

1981—2021 年中国季节性干旱与骤发干旱的 时空响应关系评估

武传号^{1,2}, 黎梓涛³, 王赛赛³, 逯家宝³

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 暨南大学环境与气候学院, 广东 广州 511443)

摘要:以中国九大流域为研究对象,采用标准化蒸发胁迫比和标准化降水蒸散指数,在网格尺度上识别了 1981—2021 年季节性干旱和骤发干旱,基于非线性模型构建了季节性干旱与骤发干旱特征的响应关系模型,评估了两种干旱的时空响应关系。结果表明:季节性干旱期间的骤发干旱频次明显高于季节性干旱发生前后,但其他骤发干旱特征在季节性干旱发生前后的变化较小,较长的骤发干旱历时和较大的骤发干旱强度主要分布在西北地区,而峰值则在西南、东北和华东地区较高;骤发干旱前后季节性干旱特征的空间变化相对较小,季节性干旱在东北和华南地区频次较高,在西北地区强度较大且峰值较高;季节性干旱对骤发干旱的响应在不同流域差异较大,东南诸河、黄河和松辽河流域骤发干旱强度越大,所触发的季节性干旱强度越大,松辽河、西南诸河和珠江流域骤发干旱峰值越高,所触发的季节性干旱峰值越高。

关键词:骤发干旱;季节性干旱;标准化降水蒸散指数;标准化蒸发胁迫比;中国九大流域

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)02 - 0149 - 09

Evaluation of spatiotemporal response relationship between seasonal drought and flash drought in China from 1981 to 2021//WU Chuanhao^{1,2}, LI Zitao³, WANG Saisai³, LU Jiabao³ (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment and Climate, Ji'nan University, Guangzhou 511443, China)

Abstract: Taking nine major river basins in China as the research objects, seasonal drought and flash drought events from 1981 to 2021 were identified at the grid scale using the standardized evaporation stress ratio and standardized precipitation evapotranspiration index. Based on the nonlinear models, a response relationship model between seasonal drought and flash drought was constructed, and the spatiotemporal response relationship between seasonal drought and flash drought was evaluated. The results indicate that the frequency of flash drought during seasonal drought is significantly higher than that before and after seasonal drought. However, the other flash drought characteristics show little change before and after seasonal drought. The longer duration and higher intensity of flash drought are mainly observed in northwestern China, while the higher drought peak is found in southwestern, northeastern, and eastern China. The spatial changes in seasonal drought characteristics before and after flash drought are relatively small, with higher frequency of seasonal drought occurring in northeastern and southern China, and higher intensity and peak in northwestern China. The response of seasonal drought to flash drought varies greatly in different basins. The high-intensity flash drought in the Southeast Rivers, Yellow River, and Songliao River basins generally triggers high-intensity seasonal drought, while the high-peak flash drought in the Songliao River, Southwest Rivers, and Pearl River basins triggers high-peak seasonal drought.

Key words: flash drought; seasonal drought; standardized precipitation evapotranspiration index; standardized evaporative stress ratio; nine major river basins in China

中国地处典型季风气候区,是旱灾发生频率最高且影响最严重的国家之一^[1]。在全球变暖以及大气环流异常等多重因素叠加影响下,极端干旱频

率和强度呈增加态势^[2-3],已严重威胁粮食和生态安全,成为制约社会经济可持续发展的重要因素之一。近年来,随着气候变暖加剧,一种称为“骤发干旱”

基金项目:国家自然科学基金项目(52279016);广东省自然科学基金项目(2023A1515011760)
作者简介:武传号(1985—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wuch0907@hotmail.com

(以下简称“骤旱”)的极端事件逐渐受到关注。骤旱是一种快速发展的极端事件,通常在几天至几周内形成^[4],且常常伴随高温热浪等极端天气条件,导致土壤水分迅速耗尽,植被枯萎,水资源严重短缺^[5]。由于骤旱具有突发性强、发展迅速、强度大等特点,对农业生产、生态环境和社会经济造成了严重的影响。如 2011 年夏季长江中下游遭遇了由高温热浪引起的突发性大旱,影响到 3 000 万人,造成约 150 亿元的经济损失^[6]。2022 年 6 月长江流域遭遇了 1961 年以来最严重的干旱,流域内降雨较常年同期偏少近 50%,加之高温热浪的复合作用,旱情在短时间内迅速加剧,造成了严重的经济损失^[7]。

近年来,国内外学者根据研究需求提出了不同的骤旱识别方法,主要分为两大类:基于土壤水分百分位快速下降的识别方法^[8]和基于蒸散发需求指数的方法^[9-10],并在骤旱特征评估和成因^[7,11]以及与缓慢干旱对比评估^[12]等方面取得一些重要进展。如 Yuan 等^[13]研究指出,过去几十年中全球干旱正在经历由缓慢干旱向骤旱转变,而且这种转变与人类活动引起的气候变化显著相关。对于不同类型干旱之间的关系,目前的研究主要集中在气象干旱与其他类型干旱(如气象干旱-水文干旱、气象干旱-农业干旱)之间的传播关系^[14-16],但关于骤旱与缓慢干旱之间关系的研究还处于起步阶段,只有个别文献报道。Wang 等^[17]评估了高温热浪型和降水短缺型骤旱与季节性干旱(以下简称“季旱”)的关系,发现与季旱相关的骤旱,更易发生在季旱的爆发(开始)和恢复(结束)阶段,干湿转换期更有利于骤旱的发生。上述研究中两类骤旱的识别主要基于阈值方法,忽略了骤旱强度、历时、峰值等重要特征,所识别出的事件本质上属于干热复合极端事件。为了更好地理解骤旱与缓慢干旱之间的传递关系,有必要深入解析两类干旱特征之间的时空响应关系,这对旱灾早期预警以及水资源高效管理具有重要的指导意义。

