

基于分级恢复阈值的长江流域骤发干旱识别

薛联青^{1,2}, 张泽华¹, 刘远洪³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031;
3. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为探究恢复阈值设定对骤发干旱识别的影响以及骤发干旱时空特征, 采用 1979—2022 年 ERA5-Land 土壤水分数据, 设定第 20、30 和 40 百分位数的分级恢复阈值识别了长江流域骤发干旱事件。结果表明: 长江流域骤发干旱频次以及强度较高区域均位于四川盆地西部及长江流域东南部区域, 骤发干旱频次较低区域的骤发干旱事件平均持续时间更长; 1979—2022 年长江流域骤发干旱特征指标均呈现上升趋势, 2022 年骤发干旱持续时间及强度达到最大值; 长江流域骤发干旱频次对恢复阈值最敏感, 骤发干旱平均持续时间受恢复阈值影响表现出上游向中下游逐渐增大的特征, 骤发干旱平均强度受恢复阈值影响程度最低; 随恢复阈值升高, 骤发干旱事件频次、平均持续时间上升, 平均强度降低; 低恢复阈值适用于识别短历时骤发干旱, 高恢复阈值适用于识别季节尺度的骤发干旱。

关键词: 骤发干旱; 干旱识别; 土壤水分百分位数; 恢复阈值; 长江流域

中图分类号: P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 6933(2025)03 - 0119 - 08

Identification of flash droughts in the Yangtze River Basin based on graded recovery thresholds//XUE Lianqing^{1,2}, ZHANG Zehua¹, LIU Yuanhong³(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China; 3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To explore the impact of recovery threshold settings on flash drought identification and the spatiotemporal characteristics of flash droughts, using ERA5-Land soil moisture data from 1979 to 2022, the graded recovery thresholds were set at the 20th percentile, the 30th percentile, and the 40th percentile to identify flash drought events in the Yangtze River Basin. The results indicated that areas with a higher frequency and intensity of flash droughts in the Yangtze River Basin were located in the western part of the Sichuan Basin and the southeastern part of the Yangtze River Basin, while the average duration of flash drought events in areas with a lower frequency of flash droughts tended to be longer. The indicators of flash drought characteristics in the Yangtze River Basin showed an increasing trend from 1979 to 2022, with the duration and severity of flash droughts reaching their maximum values in 2022. The frequency of flash droughts in the Yangtze River Basin was most sensitive to the recovery threshold. The average duration of flash droughts was affected by the recovery threshold, gradually varying from the upper reaches to the middle and lower reaches, while the average intensity was the least affected. As the recovery threshold increased, the frequency and average duration of flash droughts increased, while the average intensity decreased. Lower recovery thresholds were more suitable for identifying short-duration flash droughts, whereas higher recovery thresholds were suitable for identifying flash droughts of seasonal scales.

Key words: flash drought; drought identification; soil moisture percentile; recovery threshold; the Yangtze River Basin

骤发干旱是短期内旱情快速加剧的干旱事件^[1], 与缓慢演变的持续性干旱相比, 骤发干旱的可预测性更低, 导致采取干旱应急防御措施的时间大大减少, 可能会对农业生产和社会经济发展造成

较大的不利影响, 对水安全、生态系统安全和环境可持续发展等方面造成危害^[2-3]。2012 年夏季美国中部大平原大规模骤发干旱导致农作物产量严重受损, 经济损失超过 300 亿美元^[4-5]。近年来骤发干旱

基金项目: 新疆生产建设兵团科技合作项目(2022BC001); 国家重点研发计划项目(2023YFC3206804); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201179); 江苏省水利科技项目(2024045)
作者简介: 薛联青(1973—), 女, 教授, 博士, 主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn
通信作者: 刘远洪(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事生态水文研究。E-mail: lyh910926@163.com

在全球范围内频繁发生^[6],使其成为干旱研究的焦点之一。已有研究表明,在全球气候变暖加剧,极端气象事件频发的背景下,全球范围内次季节性干旱事件加剧速度呈现出上升趋势,在联合国政府间气候变化专门委员会极端事件特别报告划分的全球26个子区域中,有超过74%区域的干旱特征呈现出由缓发干旱向骤发干旱转变的趋势^[7]。骤发干旱的定义主要包含旱情的快速发展、严重的水分亏缺程度和足以造成不利影响的干旱历时^[8],现有研究结合这三方面内容,主要采用降水、蒸散发和土壤水分3类干旱指标识别骤发干旱^[9]。土壤水分受到降水亏缺和蒸发作用的综合影响,并参与植被根系水分吸收利用过程,其动态变化能够直接反映陆面干湿状况,是干旱监测的重要指标^[10],因此土壤水分指标被广泛应用于骤发干旱识别。然而,基于土壤水分变化过程的骤发干旱定义识别方法尚不统一,特别是不同研究在骤发干旱恢复阈值的设定上存在差异。Yuan等^[7,11]将土壤水分百分位数以每候不低于第5百分位数的下降速度从第40百分位数以上降至第20百分位数以下的时期定义为骤发干旱爆发阶段,当土壤水分百分位数下降速度不满足要求或开始上升时,进入骤发干旱恢复阶段,并设定骤发干旱的恢复阈值为第20百分位数。Yang等^[12]为确保土壤水分百分位数恢复到第20百分位数阈值后旱情得到完全缓解,限制土壤水分须持续16 d高于第20百分位数的恢复阈值,并以此来确定骤发干旱的结束时刻。Liu等^[13]则将骤发干旱的开始阈值和恢复阈值均设定为第40百分位数。上述基于土壤水分变化过程的骤发干旱研究对爆发阶段或开始阶段定义较为统一,但对骤发干旱恢复阈值的设定存在差异。因恢复阈值对骤发干旱的终止时刻起决定作用,故不同的恢复阈值设定会影响骤发干旱各项特征,为骤发干旱识别带来不确定性。目前针对性分析恢复阈值对骤发干旱识别影响的研究尚不多见,因此有必要探究不同恢复阈值设定对骤发干旱识别的影响,为科学设定骤发干旱恢复阈值提供理论依据。

