

# 淮河流域骤旱时空分布特征分析

陈悦<sup>1,2,3</sup> 段春锋<sup>1,2</sup> 李清泉<sup>4</sup> 王朋岭<sup>4</sup> 卢燕宇<sup>1,2</sup> 霍彦峰<sup>1,2</sup>

1 安徽省气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031

2 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地/寿县国家气候观象台, 安徽 寿县 232200

3 中国气象局武汉暴雨研究所, 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

4 国家气候中心, 中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 北京 100081

**提 要:** 淮河流域位于我国南北气候交界带, 地理环境复杂, 提升对淮河流域骤旱的认识对于保障农业生产具有重要意义。本文基于 ERA5、ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 四套土壤湿度资料分析了 2000—2020 年淮河流域骤旱的时空分布特征及资料不确定性。针对全年的骤旱统计结果表明: ERA5 的骤旱平均发生次数整体偏多, 空间分布相对均匀, 其余三套资料呈北少南多的空间分布; 骤旱平均历时与骤旱发生次数的空间分布大致相反; 骤旱平均发生次数决定了骤旱发生率的空间分布; 骤旱发生次数的年际变化较大, 且具有较大的资料不确定性。淮河流域骤旱多发于作物生长季(4—9月), 聚焦作物生长季, 其骤旱平均发生次数的空间分布与全年结果相似; 其骤旱平均历时相对全年结果偏短。淮河流域南部地区在作物生长季内骤旱多发, 其年际趋势同样具有较大的资料不确定性。

**关键词:** 淮河流域, 骤旱, 土壤湿度, 时空分布特征, 资料不确定性

中图分类号: P429

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.101401

安徽省自然科学基金项目(2208085UQ08)、中国气象局流域强降水重点开放实验室开放研究基金(2023BHR-Y06)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J048)和风云卫星应用先行计划(FY-APP-2022.0603)共同资助

2024年5月15日收稿; 2024年10月14日收修定稿

第一作者: 陈悦, 主要从事气候与气候变化研究. E-mail: chenryue@ahmi.org.cn

通讯作者: 段春锋, 主要从事气候与气候变化研究. E-mail: dcf118@126.com

# Analysis of Spatial and Temporal Distribution Characteristics During Flash Droughts in the Huaihe River Basin

CHEN Yue<sup>1,2,3</sup> DUAN Chunfeng<sup>1,2</sup> LI Qingquan<sup>4</sup>

WANG Pengling<sup>4</sup> LU Yanyu<sup>1,2</sup> HUO Yanfeng<sup>1,2</sup>

1 Anhui Institute of Meteorological Sciences/Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

2 Huaihe River Basin Typical Farm Eco-Meteorological Experiment Field of CMA/Shouxian National Climatology Observatory, Anhui Shouxian 232200

3 CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

4 CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Center, Beijing 100081

**Abstract:** The Huaihe River Basin (HRB), situated in the transitional zone between northern and southern climates of China, and characterized by a complex geographical environment. Understanding flash droughts in the HRB is crucial for ensuring agricultural production. This study examines the spatiotemporal characteristics and data uncertainty of flash droughts in the HRB from 2000 to 2020 using four sets of soil moisture data: ERA5, ERA5-LAND, GLDAS 2.1 and GLEAM 3.8a. The annual flash drought statistics show that the average occurrence count of flash droughts is generally higher in the ERA5 dataset, with a relatively uniform spatial distribution, while the results of the other three datasets exhibit a spatial distribution with fewer occurrences in the north and more in the south. The average duration of flash droughts exhibits an approximately opposite distribution to their occurrence count distribution. The average occurrence count of flash droughts determines the occurrence of frequency of flash droughts spatial distribution. Additionally, there is significant interannual variability in the occurrence count of flash droughts with considerable data uncertainty. Flash droughts in the HRB occur frequently during the crop growing seasons (April to September). Focusing on the crop growing seasons, the spatial distribution of the average occurrence count of flash droughts is similar to that of the annual results; however, the average duration of flash droughts tends to be shorter compared to the annual results. The southern region of the HRB experiences more flash droughts during the crop growing seasons, and their interannual trends also exhibit significant data uncertainty.

**Key words:** Huaihe River basin; flash drought; soil moisture; spatiotemporal characteristics; data uncertainty

## 引 言

近年来,一种发展快速的干旱类型引起人们的关注与重视,这类干旱被称为骤旱。骤旱的发生常常伴随着高温热浪、强太阳辐射和降水减少等气象条件,能够引起土壤湿度在短期内迅速下降 (Svoboda et al, 2002; Mo and Lettenmaier, 2015, 2016; 袁星等, 2020a)。2012 年 5—8 月发生在美国中部平原的特大干旱就是一次典型的骤旱事件 (Hoerling et al, 2014)。与发展缓慢的传统干旱相比,骤旱时间尺度较短,通常为几周到几个月,但其危害性却不容小觑。在作物生长季(4—9 月)内发生的骤旱对作物发育极为不利,相比缓慢演变的干旱,骤旱可能对农业和社会经济造成更严重的影响 (Svoboda et al, 2002; Hunt et al, 2014; Xie et al, 2016; Otkin et al, 2018)。一项全球范围内的骤旱评估结果表明,2000—2020 年全球仅在 1 候范围内爆发的骤旱发生比例为 33.64%~46.18%,且呈显著上升趋势 (Qing et al, 2022)。近年来,包括中国南方在内的许多地区经历了更为频繁的骤旱 (Hoerling et al, 2014; Wang et al, 2016; Wang and Yuan, 2018; Yuan et al, 2018; 2019; Qing et al, 2022)。在全球变暖的气候背景下,大气水汽含量增加将会引起降水、土壤湿度和蒸散发等方面的变化 (Held and Soden, 2006; Trenberth, 2011),未来全球范围内遭受干旱的频率和严重程度增加的区域总面积将随变暖加剧进一步扩大 (Sheffield and Wood, 2008; Dai, 2013)。有预估结果表明我国骤旱的发生频次、持续时间以及严重程度也将在 21 世纪中叶及 21 世纪末发生不同程度的增加 (Yuan et al, 2019; 2023)。

近年来,一些学者对发生在我国的区域性骤旱特征进行了研究 (Yuan et al, 2015; 2019; Wang et al, 2016; 张翔等, 2018; 杨星星等, 2020; 蔡文慧等, 2021; 朱烨等, 2021; 任涛涛等, 2023),骤旱更易发生在我国南方湿润和半湿润地区 (Wang et al, 2016; Yuan et al, 2019)。相比干旱地区,湿润和半湿润地区的土壤湿度更大,蒸散通常受到能量供应限制,蒸散增加通常与高温同时发生,为骤旱的发生创造了理想条件;另一方面,湿润和半湿润地区通常植被更为茂密,干旱期间植被从深层土壤中汲取更多水分,引起蒸散增加,进而引发骤旱 (Wang et al, 2016)。张翔等 (2018) 的研究结果表明,我国农业区域的骤旱次数总体上呈逐年增加趋势。淮河流域地处中国南北方气候过渡带,天气、气候复杂多变,河网众多,流域内降水时空分布不均匀,年降水量由东南向西北递减,南北年降水量相差 400~500 mm (高辉, 2006; Jin et al, 2022)。淮河流域是中国重要的农业区,也是中国遭受自然灾害最频繁的地区之一,