为此,本文基于标准化蒸发胁迫比(standardized evaporative stress ratio, SESR)^[9,18]识别中国不同地区的气象骤旱,采用 3 月尺度的标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)表征季旱事件^[3]。基于观测和再分析数据,对比评估 1981—2021 年中国及九大流域季旱(骤旱)发生前后骤旱(季旱)频率、历时、强度、峰值等特征的空间分布规律,构建季旱与骤旱特征的响应关系模型,揭示两类干旱之间的时空关系,以期为流域旱灾风险防控及水资源高效管理提供科学

依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

中国位于亚洲东部、太平洋西岸,陆地总面积约 960 万 km²,地势西高东低,呈阶梯状分布,以高原、山地为主,河流众多。中国气候类型复杂多样,季风气候显著,冬季南北气温差异大,夏季普遍高温;年降水量从东南沿海向西北内陆递减,降水年际变化大、南方降水多、雨季长,北方降水少、雨季短。经过长期的地理环境演变,形成了九大流域:松辽河流域(I)、海河流域(II)、黄河流域(III)、长江流域(IV)、淮河流域(V)、东南诸河流域(VI)、珠江流域(VII)、内陆河流域(VIII)、西南诸河流域(IX),如图 1(本文地图均基于审图号为 GS(2020)4630 号的标准地图制作)所示。

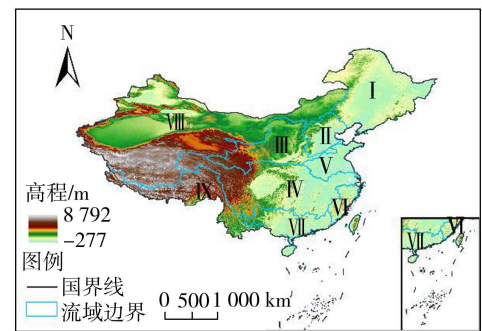


图 1 中国九大流域地理位置图

Fig. 1 Geographic locations of nine major river basins in China

1.2 数据来源

本文研究时段为 1981—2021 年,数据包括日尺度的降水、实际蒸发和潜在蒸发,其中降水数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5 数据集(<https://climate.copernicus.eu/>),该数据集是由模型数据与来自世界各地的观测数据融合所形成的一个全球完整、一致的数据集^[19]。刘婷婷等^[20]研究表明,ERA5 的降水数据可以较好地描述 3 月尺度的干旱事件,本文所获取的降水数据空间分辨率为 0.25°×0.25°。实际蒸发和潜在蒸发数据来自全球陆地蒸发阿姆斯特丹模型(global land evaporation Amsterdam model, GLEAM)^[21-22]。该模型充分利用卫星观测数据,以土壤水分和植被含水量为控制条件,基于 Priestley-Taylor 公式和 Gash 拦截模型计算地表蒸发量和全球潜在蒸发量^[23],分别估计了陆地蒸发的不同成分,包括植被蒸腾作用、拦截损失、裸土蒸发等,具有多时间分辨率(日、月、年),空间分辨率为 0.25°×0.25°。

2 研究方法

2.1 季旱与骤旱识别

SPEI 是基于降水和潜在蒸发的标准化指数,能够反映不同时间尺度上的水分亏缺状况,适用于评估全球气候变化对干旱状况的影响^[24]。SPEI 的计算过程主要包括计算水汽平衡、正态化水汽平衡数据两个主要步骤^[24-25]。本文采用 3 月尺度的 SPEI 指数表征季节性干湿变化,当 SPEI 小于-0.5 时,即认为发生了干旱。

本文利用 Christian 等^[9]提出的基于 SESR 的识别方法在网格尺度上识别中国不同地区作物生长期(4—11 月)的气象骤旱事件。SESR 由实际蒸发和潜在蒸发的比值进行标准化计算得到^[9],其反映了在特定气候条件下,植物和生态系统能否获得足够的水分来满足其蒸发需求。SESR 的计算公式为

$$R_{Eijp} = (R_{ijp} - \bar{R}_{ijp}) / \sigma_{R_{ijp}} \quad (1)$$

式中: R_{Eijp} 为网格点 (i,j) 第 p 候(1 候为 5 d)的 SESR 值; R_{ijp} 、 $\bar{R}_{ijp}$ 分别为网格点 (i,j) 第 p 候的蒸发胁迫比及多年平均值; $\sigma_{R_{ijp}}$ 为 R_{ijp} 的标准差。

相邻两候之间 SESR 变化量的标准化值为

$$\Delta R'_{Eijp} = (\Delta R_{Eijp} - \bar{\Delta R}_{Eijp}) / \sigma_{\Delta R_{Eijp}} \quad (2)$$

式中: $\Delta R'_{Eijp}$ 为网格点 (i,j) 第 p 候的 SESR 变化量的标准化值; ΔR_{Eijp} 、 $\bar{\Delta R}_{Eijp}$ 分别为网格点 (i,j) 第 p 候的 SESR 变化量及多年平均值; $\sigma_{\Delta R_{Eijp}}$ 为 ΔR_{Eijp} 的标准差。

由于骤旱具有突发性强的特点,本文在候尺度上识别骤旱事件,具体包括 4 个条件^[9]:①骤旱持续时间至少为 4 候;②骤旱结束时 R_{Eijp} 低于第 20% 分位数;③整个骤旱过程最多有 1 个 $\Delta R'_{Eijp}$ 大于第 40% 分位数;④整个骤旱过程中 R_{Eijp} 的平均变化小于第 25% 分位数。以上 4 个条件保证了整个干旱的快速发展过程以及在此期间一直保持着干旱状态,并考虑因降雨等气象条件导致的干旱减弱过程。条件②和③中涉及的百分位数依据整个研究时段数据确定,条件④的百分位数由每场骤旱事件确定。

