

# 海河流域旱涝急转事件的时空演变特征

杨艳娟,陈跃浩,陈思宁,熊明明

# Spatial and temporal variation characteristics of the drought-flood abrupt alternations over Haihe River Basin

YANG Yanjuan, CHEN Yuehao, CHEN Sining, XIONG Mingming 在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20210114001

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 海河流域近500年旱涝演变规律分析

Evolution of drought and flood in the Haihe Rvier Basin for the last 500 years 水利水运工程学报. 2020(4): 17 https://doi.org/10.12170/20190603002

# 海河流域径流变化趋势及其归因分析

Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin 水利水运工程学报. 2017(4): 59 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.009

# 大渡河流域年径流变化特征及其归因分析

Variation characteristics of annual runoff and its attribution analysis in Dadu River basin 水利水运工程学报. 2021(3):96 https://doi.org/10.12170/20200608001

# 泾河柔远川与合水川流域降水强度趋势变化特征

Characteristics of precipitation intensity regimes in the Rouyuanchuan and Heshuichuan watersheds of the Jing River 水利水运工程学报. 2021(4): 122 https://doi.org/10.12170/20200904002

# 宁夏清水河流域水沙变化特点分析

Analysis on the characteristics of flow and sediment variation in Qingshuihe River basin of Ningxia 水利水运工程学报. 2020(4): 57 https://doi.org/10.12170/20200213002

# 渭河干流径流变化趋势及突变分析

Analysis of variation trend and abrupt point of runoff in the mainstream of Weihe River Basin 水利水运工程学报. 2019(2): 33 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.005





#### DOI:10.12170/20210114001

杨艳娟,陈跃浩,陈思宁,等. 海河流域旱涝急转事件的时空演变特征 [J]. 水利水运工程学报, 2021. (YANG Yanjuan, CHEN Yuehao, CHEN Sining, et al. Spatial and temporal variation characteristics of the drought-flood abrupt alternations over Haihe River Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(in Chinese))

# 海河流域旱涝急转事件的时空演变特征

# 杨艳娟,陈跃浩,陈思宁,熊明明

(天津市气候中心, 天津 300074)

**摘要:**研究海河流域旱涝急转的发生规律,可为海河流域防汛抗旱提供科学参考依据。利用海河流域159个 气象站1961—2019年逐日降水资料,计算出标准化前期降水指数(SAPI),基于该指数根据旱涝等级标准和旱 涝急转条件筛选出1961年以来的旱涝急转事件,分析海河流域旱涝急转频次和强度特征。结果表明:海河流域 年平均旱涝急转频次为33次,基本上逐年代增加,最近10年平均值达37次。旱涝急转强度也呈上升趋势, 2000年后增加至平均值以上,尤其是近10年呈现出跳跃式的增加,达到最大值。旱涝急转多发生在5、6月及 9月中旬,盛夏期间发生的次数较少。旱涝急转强度呈单峰型分布,最大值出现在6月中旬到7月上旬,该时段 对应的旱涝急转频次也较多,增加了洪涝灾害的风险。从空间分布来看,旱涝急转频次和强度在滦河河系南部 地区、北三河系西部及徒骇马颊河中部等地区均为大值区,即这些地区旱涝急转出现频次高、强度大,因此,发 生旱涝急转的风险较高。

关 键 词:海河流域;旱涝急转;标准化前期降水指数 (SAPI);频次;强度

中图分类号: P467 文献标志码: A 文章编号:

如果一个区域短时间内由旱转涝,可称为旱涝急转,该现象由降水时间和降水强度决定。即使在季节 平均降水正常年份,也有可能发生<sup>[1]</sup>。我国旱涝急转现象在长江流域、海河流域、淮河流域、华南地区及西 南地区等均有出现。吴志伟等<sup>[2]</sup>先提出"旱涝并存,旱涝急转"现象,并定义了长周期旱涝急转指数,对长 江流域旱涝急转现象及其大尺度环流特征进行了分析。此后,一些学者进一步分析发现,长江流域发生旱 涝急转的区域范围越来越广,频率和强度均具有逐年增长趋势<sup>[3-5]</sup>。东江流域汛期涝转旱的趋势减小,旱转 涝的趋势增加<sup>[6]</sup>。华南地区旱涝急转现象无明显的趋势变化特征<sup>[7]</sup>,但其发生频率具有先减少后增加的年代 际特征<sup>[8]</sup>。皖北地区在 2000 年之后旱涝急转事件具有更高的发生频率<sup>[9]</sup>。目前,旱涝急转现象已成为中国 夏季旱涝异常的一种新特点,近年来广发、频发,造成水污染<sup>[10]</sup>及农作物减产<sup>[11-14]</sup>,严重威胁到我国的水安 全和粮食安全,因此旱涝急转问题日益成为气象、水文、农业等相关领域研究的热点。

