

长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与ENSO的关系

闪丽洁¹, 张利平^{1,2}, 张艳军¹, 余敦先¹, 夏 军¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 黄冈师范学院, 黄冈 438000)

摘要: 基于长江中下游流域75个雨量站1960-2015年的日降水资料, 通过对原有的旱涝急转指数加以改进, 定义了日尺度旱涝急转指数(Dry-Wet Abrupt Alternation Index, DWAAI), 全面分析长江中下游流域夏季(5-8月)旱涝急转事件的时空演变特征, 并讨论了旱涝急转事件与事件发生前太平洋海表温度的关系。结果表明: ①改进的DWAAI综合考虑了事件前后期旱涝差异与急转快慢程度, 筛选事件更加全面。②总体来说, 自20世纪60年以来, 流域内发生旱涝急转事件的区域范围越来越广, 事件频率和强度均具有逐年增长趋势。旱涝急转事件主要发生在5月和6月, 且汉江水系、中游干流区间、洞庭湖水系北部和鄱阳湖水系西北部地区为事件高发区。③旱涝急转事件与事件发生前Nino 3.4区域海温持续异常偏低存在一定关系。在发生时间上, La Niña现象具有一定的先兆作用, 41.04%的事件发生在La Niña现象衰亡期或现象结束后8个月内; 在事件强度上, 流域内站点的DWAAI与事件发生前第1~6个月的Nino 3.4区域海温异常值存在显著的负相关性, 尤其是在鄱阳湖水系和中游干流区间, 二者负相关性最强。研究结果可以为长江中下游流域防洪抗旱工作提供一定的依据。

关键词: 旱涝急转; 长江中下游流域; 时空演变特征; La Niña

DOI: 10.11821/dlxb201801003

1 引言

受全球气候变化和人类活动等因素影响, 夏季旱涝异常事件发生强度和频率不断增加, 一直是国内外大气科学研究的热点^[1-5]。20世纪90年代以来, 中国干旱与洪、涝或者渍等灾害在相对较短的时间发生转换的现象(水旱交替)呈明显上升趋势, 此类旱涝急转事件在中国华南、长江中下游及西南等地区时有发生^[6-9], 已成为中国夏季旱涝异常的一种新特点与新趋势。它严重威胁着中国的水安全和粮食安全, 特别是会对抗旱排涝标准相对较低的作物种植区的粮食产量造成严重影响。

鉴于旱涝急转所造成灾害的严重性, 国内外学者开始逐渐关注该异常现象^[10-16]。Wu等^[17]认为即使在季节平均降水正常年份, 也有可能发生旱涝共存事件, 并研究了长江中下游流域夏季平均降水正常年份中旱涝共存事件的发生规律和前期环流形势。唐明等^[18]指出暴雨频数、短时干旱概率和降水强度呈现的增加趋势是沿淮淮地区发生旱涝急转事件的气候原因。吴志伟等^[19]揭示了华南夏季旱涝急转事件与季节性严重旱涝事件的显著

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51339004); 国家重点研发计划项目(2017YFA0603704); 湖北省科技计划项目(2015BCA290) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51339004; National Key Research and Development Program, No.2017YFA0603704; Hubei Province Science and Technology Program, No.2015BCA290]

作者简介: 闪丽洁(1991-), 女, 河南人, 博士生, 主要从事极端水文事件研究。E-mail: shanlijie0701@163.com

通讯作者: 张利平(1972-), 男, 湖北人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhanglp@whu.edu.cn

差异,并对华南旱涝急转夏季大气环流异常特征和前期海气异常信号进行了分析。Yang等^[20]指出长江中下游流域2011年6月初发生的旱涝急转事件与东亚上空中高纬度经向环流季节内振荡之间存在密切的关系。准确量化并筛选旱涝急转事件,是对事件发展规律和发生机理进行研究的前提。吴志伟等^[21]通过对比5-6月和7-8月降水的差异定义了一个长周期旱涝急转指数,对长江中下游地区夏季旱涝急转现象进行研究。张屏等^[22]通过计算各旬降水量的距平及距平百分率,在确定旱、涝等级的基础上对旱涝急转事件进行定义,并对淮北市旱涝急转进行规律分析。旱涝急转事件在任意时间都有可能发生,然而以往研究中,旱、涝期时间尺度为月或旬,尺度较大,且将旱与涝转折的时间固定,会使得旱涝发生中和;另外,也从未提及由旱转为涝这一过程的时间长短问题,即未考虑“急”的程度,如此难免会对旱涝急转事件造成误选和漏选。因此,本文对吴志伟等^[21]定义的长周期旱涝急转指数加以改进,构建一个同时考虑前后期旱涝程度与急转快慢程度的日尺度旱涝急转指数,筛选旱涝急转事件,对长江中下游流域开展旱涝急转时空演变特征进行研究。