2.2 干旱特征提取

游程理论^[26]是一种分析干旱序列的有效方法,可以识别干旱事件的频次、历时、强度和峰值等特征。本文基于游程理论并参考文献^[27],在网格尺度上提取中国 1981—2021 年季旱和骤旱事件的频次、历时、强度和峰值等特征。

对于季旱,当 SPEI 小于-0.5 且至少持续 2 月以上时,则认为发生了一场季旱事件。季旱从开始到结束的持续时间为干旱历时;一场季旱事件中

SPEI 的累积变化(烈度)与干旱历时的比值为干旱强度;一场季旱事件中 SPEI 最小值的绝对值定义为季旱峰值。对于骤旱,将一场骤旱的持续时间定义为骤旱历时;一场骤旱中 SESR 的累积变化(烈度)与干旱历时的比值定义为骤旱强度;一场骤旱中 SESR 的最小值定义为骤旱峰值。

2.3 骤旱与季旱特征响应关系模型构建

采用事件匹配的方法,结合多种统计模型构建骤旱与季旱特征响应关系模型,具体步骤为:

a. 在网格尺度上统计骤旱事件结束后 1 月以内对应的季旱事件,对两类事件依次进行匹配,提取配对成功的骤旱和季旱特征(历时、强度、峰值)。

b. 以骤旱特征为自变量,季旱特征为因变量,采用多种统计模型(指数函数、对数函数、多项式函数、幂函数、S 形曲线),在九大流域分别构建季旱(历时、强度、峰值)对骤旱(历时、强度、峰值)的响应关系模型。

c. 对所选定的模型进行参数拟合,采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)筛选出最优拟合模型,评估九大流域季旱特征对骤旱特征的响应关系。

通过统计分析发现,季旱历时与骤旱历时之间无明显函数关系(不符合以上 5 种模型关系),故本文只构建了季旱强度、峰值与骤旱强度、峰值之间的响应关系模型。

3 结果与分析

3.1 两类干旱发生频次的关系

图 2 为季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)发生频次的空间分布,图中白色区域表示未发生干旱。由图 2(a)~(c)可知,季旱发生前 2 月和结束后 2 月,骤旱发生频次空间分布基本一致,在华南和东北地区北部骤旱发生频次较高;而季旱发生期间,骤旱在中国大部分地区,特别是华南地区,均有较高的频次(最高为 45 次)。总体来说,季旱发生期间的骤旱频次明显高于季旱发生前后,且这种现象在华南地区尤为突出,其原因可能是南方地区高温热浪事件频发,与季旱形成叠加效应,进一步加剧了大气水分亏缺,更容易触发骤旱。由图 2(d)~(f)可知,骤旱发生前 2 月和结束后 2 月,季旱发生频次的分布大致相同。但在黄河流域,骤旱发生前 2 月季旱发生的频次明显高于骤旱结束后 2 月。除了内陆河流域大部分区域及松辽河流域西南部季旱发生频次较低外,其他地区的季旱发生频次均较高。而骤旱发生期间,较高的季旱频次主要集中在内陆河流域东南部、西南诸河流域西部及东南部、长江流域西北部及西南部以及黄河流域中南

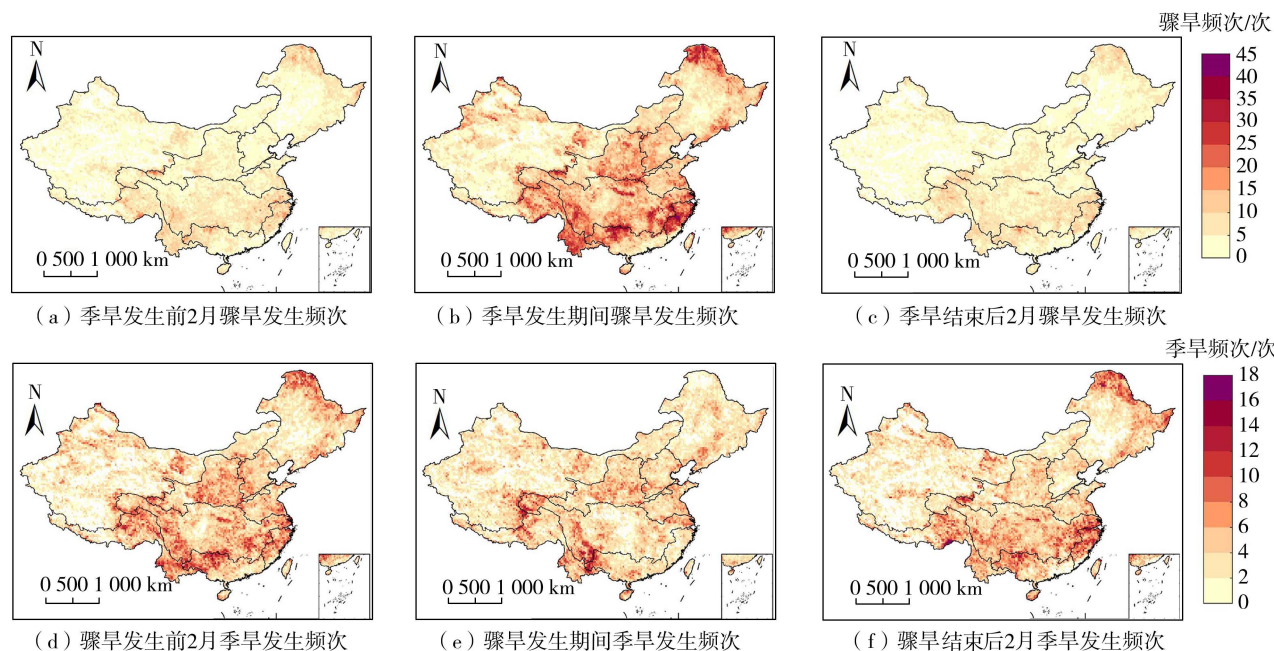


图2 季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)发生频次的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of flash drought(seasonal drought) frequency before, after, and during seasonal drought(flash drought)