受地理和气候条件影响，其水灾、旱灾频发（牛若芸和周兵, 2021; 刘远等, 2023; 汪小康等, 2024）。旱涝灾害均会导致作物产量严重歉收，对农业经济具有极大威胁。据统计，1949—1991 年间淮河流域水灾、旱灾成灾面积年均达到 2000 万亩左右，仅因旱灾导致粮食减产量年均达到 11.75 亿公斤（朱正业, 2022）。基于骤旱具有湿润和半湿润地区的易发特性（Wang et al, 2016; Yuan et al, 2019），降水空间分布不均可能会使地处气候过渡带的淮河流域内的骤旱特征更具复杂性，增加旱涝预测的难度。

然而，目前聚焦淮河流域骤旱的研究还存在一定程度的空白，有必要了解淮河流域骤旱事件的基本特征，为科学开展旱灾防御治理提供理论依据。由于仅依赖站点土壤湿度监测数据无法满足大尺度区域研究的需要（詹艳玲等, 2020），前人研究区域骤旱多采用陆表同化或卫星遥感反演数据（张翔等, 2018; 刘懿等, 2021; 蔡文慧等, 2021）。但以往多采用单一资料进行研究，难以对比不同资料之间的不确定性。基于前人评估了多种土壤湿度资料在淮河流域的适用性（詹艳玲等, 2020; 杨传国等, 2021），本文选取四套不同来源的土壤湿度资料，分析 2000—2020 年期间淮河流域骤旱事件的时空分布特征，并讨论四套资料在表征淮河流域骤旱特征方面的不确定性。

## 1 数据和定义

### 1.1 数据

本文使用了时间范围为 2000—2020 年的四套不同来源的土壤湿度资料（表 1）。首先将四套土壤湿度资料通过加权平均处理为根区（1 m）土壤湿度，进一步处理为候平均数据参与骤旱计算。

表 1 资料数据

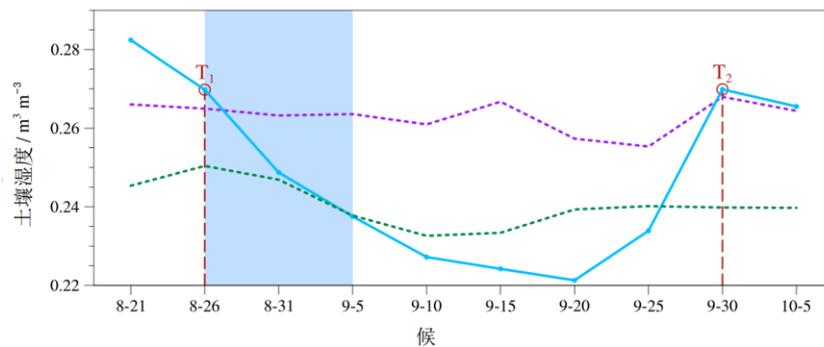
Table 1 Information data

资料集	变量	水平分辨率	时间分辨率
欧洲中期天气预报中心第五代再分析产品（ERA5）（Muñoz Sabater, 2019）	土壤湿度（0~7 cm, 7~28 cm, 28~100 cm 层次）	0.25°×0.25°	逐小时
ERA5-Land（Hersbach et al, 2023）	土壤湿度（0~7 cm, 7~28 cm, 28~100 cm 层次）	0.1°×0.1°	逐小时
美国国家航空航天局（NASA）全球陆表数据同化系统第二版产品中的 GLDAS 2.1 数	土壤湿度（0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm 层次）	0.25°×0.25°	逐 3 h
GLEAM 3.8a 卫星土壤数据集（Martens et al, 2017）	土壤湿度（0~10 cm, 10~100 cm）	0.25°×0.25°	逐日

## 1.2 骤旱事件定义

目前关于识别骤旱事件的方法大致可分为两类：通过短期气象特征的骤旱识别方法和基于土壤湿度下降速率的骤旱识别方法。通过短期气象特征识别的骤旱事件分为热浪型骤旱和缺水型骤旱 (Mo and Lettenmaier, 2015; 2016)，但这种方法未考虑骤旱的快速发展特性，一些研究提出了基于土壤湿度下降速率的骤旱识别方法 (Ford and Labosier, 2017; Yuan et al, 2019; Liu et al, 2020; 刘懿等, 2021; Qing et al, 2022)。本文参考 Yuan et al (2019) 和 Qing et al (2022) 提出的基于土壤湿度下降速率的骤旱识别方法，明确骤旱的爆发、维持和恢复阶段。基于土壤湿度下降速率定义的一次骤旱事件的完整过程为：骤旱爆发阶段，候平均的土壤湿度百分位数从 40% 下降到 20% 过程中的平均下降速率不低于 5%，当土壤湿度恢复至 20% 分位数以上时，骤旱事件终止，且整个骤旱事件的持续时间不少于 15 d。

图 1 是采用 ERA5 在 (34.75°N, 115.75°E) 位置识别的一次骤旱事件。为了方便表示，采用每候的中间日期代表该候，如用 1 月 3 日代表 1 月 1 日—5 日该候。在该骤旱事件中，土壤湿度在 2016 年 8 月 26 日至 9 月 5 日期间内迅速从 40% 分位数以上下降到 20% 分位数以下，随后维持在 20% 分位数以下，直到 9 月 30 日重新恢复到 40% 分位数以上。利用该方法逐格点地识别淮河流域骤旱事件，进一步分析淮河流域骤旱的时空分布特征。在该位置上，ERA5 还识别出其他 7 次骤旱事件，其起讫时间列于表 2。



注：紫色虚线和绿色虚线分别为土壤湿度的 40% 和 20% 分位数阈值，蓝色实线为候平均的土壤湿度，蓝色区域表示骤旱爆发阶段， $T_1$ 、 $T_2$  分别为骤旱开始和结束时间。

图 1 采用 ERA5 识别出的 2016 年 8 月 26 日至 9 月 30 日在 (34.75°N, 115.75°E) 发生的一次骤旱事件

Fig.1 A flash drought event occurring at (34.75°N,115.75°E) from August 26th to September 30th, 2016, identified from ERA5

表 2 ERA5 在 (34.75°N, 115.75°E) 位置识别出的其他 7 次骤旱事件的起讫时间

**Table 2 Start and end dates of the other 7 flash drought events identified at the location (34.75°N, 115.75°E) from ERA5**