有关影响长江中下游流域夏季降水异常以致发生旱涝急转的因素研究在近些年也有所开展,已有研究成果包括Wu等^[17]提出的前期南半球环状模、热带东太平洋海温,吉中会等^[23]指出的夏季和春季北极涛动指数、春季亚洲经向环流指数和春季亚洲区极涡面积指数等,均可作为长江中下游流域夏季旱涝急转的预测提供一定的参考。鉴于ENSO是全球海洋和大气相互耦合的最强年际变化信号之一,其变化对长江流域夏季降水具有十分重要的影响^[24-25],本文主要研究ENSO与旱涝急转事件的关系。以往研究多关注太平洋海温异常对长江中下游流域夏季降水的影响情况^[26-29],如龚振淞等^[30]研究表明当前期冬季赤道东太平洋海温、同期夏季西太平洋暖池和赤道印度洋海温偏高时,有利于长江流域夏季降水偏多;刘炯等^[31]认为当澳大利亚东侧局地海域海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)偏高时,南海地区SST也易于偏高,从而造成长江中下游降水偏多。近年来,随着旱涝异常研究的深入,学者们也开始关注旱涝急转与太平洋海温异常的关系^[32-34]。封国林等^[7]对长江中下游流域2011年春末夏初发生的旱涝急转事件影响机制进行分析,结果表明2010年7月至2011年4月的La Niña事件及印度洋海域海温冷异常是此次事件的前兆信号;李明等^[24]指出2011年旱涝急转事件前期的干旱主要是由于西北太平洋的冷水明显偏东,西北太平洋副高位置位于125°E以东,使得副高西北侧的西南风伴随的水汽通量无法到达长江流域。然而这些研究仅对2011年6月发生的旱涝急转事件进行成因分析,较少对流域历史上发生的所有事件进行整体研究。因此本文在筛选长江中下游流域夏季旱涝急转事件的基础上,讨论了旱涝急转事件与事件发生前太平洋海温的关系,以期对长江流域旱涝急转事件的预测预报和防洪抗旱工作提供科学依据。

2 研究区域与方法

2.1 区域概况和数据资料

长江中下游流域地处东亚季风区,受季风爆发时间和强度不同的影响,降水时空变化很大,其中5-8月降水量占年总降水量的50%以上。若前期降水持续偏少产生干旱,6-7月受夏季风和北方冷空气的影响,形成梅雨,出现长时间的连阴雨天气,易发生旱涝急转,因此长江中下游流域为旱涝急转灾害最严重的区域之一^[35]。然而长江中下游流域地理范围较大,流域内不同地区旱涝急转现象存在较大差异^[36],若对全流域平均降水进行分析,会平滑掉区域性的旱涝急转事件。因此,本文按照水资源二级分区^[37]将长江中

下游流域分为汉江水系、中游干流区间、洞庭湖水系、鄱阳湖水系、下游干流区间和三角洲平原区共6个分区, 空间分布如图1所示。

本文所用的资料包括: 国家气候中心提供的长江中下游流域75个雨量站1960-2015年逐日降水资料; 海表温度资料来自NOAA官方网站(www.esrl.noaa.gov)下载的1951-2015年全球月平均SST, 空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。随着5月份东亚夏季风的建立, 长江中下游及其以南地区开始进入雨季^[38], 因此, 将5-8月作为本文的研究时段。

2.2 旱涝急转指数的改进

为了量化并筛选旱涝急转事件, 吴志伟等^[21]定义了长周期降雨旱涝急转指数LDFAI (Long-cycle Drought-Flood Abrupt Alternation Index):

$$LDFAI = (R_{78} - R_{56}) \times (|R_{56}| + |R_{78}|) \times 1.8^{-|R_{56} + R_{78}|} \quad (1)$$

式中: R_{56} 为5-6月标准化降水量; R_{78} 为7-8月标准化降水量; $(R_{78} - R_{56})$ 为旱涝急转强度项; $(|R_{56}| + |R_{78}|)$ 为旱涝强度项; $1.8^{-|R_{56} + R_{78}|}$ 为权重系数, 作用是增加长周期旱涝急转事件所占权重, 降低全旱或全涝事件的权重。

LDFAI是首个被定义用来量化旱涝急转事件的指标, 计算过程简单, 不需要人为筛选, 为研究旱涝急转事件的基本特征和物理成因奠定了基础, 但其中也存在着一些问题。首先, 该指数所采用的时间尺度为2个月, 即5-6月份为前期, 7-8月份为后期, 如此则把旱涝转折的时间固定在6月与7月之间, 然而旱涝急转事件在任意时间都有可能发生, 若事件发生在5-6月份期间, 计算前期降水量时则会把旱涝中和, 从而使得前期降水趋于正常, 难免会对旱涝急转事件造成漏选。其次, LDFAI仅考虑了前后期的旱涝差异, 并未提及由旱转为涝的急缓问题, 例如前后期降水量相同的两个旱涝急转事件, 后期降水集中在前几日的事件强度必定强于后期降水平均分布的事件, 所带来的危害也较为严重, 利用LDFAI量化事件时却无法区分二者, 即未考虑“急”的程度, 有失准确性。

针对以上问题, 本文在LDFAI的基础之上, 构建了改进的日尺度旱涝急转指数DWAAI (Dry-Wet Abrupt Alternation Index), 即:

$$DWAAI = \left[K + (SPA_{后} - SPA_{前}) \times (|SPA_{前}| + |SPA_{后}|) \right] \times a^{-|SPA_{前} + SPA_{后}|} \quad (2)$$

$$K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{SAPI_i - SAPI_0}{i} \right) \quad (3)$$

式中: $SPA_{前}$ 、 $SPA_{后}$ 分别为前期、后期标准化降水异常值 (Standardized Precipitation Anomaly) ^[39]; $SAPI_i$ 、 $SAPI_0$ 分别为后期第*i*天和前期最后一天的标准化前期降水指数异常值, 即分别对后期第*i*天和前期最后一天的前期降水指数API (Antecedent Precipitation Index) ^[40]取标准化; *n* 为后期天数。本文考虑旱涝急转事件仅为由旱急转为涝的过程, 即前期为旱期, 后期为涝期。由于旱、涝事件对于时间的响应不同, 需分开考虑旱、涝