部等区域,但均明显小于季旱发生期间的骤旱频次。

3.2 两类干旱历时的关系

图3为季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)历时的空间分布。由图3(a)~(c)可知,季旱发生前2月、发生期间和结束后2月,内陆河流域西南部及东北部、西南诸河流域西部骤旱历时(>40 d)均明显大于其他区域,但同时内陆河和松辽河流域部分区域未发生骤旱,历时为0,此外,长江、

珠江和东南诸河流域骤旱历时相对较短(<30 d)。由图3(d)~(f)可知,骤旱发生前2月、发生期间和结束后2月,季旱历时呈现出较大的空间异质性,其中,较长的季旱历时(>12月)主要分散在内陆河、松辽河和长江流域,其他地区的季旱历时大多小于4月。综上所述,季旱(骤旱)发生前后和发生期间,骤旱(季旱)历时的空间分布较为相似,但季旱历时的空间异质性更大。

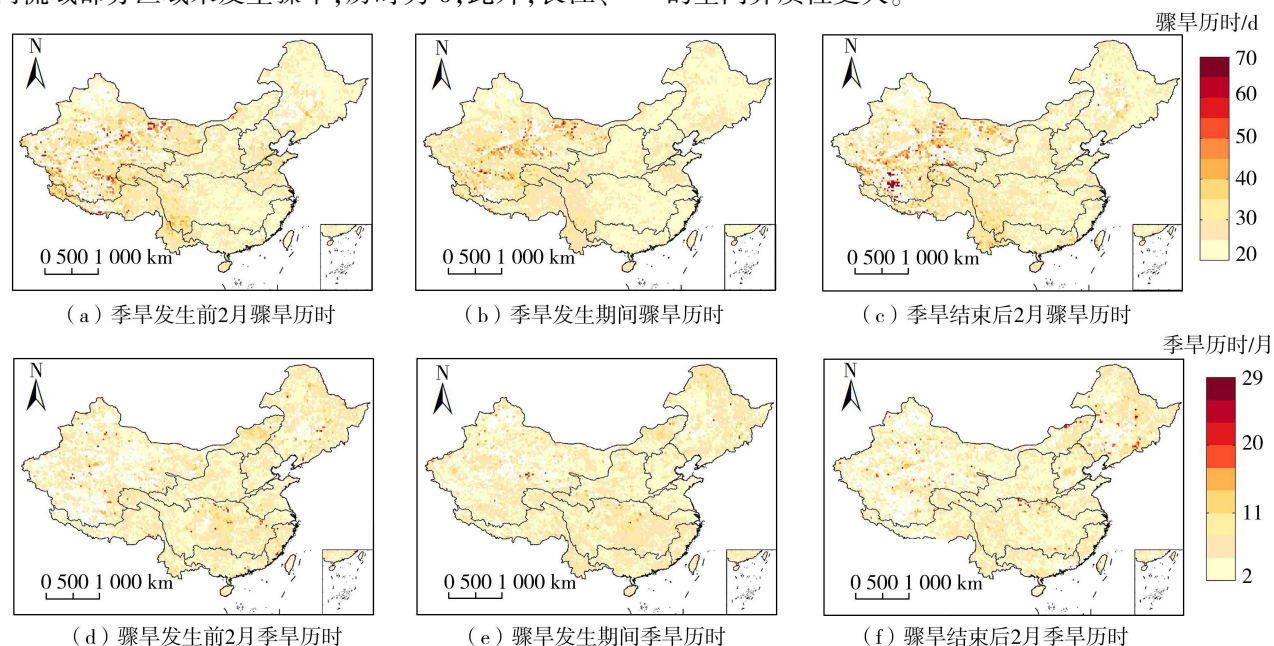


图3 季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)历时的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of flash drought(seasonal drought) duration before, after, and during seasonal drought(flash drought)

3.3 两类干旱强度的关系

图4为季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)强度的空间分布,图中白色区域表示未发生干旱。由图4(a)~(c)可知,在季旱发生前2月、发生期间和结束后2月,大部分地区的骤旱强度在0.3以下,而华中、华北、华东部分地区骤旱强度相对较大(>0.6)。由图4(d)~(f)可知,骤旱发生前2月、发生期间和结束后2月,季旱强度在空间分布

上基本相同,较大的季旱强度(>2.4)主要集中在内陆河流域的大部分区域、黄河流域北部以及松辽河流域中部的少部分区域,而较低的季旱强度(<1.2)主要集中在华南和华东地区。骤旱发生前后季旱强度的分布格局变化较小。