序号	骤旱开始时间	土壤湿度百分位数下降到 20%以下的时间	骤旱结束时间
1	2001 年 11 月 14 日	2001 年 11 月 24 日	2001 年 12 月 9 日
2	2002 年 8 月 1 日	2002 年 8 月 11 日	2002 年 8 月 26 日
3	2010 年 7 月 22 日	2010 年 8 月 6 日	2010 年 8 月 26 日
4	2010 年 11 月 4 日	2010 年 11 月 24 日	2011 年 3 月 4 日
5	2015 年 9 月 5 日	2015 年 9 月 25 日	2015 年 10 月 30 日
6	2016 年 2 月 17 日	2016 年 2 月 27 日	2016 年 4 月 8 日
7	2019 年 2 月 22 日	2019 年 3 月 9 日	2019 年 3 月 24 日

### 1.3 骤旱平均历时和发生率

在图 1 所示的骤旱事件中，骤旱开始时间为 2016 年 8 月 26 日，骤旱结束时间为 2016 年 9 月 30 日，该次骤旱事件历时为 7 候。单个格点上的骤旱平均历时定义为该格点在 2000—2020 年发生的骤旱事件的总历时除以骤旱总发生次数。单个格点上的骤旱发生率定义为该格点上骤旱事件的总历时占统计时段（2000—2020 年的总候数）的百分比。

## 2 结果与分析

### 2.1 基本特征

#### 2.1.1 发生次数

图 2 为 2000—2020 年淮河流域骤旱的年平均发生次数，其结果具有较大的资料不确定性。从区域平均结果来看，ERA5、ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 四套土壤湿度资料识别的骤旱年平均发生次数分别为 0.50 次、0.26 次、0.31 次和 0.28 次，ERA5 识别的骤旱次数明显多于其他三套资料。从骤旱次数的空间分布来看，在淮河流域东北—西南对角线上 ERA5 识别的骤旱次数最多（图 2a）。ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料的结果总体上呈现北少南多的空间分布，即骤旱事件更多发生在淮河流域南边缘地区，在中部和北部地区较少发生（图 2b~2d）。

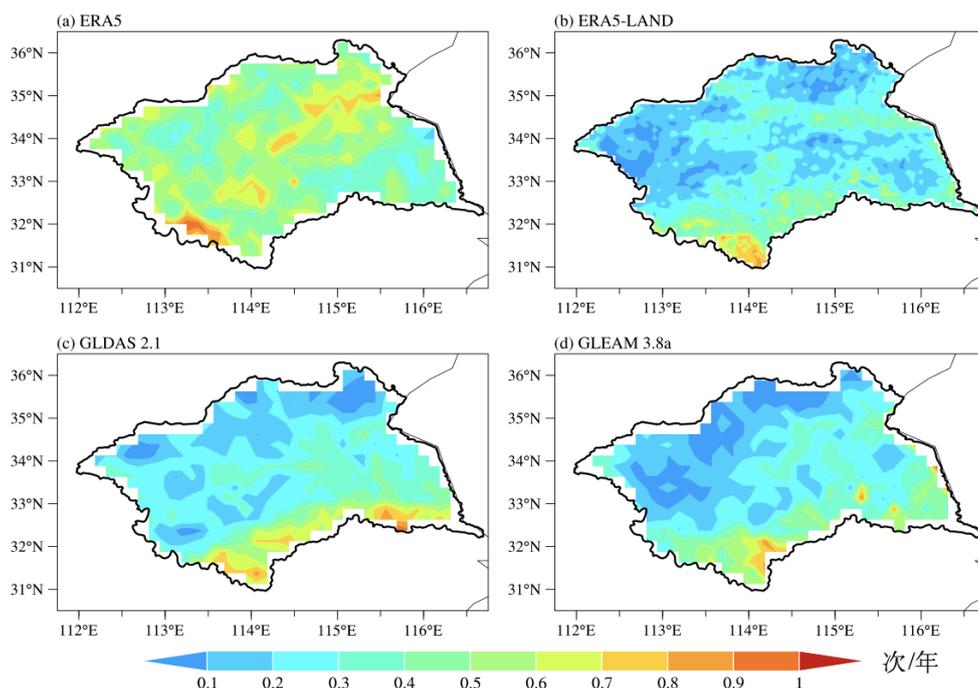


图2 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 资料中淮河流域 2000—2020 年骤旱的平均发生次数

Fig.2 Average occurrence count of flash droughts in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020 in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

### 2.1.2 平均历时

图 3 为淮河流域骤旱的平均历时，ERA5、ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 识别的骤旱平均历时分别为 10.4 候、12.8 候、16.7 候和 14.4 候。与骤旱平均发生次数的结果相反，ERA5 显示的骤旱平均历时低于其他三套资料的结果（图 3a）。从空间分布上看，ERA5 的结果空间分布均匀，其他三套资料的骤旱平均历时大致呈北长南短的分佈（图 3b~3d）。可以发现，骤旱平均历时的空间分佈与骤旱平均发生次数的空间分佈大致相反，即骤旱多发地区的骤旱平均历时相对较短，而在骤旱少发地区骤旱平均历时更长。蔡文慧等（2021）研究中国东部季风区域骤旱的结果表明，骤旱历时总体呈现出北长南短的特征，主要是因为干旱半干旱地区水资源相对不足，土壤湿度和蒸散量相互抑制，共同减少，更容易发生长时间的干旱。GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 两套资料的骤旱平均历时的空间分佈更为接近（图 3c, 3d）。

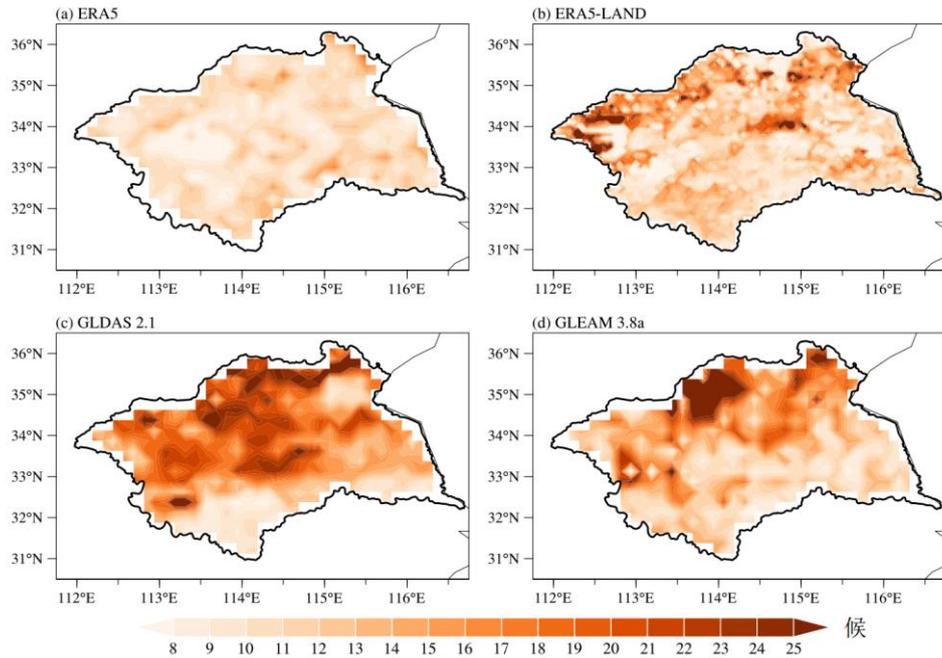


图3 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 资料中  
淮河流域 2000–2020 年骤旱的平均历时