海河流域是我国政治文化中心和经济发达地区,具有重要的战略地位。然而,流域内人口密集,水资源 供需矛盾比较突出,人均、亩均水资源量仅为 276 和 213 m<sup>3</sup>,分别为全国平均水平的 13% 和 15%<sup>[15]</sup>。水资 源短缺已成为制约海河流域经济社会可持续发展的主要因素,因此海河流域的旱涝异常一直是学者研究的 重点。研究表明,在过去的半个世纪,海河流域主要表现为降水量减少,地面气温趋于上升<sup>[16]</sup>,干旱加 剧<sup>[17-19]</sup>。虽然海河流域总体上呈现暖干化趋势,但是强降水仍会经常出现<sup>[20-22]</sup>,近年来比较极端的强降水有 "96.8"、"12.7"、"16.7"等<sup>[23]</sup>,给农业、交通及防汛等带来了较大的压力。值得注意的是,旱涝急转作 为季节内降水异常的典型代表,其危害和损失较单一的旱、涝灾害更大,对工农业生产和人民生活均构成较 大威胁,因此急需研究旱涝急转现象及其时空分布规律。目前针对海河流域旱涝急转的研究较少,汪靖

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0606302);国家自然科学基金资助项目(31701314)

**作者简介**:杨艳娟(1979—),女,辽宁葫芦岛人,高级工程师,主要从事气候变化及气候应用研究。 E-mail: yangyyj1979@163.com 通信作者:陈思宁(E-mail: siningchen@126.com)

等<sup>[24]</sup>基于月尺度(7、8月)数据对海河流域旱涝急转事件进行了分析。然而,旱涝急转可发生在任意时间,如果把降水量固定在7月和8月,那么会把旱涝中和,极大可能会对旱涝急转事件造成漏选<sup>[3]</sup>。因此本文基于日降水量,进行旱涝急转事件的筛选,可更加精确地得到海河流域旱涝急转的发生规律,并在此基础上分析其时空分布特征及变化规律,以期为海河流域防汛抗旱提供科学参考依据。

# 1 数据和方法

#### 1.1 研究区概况

海河流域位于 112°E~120°E、35°N~43°N 之间, 总面积为 31.8×10<sup>4</sup> km<sup>2[25]</sup>, 包括海河、滦河、徒骇马颊河 等水系<sup>[26]</sup>, 地跨北京、天津、山西、河南、山东、内蒙古、辽宁等 8 省(市、自治区)<sup>[16]</sup>。海河流域属于温带大 陆性季风气候, 年平均气温 11.3 ℃, 由西北向东南递增, 年平均降水量为 507.5 mm, 降水年际变化大, 年内

分布不均,易发生洪涝和干旱灾害。2014年河南遭 遇严重干旱,造成2343万人受灾,144万人出现饮 水困难,农作物受灾面积217万hm<sup>2</sup>,绝收面积 33.49万hm<sup>2</sup>,直接经济损失109.85亿元<sup>[27]</sup>。2016 年7月18—21日,海河流域自南向北出现一次全流 域强降雨过程,海河南系漳卫河、子牙河发生了 1996年以来最大洪水,受暴雨洪水影响,北京、天 津、河北、山西、河南5省(直辖市)283县(区、市) 受灾,直接经济损失达617.77亿元<sup>[28]</sup>。

#### 1.2 数据

本文采用海河流域 159 个气象站 1961—2019 年逐日降水数据,研究区域、站点分布及站点高程见 图 1<sup>[26]</sup>,所有数据均来自国家气象信息中心。



Fig. 1 Distribution and altitude of meteorological stations over the Haihe River Basin

#### 1.3 方法

**1.3.1** 标准化前期降水指数(SAPI) 前期降水指数(Antecedent Precipitation Index, API)<sup>[29:30]</sup>,考虑了降水发生时间对当前旱情的影响,降水发生时间越久,对当前旱情的影响越小,适用于反映短时间尺度的水分干湿状况。因此本文采用前期降水指数 *I*<sub>AP</sub>,并借鉴标准化降水指数(SPI)方法得到标准化前期降水指数 *I*<sub>SAP</sub>,作为逐日旱涝指标<sup>[31:32]</sup>。

$$I_{\rm AP}(i) = \sum_{d=0}^{i-1} k^d P_{(i-d)}$$
(1)