对我国区域骤发干旱的研究普遍表明,我国南部湿润地区的骤发干旱发生频率最高,骤发干旱发展速度较北方半干旱地区更快^[11,14-16]。长江流域位于我国中南部地区,是我国最重要的经济区域之一,21世纪以来长江流域极端干旱和高温热浪事件频发^[17-18],为流域水安全、粮食安全和社会经济可持续发展造成威胁。现阶段对长江流域内气象干旱、水文干旱和农业干旱特征的研究较多^[19-20],但针对长江流域骤发干旱特征的研究较少,有必要对流域内骤发干

旱时空特征进行深入探究。鉴于此,本文基于分级恢复阈值识别长江流域骤发干旱,探究恢复阈值对骤发干旱识别造成的不确定性,以期更加系统地理解长江流域骤发干旱的时空特征,为长江流域骤发干旱预警防治以及水资源规划管理提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域地理位置处于24°30'N~35°45'N、90°33'E~122°25'E,流域面积达180万km²,约占国土总面积的18.8%,流域横跨青藏高寒区、西南热带季风区和华中亚热带季风区,气候条件十分复杂^[21],主要位于湿润区和半湿润区。长江流域包括成都平原、江汉平原、洞庭湖平原、鄱阳湖平原和太湖平原等粮食生产基地,是我国重要的粮食产地之一。为全面分析长江流域骤发干旱恢复阈值给骤发干旱识别带来的不确定性,结合长江流域水文特性,参考董耀华等^[22]研究中的长江水系划分,将研究区划分为9个子流域:雅砻江水系(子流域1)、岷江水系(子流域2)、嘉陵江水系(子流域3)、汉江水系(子流域4)、太湖流域(子流域5)、鄱阳湖水系(子流域6)、洞庭湖水系(子流域7)、乌江水系(子流域8)、长江干流水系(子流域9)(图1)。

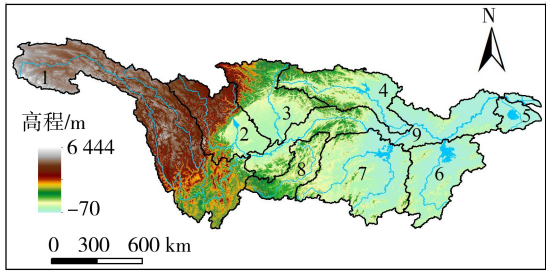


图1 长江流域高程及子流域划分

Fig. 1 Elevation and sub-basin division in the Yangtze River Basin

1.2 数据来源

1979—2022年长江流域土壤水分数据来源于ERA5-Land数据集(<https://climate.copernicus.eu/>)。ERA5-Land是由欧洲中期天气预报中心提供的全球陆地表面再分析数据集,其在ERA5的陆面模型基础上,结合高分辨率网格和大气强迫生成^[23]。经位于全国245个观测站点实测得到的中国农业气象土壤水分数据集(V1.0,1981—2010)验证,结果表明该数据集的土壤水分数据与观测值基本吻合,并能较好地反映出土壤水分的多尺度变化特征,具有较好的精度,能够满足包括不同气候区及海拔特征的大流域范围土壤水分研究需求^[24]。

ERA5-Land土壤水分数据时间分辨率为1 h,空

间分辨率为 0.1° ,以土层体积土壤含水量表示土壤水分,分为 $0\sim 7$ 、 $>7\sim 28$ 、 $>28\sim 100$ 、 $>100\sim 289\text{ cm}$ 4 层深度。考虑到骤发干旱研究需求,选取前三层,即 $0\sim 100\text{ cm}$ 的根区平均土壤水分,并将其转换为候(5 d)平均土壤水分百分位数用于识别骤发干旱过程,处理过程为:①将前三层的体积土壤含水量按土层厚度加权平均,得到根区 1 m 内逐小时土壤水分数据;②将小时尺度的根区土壤水分数据处理至候尺度,得到候平均土壤水分数据;③计算特定候的土壤水分百分位数。为了消除季节性趋势的影响,并有效扩展序列样本数,在计算当年特定候的土壤水分百分位数时,将该候及其前一候和后一候的历年土壤水分按升序排列,从而计算土壤水分百分位数。