3.4 两类干旱峰值的关系

图5为季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)峰值的空间分布。由图5(a)~(c)可知,季

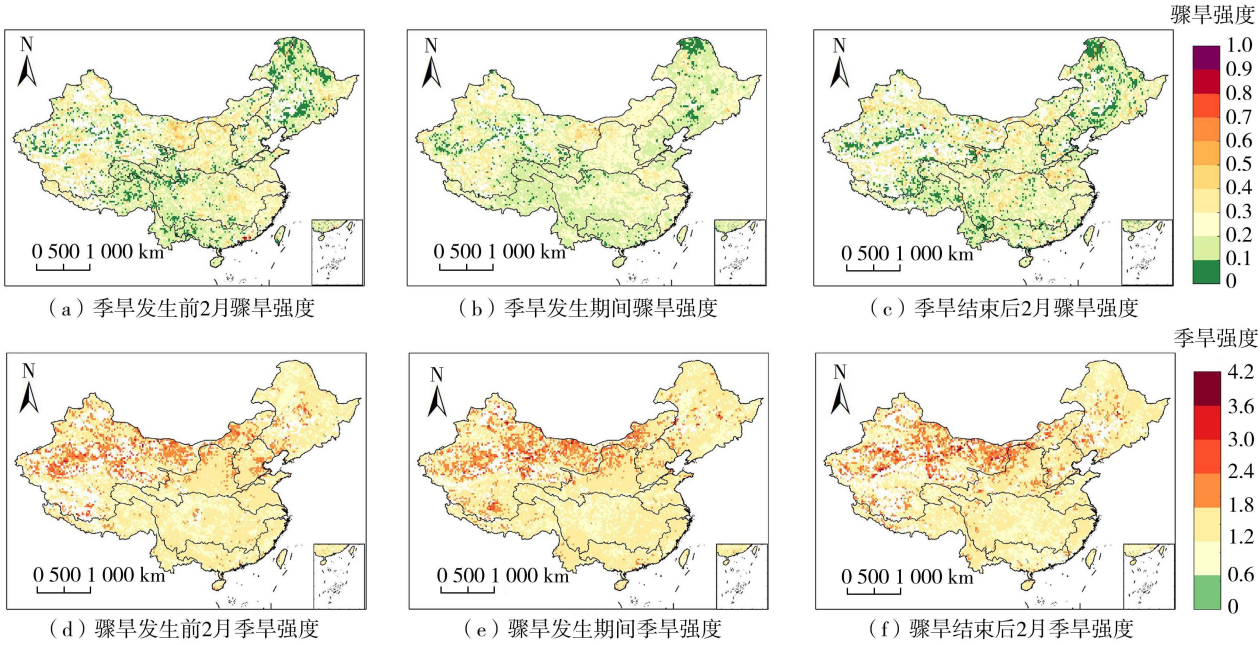


图4 季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)强度的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of flash drought(seasonal drought) intensity before, after, and during seasonal drought (flash drought)

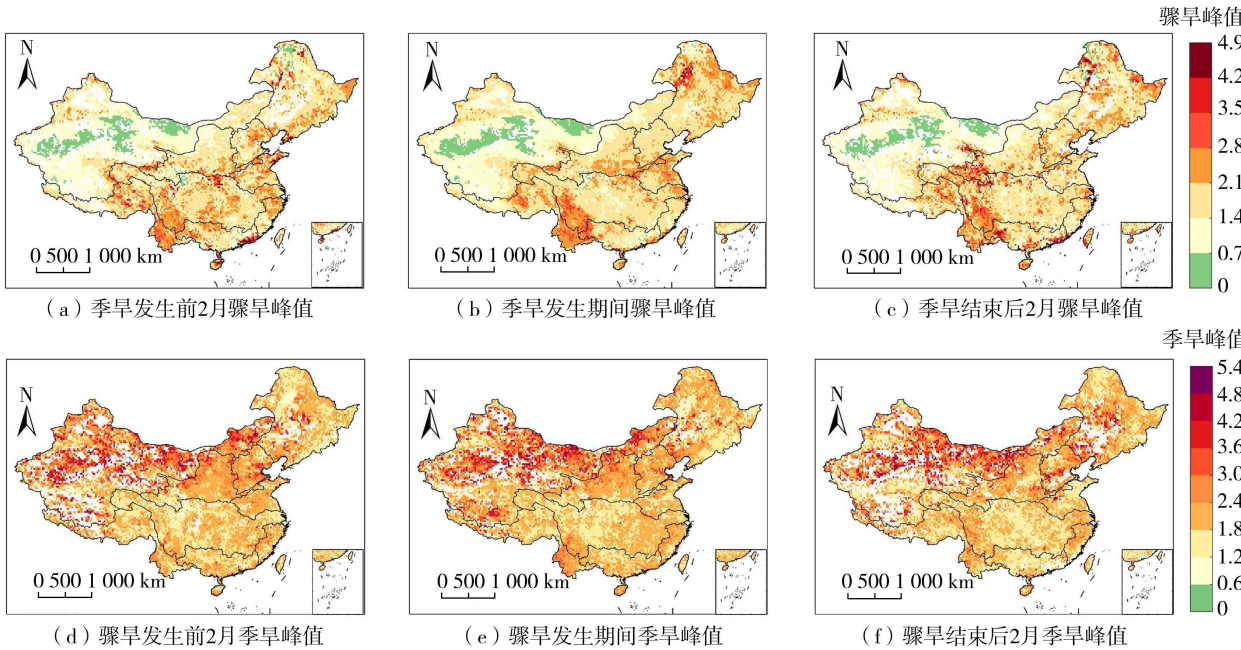


图5 季旱(骤旱)发生前后和发生期间骤旱(季旱)峰值的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of flash drought(seasonal drought) peak before, after, and during seasonal drought (flash drought)