Fig. 3 Average duration of flash droughts in Huaihe River Basin from 2000 to 2020 in  
(a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

与基于短期气象特征识别的骤旱相比，本文基于土壤湿度下降速率识别的骤旱平均历时总体偏长。Mo and Lettenmaier (2015; 2016) 分析美国热浪型骤旱和缺水型骤旱的结果表明，约有 55%~60% 的热浪型骤旱持续 1 候，30%~35% 的热浪型骤旱持续 2 候，大多数缺水型骤旱仅持续 1 候。Yuan et al (2019) 也指出，基于短期气象特征识别的骤旱的平均历时非常短，大多在 7 d 左右，而基于土壤湿度下降速率识别的骤旱的平均历时约为 20~40 d (4~8 候)。这种结果差异从干旱影响的角度来看更为合理，因为如果干旱时间过短，可能不足以对生态系统产生负面影响 (Yuan et al, 2019; 袁星等, 2020b)。此外，本文识别的骤旱平均历时与 Yuan et al (2019) 的结果相比也明显偏长，资料、研究区域和时间段的不同可能是引起结果差异的原因。

### 2.1.3 发生率

2000—2020 年淮河流域的骤旱总历时占统计时段的比例 (发生率) 如图 4 所示。四套资料的结果显示，骤旱发生率大多在 3%~10% 之间，这与 Liu et al (2020) 研究的黄河流域骤旱结果相似。对比图 2 可看出，骤旱平均发生次数的空间分布决定了骤旱发生率的空间

分布。ERA5 在淮河流域东北-西南沿线上上的骤旱发生次数较多，在该地区的骤旱总历时更长，约占统计时段的 10%左右。ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料的骤旱发生率的空间分布也与各自的骤旱平均发生次数的空间分布相似。Liu et al (2020) 研究结果表明，基于短期气象特征识别的骤旱发生率略高于基于土壤湿度下降速率的结果，这表明骤旱识别方法的不同在某种程度上影响骤旱发生率的识别结果。

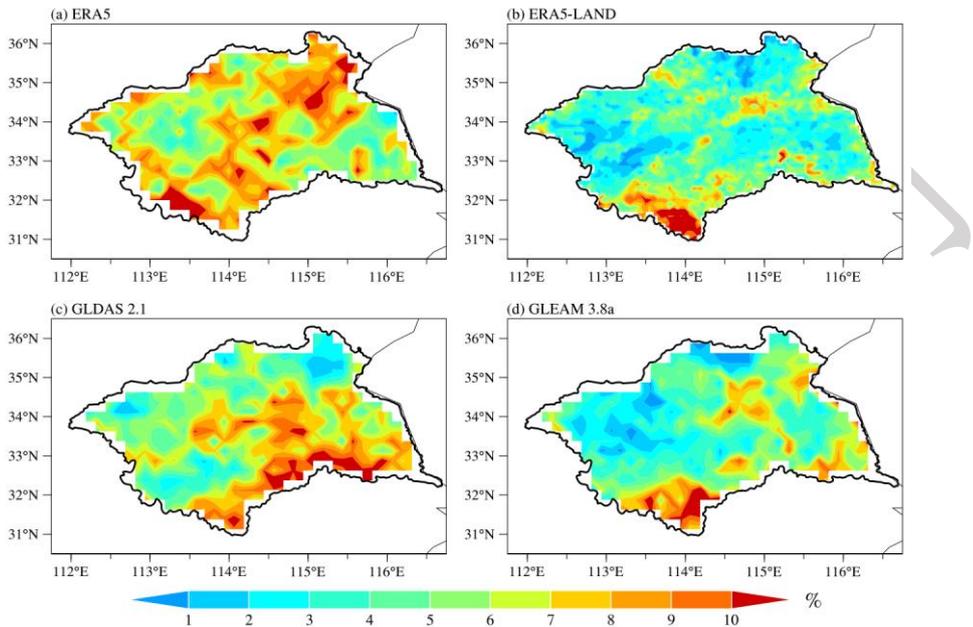


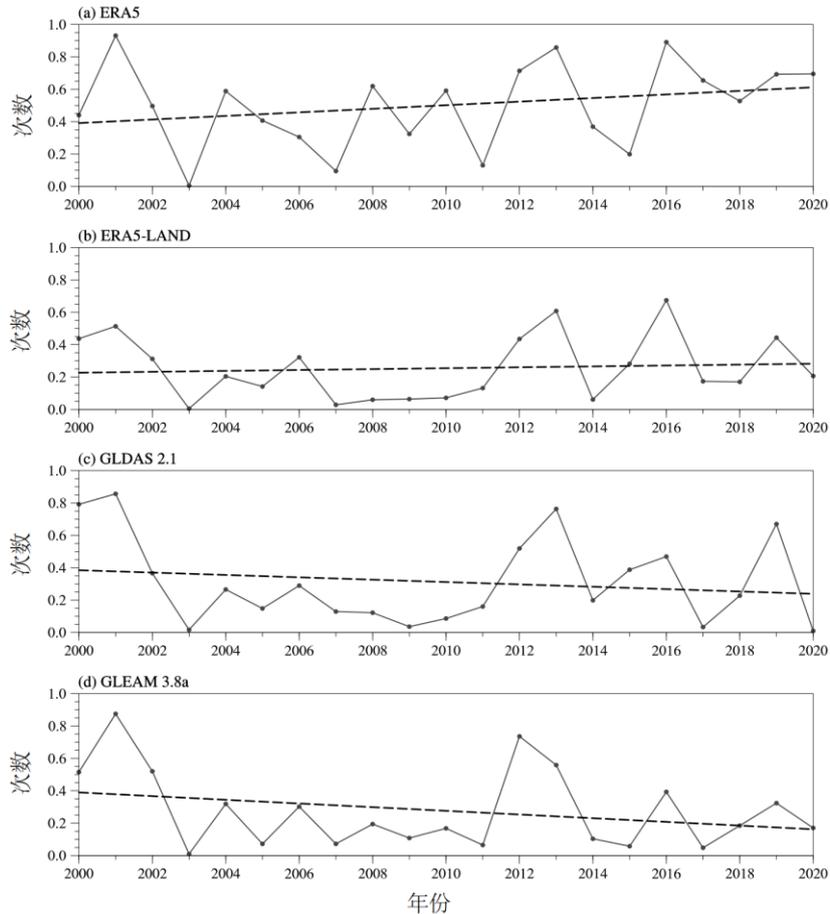
图4 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 资料中淮河流域 2000—2020 年骤旱的发生率