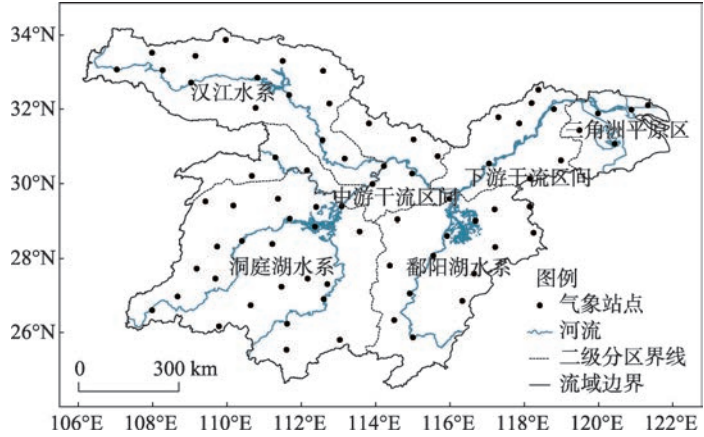


图1 长江中下游流域分布

Fig. 1 Location of the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin

期的时间长度。Lu^[41]指出当日旱涝程度受当日降水和前期降水的影响,但前期逐日降水对当日旱涝程度的影响呈指数衰减趋势,前期第44天对当日旱涝作用减少至1‰,因此本文选取早期为44天。另外选取涝期为10天。

在指数的定义中, $(SPA_{后}-SPA_{前}) \times (|SPA_{前}| + |SPA_{后}|) \times a^{-|SPA_{前}+SPA_{后}|}$ 表示“转”的程度, $a^{-|SPA_{前}+SPA_{后}|}$ 为权重系数。为讨论参数 a 取值的合理性,对不同事件由早期向涝期“转”的程度进行计算对比,结果如表1所示。事件1-6为不同程度的旱涝急转事件,事件7、8分别为全旱和全涝事件,其中“转”的程度排序为:事件3>事件2>事件1,事件6>事件5>事件4,且事件1-6均大于事件7、8。当 $a \leq 1$ 时,全涝事件8“转”的程度为5.00,大于事件1,不合理;当 $a > 1.4$ 时,事件6“转”的程度小于事件5,亦不合理。通过对比,本文取参数 a 为1.3。另外, K 为后期逐日SAPI_i相对于SAPI₀的斜率之和,后期发生高强度降水的时间越靠前,相对于SAPI₀的斜率越大, K 值越大,由旱转为涝越急。 $K \times a^{-|SPA_{前}+SPA_{后}|}$ 表示“急”的程度。

表1 参数 a 不同取值时事件“转”的程度

Tab. 1 Degrees of events that change from dry to wet according to different values of parameter a												
序号	SPA		“转”的程度									
	前期	后期	$a=0.8$	$a=1.0$	$a=1.2$	$a=1.3$	$a=1.4$	$a=1.6$	$a=1.8$	$a=2.0$	$a=2.5$	$a=3.0$
1	-1	1	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
2	-1	2	11.25	9.00	7.50	6.92	6.43	5.63	5.00	4.50	3.60	3.00
3	-1	3	25.00	16.00	11.11	9.47	8.16	6.25	4.94	4.00	2.56	1.78
4	-2	1	11.25	9.00	7.50	6.92	6.43	5.63	5.00	4.50	3.60	3.00
5	-2	2	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
6	-2	3	31.25	25.00	20.83	19.23	17.86	15.63	13.89	12.50	10.00	8.33
7	-2	-3	-15.26	-5.00	-2.01	-1.35	-0.93	-0.48	-0.26	-0.16	-0.05	-0.02
8	2	3	15.26	5.00	2.01	1.35	0.93	0.48	0.26	0.16	0.05	0.02

3 改进的日尺度旱涝急转指数DWAAI的适用性

为了讨论改进的DWAAI能否描述长江中下游流域旱涝急转事件的发生情况,本文以武汉站为例,分别计算了改进前、后旱涝急转指数。改进后的DWAAI需要逐日计算,因此选取5-8月中DWAAI最大的一天为当年夏季由旱转为涝最急的一天(急转日期),且该天的前44天与后10天成为当年夏季发生旱涝急转最严重的事件。表2和表3分别列出了1960-2015年间改进前后指数排位前10的年份及其旱、涝期标准化降水量分布情况。对比可知,两种指数排位前10个年份中,仅有两个年份相同,即1994年和1998年。由于改进前的LDFAI所定义的旱涝转折日期固定在5-6月与7-8月之间,同时改进后的DWAAI表明这两个年份发生事件的急转日期均为7月上旬,转折时间接近,因此可被同时筛选出来。然而类似于2011年发生于6月初的高强度旱涝急转事件,并未被改进前的指数筛选出来,说明改进前的指数所用时间尺度较大,难以筛选出急

表2 1960-2015年间改进前的指数排位前10的年份及其标准化降水量分布

Tab. 2 Years and comparison of SPI values for the 10 highest original indices during the period of 1960-2015							
年份	指数	5-6月	7-8月	年份	指数	5-6月	7-8月
1963	5.06	-2.31	1.00	2010	1.74	-0.56	0.91
1969	3.77	-0.75	2.43	2006	1.45	-1.11	0.38
1998	2.77	-0.57	1.83	2003	1.26	-0.54	0.61
1994	2.33	-1.88	0.45	1962	1.18	0.00	1.91
1997	1.85	-1.86	0.30	1991	0.93	0.40	1.99