2 研究方法

2.1 骤发干旱识别

考虑到骤发干旱主要在生长季对作物及植被产生影响^[25-26],将每年生长季节划分为 42 候,选取历年生长季节(4—10 月)的候平均土壤水分百分位数变化过程识别骤发干旱事件。参考 Ford 等^[27]的研究,当土壤含水率低于第 40 百分位数时,表明土壤开始出现由正常转干的迹象,可作为干旱过程的上边界。Svoboda 等^[28]的研究认为第 20 百分位数和第 30 百分位数分别代表了中等干旱阈值和异常干燥阈值,基于此,本文将第 20 百分位数和第 30 百分位数设为骤发干旱阶段性恢复阈值,第 40 百分位数设为骤发干旱由干燥状况转为正常状况的恢复阈值,代表了旱情的结束。

本文基于游程理论设置分级恢复阈值识别骤发干旱,参考 Yuan 等^[7]对骤发干旱的定义及 Xi 等^[14]对骤发干旱爆发和恢复阶段的划分,将骤发干旱划分为开始阶段和持续恢复阶段。骤发干旱事件识别原则为:①候平均土壤水分百分位数由第 40 百分位数以上下降至第 20 百分位数以下,平均下降速率不低于 5 百分位数/候;当候平均土壤水分百分位数下降至第 20 百分位数以下之后,若土壤水分百分位数开始上升或平均下降速率不满足要求,骤发干旱开始阶段结束。②开始阶段结束后,进入持续恢复阶段,当土壤水分百分位数上升到对应的恢复阈值,基于该恢复阈值的骤发干旱事件结束。③骤发干旱历时不短于 4 候,以排除短期干燥事件。

以上原则可以确保土壤水分以较快速率由正常状况转变为中等干旱状况,并且骤发干旱持续时间不会过短,以此避免对短期干燥事件的识别。以 2022 年长江流域 31.8°N 、 110.4°E 格点处候平均土壤水分百分位数变化过程为例,展示基于分级恢复

阈值的骤发干旱识别,如图 2 所示,图中 t_{0-1} 至 t_0 为土壤水分百分位数下降至第 40 百分位数以下的过程, t_0 为骤发干旱起点, t_{0+2} 时土壤水分百分位数下降至第 20 百分位数以下,此后开始上升, t_{0+2} 即为开始阶段的结束时刻, t_1 、 t_2 、 t_3 分别为第 20、30、40 百分位数恢复阈值对应的骤发干旱结束点, T_1 、 T_2 、 T_3 为各级恢复阈值对应的持续恢复阶段。

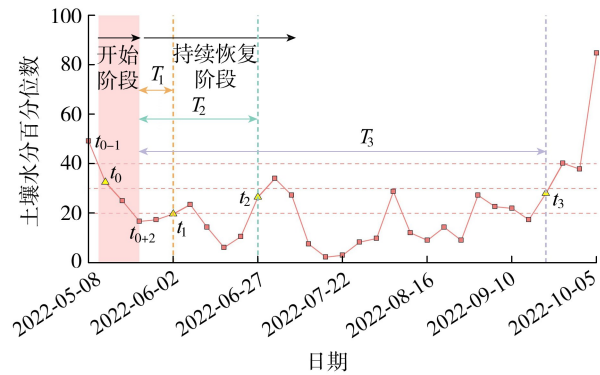


图 2 基于分级恢复阈值的骤发干旱识别

Fig. 2 Identification of flash drought based on graded recovery thresholds

2.2 骤发干旱特征指标

基于识别的骤发干旱事件,进一步计算骤发干旱的各项特征指标,包括频次、持续时间以及强度。考虑到骤发干旱在候尺度上进行识别,其持续时间变化范围较大,干旱烈度指标与持续时间之间存在较明显的正相关性,而干旱强度指标能够综合反映干旱事件的整体影响程度,在持续时间差异较大的骤发干旱事件之间也具有可比性,故采用了强度指标而非烈度指标。频次 F 为研究时段内骤发干旱的发生次数;持续时间 D 为骤发干旱事件的开始阶段和持续恢复阶段的总历时,单位为候;强度 I 为骤发干旱持续时间内土壤水分百分位数与第 40 百分位数之差的平均值,即为干旱烈度除以持续时间,强度代表骤发干旱持续时间内土壤水分亏缺的平均值,单位为百分位数/候, I 值越大,骤发干旱期间土壤水分亏缺情况越严重。