式中: *I*<sub>AP</sub>(*i*)是过去逐日降水(*P*<sub>(*i*-*d*)</sub>)以 *k<sup>d</sup>* 为权重累加所得,当日降水权重为 1,随着时间距离 *d* 的增加降水权 重呈指数递减。*k*(0<*k*≤1)为衰减系数,本文取 0.9<sup>[29-30]</sup>, *k* 值的大小表示前期降水对 *I*<sub>AP</sub> 的影响, *k* 值越大,前 期降水影响越大。当 *d*=100 d 时, *k<sup>d</sup>* 小于 0.001,其影响可忽略不计,因此本文中前期降水天数最大值取 100 d。

为了便于在不同时空尺度上进行比较,需将 *I*<sub>AP</sub> 进行标准化,本文参考 SPI 的计算方法(具体算法参考 GB/T 20481—2017),即计算出 *I*<sub>AP</sub> 的Γ分布概率后,再经正态标准化求得 *I*<sub>AP</sub> 的标准化变量 *I*<sub>SAP</sub><sup>[30]</sup>,利用 *I*<sub>SAP</sub> 来划分旱涝等级(划分标准见表 1)。

**1.3.2** 旱涝急转事件识别 目前,研究旱涝急转事件的识别主要有指数方法和游程理论。2006 年吴志伟等<sup>[2]</sup> 首先提出长周期旱涝急转指数, Shan 等<sup>[3]</sup> 在此基础上提出了日尺度旱涝急转指数。游程理论是一种时间序

列分析方法, 是量化旱涝特征变量变化规律的理论 基础<sup>[4-5]</sup>。在分析日尺度旱涝指数筛选旱涝事件时, 游程理论物理意义更加明确。因此本文将 *I*<sub>SAP</sub> 指数 和游程理论相结合来进行海河流域旱涝急转事件的 识别。首先根据逐日 *I*<sub>SAP</sub> 和旱涝强度等级(表 1)来 识别干旱和洪涝事件。当 *I*<sub>SAP</sub> 连续 10 d(5 d) 为轻旱(轻涝)及以上等级,则确定为发生一次干旱 (洪涝)过程。干旱(洪涝)过程的开始日为第1天达 轻旱(轻涝)及以上等级的日期。在干旱(洪涝)发生 期, 当 *I*<sub>SAP</sub> 连续 10 d(5 d)为无旱(无涝)等级时干旱

- PC 1	至 1 I SAF (1)) - 1)) (1									
Tab. 1	Classification of drought and flood									
grades based on $I_{\text{SAP}}$										
等级	<b>ISAP范围</b>	类型								
1	$2.0 \leq I_{SAP}$	特涝								
2	$1.5 \le I_{\text{SAP}} \le 2.0$	重涝								
3	$1.0 \le I_{SAP} \le 1.5$	中涝								
4	$0.5 \le I_{\text{SAP}} \le 1.0$	轻涝								
5	$-0.5 \le I_{\text{SAP}} < 0.5$	正常								
6	$-1.0 \le I_{\text{SAP}} < -0.5$	轻旱								
7	$-1.5 \le I_{\text{SAP}} < -1.0$	中旱								
8	$-2.0 \le I_{\text{SAP}} < -1.5$	重旱								
9	$I_{\rm SAP} < -2.0$	特旱								

表 1 其于 Laux 划分早滞等级标准

(洪涝)过程结束,结束日期为最后1天发生干旱(洪涝)的日期。干旱(洪涝)过程开始到结束期间的时间为干旱(洪涝)持续时间。

本文考虑旱涝急转事件仅为由旱转为涝的过程,若某时期先后发生一次干旱事件和一次洪涝事件,且 干旱过程结束和洪涝过程开始的时间间隔小于 5 d,那么判断为一次旱涝急转事件<sup>[4]</sup>,急转点为洪涝事件开 始的日期。急转强度为涝期 *I*SAP 平均值与旱期 *I*SAP 平均值之差,即:

$$S = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} I_{\text{SAP}}(i) - \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} I_{\text{SAP}}(i)$$
(2)

式中: n1、n2 分别为涝期和旱期的日数(旱期超过44 d 的取 44 d,不足的按实际天数<sup>[3,33]</sup>,涝期取 5 d)。 因为海河流域降水多出现在 5—9月,所以本文仅研究 5—9月的旱涝急转事件。