转时间发生在5-6月和7-8月内的旱涝急转事件。

由表3得知, 10个高DWAAI年中有8年早期SPA小于-1, 其中有5年小于-1.5, 属于中旱至重旱水平; 涝期SPA均大于2, 其中有6年大于3, 属于中涝至重涝水平。高DWAAI年份的旱涝急转事件降水过程线如图2所示, 旱、涝期降水过程有着明显的差异。对比图2a和2c可知, 2011年比1984年的旱涝急转事件发生急缓程度较缓, 但2011年事件的涝期降水量比1984年多54.1%, 则2011年发生的旱涝急转事件比1984年严重, 说明DWAAI可体现出由早期到涝期“转”的程度大小。另外可知, 1961年与1984年“转”的程度接近, 而对比图2b和2c可以发现, 1961年自6月7日起5日内平均降水49.72 mm, 而1984年事件发生急转前5天平均降水为14.06 mm, 则1961年发生的旱涝急转事件比1984年发生的急, 事件综合强度比1984年大, 说明DWAAI也体现了由早期转向涝期“急”的程度大小。

另外, 由图2d可知, 1982年事件涝期前两天降水为26.2 mm和298.5 mm, 但早期日均降水量为3.72 mm, SPA为-0.76, 仅为轻旱, 从而“转”的程度低; 由图2e可知, 1998年事件虽然涝期总降水量为543.4 mm, 但仅急转第一天降水为72.3 mm, 接连3天均为0, “急”的程度较低。因此, 经过综合考虑, 本文选取DWAAI大于15的事件为旱涝急转事件, DWAAI越大, 旱涝急转事件越严重。另外, 定义DWAAI小于20, 为轻度旱涝急转事件; 大于23为重度旱涝急转事件; DWAAI介于20与23之间为中度旱涝急转事件; 中度和重度事件统称为高强度旱涝急转事件。

为了检验和比较改进的DWAAI在长江中下游流域是否更加具有适用性, 本文在流域内6个分区分别选取代表站计算LDFAI和改进的DWAAI, 筛选出的旱涝急转事件如表4所示。6个代表站中, 采用两种指数所筛选的事件中仅有少量事件年份相同, 且这些事件均发生在6月底或7月初。然而通过计算改进的DWAAI所筛选出急转日期处于5-6月

表3 1960-2015年间改进后的DWAAI排位前10的年份及其标准化降水异常值分布

Tab. 3 Years and comparison of SPA values for the 10 highest modified DWAAIs during the period of 1960-2015						
年份	急转日期	早期 SPA	涝期 SPA	“急”的程度	“转”的程度	DWAAI
2000	5月24日	-1.93	2.21	6.69	15.99	22.68
1988	5月6日	-1.79	3.19	4.99	17.19	22.18
2008	5月3日	-1.50	3.61	5.75	15.02	20.77
2011	6月10日	-1.66	4.96	1.74	18.41	20.15
1961	6月7日	-1.29	3.49	5.33	12.82	18.15
2007	5月24日	-1.64	2.88	2.60	14.70	17.30
1984	6月7日	-1.49	2.69	2.97	12.73	15.70
1982	6月19日	-0.76	3.76	4.74	9.29	14.03
1998	7月17日	-0.78	5.81	1.77	11.60	13.37
1994	7月12日	-1.26	2.22	3.90	9.39	13.29

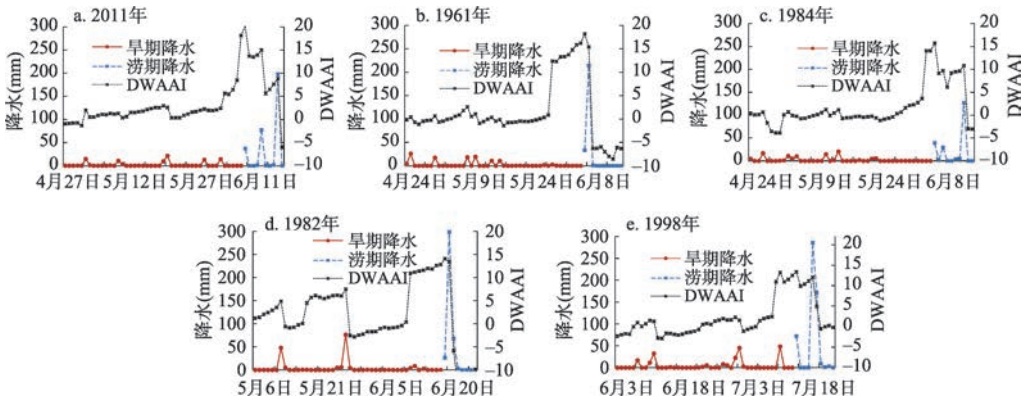


图2 高DWAAI年份的旱涝急转事件降水及DWAAI过程线
Fig. 2 Precipitation and DWAAI sequences of DWAA events in high-DWAAI years

表 4 采用 LDFAI 和改进后的 DWAAI 筛选事件对比
Tab. 4 Comparison of DWAA events selected by calculating LDFAI and modified DWAAI

代表站	所属分区	采用 LDFAI 指数筛选事件	采用改进的 DWAAI 指数筛选事件(急转日期)
天门	汉江水系	1963、 1968	1961(6 月 8 日)、 1968(7 月 14 日) 、1969(6 月 9 日)、1982(5 月 12 日)、1997(6 月 6 日)、2000(5 月 24 日)
荆州	中游干流区间	1968 、 1991 、2007	1968(7 月 13 日) 、1981(6 月 27 日)、 1991(7 月 1 日) 、2000(5 月 24 日)、2011(6 月 13 日)
石门	洞庭湖水系	1991 、1993、2007、2008、2014	1982(5 月 26 日)、1986(6 月 4 日)、1988(5 月 5 日)、 1991(7 月 1 日) 、1996(5 月 31 日)、2006(5 月 5 日)、2011(6 月 10 日)
樟树	鄱阳湖水系	无	1982(6 月 14 日)、1985(6 月 4 日)、1988(5 月 9 日)、2011(6 月 3 日)
黄山	下游干流区间	1965、1987、1997、 2009	1992(8 月 26 日)、1994(6 月 8 日)、1996(6 月 3 日)、2000(5 月 25 日)、2008(6 月 8 日)、 2009(7 月 24 日) 、2011(6 月 4 日)
南通	三角洲平原区	1965、1980、1982、1987、1997、 2003 、2006、2007、 2010 、2014	1971(5 月 17 日)、1974(5 月 4 日)、1981(6 月 24 日)、 2003(6 月 29 日) 、 2010(7 月 3 日)