2.3 统计分析

采用变异系数对骤发干旱特征指标的离散程度进行客观比较,以便消除各特征指标量纲的影响,进而分析恢复阈值设定对各项指标造成的不确定性差异。在分析骤发干旱时间变化特征时,为了减少异常值的干扰,采用 Sen's 斜率估计结合 Mann-Kendall 趋势检验方法分析骤发干旱特征指标年际变化趋势与显著性。通过计算皮尔逊相关系数分析骤发干旱强度与持续时间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 长江流域骤发干旱时空变化特征

3.1.1 空间特征

为分析长江流域骤发干旱空间特征,在网格尺度上基于分级恢复阈值识别长江流域 1979—2022 年骤发干旱事件,统计全流域骤发干旱各项特征指标,得到各级恢复阈值识别的骤发干旱发生频次、平均持续时间以及平均强度空间分布情况,如图 3 所示。由图 3 可见,在各级恢复阈值下长江流域骤发干旱特征指标表现出一致的空间分布特征。从骤发干旱频次分布来看,第 20、30、40 百分位数恢复阈值下长江流域骤发干旱频发区域均位于四川盆地西部及长江流域东南部区域。在第 40 百分位数恢复阈值下,1979—2022 年骤发干旱频次高达 50~60。四川盆地、汉江水系、雅砻江水系北部地区和长江下游流域表现出较低的骤发干旱频次,在各级恢复阈值下研究时段内的骤发干旱频次均低于 30。四川盆地的骤发干旱频次相较于周边地区明显偏低,表明该地区生长季土壤水分较周边地区稳定,发生骤发干旱事件的可能性相对较低。骤发干旱平均持续时间的空间分布特征与频次分布相反,骤发干旱平均持续时间相对较长的区域与上述的骤发干旱低频次地区吻合,这说明骤发干旱频次较低的区域遭遇的骤发干旱事件平均持续时间更长。其中,汉江流域东部地区骤发干旱平均持续时间最长,部分

区域平均持续时间达到 18 候以上,且随着恢复阈值上升,骤发干旱平均持续时间较长的区域显著扩张,表明该区域骤发干旱持续时间对恢复阈值响应较为敏感。骤发干旱平均强度空间分布与频次分布总体类似,但在骤发干旱频次整体较低的汉江水系存在强度值高低交错分布的情况,表明该区域的骤发干旱特征空间差异性显著。

3.1.2 时间特征

基于识别出的 1979—2022 年长江流域骤发干旱事件,计算得到各级恢复阈值对应的骤发干旱流域平均频次、流域平均持续时间以及流域平均强度的年均值序列,并进行趋势分析,结果如图 4 所示。由图 4 可见,1979—2022 年长江流域整体骤发干旱特征指标均呈现上升趋势。在第 20、30、40 百分位数的恢复阈值下,骤发干旱流域平均频次上升率分别为 0.30%、0.35%、0.35%,均未通过显著性检验;骤发干旱流域平均持续时间上升率分别为 2.0%、3.3%、3.9%,且均通过了 95%置信水平的显著性检验;骤发干旱流域平均强度上升率分别为 2.2%、2.1%、2.4%,均未通过显著性检验。结果说明,1979—2022 年长江流域骤发干旱愈加频发且持续时间显著增加,骤发干旱强度也在逐步升高,骤发干旱风险逐渐增大。由图 4(b)(c)可见,2022 年长江流域整体骤发干旱持续时间和强度均达到了 1979 年以来的最大值,流域平均持续时间达到 11.6~13.5 候,流域平均强度达到 27.9~30.1 百分