早发生前 2 月、发生期间及结束后 2 月,内陆河流域
骤旱峰值空间分布大致相同,表明季旱发生与否对
该流域骤旱峰值的影响相对较小。其中,较低的骤
旱峰值(<0.7)主要集中在内陆河流域,较高的骤旱
峰值(>2.1)主要集中在松辽河流域东部和北部、淮
河流域部分区域、黄河流域南部及西南少部分区域、
长江流域西南部分区域、西南诸河流域下游区域以及
珠江流域西部和南部。骤旱发生前 2 月、发生期间及
结束后 2 月的季旱峰值空间分布较为相似,表明骤旱
发生与否对季旱峰值空间格局的影响不大。从空间
分布来看,较低的季旱峰值(<1.8)主要分散在松辽
河流域、长江流域中部以及珠江流域中部,而较高的
季旱峰值(>3)主要集中在华北和西部地区,如内陆
河流域、海河流域部分区域以及黄河流域北部。

3.5 季旱对骤旱的响应特征

3.5.1 强度响应特征

基于 5 种非线性拟合模型(指数函数、对数函
数、多项式、幂函数和 S 形曲线),分别构建季旱强
度与骤旱强度的响应关系模型,九大流域季旱强度
与骤旱强度响应关系拟合结果如表 1 所示,各流域
干旱强度最优拟合函数曲线如图 6 所示。长江、黄
河、松辽河、西南诸河、海河流域干旱强度响应关
系的最优拟合模型为多项式模型,东南诸河流域的
最优拟合模型为幂函数模型,淮河、内陆河、珠江流
域的最优拟合模型为指数模型。从图 6 可以看出,长
江、海河、淮河、内陆河、西南诸河、珠江流域的
季旱强度随骤旱强度增大而降低,表明强度大的骤
旱结束后,所发生季旱的强度通常较低。其原因可能
是骤旱发生后,干燥的气候条件虽然得到一定的缓
解(例如降水补给),但还可以触发轻度的季旱。相
比之下,东南诸河、黄河、松辽河流域的季旱强度
随骤旱强度增大而增大,表明这些流域骤旱强度越
大,其触发的季旱强度也越大。其原因可能是虽然
骤旱已

结束,但干燥的气候条件仍未得到缓解,因而触发强
度较大的季旱。

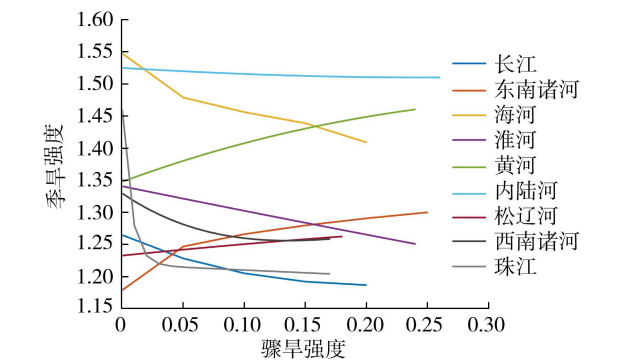


图 6 九大流域干旱强度最优拟合函数曲线

Fig. 6 Optimal fitting function curves of drought intensity for nine major river basins

3.5.2 峰值响应特征

九大流域季旱峰值与骤旱峰值响应关系拟合结
果如表 2 所示,各流域干旱峰值最优拟合函数曲线
如图 7 所示。长江、淮河、黄河、内陆河、松辽河、珠
江流域峰值响应关系的最优拟合模型为多项式模
型,东南诸河流域峰值响应关系的最优拟合模型为
指数模型,海河流域的最优拟合模型为幂函数模型,
西南诸河流域的最优拟合模型为 S 形曲线模型。从
图 7 可以看出,长江、东南诸河、海河、淮河、内
陆河流域的季旱峰值随骤旱峰值增加而降低;松辽
河、西南诸河、珠江流域的季旱峰值随骤旱峰值
增加而增加,黄河流域的季旱峰值先随骤旱峰值
增加而增加,但当骤旱峰值大于 1 后,季旱峰值
随骤旱峰值增加而降低。

3.5.3 讨论

本文利用 ERA5 降水产品识别季节性干旱事
件,尽管已有研究表明 ERA5 降水产品能够较好描
述季旱^[20],但在部分地区仍存在一定的不确定性,
例如在黄河流域、中国西南地区存在对降水的高估

表 1 九大流域季旱强度与骤旱强度响应关系拟合结果

Table 1 Fitting results of response relationship between seasonal drought intensity and flash drought intensity in nine major river basins

流域	最优拟合模型	拟合公式	R ²	RMSE
长江	多项式	$f(x) = -0.6636x^5 + 3.078x^4 - 4.894x^3 + 3.332x^2 - 0.8845x + 1.265$	0.85	0.158
东南诸河	幂函数	$f(x) = 0.1997x^{0.359} + 1.179$	0.96	0.088
海河	多项式	$f(x) = -155.2x^5 + 229.8x^4 - 113.5x^3 + 22.5x^2 - 2.244x + 1.548$	0.95	0.091
淮河	指数	$f(x) = 1.341e^{-0.2896x}$	0.97	0.065
黄河	多项式	$f(x) = 0.3589x^3 - 1.064x^2 + 0.7049x + 1.348$	0.89	0.169
内陆河	指数	$f(x) = 0.1105e^{1.711x} + 1.415e^{-0.2147x}$	0.77	0.310
松辽河	多项式	$f(x) = -0.0129x^5 + 0.1078x^4 - 0.208x^3 - 0.1093x^2 + 0.191x + 1.233$	0.88	0.161
西南诸河	多项式	$f(x) = -3.38x^5 + 12.3x^4 - 15.1x^3 + 7.449x^2 - 1.306x + 1.33$	0.88	0.169
珠江	指数	$f(x) = 1.219e^{-0.0708x} + 0.2425e^{-137.7x}$	0.93	0.097