注：下划线加粗的年份代表采用两个指数筛选出的相同事件年份。

份的事件占 76.47%，采用 LDFAI 却未识别出这些事件。据资料记载，2011 年 6 月初长江中下游流域发生了明显的旱涝急转，通过计算改进的 DWAAI 可以筛选出有 28 个站点发生了旱涝急转事件，集中在湖北省东南部、湖南省中北部和江西省中北部，与实际情况吻合；而计算 LDFAI 仅可筛选出 5 个站点，且分布在汉江水系西北部和三角洲平原区，与实际发生情况存在偏差。另外，采用 LDFAI 所筛选的事件中，如天门站 1963 年间前后期旱涝对比最明显的日期为 7 月 30 日，其前后期日平均降水分别为 2.23 mm 和 6.30 mm，后期降水量较少且过渡缓慢；石门站 1993 年间前后期旱涝对比最明显的日期为 7 月 19 日，其前后期日平均降水分别为和 4.90 mm 和 21.66 mm，前期降水量较多，均不足以划定为旱涝急转事件。综上所述，改进后的 DWAAI 通过逐日滑动计算，可以筛选出发生在任意时间的事件，筛选事件更为全面，能够更好地反映长江中下游地区夏季旱涝急转事件的发生时间及严重程度。

4 长江中下游流域夏季旱涝急转事件时空演变特征分析

4.1 旱涝急转事件时间演变特征

根据长江中下游流域夏季降水序列，计算流域内 75 个雨量站 1960-2015 年的 DWAAI，统计各站点发生旱涝急转事件的情况。该流域各年份发生不同等级事件的站点情况如图 3 所示。由图 3a 可知，历年夏季均有站点发生旱涝急转事件，但发生事件站点个数存在较大的年际差异，在 1986 年以后尤其显著。轻度旱涝急转事件除了在 2011 年发生站点较多外，并无明显的年际变化趋势，而 1986 年后发生高强度事件的站点明显增多。说明长江中下游流域旱涝急转事件数量和强度均具有逐年增长趋势。值得注意的是，1988 年、2000 年和 2011 年发生事件的站点较多，且事件强度较强，1988 年和 2000 年平均 DWAAI 值更是在 20 以上，高强度事件分别占总事件的 43.48%、55.17% 和 44.83%，是 1960 年以来发生旱涝急转事件最严重的 3 个年份。

夏季旱涝急转事件主要发生在 5 月和 6 月（图 3b、3c），分别占发生事件的 31.29%、37.41%。5 月和 6 月发生事件站点数年际差异较大，且高强度事件发生次数较多，事件数量和强度均具有逐年增长的趋势；7 月发生旱涝急转事件的站点较少（图 3d），且年际变

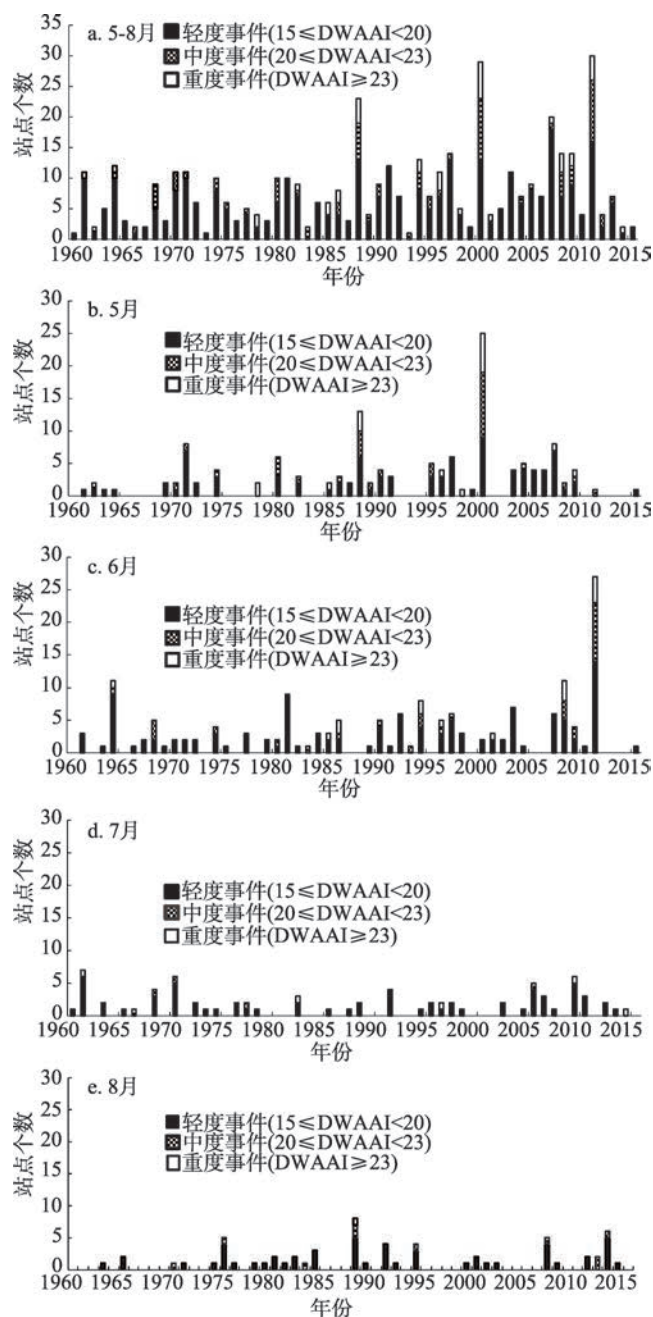


图3 1960-2015年间长江中下游流域夏季发生旱涝急转事件的站点统计

Fig. 3 Statistics of stations where summer DWAA events occurred in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin during the period of 1960-2015