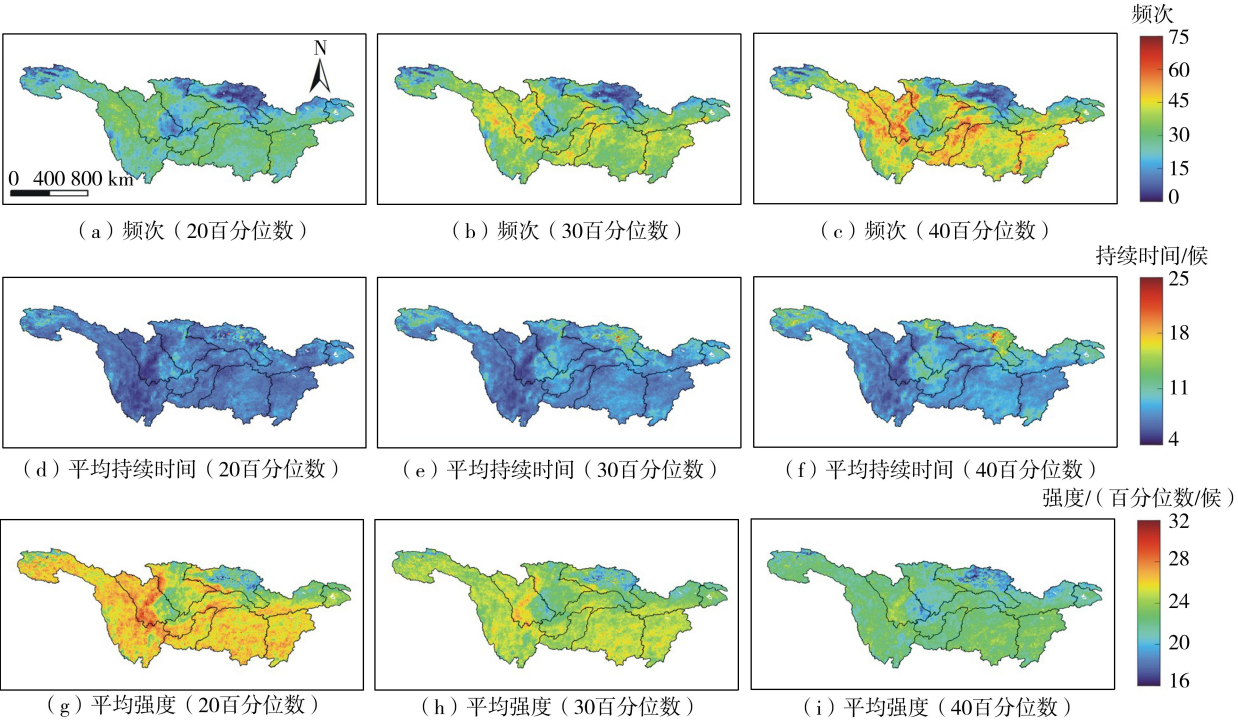


图 3 1979—2022 年长江流域骤发干旱特征指标空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of flash drought characteristic indicators in the Yangtze River Basin from 1979 to 2022

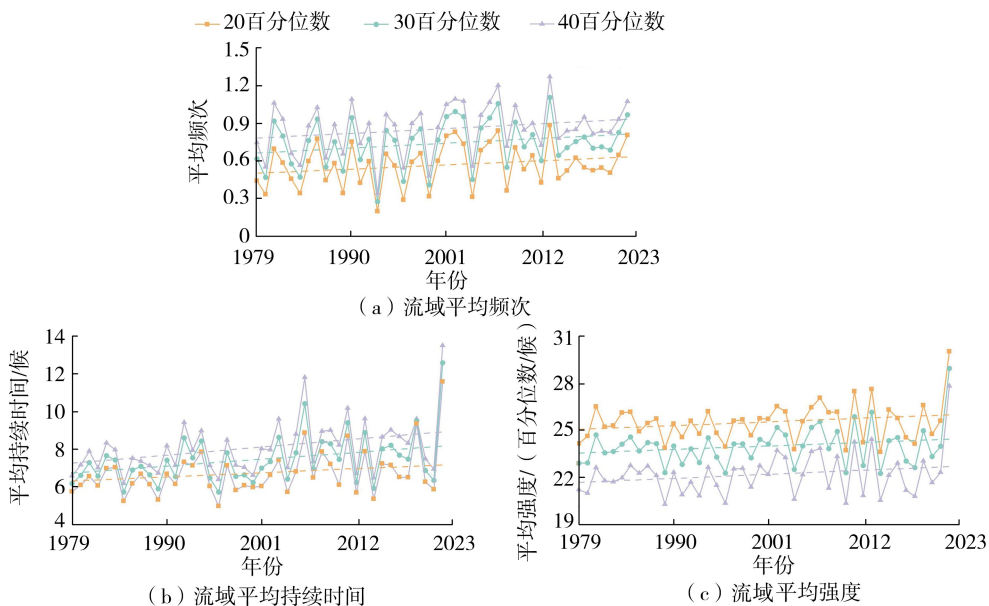


图 4 长江流域骤发干旱特征指标年际变化

Fig. 4 Interannual variability of flash drought characteristic indicators in the Yangtze River Basin

位数/候,且流域平均频次达到 0.8~1.1,可见 2022 年长江流域发生了严重的骤发干旱事件。2022 年长江流域入夏之后,受到全球大气环流异常等因素影响,遭遇了极端气象干旱与高温热浪事件^[29-30],土壤水分在高温热浪影响下快速蒸发消耗,在骤发干旱开始阶段后长期的气象干旱导致土壤水分补给困难,骤发干旱难以得到缓解,导致了 2022 年长江流域骤发干旱表现出较长持续时间和异常高水平强度的特征。这一现象表明在极端气候条件作用下骤发干旱有可能演变为长期的季节性干旱,而骤发干旱的时空发展速度较传统干旱更快,造成旱灾预报预警和应急防御难度显著上升,因此生长季内发生的季节尺度骤发干旱带来的农业和社会经济损失是极为严重的。

3.2 长江流域骤发干旱识别不确定性

为探究恢复阈值对骤发干旱识别造成的不确定性,计算了长江流域网格尺度的骤发干旱特征指标变异系数,结果如图 5 所示。由图 5 可见,长江流域骤发干旱频次的变异系数相对较高,流域变异系数均值达到 0.16,平均持续时间和平均强度变异系数