表 2 九大流域季旱峰值与骤旱峰值响应关系拟合结果

Table 2 Fitting results of response relationship between seasonal drought peak and flash drought peak in nine major river basins				
流域	最优拟合模型	拟合公式	R^2	RMSE
长江	多项式	$f(x) = 0.0005x^4 - 0.0139x^3 + 0.1086x^2 - 0.3115x + 1.937$	0.73	0.427
东南诸河	指数	$f(x) = 0.2493e^{0.3068x} + 1.797e^{-0.1282x}$	0.96	0.189
海河	幂函数	$f(x) = 2.195x^{-0.0793}$	0.96	0.170
淮河	多项式	$f(x) = -0.0046x^3 + 0.029x^2 - 0.1165x + 1.925$	0.97	0.126
黄河	多项式	$f(x) = -0.0031x^4 + 0.0477x^3 - 0.2437x^2 + 0.3614x + 2.01$	0.92	0.266
内陆河	多项式	$f(x) = -0.0016x^5 + 0.04x^4 - 0.3768x^3 + 1.618x^2 - 3.184x + 4.214$	0.92	0.371
松辽河	多项式	$f(x) = -2.937e^{-5}x^4 + 0.0017x^3 - 0.0286x^2 + 0.125x + 1.707$	0.86	0.345
西南诸河	S 形曲线	$f(x) = 1 / (0.5441 + 0.0443e^{-x})$	0.75	0.467
珠江	多项式	$f(x) = 0.0045x^2 + 0.019x + 1.645$	0.93	0.185

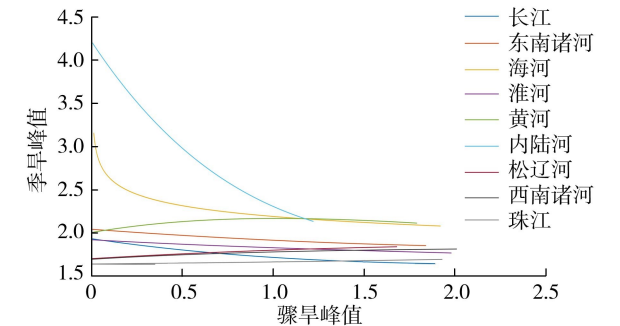


图 7 九大流域干旱峰值最优拟合函数曲线
Fig. 7 Optimal fitting function curves of drought peak for nine major river basins

现象^[28-29],在进行干旱事件识别时,可能存在阈值越低(即干旱越严重)误差越大的现象^[20]。针对该问题,未来需要进一步收集基于观测的网格降水数据,通过多源数据对比评估,降低降水数据的不确定性,提高干旱识别的可信度。

针对九大流域的干旱响应关系评估表明,东南诸河、黄河和松辽河流域的季旱强度与骤旱强度呈正相关,松辽河、西南诸河和珠江流域季旱峰值与骤旱峰值呈正相关,其他大部分流域呈相反态势。总的来看,不同流域季旱与骤旱的响应关系存在较大的差异,这可能与气候特征(如降水、气温、风向和大气环流)、下垫面条件(如地质与地貌、植被与土壤、地表水系特征)和人类活动(如土地利用变化、城市化、农业灌溉、水资源开发)等因素密切相关^[30-34],已有研究指出,气候及下垫面因素在不同地点和时间对于旱传播过程呈现出显著的差异性影响^[35]。针对以上 3 大影响因素,未来可分别构建能反映 3 类因素的代表性指标,采用机器学习等方法(如随机森林模型)量化不同影响因素对骤旱-季旱传播过程的相对影响。

4 结 论

a. 骤旱在季旱期间的发生频次明显高于季旱

发生前和结束后 2 月,但骤旱历时、强度和峰值在季旱发生前后无明显变化,较长的骤旱历时和较大的骤旱强度主要分布在西北地区,而较高的骤旱峰值主要集中在西南、东北和华东地区。

b. 骤旱发生前后季旱特征在空间尺度上的变化较小,较高的季旱频次主要发生在东北和华南地区,而强度较大和峰值较高的季旱事件主要集中在西北部分地区。

c. 东南诸河、黄河和松辽河流域骤旱强度越大,所触发的季旱强度通常也越大,松辽河、西南诸河和珠江流域骤旱峰值越高,所触发的季旱峰值也较高,黄河流域的季旱峰值随骤旱峰值先增加后降低。

参考文献:

[1] 张德二,梁有叶. 1876—1878 年中国大范围持续干旱事件[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6 (2) : 106-112. (ZHANG De ' er, LIANG Youye. Along lasting and extensive drought event over China during 1876-1878[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6 (2) : 106-112. (in Chinese))

[2] 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))

[3] WAN Lingling, BENTO V A, QU Yanping, et al. Drought characteristics and dominant factors across China: insights from high-resolution daily SPEI dataset between 1979 and 2018[J]. Science of the Total Environment, 2023, 901: 166362.