化不大,但事件强度有减小的趋势;8月虽然发生旱涝急转事件的站点较少,但1986年以后发生高强度事件次数较多,事件强度有增大的趋势。

4.2 旱涝急转事件空间演变特征

长江中下游流域各站点夏季旱涝急转事件发生频率的空间分布及其年代际变化情况如图4所示。由图4a可知,长江中下游流域夏季旱涝急转事件发生频率空间分布不均

匀，主要发生在汉江水系、中游干流区间、洞庭湖水系北部和鄱阳湖水系西北部地区，平均6 a发生一次，其中汉江水系中部和中游干流区间事件强度较大；而洞庭湖水系南部、鄱阳湖水系南部和三角洲平原区发生频率和强度较小，平均12 a发生一次。

由图4b~4g可知，20世纪60年代和70年代事件发生次数少，强度低，60年代主要发生在中游干流区间和流域南部地区，而70年代发生在汉江水系和洞庭湖水系东南部地

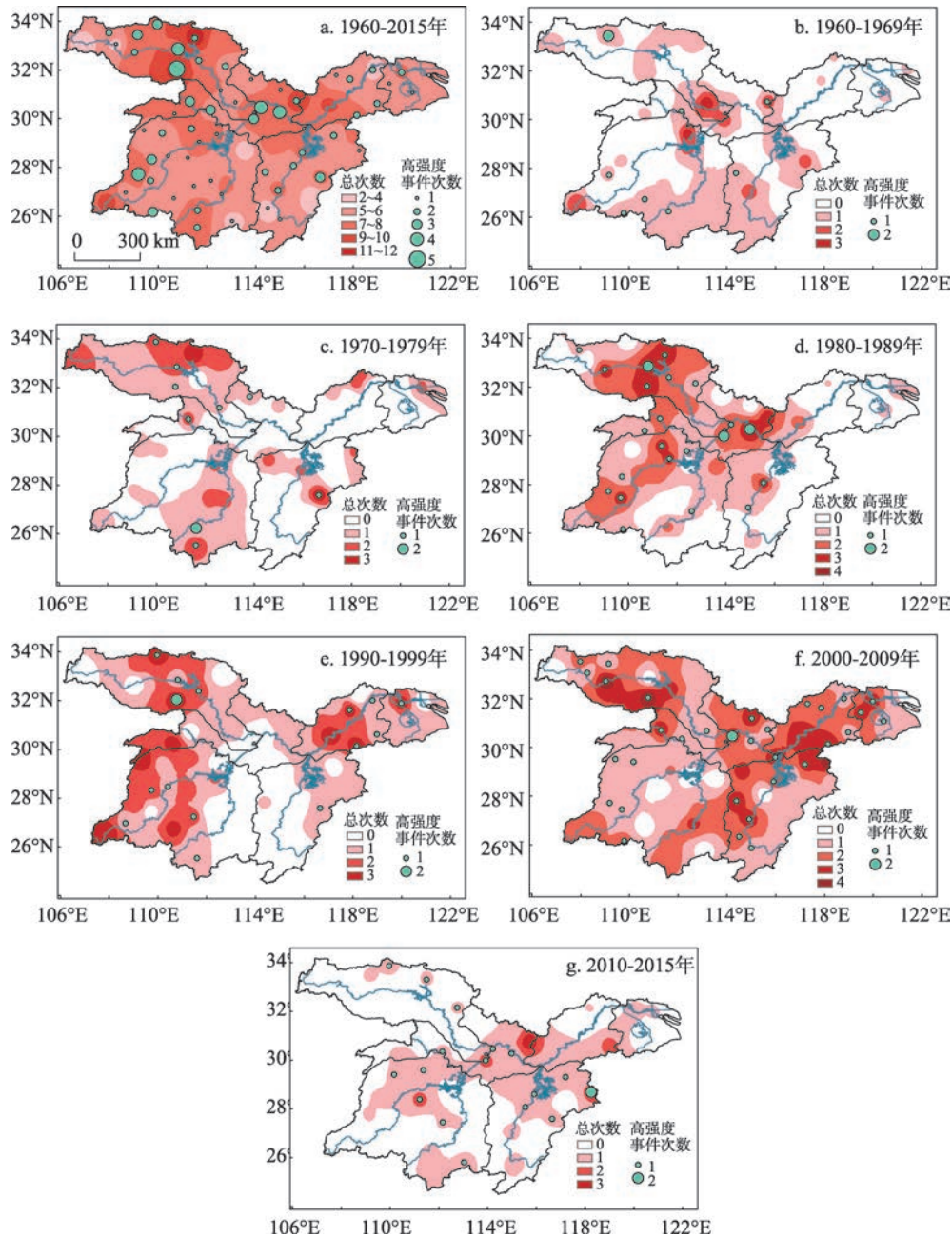


图4 长江中下游流域各年代夏季旱涝急转事件发生频率空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of the interdecadal frequency of summer DWAA events
in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin

区; 80年代发生事件次数有所增加, 除了三角洲平原区和流域东南地区之外, 其他地区均有旱涝急转事件发生, 尤其是汉江中游、洞庭湖西北部和长江中游干流地区, 事件次数多强度大; 90年代事件发生频率和强度减弱, 且空间分布有所改变, 主要发生在汉江水系中部、洞庭湖西部、鄱阳湖东北部和长江下游干流地区; 21世纪初10年全流域均发生了旱涝急转事件, 且强度大; 10年代前6年已有大部分地区发生高强度旱涝急转事件。总的来说, 20世纪60年代至今, 长江中下游流域发生旱涝急转事件的范围越来越广, 发生频率和强度具有增长的趋势。

5 长江中下游流域夏季旱涝急转事件与ENSO的关系

5.1 旱涝急转事件前期太平洋SST异常分布

为了探讨长江中下游流域夏季旱涝急转事件发生原因, 本文分别对不同强度的旱涝急转事件发生前的1年内太平洋海温(SST)异常情况进行了分析, 空间分布如图5~图7所示。结果表明, 从旱涝急转事件发生前的第6个月开始, 西太平洋地区SST异常偏暖, 而赤道东太平洋SST开始出现异常偏冷的趋势, 中心位于 $5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$ 、 $150^{\circ}\text{W}\sim 130^{\circ}\text{W}$ 范围内, 恰好处于Nino 3.4区域; 直至事件发生前的第2个月, SST异常偏冷程度最强; 而后异常偏冷程度逐渐减弱, 发展到事件发生当月时, 异常中心东移至 110°W 附近。值得注意的是, 旱涝急转事件强度越高, 赤道东太平洋SST异常偏冷程度越严重。其中重度旱涝急转事件发生当月至发生前的第4个月的SST异常偏冷最为严重, SST距平持续小于 -0.4°C , 此时太平洋海区SST分布类型为La Niña状态。另外, 南海地处太平洋西部海域, 作为邻近海区以及季风气流上游, 其SST在旱涝急转事件发生前的第4~6个月存在异常偏高情况, 尤其是重度旱涝急转事件发生前的第4~6个月内, 南海东部地区SST距平持续高达 0.4°C , 与谭军等^[42]指出的南海SST异常存在与ENSO密切相关的年际变化这一结论相吻合, 当太平洋海区SST分布类型为La Niña状态时, 南海伴随有异常增温过程。以上表明, 长江中下游流域夏季旱涝急转事件很有可能与Nino 3.4区域SST异常偏

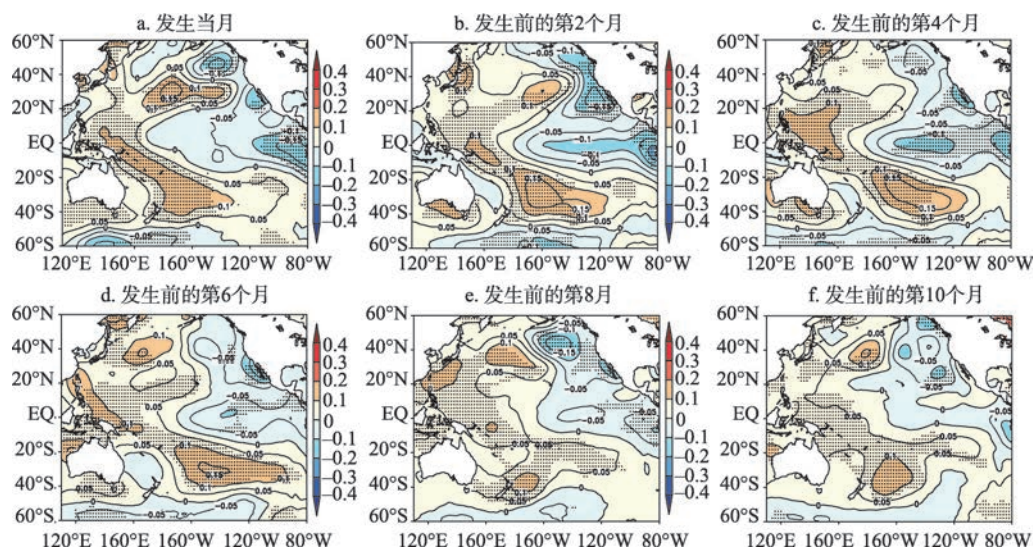


图5 轻度旱涝急转事件发生前太平洋SST异常空间分布($^{\circ}\text{C}$)(黑点表示超过90%显著性检验区域)

Fig. 5 Spatial distributions of Pacific SST anomalies before mild DWAA events (The dotted regions are for values passing the significant test at 0.1 level.)

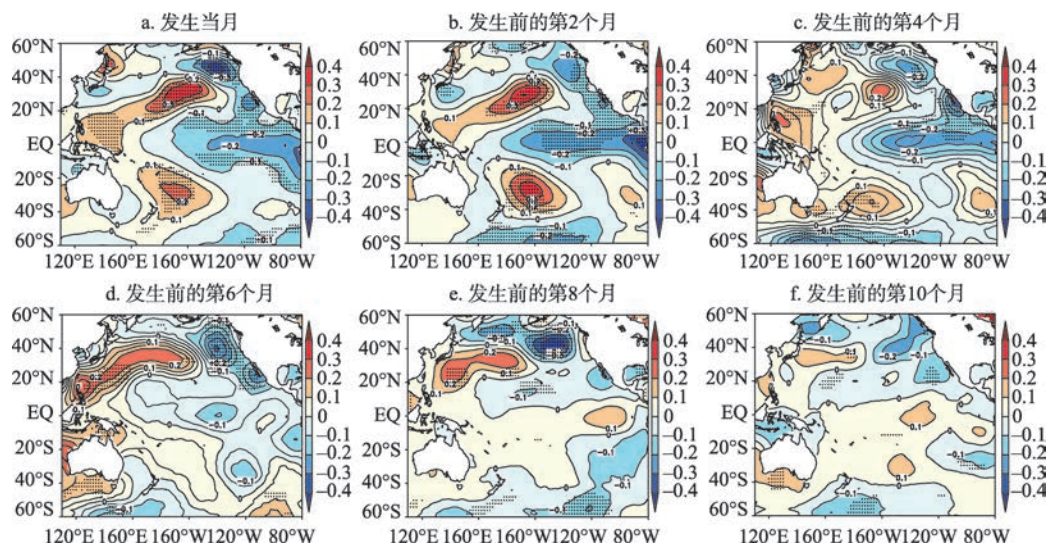


图6 中度旱涝急转事件发生前太平洋SST异常空间分布(°C)(黑点表示超过90%显著性检验区域)