# 2 旱涝事件判别能力

为验证标准化前期降水指数对旱涝事件的判别能力,本文以天津市蓟州区为例进行对比分析。根据 《中国气象灾害大典》(天津卷)<sup>[34]</sup>,找出 1961—2000 年间蓟州区的部分干旱事件,与利用标准化前期降水指 数识别出的干旱事件进行对比(表 2)。可见历史记载与指数识别出来的干旱事件基本吻合,但指数筛选出 来的干旱事件有些不连续。例如,1968 年蓟州冬春夏连旱,指数识别出来的干旱过程为 5 次,基本涵盖了 冬、春、夏这 3 个时间段,总体上指数识别出的干旱事件是比较准确的。

表 2 SAPI 识别与历史记载的干旱事件对比(以天津市蓟州区为例) Tab. 2 Comparison of drought events identified by SAPI and historical records (Taking Jizhou District of Tianjin as an example)

		SAPI识别结果		历史记载				
平切	年份 ———————— 干旱起始日期	干旱结束日期	持续天数/d					
1961年	4月6日	7月18日	104	蓟州春大旱,农田受灾2万hm <sup>2</sup> 。				
	1月2日	1月11日	10					
2. 1968年 55 6. 8.	2月16日	4月6日	51					
	5月6日	5月22日	17	蓟州冬春夏连旱,农田受灾1000 hm <sup>2</sup> 。				
	6月15日	7月12日	28					
	8月25日	9月17日	24					
3月23日        1972年        4月27日	4月5日	14	蓟州大旱,2至7月中旬,降水量仅33.5 mm,					
	4月27日	7月19日	84	造成河干、井干、河渠断流。				
1975年	2月16日	5月3日	77	蓟州春旱,农田受灾1.2万hm <sup>2</sup> 。				

<u> </u>								
年份 —		SAPI识别结果						
	干旱起始日期	干旱结束日期	持续天数/d	一 历史记载				
1983年	5月31日	8月25日	87	蓟州夏旱,农田受灾2.5万hm <sup>2</sup> 。				
1020年	6月19日	7月18日	30	蓟州夏季降水量偏少4成,农作物出现"卡脖旱",				
1989年	8月2日	8月28日	27	玉米等作物产量受到影响。				
2000年	6月14日	8月7日	55	蓟州6月降水量仅为20.9 mm, 7月偏少6.5成,造成旱情严峻。				

选取蓟州站 1961—2019 年实测单日最大降水量的前 10 位,与指数判别的洪涝事件出现时间进行对 比,用来验证该指数对洪涝事件的识别能力(表 3)。可以看出,10 次过程中有 6 次是出现暴雨的当日为洪 涝事件的起始日,其余 4 次暴雨日均在洪涝过程中。另外再选取一个降水偏少年(2000 年)和一个降水偏多 年(2012 年),对比 5—9 月降水量与 SAPI 指数发现(图 2), SAPI 指数与降水存在较好的对应关系,降水量 的高点基本都对应着 SAPI 指数的高点,即降水量大时对应着洪涝过程,这说明 SAPI 指数可以很好地识别 洪涝事件。

	Frank Street		F F F F F F F F F F F F F F F F F F F	- 5		
	实测单日最大降水量					
年份	日期	单日降水量/mm	起始日期	结束日期		
1962年	7月25日	187.6	7月24日	8月5日		
1966年	7月29日	139.2	7月13日	9月5日		
1972年	8月4日	184.1	7月27日	8月20日		
1978年	7月25日	353.5	7月25日	10月2日		
1980年	6月6日	128.2	6月6日	6月20日		
1982年	7月25日	167.7	7月25日	8月27日		
1984年	8月10日	128.7	8月10日	8月29日		
1996年	8月3日	123.8	7月23日	10月15日		
2012年	7月22日	174.8	7月22日	8月13日		
2016年	7月20日	135.7	7月20日	8月1日		

表 3 蓟州站典型暴雨日及洪涝过程筛选结果对比 Tab. 3 Comparison of typical rainstorm days by observation and flood process selected by SAPI



图 2 2000 年和 2012 年 SAPI 指数与降水量的关系



# 3 结果分析

#### 3.1 旱涝急转事件时间演变特征

3.1.1 旱涝急转事件的年际变化 海河流域平均每年发生旱涝急转的次数为 33 次(1个站发生 1 次为 1 次),年际波动较大,旱涝急转站次最多的年份达 81 次(1997年),最少的年份仅有 8 次(1985 和 1987年)。1961年以来,旱涝急转频次总体上呈上升趋势,各年代旱涝急转频次也表现出增加趋势(图 3(a)),20世纪 60 年代为 28 次,70 年代和 80 年份分别增加到 32 次和 35 次,90 年代有所下降,为 33 次,2000 年后又增加到 34 次和 37 次。