[4] 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))
- [5] HUNT E D, HUBBARD K G, WILHITE D A, et al. The development and evaluation of a soil moisture index[J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 29(5):747-759.
- [6] YUAN Xing, MA Zhuguo, PAN Ming, et al. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11):4394-4401.
- [7] 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))
- [8] 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.
- [9] CHRISTIAN J I, BASARA J B, OTKIN J A, et al. A methodology for flash drought identification: application of flash drought frequency across the United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5):833-846.
- [10] LI Jun, WANG Zhaoli, WU Xushu, et al. A new framework for tracking flash drought events in space and time [J]. *Catena*, 2020, 194:104763.
- [11] 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))
- [12] 施欣池,余锦华,张旭煜. 长江中下游地区骤发干旱与缓发干旱特征对比研究 [J]. *气象科学*, 2024, 44(2):292-300. (SHI Xinchu, YU Jinhua, ZHANG Xuyu. Comparisons on the characteristics of flash drought and slowly-evolving drought in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2024, 44(2):292-300. (in Chinese))
- [13] YUAN Xing, WANG Yumiao, JI Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. *Science*, 2023, 380(6641):187-191.
- [14] XU Yang, ZHANG Xuan, WANG Xiao, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579:124147
- [15] HUANG Shengzhi, LI Pei, HUANG Qiang, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547:184-195.
- [16] HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. The response of agricultural drought to meteorological drought and the influencing factors: a case study in the Wei River Basin, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159:45-54.
- [17] 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.
- [18] GOU Qiqi, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Application of an improved spatio-temporal identification method of flash droughts [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604:127224.
- [19] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730):1999-2049.
- [20] 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析 [J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1):66-79. (LIU Tingting, ZHU Xiufang, GUO Rui, et al. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1):66-79. (in Chinese))
- [21] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5):1903-1925.
- [22] YANG Xiuqin, YONG Bin, REN Liliang, et al. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via China FLUX ET measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(20):5688-5709.
- [23] ALLIES A, DEMARTY J, OLIOSO A, et al. Evapotranspiration estimation in the sahel using a new ensemble-contextual method [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3):380.
- [24] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of climate*, 2010, 23(7):1696-1718.
- [25] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征 [J]. *地理研究*, 2015, 34(8):1547-1558. (SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Spatial and temporal variations of drought in Henan province over a 53-year period based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Geographical*

Research,2015,34(8):1547-1558. (in Chinese))

[26] 杨好周,梁忠民,胡义明,等. 游程理论在云南省干旱重
现期分析中的应用[J]. 水电能源科学,2013,31(12):
8-12. (YANG Haozhou,LIANG Zhongmin,HU Yiming,et
al. Application of run-length theory to drought return
period analysis of Yunnan Province[J]. Water Resources
and Power,2013,31(12):8-12. (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] 朱丽,吕潇雨,郭浩,等. ERA5-Land 降水产品在黄河流
域干旱监测中的适用性研究[J]. 干旱气象,2023,41
(5):677-687. (ZHU Li,LYU Xiaoyu,GUO Hao,et al.
Suitability study of ERA5-Land precipitation product for
drought monitoring in the Yellow River Basin[J]. Journal
of Arid Meteorology, 2023, 41 (5): 677-687. (in
Chinese))

[29] 黄晓龙,吴薇,许剑辉,等. ERA5-Land 降水再分析资料
在中国西南地区的适用性评估[J]. 高原气象,2023,42
(6):1562-1575. (HUANG Xiaolong, WU Wei, XU
Jianhui,et al. The applicability performance of the ERA5-
land precipitation datasets in Southwest China[J]. Plateau
Meteorology,2023,42(6):1562-1575. (in Chinese))

[30] 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 ofgeographicsciences[J].
Progress in Geography, 2022, 41 (1): 173-184 . (in
Chinese))

[31] KONAPALA G,MISHRA A. Review of complex networks
application in hydroclimatic extremes with an
implementation to characterize spatio-temporal drought
propagation in continental USA[J]. Journal of Hydrology,
2017,555:600-620.

[32] APURV T,SIVAPALAN M,CAI Ximing. Understanding
the role of climate characteristics in drought propagation
[J]. Water Resources Research, 2017, 53 (11): 9304-
9329.

[33] WEN Li,ROGERS K,LING J,et al. The impacts of river
regulation and water diversion on the hydrological drought
characteristics in the Lower MurrumbidgeeRiver, Australia
[J]. Journal of Hydrology,2011,405(3/4):382-391.

[34] VANLANEN H A J,WANDERS N,TALLALSENL M,et
al. Hydrological drought across the world:impact of climate
and physical catchment structure[J]. Hydrology and Earth
System Sciences,2013,17(5):1715-1732.

[35] 智协飞,田云涛,陈昌春,等. 干旱传播研究进展与展望
(II) 影响因素与干旱传播研究展望[J]. 南水北调与
水利科技(中英文),2023,21(4):654-668. (ZHI
Xiefei,TIAN Yuntao,CHEN Changchun,et al. Progress
and prospects in drought propagation research, partII:
influencing factors and research prospects [J]. South-to-
North Water Transfers and Water science & Technology,
2023,21(4):654-668. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 08 - 27 编辑:施业)

(上接第 132 页)

[32] 黄国如,李梅萍. 基于微观交通仿真的城市内涝对道路
交通的影响评估研究进展[J]. 水资源保护,2023,39
(5):69-78. (HUANG Guoru,LI Meiping. Research
progress on impact assessment of urban waterlogging on
road traffic based on micro traffic simulation [J]. Water
Resources Protection,2023,39(5):69-78. (in Chinese))

[33] 李瑞栋,倪广恒,陆科成,等. 北京“23·7”特大暴雨影
响下城市交通应急响应时间动态分析:以北京市通州
区为例[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(2):
365-377. (LI Ruidong,NI Guangheng,LU Kecheng,et al.
Dynamics of urban traffic emergency response times during
the extraordinary “23·7” rainstorm event in Beijing:a
case study of Tongzhou District, Beijing [J]. Journal of
Basic Science and Engineering, 2024, 32 (2): 365-377.
(in Chinese))

[34] 宋川,王琳,王浩程,等. 降雨雨型对城市雨水系统内涝
弹性的影响[J]. 中国农村水利水电,2024(1):197-
206. (SONG Chuan,WANG Lin,WANG Haocheng,et al.
The influence of rainfall patterns on the waterlogging
resilience of urban rainwater system [J]. China Rural
Water and Hydropower, 2024 (1): 197-206. (in
Chinese))

(收稿日期:2024 - 05 - 22 编辑:王芳)