相对较低,变异系数均值分别为 0.09 及 0.06。网格尺度骤发干旱特征指标变异系数的数值越大,表明不同恢复阈值下骤发干旱特征离散程度越高,因此恢复阈值设定对这些区域骤发干旱识别结果带来的不确定性越高,反之亦然。特征指标的变异系数空间分布情况表明,在长江流域内骤发干旱频次对恢复阈值变化最敏感。平均持续时间变异系数表现出由上游向中下游增大的特征,汉江水系和长江干流水系平均持续时间变异系数最高,表明这些地区的骤发干旱持续时间对恢复阈值更为敏感。流域范围内骤发干旱平均强度受恢复阈值影响程度总体较低。

按子流域统计了骤发干旱事件的特征指标,结果如图 6 所示。由图 6 可见,随着恢复阈值由第 20 百分位数上升至第 40 百分位数,骤发干旱频次和平均持续时间整体分布在各个子流域均表现为向上偏移,而骤发干旱平均强度整体分布则表现为向下偏移。第 20、30、40 百分位数阈值识别的长江流域 1979—2022 年整体骤发干旱频次平均值分别为 20.6、26.6、30.9,平均持续时间分别为 7.0、7.9、8.8 候,平均强度分别为 25.3、23.9、22.2 百分位数/候。

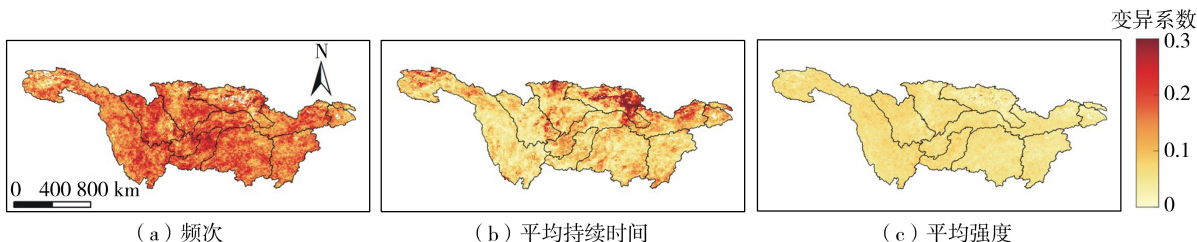


图 5 长江流域骤发干旱特征指标变异系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of variation coefficients of flash drought characteristic indicators in the Yangtze River Basin

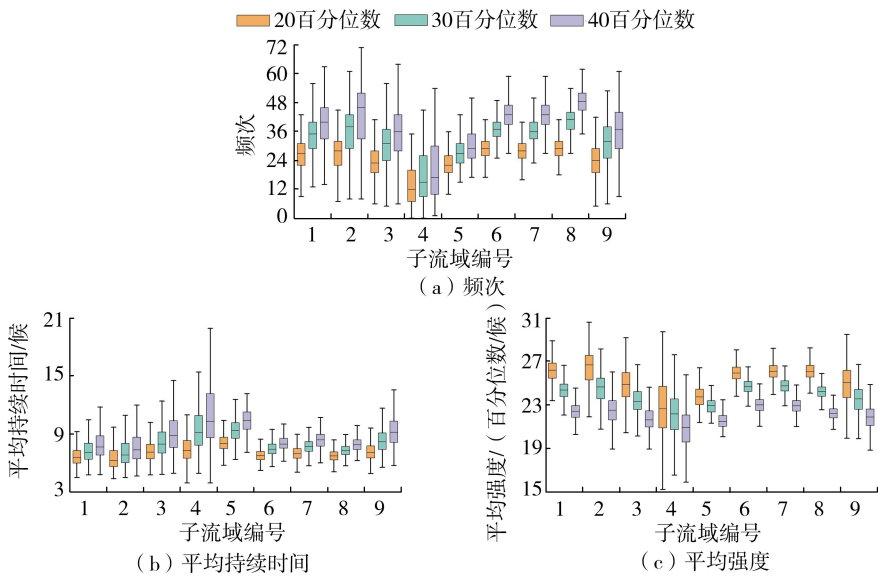


图6 各级恢复阈值下长江流域各子流域骤发干旱特征指标箱线图

Fig. 6 Box plots of flash drought characteristic indicators in sub-basins of the Yangtze River Basin at various graded recovery thresholds

结合图5与图6进行分析,发现在保持其他识别条件不变的情况下,不同恢复阈值设定首先会造成骤发干旱事件频次出现显著差异,进而影响骤发干旱的持续时间和强度等特征。恢复阈值对骤发干旱特征影响具体表现为:较高恢复阈值会造成识别的骤发干旱事件频次和平均持续时间升高,同时平均强度降低,较低恢复阈值则与之相反。

3.3 恢复阈值适用性分析

为探究骤发干旱恢复阈值对骤发干旱识别的具体影响,分析不同恢复阈值的适用场景,统计了不同恢复阈值识别的骤发干旱持续时间分布占比情况,如表1所示。骤发干旱有可能在短期内恢复到干旱水平以上,但同时有可能最终会演变为季节性干旱^[31],2022年长江流域发生的骤发干旱事件就印证了这一点。由表1可见,各级恢复阈值下,骤发干旱时间尺度基本分布在1~3月,超过3月(即18候以上)的季节性骤发干旱事件占比不超过第10%。第20、30、40百分位数恢复阈值识别的季节性干旱事件占比分别为3.1%、4.9%、6.9%。

