成机制更加复杂。众多学者针对长江流域干旱形成机理及变化规律逐步开展深入研究,目前已在大气环流异常和海

温异常诱发气象干旱方面达成了共识<sup>[58-59]</sup>。

长江中下游地区属于典型东亚季风气候区,季风引起的大气环流变化影响显著,对气候变化的影响较为敏感。对长江中下游气象干旱成因的一系列研究表明,初夏来自北方的干冷气流与来自海洋的暖湿气流相遇,在该地区形成锋面系统。当锋面较弱时,长江中下游区域汛期降水急剧减少。到了盛夏,西太平洋副热带高压向西延伸和向北跳跃,长江中下游处于副热带高压带控制区域,受下沉气流影响,降水持续减少,温度升高,容易引发极端干旱现象。诸多学者也从不同角度对长江流域极端干旱事件成因展开了研究:从海温异常角度诊断了2010—2011年秋冬春连旱成因<sup>[60]</sup>;从大气环流异常角度分析了2013年夏季高温伏旱成因<sup>[61]</sup>;从水汽条件角度分析了2019年夏秋冬持续特大干旱成因<sup>[62]</sup>;从气象变化角度分析了2022年极端干旱特征和成因<sup>[49]</sup>。

长江流域上游位于中国西南部,其地势落差大,加大了气候的异常变幅,这种气候特征受云南东西两大不同地形(以元江谷地和云岭山脉南段宽谷为界)的影响,又叠加山地垂直地带性因素,导致部分地区气候条件受地形地貌影响显著,干旱灾害频发<sup>[63]</sup>。西南地区干旱灾害成因复杂,在特定地理和气候条件下,加之人类活动影响,使该地区旱灾强度日益加剧,温度、降水、土壤湿度和植被覆盖度等因素相互交织,共同构成了西南地区干旱灾害频发的主要原因<sup>[64]</sup>。此外,青海、西藏的荒漠化和云南、贵州的石漠化现象也是加剧区域性干旱的重要原因。退化后的土地易造成水土流失,且土壤含水量偏低,加之当地日光足、降水少且时空分布不均、降水量远小于蒸发量等气候特点,使得这些地区的土壤愈发干燥,进而加剧了区域的干旱化。此外,人口持续增长、经济高速发展以及城市化、工农业生产和人民生活用水持续增加使得水资源在数量、质量、供水保证率等方面面临严峻挑战。上述因素交织和叠加,进一步加重了未来应对特大干旱的压力<sup>[65]</sup>。

极端持续干旱事件因其复杂的成因和巨大的社会经济影响,成为近年来研究的热点和难点。根据相关气候预测研究,在气候变暖背景下,长江流域的较强副热带高压带是干旱形成的重要但非决定性环流背景。今后研究仍需要考虑更全面的物理过程,并引入更为系统的影响因素,深入探究干旱的成因、过程及其关键驱动机制<sup>[66]</sup>。

## 4 面临的挑战

a. 从干旱指标来看,由于长江流域干旱事件表

现出较强的空间异质性,如何识别影响该地区干旱的主要内部因子和外部强迫因子,针对不同地区地理特征,选择适合的干旱指数,成为正确评估长江流域干旱的关键。对于气象干旱,分析数据往往依赖于该区域的气象台站,在缺乏干旱监测站点的区域,如何弥补地面观测不足并提高监测数据精度和时效性,是当前研究面临的一大挑战。对于水文干旱,鉴于环境变化导致的水文条件非一致性,在变化条件下基于传统干旱指标的干旱监测并不稳定,如何构建新型非一致性水文干旱指标,进而评估变化环境下的水文干旱,是长江流域干旱研究的难题<sup>[35]</sup>。对于农业干旱,未来南方骤旱风险呈显著上升趋势<sup>[46]</sup>,并且因其发展的快速性和严重性,正逐步成为气候变化背景下长江流域农业生产的巨大威胁,如何快速识别骤旱,并对其形成一套独特的评估指标,是未来长江流域干旱研究的另一难点<sup>[67]</sup>。另外,干旱的形成通常是多因子相互作用、相互影响的结果,厘清不同类型干旱形成的多因子协同作用,构建气象-水文-农业综合干旱指标,量化不同因子对干旱形成的贡献率,应是干旱指标研究主要方向<sup>[68]</sup>。因此,在干旱指标研究方面应重视:①识别区域特征,选择合适的干旱指标;②构建非一致条件下的干旱指标,应对环境变化下的干旱评估;③完善综合指标评估体系,提高干旱指标全面性和适应性。