Fig. 4 Occurrence of frequency of flash droughts in Huaihe River basin from 2000 to 2020 in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

#### 2.1.4 年际变化

淮河流域骤旱发生次数的年际变化较大，其变化趋势具有较大的资料不确定性(图 5)。与图 2 的结果一致，ERA5 资料的逐年骤旱发生次数明显高于其他三套资料，骤旱次数的年际变化也与其他三套资料差别较大。ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料的骤旱发生次数的年际变化更为相近，尤其是 GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a。ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料的结果一致表明，2002—2010 年骤旱发生次数偏低，2010 年后骤旱频发，同时年际变化增大。从骤旱发生次数的年际变化趋势来看，ERA5 和 ERA5-LAND 资料的骤旱发生次数在 2000—2020 年呈上升趋势，而其余两套资料呈下降趋

势（均未通过 90%的显著性检验）。骤早年际变化趋势除受到资料不确定性影响外，还可能会受到研究时段的影响，例如 GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 两套资料如果从 2003 年开始计算趋势，其减少趋势会变成上升趋势。这表明淮河流域骤旱发生次数的年际变化趋势具有较大的资料不确定性，未来需要引入质量较高的观测资料进一步验证。



注：虚线为骤旱历年发生次数与时间的一元线性回归。

图 5 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 资料中

淮河流域 2000—2020 年逐年骤旱发生次数

Fig.5 Annual occurrence count of flash droughts in Huaihe River Basin from 2000 to 2020

in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

## 2.2 聚焦作物生长季的骤旱发生情况

作物生长季发生的骤旱对作物发育具有严重危害，2017 年美国北部平原骤旱使作物减产 6% (He et al, 2019)。关注淮河流域作物生长季的骤旱发生情况对保护农业生产力、确保粮食安全以及促进水资源和土地管理的可持续实践至关重要。鉴于土壤水分是影响作物发

育和产量的关键因素之一 (Lobell et al, 2011), 本文对比统计了淮河流域在作物生长季 (4—9 月) 和非生长季 (1—3 月和 10—12 月) 的月平均骤旱发生次数 (图 6)。与全年的统计结果相似 (图 2), 无论是作物生长季还是非生长季, ERA5 的月平均骤旱发生次数在四套资料中均为最高。其中, 在作物非生长季 ERA5 的月平均骤旱发生次数远高于其他三套资料。对比作物生长季与非生长季, 四套资料的结果一致表明, 淮河流域发生在作物生长季的月平均骤旱发生次数高于非生长季的结果。由于 ERA5 在作物非生长季的骤旱月平均发生次数相较其他三套资料大幅偏高, 因此 ERA5 在生长季和非生长季的结果差异程度相对较小。而 ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料在作物生长季的月平均骤旱发生次数均达到非生长季结果的两倍以上。

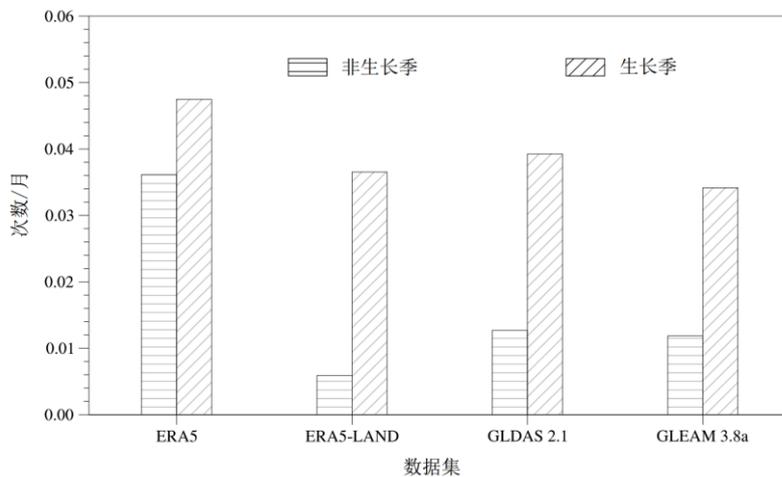


图 6 淮河流域骤旱在作物非生长季和生长季的区域月平均发生次数

Fig.6 Regional monthly average occurrence count of flash droughts in Huaihe River Basin during non-growing and growing seasons of crops

淮河流域骤旱在作物生长季的发生次数与全年结果的空间分布相似 (图 2、图 7)。对比四套资料的结果, ERA5 在作物生长季的骤旱发生次数相较其他三套资料偏多, 与图 6 的结果一致。ERA5 在淮河流域中部地区的骤旱平均发生次数偏多 (图 7a), 其他三套资料骤旱平均发生次数在淮河流域南部边缘地区更多 (图 7b~7d)。对于骤旱平均历时来说, 作物生长季的骤旱历时明显低于全年的结果, 且区域分布相对更加均匀 (图 3、图 8)。四套资料中, GLDAS 2.1 的骤旱平均历时相比其他三套资料的结果偏长, 其历时较长的骤旱主要集中在中部区域, 其他三套资料历时较长的骤旱主要在淮河流域南部区域呈零星分布。

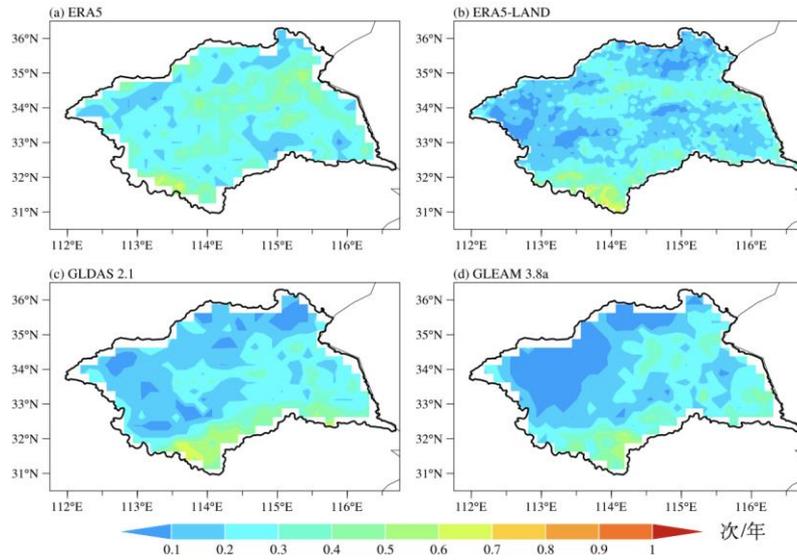


图7 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 资料中淮河流域 2000—2020 年骤旱在作物生长季的平均发生次数

Fig.7 Average occurrence count of flash droughts during the crop growing seasons in Huaihe River Basin from 2000 to 2020 in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