表1 不同恢复阈值下骤发干旱持续时间分布占比
Table 1 Proportion of flash drought duration distribution under different recovery thresholds

恢复阈值	不同持续时间分布占比/%			
	4 候 $\leq D <$ 6 候	6 候 $\leq D <$ 12 候	12 候 $\leq D <$ 18 候	$D \geq 18$ 候
20 百分位数	51.7	37.1	8.2	3.1
30 百分位数	44.4	40.1	10.6	4.9
40 百分位数	39.0	41.7	12.5	6.9

对骤发干旱强度与持续时间分布之间进行

Pearson 相关性分析,结果图7所示。由图7可见,各级恢复阈值下骤发干旱的强度与持续时间呈现正相关关系,第20、30、40百分位数恢复阈值下,骤发干旱强度与持续时间的 Pearson 相关系数分别为0.445、0.399、0.337($p < 0.05$),随着骤发干旱持续时间增加,骤发干旱整体强度显著增加。因此持续时间较长的骤发干旱事件通常伴随着更大程度的土壤水分亏缺,两者叠加的影响效应会使干旱影响程度显著上升,而短历时骤发干旱因其频繁发生可能对农业生产、生态系统健康和水资源供需平衡造成累积影响。

鉴于识别得到的短历时与长历时的骤发干旱有各自特殊性,应对其进行独立的识别与研究。相对于较高恢复阈值,采用较低恢复阈值识别的短历时骤发干旱强度和频次均较高,识别结果更加有代表性,这对于研究短历时干旱事件对生态系统带来的快速影响尤为重要。然而由于较低恢复阈值对向季节尺度干旱演变的骤发干旱不敏感,识别出的季节性干旱频率较低,因此在研究向季节尺度演变的骤发干旱事件时,可以采用较高的恢复阈值,以有效增加样本数量,更全面地捕捉季节性骤发干旱的特征及其影响,进一步研究骤发干旱向季节尺度干旱演变的成因。同时,应当设定更长的持续时间阈值以减少对短历时低强度干旱事件的识别。骤发干旱特征与区域的气候条件、土壤类型以及地形特征有关,不同区域的骤发干旱特征(例如持续时间的频率分布特征)可能存在显著差异,造成恢复阈值适用性在区域之间也存在差异。因此,骤发干旱研究需要

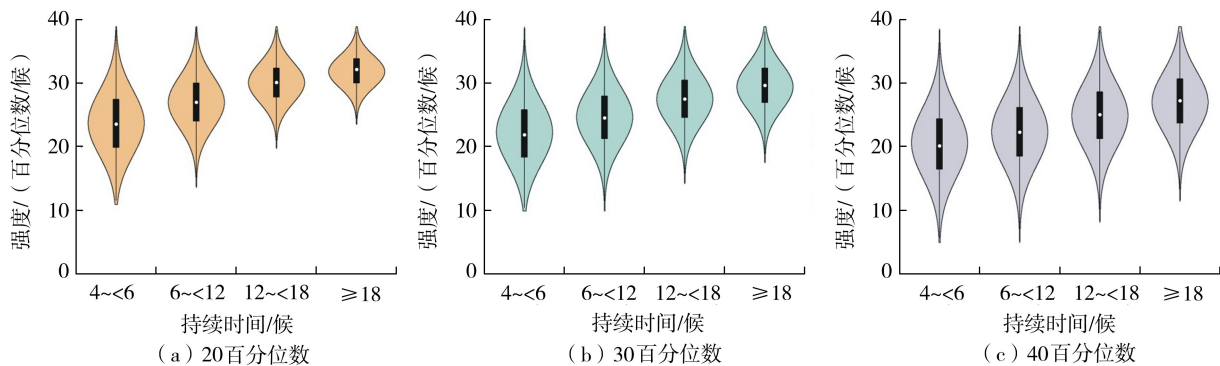


图 7 骤发干旱强度与持续时间分布相关性分析结果

Fig. 7 Correlation analysis results of intensity and duration distribution of flash droughts

针对特定区域具体分析并选取适宜的阈值,以准确理解骤发干旱事件的时空演变特征和潜在影响。

4 结 论

a. 在各级恢复阈值下,长江流域的骤发干旱特征指标时空特征较为一致。骤发干旱频发区域和强度较高区域均位于四川盆地西部及长江流域东南部区域,而骤发干旱频次较低的区域遭遇的骤发干旱事件平均持续时间更长。1979—2022 年长江流域整体骤发干旱特征指标均呈现上升趋势,2022 年长江流域整体骤发干旱持续时间和强度均达到了 1979 年以来的最大值。

b. 长江流域骤发干旱频次对恢复阈值最为敏感,骤发干旱平均持续时间受恢复阈值的影响表现出上游向中下游逐渐增大的特征,骤发干旱平均强度受恢复阈值的影响程度最低。在研究区 9 个子流域中,随着恢复阈值升高,骤发干旱事件频次和平均持续时间上升,同时平均强度降低。

c. 较低的恢复阈值适用于识别短历时骤发干旱,较高的恢复阈值则更加适用于识别季节尺度的骤发干旱,但同时应当设定更长的持续时间阈值以减少对短历时低强度干旱事件的识别。