**b.** 从干旱特征来看,长江流域干旱研究往往聚焦于典型干旱事件,利用多种干旱指标剖析该区域干旱频率、历时和强度,进而揭示其时空分布特性。然而,当前研究在干旱定义上缺乏统一、综合的共识,使得对不同研究结果的解释和比较存在困难,进而导致在干旱特征研究中的不一致性<sup>[69]</sup>。实际情况中干旱事件(特别是重大干旱事件)大多具有持续性,当前研究正从基于单一时间尺度逐步向多尺度下的干旱特征分析转变。鉴于不同类型干旱在多尺度下传递时间及影响范围各异,气象、水文、农业干旱之间的传递同样具有时空特征<sup>[70]</sup>。当前对于干旱传递的概念和机制尚不清晰,致使量化干旱传递的时空特征存在障碍<sup>[71]</sup>。尽管当前在干旱时空特征演变趋势方面已有一定成果,但其预测结果的精准性仍受到多种因素制约。例如:干旱特征研究需要大量观测数据支撑,包括气象、水文、农业数据等,然而由于数据获取和处理的难度以及数据质量参差不齐,使得研究结果的可靠性受到一定程度影响。此外,数据分辨率也可能限制了对干旱特征的细节捕捉和分析,使得研究结果存在一定的局限性<sup>[72]</sup>。因此,在干旱特征研究方面应重视:①建立完善且明确的干旱定义;②深化干旱传递时空特征

研究;③提高检测数据质量和时效性。

**c.** 从干旱成因来看,当前长江流域干旱成因研究多在季风影响、海温异常和大气环流三大气象因素方面达成共识<sup>[59,73-74]</sup>。然而,在全球变化背景下,不能仅从单因素或某几个因素去认识干旱的形成和发展机理。以往许多干旱灾害影响和风险评估模型对全球变暖的响应机制缺乏深入考虑,需要进一步提高干旱主导因素及干旱风险影响因子对气候变化响应特征的认识<sup>[58]</sup>。近年来,复合干旱事件成为影响长江流域粮食安全和电力系统的重大灾害之一,因其驱动因素及相互作用较为复杂,且需同时满足在时间上的突发性和空间上的突变性,致使该研究样本量较少,进而导致其归因研究成果偏少<sup>[69]</sup>。如何定量描述复合干旱事件的再现动力因素,以及评估海温异常主导下区域的干旱同步性,均存在不小的挑战。此外,在干旱形势日趋复杂背景下,针对长江流域骤旱现象能否沿用传统的干旱评价指标体系<sup>[67]</sup>,以及不同区域干旱之间的传递归因仍需继续探讨。干旱对生态系统、粮食安全、水循环过程均存在明显的键影响期及其级联效应,对这种关键期特征和级联效应机制也需要进一步研究<sup>[58]</sup>。因此,在干旱成因研究方面应重视:①提高对环境变化下复合干旱响应的认识;②加强区域间干旱传递归因机制研究;③加强干旱的关键期特征和级联效应研究。

## 5 研究展望

### 5.1 提高多源数据综合利用水平

基础数据的丰富性和可靠性在很大程度上影响干旱评估的准确度。当前长江流域干旱研究多基于地面观测站点和卫星遥感监测,气象、水文站网提供的数据往往受站点密度的限制,获取的数据有限,且存在空间不连续问题;而高空间分辨率遥感数据因其卫星过境时间的间隔较长,往往难以满足短时间的监测需求。因此,在长江流域大范围干旱评估中,应提高多源数据综合利用水平:①在数据获取方面,通过增加站点密度,优化站点布局,获取更多、更准确的地面观测数据;利用遥感影像、水文模型模拟及数据同化等技术,使干旱监测逐步从传统基于站点数据监测向基于区域干旱监测方向发展<sup>[75]</sup>,提供更高质量、更精细化的干旱相关信息<sup>[76]</sup>。②在数据处理方面,针对不同数据源之间差异性和不确定性,加强与干旱相关的多源信息集成和融合技术的研究,通过优化数据处理算法和提高数据质量,更好地结合遥感、气象站点和野外实测等多种数据源信息。此外,开发高效数据存储和管理系统,为干旱监