旱涝急转频次表征的是发生次数的多少,而旱涝急转强度表征的是其发生程度的大小。从旱涝急转强 度的年际变化图(图 3(b))中可见,与频次相似,1961年以来总体呈增加趋势。从各年代平均值来看,从 20世纪 70年代开始,旱涝急转强度逐年代增加,2000年以前,均低于多年平均值,2000年后增加至平均值 以上,尤其是最近 10年,呈现出跳跃式增加。

**3.1.2** 旱涝急转事件的年内变化 图 4 给出了海河流域各旬旱涝急转频次和强度的变化,可以看出,海河流域旱涝急转多发生在 5、6 月及 9 月中旬,盛夏期间发生的次数较少。这是因为海河流域春季多干旱,突发降水容易造成旱涝急转,而夏季降水较多,全年大部分降水集中在汛期,尤其集中在盛汛期(7—8 月)<sup>[55]</sup>, 干旱日数相对较少,所以旱涝急转频次相对较少。旱涝急转强度呈单峰型分布,最大值出现在 6 月中旬到 7 月上旬,该时段对应的旱涝急转频次也较多,因此发生洪涝灾害的风险较大。



Fig. 4 Ten days' drought-flood abrupt alternations intensity over Haihe River Basin from May to September

从各年代各旬旱涝急转频次来看(表 4),2000年以前,旱涝急转多发生在 5、6 月,而 2000 年以后旱涝 急转发生的时间出现了后移,多出现在 6、7 月份。并且,1990 年后 9 月中旬旱涝急转次数增加。梁苏洁 等<sup>[36]</sup>研究表明,京津冀地区初秋降水明显增加,且在 2000 年代初发生跃变,由少雨位相转为多雨位相,这可 能与 9 月旱涝急转频次增加有关。

Tuo. 1 Diought nood usrupt attentiations nequency over frame fitter Dusin nom may to september in each uge											, iii iii iii iii j	to bep	contoer	in cuch	uge	,			
年份 5—	5 0日		5月		6月		7月		8月			9月							
	5—9月	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬			
	1961—1969	28	2	1	3	2	4	4	3	2	2	1	1	1	0	1	1		
	1970—1979	32	5	3	5	3	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	1		
	1980—1989	35	6	6	1	1	4	1	1	2	3	2	1	2	1	1	3		
	1990—1999	33	4	4	1	3	3	1	2	1	1	2	1	1	2	5	2		
	2000—2009	34	2	3	2	3	2	3	2	1	3	3	3	2	2	3	2		
	2010—2019	37	2	1	3	4	3	5	3	3	2	1	1	2	2	4	1		

表 4 各年代 5—9 月各旬旱涝急转频次

单位・次

# Tab. 4 Drought-flood abrupt alternations frequency over Haihe River Basin from May to September in each age

#### 3.2 旱涝急转事件空间分布特征

从旱涝急转频次的空间分布来看,大部分地区超过 10 d,有 3 个区域旱涝急转出现频次较多,这些区域 旱涝急转频次均在 15 d 以上。3 个区域分别为:海河流域西部地区,包括永定河系南部、子牙河系中部、漳 卫河系北部;滦河河系东北部;海河流域下游地区,包括黑龙港运东下游、大清河系和徒骇马颊河系中下游 地区。滦河流域和海河流域西部地区位于山区,若长期处于干旱状态,会出现岩石土地状态疏松的现象,一 旦发生旱涝急转,大量的雨水会冲进到裂缝中,导致岩体的稳定性变差,极易出现山体滑坡和泥石流等地质 灾害<sup>[37]</sup>,威胁当地居民生命财产安全。

从旱涝急转强度的空间分布(图 5)来看,大值区位于滦河河系的南部、北三河东部、永定河系北部、漳 卫河系南部和徒骇马颊河中部,而整个中部地区及滦河流域北部旱涝急转强度较小。值得注意的是,永定 河系、漳卫河系发生旱涝急转强度高的地方频次较低,综合来看风险较小。而滦河河系南部地区、北三河 系西部及徒骇马颊河中部地区旱涝急转强度较大,同时出现频次也高,大大增加了旱涝急转带来的风险。





# 4 结 语

本文采用海河流域逐日降水数据计算出标准化前期降水指数,根据旱涝急转条件筛选出 1961 年以来 的旱涝急转事件,计算其频次和强度,得出主要结论如下:

(1)1961年以来,旱涝急转频次和强度总体上呈上升趋势。从各年代平均值来看,旱涝急转频次和强度基本上逐年代增加,尤其是最近10年,呈现出跳跃式增加,达到最大值。

(2)海河流域旱涝急转多发生在 5、6 月及 9 月中旬。旱涝急转强度呈单峰型分布,最大值出现在 6 月 中旬到 7 月上旬。2000 年以前,旱涝急转多发生在 5、6 月,而 2000 年以后旱涝急转发生的时间出现了后 移,多出现在 6、7 月份,并且 9 月中旬旱涝急转频次有所增加。

(3)海河流域西部地区(包括永定河系南部、子牙河系中部、漳卫河系北部)、滦河河系东北部和海河流 域下游地区(包括黑龙港运东下游、大清河系和徒骇马颊河系中下游地区)发生旱涝急转频次较多。旱涝急 转强度的大值区位于滦河河系的南部、北三河东部、永定河系北部、漳卫河系南部和徒骇马颊河中部。值 得注意的是,滦河河系南部地区、北三河系西部及徒骇马颊河中部地区旱涝急转强度较大,同时出现频次也 高,大大增加了旱涝急转带来的风险。

(4)本文从气候统计特征的角度对旱涝急转现象进行研究,总结归纳了海河流域旱涝急转的时空分布特征。然而,在旱涝急转的识别方法上,当前大部分研究仅考虑了降水条件,这是有局限性的。因为一次极端降水事件可能会在一定程度上缓解"旱",不一定造成"涝",所以在未来的研究中可基于现有的判别方法,综合考虑土壤含水量和作物需水等提出更符合实际情况的识别方法。

#### 参考文献:

- [1] WU Z W, LI J P, HE J H, et al. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid and lower reaches of the Yangtze River[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(5): L05813.
- [2] 吴志伟,李建平,何金海,等.大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J]. 科学通报, 2006, 51(14): 1717-1724. (WU Zhiwei, LI Jianping, HE Jinhai, et al. Large scale atmospheric circulation anomalies and long-cycle dry-wet abrupt alternation in summer in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(14): 1717-1724. (in Chinese))
- [3] SHAN L J, ZHANG L P, SONG J Y, et al. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and the relationship with ENSO[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(8): 1039-1058.
- [4] 杨家伟, 陈华, 侯雨坤, 等. 基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2358-2370. (YANG Jiawei, CHEN Hua, HOU Yukun, et al. A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(11): 2358-2370. (in Chinese))
- [5] 陶新娥,侯雨坤.长江流域气象旱涝异常急转识别及分析[J]. 三峡生态环境监测, 2019, 4(3): 52-58. (TAO Xin'e, HOU Yukun. Identification and analysis of meteorological drought-flood sudden alternation in the Yangtze River Basin[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2019, 4(3): 52-58. (in Chinese))
- [6] 孙鹏, 刘春玲, 张强. 东江流域汛期旱涝急转的时空演变特征[J]. 人民珠江, 2012, 33(5): 29-34. (SUN Peng, LIU Chunling, ZHANG Qiang. Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation during main flood season in East River Basin[J]. Pearl River, 2012, 33(5): 29-34. (in Chinese))
- [7] 何慧,廖雪萍,陆虹,等. 华南地区1961—2014年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 130-141. (HE Hui, LIAO Xueping, LU Hong, et al. Features of long-cycle drought-flood abrupt alternation in South China during summer in 1961—2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 130-141. (in Chinese))
- [8] 张玉琴, 李栋梁. 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(4): 430-444. (ZhANG Yuqin, LI Dongliang. Drought-flood abrupt alternation and its atmospheric circulation characteristics during flood season in southern

China[J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(4): 430-444. (in Chinese))