参考文献:

[1] 袁星,王钰淼,张苗,等. 关于骤旱研究的一些思考[J]. 大气科学学报,2020,43(6):1086-1095. (YUAN Xing, WANG Yumiao, ZHANG Miao, et al. A few thoughts on the study of flash drought[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2020,43(6):1086-1095. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 杨肖丽,马慧君,吴凡,等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护,2023,39(2):40-49. (YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):40-49. (in Chinese))

[4] OTKIN J A, SVOBODA M, HUNT E D, et al. Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the united states[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2018,99(5):911-919.

[5] PAIMAZUMDER D, DONE J M. Potential predictability sources of the 2012 U. S. drought in observations and a regional model ensemble [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2016,121(21):12581-12592.

[6] 孟长青,董子娇,刘柯莹,等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):23-30. (MENG Changqing, DONG Zijiao, LIU Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4):23-30. (in Chinese))

[7] YUAN Xing, WANG Yumiao, JI Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. Science,2023,380(6641):187-191.

[8] OTKIN J A, WOLOSZYN M, WANG Hailan, et al. Getting ahead of flash drought: from early warning to early action [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022,103(10):E2188-E2202.

[9] CHRISTIAN J I, HOBBS M, HOELL A, et al. Flash drought: a state of the science review [J]. WIREs Water, 2024,11(3):e1714.

[10] 瞿德业,杨明月,刘婷婷,等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(5):32-40. (QU Deyue, YANG Mingyue, LIU Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water

- Resources, 2024, 44(5): 32-40. (in Chinese))
- [11] YUAN Xing, WANG Linying, WU Peili, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4661.
- [12] YANG Liyan, WANG Weiguang, WEI Jia. Assessing the response of vegetation photosynthesis to flash drought events based on a new identification framework [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 339: 109545.
- [13] LIU Yi, ZHU Ye, REN Liliang, et al. Two different methods for flash drought identification: comparison of their strengths and limitations [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(4): 691-704.
- [14] XI Xiazhen, YUAN Xing. Significant water stress on gross primary productivity during flash droughts with hot conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 324: 109100.
- [15] ZHANG Xinyu, LIU Yi, ZHU Ye, et al. Probabilistic analysis on the influences of heatwaves during the onset of flash droughts over China [J]. Hydrology Research, 2023, 54(7): 869-884.
- [16] WANG Yumiao, YUAN Xing. Land-atmosphere coupling speeds up flash drought onset [J]. Science of The Total Environment, 2022, 851: 158109.
- [17] 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))
- [18] 梅梅, 高歌, 李莹, 等. 1961—2022 年长江流域高温干旱复合极端事件变化特征 [J]. 人民长江, 2023, 54(2): 12-20. (MEI Mei, GAO Ge, LI Ying, et al. Change characteristics in compound high temperature and drought extreme events over Yangtze River Basin from 1961 to 2022 [J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 12-20. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 郑博福, 肖德利, 万炜, 等. 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展 [J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 18-28. (ZHENG Bofu, XIAO Deli, WAN Wei, et al. Research progress on assessment indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 18-28. (in Chinese))
- [21] 黄涛, 徐力刚, 范宏翔, 等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1677-1684. (HUANG Tao, XU Ligang, FAN Hongxiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1677-1684. (in Chinese))
- [22] 董耀华, 汪秀丽. 长江流域水系划分与河流分级初步研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30(10): 1-5. (DONG Yaohua, WANG Xiuli. Preliminary research on watershed division and stream order classification of the Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(10): 1-5. (in Chinese))
- [23] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [24] ZHANG Shuyi, LI Mingxing, MA Zhuguo, et al. The intensification of flash droughts across China from 1981 to 2021 [J]. Climate Dynamics, 2024, 62(2): 1233-1247.
- [25] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Examining rapid onset drought development using the thermal infrared-based evaporative stress index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1057-1074.
- [26] ZHANG Yuqing, YOU Qinglong, CHEN Changchun, et al. Flash droughts in a typical humid and subtropical basin: a case study in the Gan River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 162-176.
- [27] FORD T W, LABOSIER C F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 414-423.
- [28] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [29] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策 [J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese))
- [30] 郝增超, 张璇, 郝芳华, 等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对 [J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 46-52. (HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 46-52. (in Chinese))
- [31] WANG Linying, YUAN Xing. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(12): 1478-1490.

(收稿日期: 2024-09-04 编辑: 王芳)