测提供稳定可靠的数据支持。③在数据利用方面,建立基于多源信息的干旱指标,结合多种指数,从机理上考虑干旱胁迫的影响因素,开发综合指数,提高干旱评估能力,更全面准确地反映干旱发生和发展过程,进而提升综合干旱指数在实际干旱监测中的准确性和适用性。

## 5.2 完善干旱监测及预报体系

传统干旱监测通常基于地面站点观测数据,虽能较准确地反映周边区域干旱状况,但在刻画大范围干旱时空特征时,存在因站点密度有限而导致资料缺乏空间连续性的情况。遥感监测能紧密联系时空信息,通过连续数据识别干旱时空特征,但反演精度仍有提升空间。因此,为精确反映干旱状况并增强监测可靠性,亟须建立多要素干旱综合监测体系,通过开发多源信息的陆面数据同化系统,对多种来源的历史观测资料进行质量控制和同化处理,以构建更加准确、可靠的多要素综合干旱监测模型<sup>[73]</sup>。针对骤旱等发展迅速、机制复杂、涉及多个变量的干旱类型,其有效监测需要综合考虑站点资料和遥感数据,如降水、土壤湿度、温度、蒸散发及植被健康等多个指标的状态。在干旱预测方面,今后应系统研究大尺度下海-陆-气反馈效应对干旱发生发展及不同干旱类型形成过程的影响,提高模型模拟能力。同时,加强变化环境下全过程干旱监测和预报研究,改进相应预测模型,提高干旱预报精度并延长预见期,进而精准刻画干旱事件发生至消亡的动态演变过程<sup>[77]</sup>。此外,应加强人工智能、深度学习等方法的研究,以实现全过程智慧化干旱监测,对复杂成因的干旱事件进行动态监测,及早发现干旱的迹象。

## 5.3 深化人类活动对干旱的响应研究

长江流域是中国经济重心及活力所在,更是长江经济带高质量发展战略的重要依托。在社会经济发展和全球气候变化的双重压力下,该区域干旱问题日益凸显,人类活动对水资源需求急剧增长。然而,人类活动对不同类型干旱影响的检测和归因分析稍显不足,各驱动因子与干旱之间的关系有待深入研究,如人为因素中温室气体排放等对长江流域干旱的影响程度相较于自然因子的贡献率差异有待进一步厘清。此外,湿地退化、植被减少等生态破坏现象在人类活动推动下日益加剧,这些变化不仅削弱了生态系统的蓄水能力,还提高了长江流域生态干旱的风险<sup>[78]</sup>。因此,提升生态干旱监测能力对于减轻干旱对生态系统的损害至关重要。传统干旱指数往往难以准确表征生态系统的干旱特征,导致其在干旱监测和水资源管理中的应用受限,今后有必要进一步开发和研究生态干旱指数<sup>[79]</sup>。鉴于人类

活动对干旱的影响是一个涉及多领域和多尺度的复杂问题,今后需加强跨学科、跨领域合作,积极采取相关措施,减少人类活动对气候和环境的负面影响,以应对未来可能出现的新型干旱问题。