- [9] 白恒, 严登明, 翁白莎, 等. 皖北地区旱涝演变及急转特征[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1): 1-4. (BAI Heng, YAN Dengming, WENG Baisha, et al. Characteristics of evolution and abrupt alternations of drought-flood in northern Anhui[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1): 1-4. (in Chinese))
- [10] BI W X, WENG B S, YUAN Z, et al. Evolution of drought-flood abrupt alternation and its impacts on surface water quality from 2020 to 2050 in the Luanhe River Basin[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(5): 691.
- [11] 高芸, 胡铁松, 袁宏伟, 等. 淮北平原旱涝急转条件下水稻减产规律分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 128-136. (GAO Yun, HU Tiesong, YUAN Hongwei, et al. Analysis on yield reduced law of rice in Huaibei plain under drought-flood abrupt alternation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 128-136. (in Chinese))
- [12] 王梦珂, 毕吴瑕, 翁白莎, 等. 旱涝急转对作物生长发育及产量的影响研究综述[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 189-196.
  (WANG Mengke, BI Wuxia, WENG Baisha, et al. Review on impact from drought-flood abrupt alternation on crop growth and yield[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11): 189-196. (in Chinese))
- [13] HUANG J, HU T S, YASIR M, et al. Root growth dynamics and yield responses of rice (*Oryza sativa* L.) under drought—flood abrupt alternating conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 157: 11-25.
- [14] XIONG Q Q, SHEN T H, ZHONG L, et al. Comprehensive metabolomic, proteomic and physiological analyses of grain yield reduction in rice under abrupt drought-flood alternation stress [J]. Physiologia Plantarum, 2019, 167(4): 564-584.
- [15] 严小林, 张建云, 鲍振鑫, 等. 海河流域近500年旱涝演变规律分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 17-23. (YAN Xiaolin, ZHANG Jianyun, BAO Zhenxin, et al. Evolution of drought and flood in the Haihe Rvier Basin for the last 500 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 17-23. (in Chinese))
- [16] 任国玉, 王涛, 郭军, 等. 海河流域近现代降水量变化若干特征[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 103-111. (REN Guoyu, WANG Tao, GUO Jun, et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River Basin in modern times[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 103-111. (in Chinese))
- [17] 邹旭恺,任国玉,张强.基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 371-378.
  (ZOU Xukai, REN Guoyu, ZHANG Qiang. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 371-378. (in Chinese))
- [18] 李立新, 严登华, 秦天玲, 等. 海河流域1961—2010年干旱化特征及其变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11):
  61-67. (LI Lixin, YAN Denghua, QIN Tianling, et al. Drought variation in Haihe River Basin from 1961 to 2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(11): 61-67. (in Chinese))
- [19] 宗燕, 王艳君, 翟建青. 海河流域气象干旱时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 198-202. (ZONG Yan, WANG Yanjun, ZHAI Jianqing. Spatial and temporal characteristics of meteorological drought in the Haihe River Basin based on standardized precipitation index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 198-202. (in Chinese))
- [20] 何群英,陈涛. 2006年8月海河流域暴雨过程的成因分析[J]. 气象, 2009, 35(1): 80-86. (HE Qunying, CHEN Tao. Analysis of causes of heavy rainfall in Haihe River valley in August 2006[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(1): 80-86. (in Chinese))
- [21] 卢焕珍, 刘一玮, 张楠. 海河流域切变线类暴雨成因分析[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(1): 15-22. (LU Huanzhen, LIU Yiwei, ZHANG Nan. Cause of heavy rain by shear line in the Haihe River Basin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, 30(1): 15-22. (in Chinese))
- [22] 杨德江,马宁,尉英华.海河流域暴雨的气候特征与环流分型[J].水文,2017,37(1):83-91. (YANG Dejiang, MA Ning, WEI Yinghua. Climatic characteristics of rainstorms and circulation types in Haihe River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(1):83-91. (in Chinese))
- [23] 魏琳, 李静, 王颖. 海河流域 "16.7" 大暴雨洪水成因初步分析[J]. 水文, 2017, 37(4): 91-96. (WEI Lin, LI Jing, WANG Ying. Analysis of "2016·7" storm flood in Haihe River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(4): 91-96. (in Chinese))
- [24] 汪靖, 段丽瑶, 何群英, 等. 海河流域盛汛期旱涝急转事件及其与大气环流异常的关系[J]. 热带气象学报, 2016, 32(4): 515-

523. (WANG Jing, DUAN Liyao, HE Qunying, et al. Drought-flood abrupt alternation events of Haihe River Basin in main rainy season and their relationships with the anomalous atmospheric circulation[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(4): 515-523. (in Chinese))