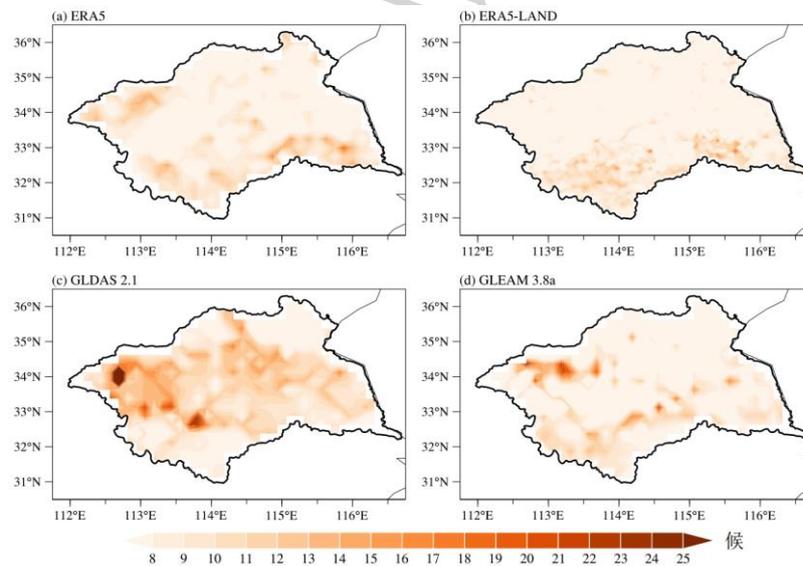


图8 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 资料中淮河流域 2000—2020 年骤旱在作物生长季的平均历时

Fig.8 Average duration of flash droughts during the crop growing seasons in Huaihe River Basin from 2000 to 2020 in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

聚焦作物生长季的骤旱发生率，四套资料的结果差异程度较大。从区域整体上看，ERA5 和 GLDAS 2.1 识别的生长季骤旱发生率相比 ERA5-LAND 和 GLEAM 3.8a 偏高（图 9）。ERA5 和 GLDAS 2.1 在淮河流域南部和中部区域识别的骤旱发生率较高，而其余两套资料的骤旱发生率较高处主要集中在南部地区。四套资料的结果一致显示，淮河流域南部地区作物生长季的骤旱发生率高于其他地区。这意味着该地区在作物生长季期间更容易发生骤旱，造成短期内水分供应不足，进而影响农业生产，这对淮河流域南部地区的农业灌溉和水资源调配提出了更高的要求。图 10 为作物生长季的逐年骤旱发生次数。对于 ERA5 而言，作物生长季的年际变化与全年结果差别较大，主要差异在于 2002—2010 年骤旱发生次数相对其他年份较低，且年际变化波动较为平缓（图 10a）。与全年的统计结果相似，ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料在 2002—2010 年生长季骤旱发生次数均较少，2010 年后骤旱发生次数增多，且年际变化增大（图 10b~10d）。四套资料的生长季骤旱发生次数的变化趋势仍存在一定分歧，同样反映出较大的资料不确定性。ERA5、ERA5-LAND 和 GLEAM 3.8a 在作物生长季的骤旱趋势与全年结果保持一致，而 GLDAS 2.1 在作物生长季的骤旱趋势与全年结果相反。

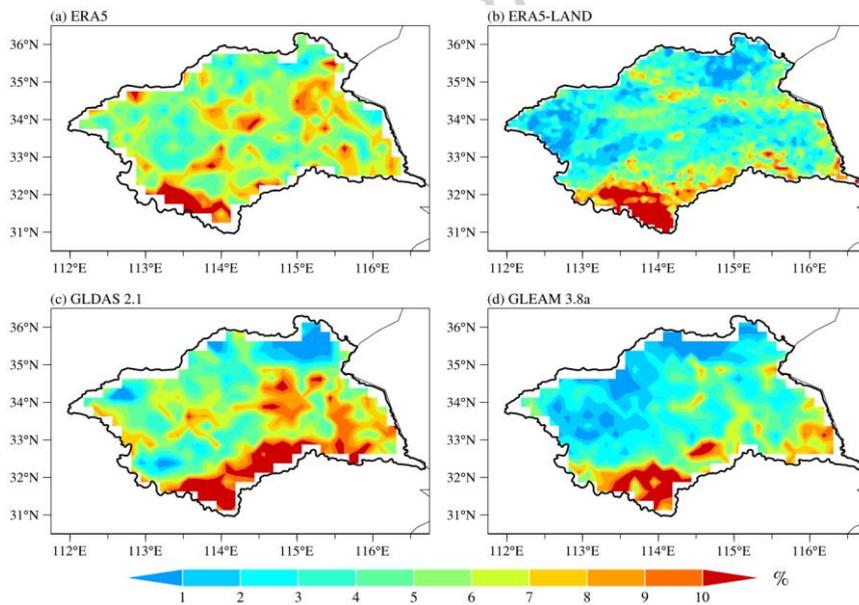


图 9 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 识别的淮河流域在 2000—2020 年作物生长季的骤旱发生率

Fig.9 Occurrence of frequency of flash droughts during the crop growing seasons in Huaihe River Basin from 2000 to 2020 in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

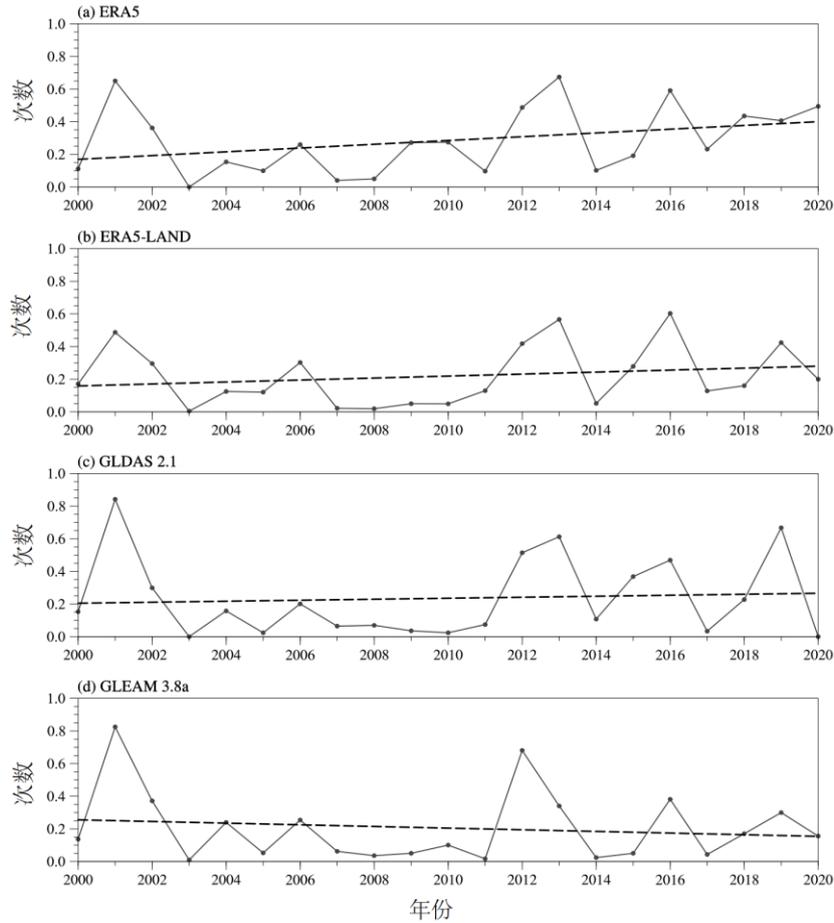


图 10 (a) ERA5、(b) ERA5-LAND、(c) GLDAS 2.1 和 (d) GLEAM 3.8a 识别的淮河流域在 2000—2020 年作物生长季骤旱逐年发生次数