## 参考文献:

- [1] 石朋,唐汉,瞿思敏,等.西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J].水资源保护,2023,39(1):49-56. (SHI Peng, TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 49-56. (in Chinese))
- [2] GRILLAKIS M G. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 1245-1255.
- [3] 倪深海,顾颖,彭岳津,等.近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J].自然灾害学报,2019,28(6):176-181. (NI Shenhai, GU Ying, PENG Yuejin, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of drought disaster in China in recent seventy years [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 176-181. (in Chinese))
- [4] 苏越,路春燕,黄雨菲,等.1950—2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量分析[J].环境科学,2023,44(5):3003-3016. (SU Yue, LU Chunyan, HUANG Yufei, et al. Quantitative analysis of spatio-temporal evolution characteristics of seasonal average maximum temperature and its influence by atmospheric circulation in China from 1950 to 2019 [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 3003-3016. (in Chinese))
- [5] ZOU Kaijie, CHENG Lei, ZHANG Quan, et al. Detecting multidecadal variation of short-term drought risk by combining frequency analysis and Fourier transformation methods: a case study in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130803.
- [6] GUAN Yansong, GU Xihui, SLATER L J, et al. Tracing anomalies in moisture recycling and transport to two record-breaking droughts over the Mid-to-Lower Reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127787.
- [7] CHEN Shaodan, ZHANG Liping, ZHANG Yanjun, et al. Evaluation of tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite precipitation products for drought monitoring over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(1): 53-67.
- [8] 王晓利,张春艳,侯西勇.1961—2017年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估[J].生态学报,2019,39(13):4647-4659. (WANG Xiaoli, ZHANG Chunyan, HOU Xiyong. Spatial-temporal characteristics

- and hazard risks of meteorological drought in Circum-Bohai-Sea region from 1961 to 2017[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4647-4659. (in Chinese))
- [9] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应: III. 基于降水量距平百分率的南方地区季节性干旱时空特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 397-406. (HUANG Wanhua, SUI Yue, YANG Xiaoguang, et al. Characteristics and adaptation of seasonal drought in southern China under the background of climate change: III. spatiotemporal characteristics of seasonal drought in southern China based on the percentage of precipitation anomalies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 397-406. (in Chinese))
- [10] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(5): 1043-1052. (LI Bozhen, ZHOU Guangsheng. Advance in the study on drought index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 1043-1052. (in Chinese))
- [11] 杨肖丽, 罗定, 叶周兵, 等. 基于SPI-RRV指数中国气象干旱及其风险时空演变特征研究[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 44-51. (YANG Xiaoli, LUO Ding, YE Zhoubing, et al. Study on spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought and its risk in China based on SPI-RRV index[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 44-51. (in Chinese))
- [12] LI Ronghui, CHEN Nengcheng, ZHANG Xiang, et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 280: 107809.
- [13] HUANG Shuzhe, ZHANG Xiang, YANG Long, et al. Urbanization-induced drought modification: example over the Yangtze River Basin, China[J]. *Urban Climate*, 2022, 44: 101231.
- [14] 冯平, 任明雪, 李建柱. 基于蒸散发干旱指数的子牙河流域干旱时空变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 35-43. (FENG Ping, REN Mingxue, LI Jianzhu. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of droughts in the Ziya River Basin based on evapotranspiration-related drought indexes [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 35-43. (in Chinese))
- [15] 李帅, 曾凌, 张存杰, 等. 长江上游近120年来气象干旱和水文干旱时空变化关系及其传递特征[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(3): 263-277. (LI Shuai, ZENG Ling, ZHANG Cunjie, et al. Spatio-temporal variations and propagation from meteorological to hydrological drought in the upper Yangtze River basin over last 120 years[J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(3): 263-277. (in Chinese))
- [16] 袁飞, 章益棋, 刘懿, 等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 46-52. (in Chinese))
- [17] 朱烨, 靳鑫桐, 刘懿, 等. 基于短时间尺度自适应帕尔默干旱指数的中国干旱演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 124-130. (ZHU Ye, JIN Xintong, LIU Yi, et al. Drought characteristics analysis in China based on self-calibrating Palmer drought severity index in a short time scale [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 124-130. (in Chinese))
- [18] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese)).
- [19] WEI Hongfei, LIU Xiuguo, HUA Weihua, et al. Copula-based joint drought index using precipitation, NDVI, and runoff and its application in the Yangtze River Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4484.
- [20] BACHMAIR S, STAHL K, COLLINS K, et al. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society [J]. *WIREs Water*, 2016, 3(4): 516-536.
- [21] BEGUERÍA S, VICENTE-SERRANO S M, REIG F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3001-3023.
- [22] ŞEN Z. Fuzzy standardized precipitation index (FSPI) for drought early warning procedure [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, 155(2): 1281-1287.
- [23] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [24] 董前进, 谢平. 水文干旱研究进展[J]. *水文*, 2014, 34(4): 1-7. (DONG Qianjin, XIE Ping. Advances in hydrological drought research [J]. *Journal of China hydrology*, 2014, 34(4): 1-7. (in Chinese))
- [25] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02405.
- [26] 吴燕锋, 章光新. 松花江区气象水文干旱演变特征[J]. *地理科学*, 2018, 38(10): 1731-1739. (WU Yanfeng,