- [25] 鲍振鑫, 张建云, 严小林, 等. 海河流域60年降水量的变化及未来情景分析[J]. 水利水运工程学报, 2014(5): 8-13. (BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, YAN Xiaolin, et al. Analysis of precipitation in the Haihe River Basin during the last decades of years and future scenarios[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(5): 8-13. (in Chinese))
- [26] 杨艳娟, 曹经福, 熊明明, 等. 影响海河流域参考作物蒸散量的气象因子定量分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 367-373.
  (YANG Yanjuan, CAO Jingfu, XIONG Mingming, et al. Quantitative analysis of climate factors influencing on potential evapotranspiration changes over Haihe River Basin[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3): 367-373. (in Chinese))
- [27] 夏兴生,朱秀芳,潘耀忠,等.农作物干旱灾害实时风险监测研究——以2014年河南干旱为例[J].自然灾害学报,2016, 25(5): 28-36. (XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Study on real-time risk monitoring of crop drought disaster—taking the drought of Henan Province in 2014 as an example[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(5): 28-36. (in Chinese))
- [28] 杨卫忠, 张葆蔚, 符日明. 2016年洪涝灾情综述[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(1): 26-29. (YANG Weizhong, ZHANG Baowei, FU Riming. Summary of flood disaster in 2016[J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(1): 26-29. (in Chinese))
- [29] HEIM R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1166.
- [30] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991. (YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Theoratical study and research prospect on drought indices[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(6): 982-991. (in Chinese))
- [31] 王春林,陈慧华,唐力生,等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 157-163.
  (WANG Chunlin, CHEN Huihua, TANG Lisheng, et al. A daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and its spatial-temperal variation[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8(3): 157-163. (in Chinese))
- [32] 白慧, 吴战平, 龙俐, 等. 基于标准化前期降水指数的气象干旱指标在贵州的适用性分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 661-668. (BAI Hui, WU Zhanping, LONG Li, et al. The application of the daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index in Guizhou[J]. Journal of Yunnan University, 2013, 35(5): 661-668. (in Chinese))
- [33] LU E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: rationale[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(12): L12707.
- [34] 温克刚, 王宗信. 中国气象灾害大典(天津卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 79-113. (WEN Kegang, WANG Zongxin. China meteorological disaster dictionary (Tianjin volume)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 79-113. (in Chinese))
- [35] 车少静. 海河流域旱涝时空变化特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010: 14-56. (CHE Shaojing. Spatial and temporal characteristics of drought/flood in the Haihe River Basin[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2010: 14-56. (in Chinese))
- [36] 梁苏洁, 丁一汇, 段丽瑶, 等. 近46年京津冀地区"夏雨秋下"现象及其成因初探[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 655-675.
  (LIANG Sujie, DING Yihui, DUAN Liyao, et al. A study on the phenomenon of midsummer precipitation delays until early autumn and associated reasons in Beijing-Tianjin-Hebei during 1970-2015[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(3): 655-675. (in Chinese))
- [37] 陈才. 暴雨和高温天气对地质灾害的影响机理研究[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 32-37. (CHEN Cai. Study on the mechanism of the impact of heavy rain and high temperature weather on geological disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 32-37. (in Chinese))

# Spatial and temporal variation characteristics of the drought-flood abrupt alternations over Haihe River Basin

YANG Yanjuan, CHEN Yuehao, CHEN Sining, XIONG Mingming (*Tianjin Climate Center, Tianjin* 300074, *China*)

Abstract: The research on the occurrence regularity of the drought-flood abrupt alternation in Haihe River Basin can provide scientific reference for flood control and drought relief. Based on the daily precipitation data of 159 meteorological stations in Haihe River Basin from 1961 to 2019, the Standardized Antecedent Precipitation Index (SAPI) is calculated. Based on the SAPI, according to the drought-flood grade standard and drought-flood abrupt alternation conditions, the drought-flood abrupt alternation events since 1961 are screened out, and the frequency and intensity characteristics of drought-flood abrupt alternation in Haihe River Basin are analyzed. The results show that the annual average frequency of drought-flood abrupt alternation in Haihe River Basin is 33 times, which basically increases year by year, with an average of 37 times in recent 10 years. The intensity of drought-flood abrupt alternation also showed an upward trend, and increased to above the average value after 2000; it showed a jumping increase with reaching the maximum value especially in recent 10 years. The drought-flood abrupt alternation occurred mostly in May, June and mid September, and less in midsummer. The intensity of drought-flood abrupt alternation presents a single peak distribution, and the maximum value appears from the middle of June to the first ten days of July. The corresponding frequency of drought-flood abrupt alternation is also more in this period, which increases the risk of flood disaster. From the perspective of spatial distribution, the frequency and intensity of drought-flood abrupt alternation are high value areas in the southern part of Luanhe River system, the western part of Beisanhe River system and the central part of TuhaiMajia River. That is to say, the frequency and intensity of drought-flood abrupt alternation are high in these areas, consequently, the risk of drought-flood abrupt alternation is high. These areas may become the focus of flood control.

**Key words:** Haihe River Basin; drought-flood abrupt alternations; standardized antecedent precipitation index (SAPI); frequency; intensity