Fig.10 Annual occurrence count of flash droughts during the crop growing seasons in Huaihe River Basin from 2000 to 2020 in (a) ERA5, (b) ERA5-LAND, (c) GLDAS 2.1 and (d) GLEAM 3.8a datasets

### 3 结论和讨论

本文利用 ERA5、ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 四套土壤湿度资料研究了 2000—2020 年淮河流域骤旱事件的时空分布特征以及资料不确定性。根据骤旱发展期间土壤湿度快速下降特性识别了淮河流域骤旱事件，分别从全年和作物生长季统计分析了四套资料中的淮河流域骤旱平均发生次数、平均历时以及发生率的空间分布，并分析了骤旱发生次数的年际变化和趋势。

四套土壤湿度资料表征的淮河流域骤旱特征存在一定程度的差异。在全年统计结果方面, ERA5 的骤旱平均发生次数在淮河流域整体偏多, 其余三套资料的骤旱平均发生次数呈北少南多的空间分布。ERA5 的骤旱平均历时在淮河流域整体偏短, 其他三套资料大致呈北长南短的空间分布。四套资料一致表明, 淮河流域骤旱平均历时的空间分布与骤旱平均发生次数的空间分布大致呈反相关。骤旱发生率的空间分布由骤旱平均发生次数所决定。淮河流域骤旱发生次数的年际变化较大, 其趋势具有较大的资料不确定性。ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料一致表明, 2002—2010 年骤旱发生次数较少, 2010 年后骤旱多发且年际变化增大。淮河流域发生在作物生长季的骤旱明显高于非生长季的结果。针对作物生长季的骤旱统计结果表明, 骤旱平均发生次数与全年结果的空间分布相似, 骤旱平均历时则相对偏短。淮河流域南部地区在作物生长季的骤旱发生率更高, 这给应对骤旱挑战、农业灌溉和水资源管理增加了不确定性。作物生长季骤旱发生次数的年际变化同样较大, 其趋势也具有较大的资料不确定性。

ERA5-LAND、GLDAS 2.1 和 GLEAM 3.8a 三套资料的结果与以往针对全国范围的骤旱研究结果相似, 即在淮河流域南部地区骤旱多发, 而在淮河流域其他地区骤旱相对少发 (Wang et al, 2016; Yuan et al, 2019)。本文研究了多套资料在表征淮河流域骤旱基本特征中的不确定性, 这种不确定性提示研究人员在使用非观测来源的土壤湿度资料时应当注重资料的适用性评估。四套土壤湿度资料在表征淮河流域骤旱特征上的差异可能源自空间和时间分辨率的不同。此外, 不同数据集的数据来源和同化方法的差异也可能导致在描绘淮河流域骤旱事件时存在差异。例如, ERA5 在多个骤旱特征上与其他三套资料表现不同, 这可能是因为 ERA5 使用了来自全球的各种观测数据, 包括地面观测、卫星数据、探空数据等, 通过复杂的数值天气预报模型和数据同化技术生成再分析数据。ERA5-Land 是将 ERA5 大气变量 (如空气温度和空气湿度) 作为大气驱动重新输入到 ERA5 气候再分析的陆面组件中生成的全球陆面数据集, ERA5-Land 更关注陆面过程。GLDAS 2.1 同化地面观测和卫星遥感数据, 特别关注土壤湿度、地表温度和其他陆面变量的模拟, 进一步通过陆面模型进行数据同化。GLEAM 3.8a 主要依赖卫星遥感数据, 如土壤湿度、植被指数、地表温度等以及气象再分析数据来驱动其模型。淮河流域骤旱特征的研究仍需引入质量较高的观测数据进一步验证。

本文从骤旱发生次数、历时、发生率和年际变化多个方面重点关注了淮河流域骤旱的基本特征及其资料不确定性,并特别关注了作物生长季的骤旱发生情况,为提升淮河流域骤旱基本科学认识提供见解。引入观测数据验证以及明确淮河流域骤旱的发生发展机理对于进一步提升抗骤旱能力具有重要意义,这将是我們下一步的工作重点。