- ZHANG Guangxin. Spatio-temporal patterns of meteorological and hydrological drought in the Songhua river area from 1961 to 2010 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1731-1739. (in Chinese))
- [27] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))
- [28] ZHANG Dan, CHEN Peng, ZHANG Qi, et al. Copula-based probability of concurrent hydrological drought in the Poyang lake-catchment-river system (China) from 1960 to 2013 [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 773-784.
- [29] FAIZ M A, ZHANG Yongqiang, TIAN Xiaoqiang, et al. Time series analysis for droughts characteristics response to propagation [J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(3): 1561-1575.
- [30] 杨少康, 刘冀, 张特, 等. 汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 143-151. (YANG Shaokang, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 143-151. (in Chinese))
- [31] LI Fupeng, WANG Zhengtao, CHAO Nengfang, et al. Assessing the influence of the three gorges dam on hydrological drought using GRACE data [J]. *Water*, 2018, 10(5): 669.
- [32] 崔豪, 江善虎, 任立良, 等. 基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 71-78. (CUI Hao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. A non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 71-78. (in Chinese))
- [33] 荣艳淑, 胡玉恒, 冯瑞瑞, 等. 广义相加模型在乌江夏季径流预报中的应用 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(2): 121-126. (RONG Yanshu, HU Yuheng, FENG Ruirui, et al. Application of generalized additive model in summer runoff forecasting of Wujiang Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(2): 121-126. (in Chinese))
- [34] 黄梦杰, 贺新光, 卢希安, 等. 长江流域的非平稳 SPI 干旱时空特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1597-1611. (HUANG Mengjie, HE Xinguang, LU Xian, et al. Spatio-temporal characteristics of drought in the Yangtze River Basin using non-stationary standardized precipitation index [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(7): 1597-1611. (in Chinese))
- [35] SONG Zhihong, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. The development of a nonstationary standardized precipitation index using climate covariates: a case study in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125115.
- [36] SUN Peng, GE Chenhao, YAO Rui, et al. Development of a nonstationary standardized precipitation evapotranspiration index (NSPEI) and its application across China [J]. *Atmospheric Research*, 2024, 300: 107256.
- [37] 杨肖丽, 崔周宇, 任立良, 等. 1966—2015 年长江流域水文干旱时空演变归因 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 349-359. (YANG Xiaoli, CUI Zhouyu, REN Liliang, et al. Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River Basin from 1966 to 2015 [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 349-359. (in Chinese))
- [38] 柳利利, 韩磊, 韩永贵, 等. 1989—2019 年西北地区干燥度指数时空变化及其对气候因子的响应 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 4050-4058. (LIU Lili, HAN Lei, HAN Yonggui, et al. Spatio-temporal variations of aridity index and its response to climate factors in Northwest China during 1989-2019 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 4050-4058. (in Chinese))
- [39] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应: IV. 基于作物水分亏缺指数的玉米干旱时空特征 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2590-2598. (SUI Yue, HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, et al. Characteristics and adaptation of seasonal drought in southern China under the background of global climate change: IV. spatiotemporal characteristics of drought for maize based on crop water deficit index [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2590-2598. (in Chinese))
- [40] LIU Yi, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. A new physically based self-calibrating Palmer drought severity index and its performance evaluation [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(13): 4833-4847.
- [41] YUAN Yanping, YE Xuchun, LIU Tingting, et al. Drought monitoring based on temperature vegetation dryness index and its relationship with anthropogenic pressure in a subtropical humid watershed in China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110584.
- [42] UM M J, KIM Y, JUNG K, et al. Evaluation of drought propagations with multiple indices in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115494.
- [43] BIAN Zunjian, ROUJEAN J L, FAN Tengyuan, et al. An angular normalization method for temperature vegetation dryness index (TVDI) in monitoring agricultural drought [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 284: 113330.
- [44] FOK H S, HE Q. Water level reconstruction based on satellite gravimetry in the Yangtze River Basin [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(7): 286.

- [45] 王思琪,张翔,陈能成. 三种复合干旱指数在我国三大农业主产区的适用性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2020,38(1):243-254. (WANG Siqi, ZHANG Xiang, CHEN Nengcheng. Applicability analysis of three compound drought indexes in three major agricultural production areas in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020,38(1):243-254. (in Chinese))
- [46] 熊立华,李姝仪,查悉妮. 基于多源数据的长江流域1982—2022年骤旱事件时空演变[J]. 水科学进展, 2024,35(1):24-37. (XIONG Lihua, LI Shuyi, ZHA Xini. Temporal and spatial evolution of flash drought events in the Yangtze River Basin from 1982 to 2022 based on multi-source data[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1):24-37. (in Chinese))
- [47] CHEN Shaodan, ZHANG Liping, LIU Xin, et al. The use of SPEI and TVDI to assess temporal-spatial variations in drought conditions in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China[J]. Advances in Meteorology, 2018,2018(1):9362041.
- [48] 刘君龙,袁喆,许继军,等. 长江流域气象干旱演变特征及未来变化趋势预估[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10):28-36. (LIU Junlong, YUAN Zhe, XU Jijun, et al. Meteorological drought evolution characteristics and future trends in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10):28-36. (in Chinese))
- [49] LIU Yi, YUAN Shanshui, ZHU Ye, et al. The patterns, magnitude, and drivers of unprecedented 2022 megadrought in the Yangtze River Basin, China [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(11):114006.
- [50] 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 Cuiling, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Characteristics of drought events using three-dimensional graph connectedness recognition method in the Yangtze River Basin, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11):131-139. (in Chinese))
- [51] 杨少康,刘冀,魏榕,等. 长江上游流域生长季气象干旱分异特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2):184-191. (YANG Shaokang, LIU Ji, WEI Rong, et al. Differentiation characteristics of meteorological drought in the growing season in the upper reaches of the Yangtze River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):184-191. (in Chinese)).
- [52] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(2):70-77. (JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):70-77. (in Chinese))
- [53] 田晴,陆建忠,陈晓玲,等. 基于长时序CCI土壤湿度数据的长江流域农业干旱时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(2):472-481. (TIAN Qing, LU Jianzhong, CHEN Xiaoling, et al. Spatio-temporal evolution of agricultural drought in the Yangtze River Basin based on long-term CCI soil moisture data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2):472-481. (in Chinese))
- [54] GUO Wenwen, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Precipitation and vegetation transpiration variations dominate the dynamics of agricultural drought characteristics in China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 898:165480.
- [55] SHI Mengqi, YUAN Zhe, SHI Xiaoliang, et al. Drought assessment of terrestrial ecosystems in the Yangtze River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 362:132234.
- [56] DUAN Ao, ZHONG Yulong, XU Guodong, et al. Quantifying the 2022 extreme drought in the Yangtze River Basin using GRACE-FO [J]. Journal of Hydrology, 2024, 630:130680.
- [57] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3):500-521. (ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3):500-521. (in Chinese))
- [58] 张强,李栋梁,姚玉璧,等. 干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望[J]. 气象学报, 2024, 82(1):1-21. (ZHANG Qiang, LI Dongliang, YAO Yubi, et al. Progress and prospect of the research on drought formation, prediction, and related risk assessment [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2024, 82(1):1-21. (in Chinese))
- [59] HE Hai, CAO Rui, WU Zhiyong, et al. Diagnosing anomalous characteristics of atmospheric water cycle structure during seasonal-scale drought events: a case study in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(2):103-113.
- [60] JIN Dachao, GUAN Zhaoyong, TANG Weiya. The extreme drought event during winter-spring of 2011 in east China: combined influences of teleconnection in midhigh latitudes and thermal forcing in maritime continent region [J]. Journal of Climate, 2013, 26(20):8210-8222.
- [61] 夏扬,徐海明. 2013年长江中下游地区夏季高温事件的环流特征及成因[J]. 气象科学, 2017, 37(1):60-69. (XIA Yang, XU Haiming. Circulation characteristics and causes of the summer extreme high temperature event in the middle and lower reaches of the Yangtze River of 2013 [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(1):60-69. (in Chinese))
- [62] 高琦,徐明. 2019年长江中下游伏秋连旱的异常特征