## 参考文献

- 蔡文慧,孙鹏,夏春晖,等,2021.基于不同土壤类型的东部季风区骤旱时空演变特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),57(6):834-844. Cai W H, Sun P, Xia C H, et al, 2021. Spatio-temporal evolution of flash droughts in eastern monsoon region according to different soil types[J]. J Beijing Norm Univ (Nat Sci), 57(6): 834-844(in Chinese).
- 高辉,2006.淮河夏季降水与赤道东太平洋海温对应关系的年代际变化[J].应用气象学报,17(1):1-9. Gao H, 2006. Decadal variation of the relationship between summer precipitation along the Huaihe river valley and SST over the equatorial eastern Pacific[J]. J Appl Meteorol Sci, 17(1): 1-9(in Chinese).
- 刘懿,朱烨,张林齐,等,2021.骤发干旱前期气象驱动条件及可模拟性分析[J].水科学进展,32(4):497-507. Liu Y, Zhu Y, Zhang L Q, et al, 2021. Precedent meteorological driving forces of flash drought and their feasibility for flash drought simulation[J]. Adv Water Sci, 32(4): 497-507(in Chinese).
- 刘远,李莹,郭增元,等,2023.2022年全球重大天气气候事件[J].气象,49(9):1142-1148. Liu Y, Li Y, Guo Z Y, et al, 2023. Global significant weather and climate events in 2022[J]. Meteor Mon, 49(9): 1142-1148(in Chinese).
- 牛若芸,周兵,2021.2019年江淮流域梅雨异常特征及成因分析[J].气象,47(11):1347-1358. Niu R Y, Zhou B, 2021. Analysis of abnormal characteristics and causes of Meiyu over the Yangtze-Huaihe River Basin in 2019[J]. Meteor Mon, 47(11): 1347-1358(in Chinese).
- 任涛涛,李双双,段克勤,等,2023.黄土高原热浪型和缺水型骤旱时空变化特征及其影响因素[J].干旱区地理,46(3):360-370. Ren T T, Li S S, Duan K Q, et al, 2023. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of heat wave and precipitation deficit flash drought in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geogr, 46(3): 360-370(in Chinese).
- 汪小康,崔春光,刘柯,等,2024.中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征[J].气象,50(4):393-406. Wang X K, Cui C G, Liu K, et al, 2024. Spatio-temporal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the main rainy season[J]. Meteor Mon, 50(4): 393-406(in Chinese).
- 杨传国,梁莹,柏欣莉,等,2021.淮河流域 GLEAM 卫星土壤湿度数据评估及其时空变化规律[J].中国农村水利水电,(9):52-57,66. Yang C G, Liang Y, Bai X L, et al, 2021. GLEAM soil moisture data evaluation and its spatiotemporal characteristics in the Huaihe River Basin[J]. China Rural Water Hydropower, (9): 52-57, 66(in Chinese).
- 杨星星,杨云川,田忆,等,2020.广西降雨亏缺型骤旱的演变过程及时空分布特征[J].水土保持研究,27(2):149-157. Yang X X, Yang Y C, Tian Y, et al, 2020. Characteristics of spatiotemporal distribution of rainfall-deficient flash drought in Guangxi[J]. Res Soil Water Conserv, 27(2): 149-157(in Chinese).
- 袁星,马凤,李华,等,2020a.全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J].大气科学学报,43(1):225-237. Yuan X, Ma F, Li H, et al, 2020a. A review on multi-scale drought processes and prediction under global change[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 225-237(in Chinese).
- 袁星,王钰淼,张苗,等,2020b.关于骤旱研究的一些思考[J].大气科学学报,43(6):1086-1095. Yuan X, Wang Y M, Zhang M, et al, 2020b. A few thoughts on the study of flash drought[J]. Trans Atmos Sci, 43(6): 1086-1095(in Chinese).
- 詹艳玲,林朝晖,田风云,等,2020.淮河流域土壤湿度的分布特征和记忆能力分析[J].气象科技进展,10(5):87-96. Zhan Y L, Lin Z H, Tian F Y, et al, 2020. The spatio-temporal characteristics of soil moisture and its memory over Huaihe River Basin[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(5): 87-96(in Chinese).
- 张翔,陈能成,胡楚丽,等,2018.1983—2015年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析[J].地球科学进展,33(10):1048-1057. Zhang X, Chen N C, Hu C L, et al, 2018. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015[J]. Adv Earth Sci, 33(10): 1048-1057(in Chinese).
- 朱烨,刘懿,王文,等,2021.基于土壤含水率的骤发干旱和缓慢干旱时空特征分析[J].农业工程学报,37(2):114-122. Zhu Y, Liu Y, Wang W, et al, 2021. Analysis of spatio-temporal characteristics of flash drought and slowly-evolving drought using soil moisture percentile[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 37(2): 114-122(in

- Chinese).
- 朱正业, 2022. 1949—2009 年淮河流域农业自然灾害分布与影响[J]. 阜阳师范大学学报(社会科学版), (5): 1-8.
- Zhu Z Y, 2022. Distribution and impact of agricultural natural disaster in the Huaihe River basin 1949—2009[J]. *J Fuyang Norm Univ (Soc Sci)*, (5): 1-8(in Chinese).
- Beaudoing H, Rodell M, NASA/GSFC/HSL, 2020. GLDAs noah land surface model L4 3 hourly 0.25×0.25 degree v2.1 (GLDAS\_NOAH025\_3H)[EB/OL]. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). <http://doi.org/10.5067/E7TYRXPJKWOQ>.
- Dai A G, 2013. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nat Clim Change*, 3(1): 52-58.
- Ford T W, Labosier C F, 2017. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the eastern United States[J]. *Agric For Meteorol*, 247: 414-423.
- Held I M, Soden B J, 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. *J Climate*, 19(21): 5686-5699.
- He M Z, Kimball J S, Yi Y H, et al, 2019. Impacts of the 2017 flash drought in the US Northern plains informed by satellite-based evapotranspiration and solar-induced fluorescence[J]. *Environ Res Lett*, 14(7): 074019.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2023. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present[EB/OL].<http://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.
- Hoerling M, Eischeid J, Kumar A, et al, 2014. Causes and predictability of the 2012 Great Plains drought[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 95(2): 269-282.
- Hunt E D, Svoboda M, Wardlow B, et al, 2014. Monitoring the effects of rapid onset of drought on non-irrigated maize with agronomic data and climate-based drought indices[J]. *Agric For Meteorol*, 191: 1-11.
- Jin H Y, Chen X H, Zhong R D, et al, 2022. Spatiotemporal distribution analysis of extreme precipitation in the Huaihe River Basin based on continuity[J]. *Nat Hazards*, 114(3): 3627-3656.
- Liu Y, Zhu Y, Ren L L, et al, 2020. Two different methods for flash drought identification: comparison of their strengths and limitations[J]. *J Hydrometeorol*, 21(4): 691-704.
- Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J, 2011. Climate trends and global crop production since 1980[J]. *Science*, 333(6042): 616-620.
- Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al, 2017. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. *Geosci Model Dev*, 10(5): 1903-1925.
- Mo K C, Lettenmaier D P, 2015. Heat wave flash droughts in decline[J]. *Geophys Res Lett*, 42(8): 2823-2829.
- Mo K C, Lettenmaier D P, 2016. Precipitation deficit flash droughts over the United States[J]. *J Hydrometeorol*, 17(4): 1169-1184.
- Muñoz Sabater J, 2019. ERA5-Land hourly data from 1950 to present[EB/OL]. <http://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>.
- Otkin J A, Svoboda M, Hunt E D, et al, 2018. Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 99(5): 911-919.
- Qing Y, Wang S, Ancell B C, et al, 2022. Accelerating flash droughts induced by the joint influence of soil moisture depletion and atmospheric aridity[J]. *Nat Commun*, 13(1): 1139.
- Sheffield J, Wood E F, 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations[J]. *Climate Dyn*, 31(1): 79-105.
- Svoboda M, LeCompte D, Hayes M, et al, 2002. The drought monitor[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 83(8): 1181-1190.
- Trenberth K E, 2011. Changes in precipitation with climate change[J]. *Clim Res*, 47(1-2): 123-138.
- Wang L Y, Yuan X, 2018. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought[J]. *Adv Atmos Sci*, 35(12): 1478-1490.
- Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, et al, 2016. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. *Sci Rep*, 6(1): 30571.
- Xie Z H, Wang L Y, Jia B H, et al, 2016. Measuring and modeling the impact of a severe drought on terrestrial ecosystem CO<sub>2</sub> and water fluxes in a subtropical forest[J]. *J Geophys Res: Biogeosci*, 121(10): 2576-2587.
- Yuan X, Ma Z G, Pan M, et al, 2015. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons[J]. *Geophys Res Lett*, 42(11): 4394-4401.
- Yuan X, Wang L, Wu P, et al, 2019. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China[J]. *Nat Commun*, 10(1): 4661.
- Yuan X, Wang L Y, Wood E F, 2018. Anthropogenic intensification of southern african flash droughts as exemplified by the 2015/16 season[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 99(1): S86-S90.
- Yuan X, Wang Y M, Ji P, et al, 2023. A global transition to flash droughts under climate change[J]. *Science*, 380(6641): 187-191.