- 分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 93-99. (GAO Qi, XU Ming. Characteristics of abnormal continuous drought in summer and autumn in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2019 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(4): 93-99. (in Chinese))
- [63] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 632-639. (HAN Lanying, ZHANG Qiang, YAO Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 632-639. (in Chinese))
- [64] 葛元凯, 赵龙龙, 陈劲松, 等. 1983—2020 年西南地区气象干旱时空演变趋势及干旱事件识别[J]. 生态环境学报, 2023, 32(5): 920-932. (GE Yuankai, ZHAO Longlong, CHEN Jinsong, et al. Spatio-temporal evolution trend of meteorological drought and identification of drought events in southwest China from 1983 to 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(5): 920-932. (in Chinese))
- [65] 马明卫, 韩宇平, 严登华, 等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 11-21. (in Chinese))
- [66] LYU Zhuozhuo, GAO Hui, GAO Rong, et al. Extreme characteristics and causes of the drought event in the whole Yangtze River Basin in the midsummer of 2022 [J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14(5): 642-650.
- [67] ZHANG Jing, ZHANG Min, YU Jialu, et al. Identifying and characterizing short-term drought with rapid onset based on the SAPEI in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101629.
- [68] RAJSEKHAR D, SINGH V P, MISHRA A K. Multivariate drought index: an information theory based approach for integrated drought assessment [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 164-182.
- [69] 郝增超, 陈阳. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(2): 360-393. (HAO Zengchao, CHEN Yang. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the earth system perspective [J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54(2): 360-393. (in Chinese))
- [70] 董蓉蓉, 粟晓玲, 屈艳萍, 等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 61-70. (DONG Rongrong, SU Xiaoling, QU Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 61-70. (in Chinese))
- [71] 田丰, 杨建华, 刘雷震, 等. 地理学视角的干旱传播概念、特征与影响因素研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 173-184. (TIAN Feng, YANG Jianhua, LIU Leizhen, et al. Progress of research on the conception, characteristic, and influencing factors of drought propagation from the perspective of geographic sciences [J]. Progress in Geography, 2022, 41(1): 173-184. (in Chinese))
- [72] MUCIA A, BONAN B, ZHENG Yongjun, et al. From monitoring to forecasting land surface conditions using a land data assimilation system: application over the contiguous United States [J]. Remote Sensing, 2020, 12(12): 2020.
- [73] GAO Chao, LIU Lei, ZHANG Silong, et al. Spatiotemporal patterns and propagation mechanism of meteorological droughts over Yangtze River Basin and Pearl River Basin based on complex network theory [J]. Atmospheric Research, 2023, 292: 106874.
- [74] SUN Fengyun, MEJIA A, ZENG Peng, et al. Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 134076.
- [75] CHAO Nengfang, WAN Xuewen, ZHONG Yulong, et al. Reconstructing a new terrestrial water storage deficit index to detect and quantify drought in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 129972.
- [76] 肖渝, 孙若辰, 王倩, 等. 不同降水驱动的 SWAT 模型参数不确定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 43-52. (XIAO Yu, SUN Ruochen, WANG Qian, et al. Study on parameter uncertainty in SWAT model driven by different precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 43-52. (in Chinese))
- [77] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [78] 姜田亮, 屈艳萍, 吕娟, 等. 长江流域六省(市)夏秋季生态干旱综合强度评估[J]. 水利学报, 2023, 54(7): 869-879. (JIANG Tianliang, QU Yanping, LYU Juan, et al. Assessment of comprehensive intensity of ecological drought in summer and autumn in six provinces (city) of Yangtze River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(7): 869-879. (in Chinese))
- [79] ZHANG Lu, CHANG Jianxia, GUO Aijun, et al. Ecological drought evolution characteristics under different climatic regions in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2024, 629: 130573.

(收稿日期: 2024-03-30 编辑: 施业)