Fig. 6 Spatial distributions of Pacific SST anomalies before moderate DWAA events (The dotted regions are for values passing the significant test at 0.1 level.)

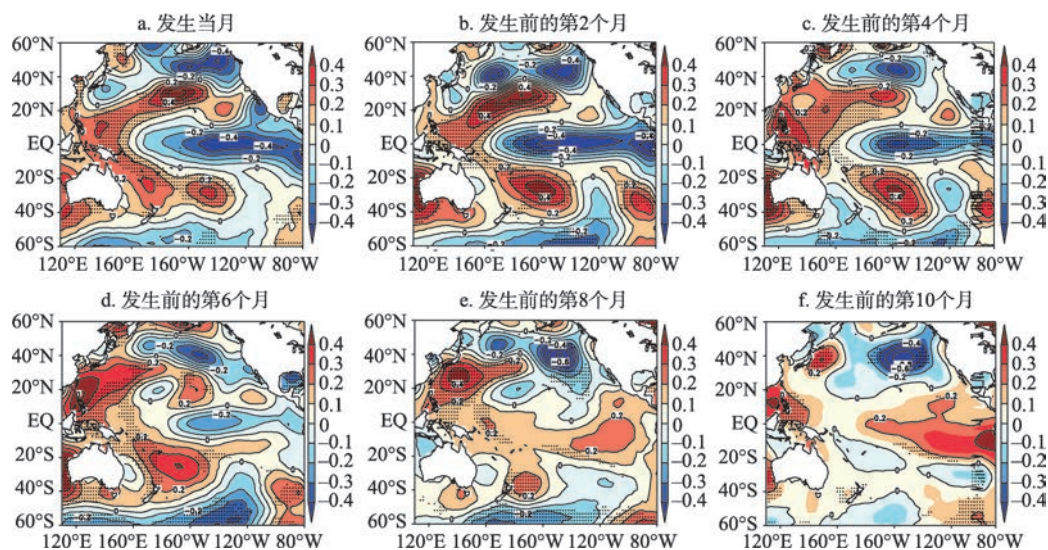


图7 重度旱涝急转事件发生前太平洋SST异常空间分布(°C)(黑点表示超过90%显著性检验区域)

Fig. 7 Spatial distributions of Pacific SST anomalies before severe DWAA events (The dotted regions are for values passing the significant test at 0.1 level.)

低存在一定的关系。

为了全面了解长江中下游流域旱涝急转事件发生前SST异常的情况,本文统计了所有旱涝急转事件发生前的1年内Nino 3.4区域SST的变化情况,统计结果如表5所示。按照国家标准《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法》^[43]的定义,若Nino 3.4区域(5°N~5°S, 170°W~120°W)SST异常值的3个月滑动平均值达到或超过0.5℃、且持续至少5个月,判定为一次厄尔尼诺事件;3个月滑动平均值达到或低于-0.5℃、且持续至少5个月,则判定为一次拉尼娜事件。可以看出,旱涝急转事件发生前Nino 3.4区域SST发生异常偏

低 (La Niña、SST 异常值持续 12 个月 < 0) 现象的事件所占比例较大, 为 52.83%, 而出现 SST 异常偏高 (El Niño、SST 异常值持续 12 个月 > 0) 现象的事件仅占有所有事件的 22.22%, 说明长江中下游流域夏季旱涝急转事件容易在 Nino 3.4 区域 SST 持续异常偏低的情况下发生, 该结论与图 5~图 7 表述一致。

5.2 旱涝急转事件前期 El Niño / La Niña 事件统计

由图 3a 可知, 1988 年、2000 年和 2011 年长江中下游流域发生旱涝急转事件的范围广、强度大, 是 1960 年以来发生旱涝急转事件最严重的 3 个年份, 而这 3 年恰好处于 La Niña 年间。为了讨论旱涝急转事件与 La Niña 现象的关系, 本文统计了在 La Niña 现象过程中及结束后 8 个月时间段内旱涝急转事件的发生数量, 以及这些事件发生前 Nino 3.4 区域 SST 最冷月份的分布情况, 结果如表 6 所示。可以看出, 长江中下游流域 75 个站点共有 181 次旱涝急转事件发生在 La Niña 现象衰亡期或结束后的 8 个月内, 占有所有事件的 41.04%, 其中有 120 次事件发生在 Nino 3.4 区域 SST 最冷月份之后的第 4~6 个月时间范围内。另外, 旱涝急转事件强度等级越高, 发生在 La Niña 现象后 8 个月内的事件次数占该等级事件次数的比例越大, 且 Nino 3.4 区域 SST 最冷月份处于旱涝急转事件发生前的第 4~6 个月的比例也越大。本文还统计出有 62 次旱涝急转事件前 1 年内发生过 El Niño 现象, 其中轻度、中度和重度事件发生次数分别为 54 次、6 次和 2 次, 所占比例较小, 且不存在明显规律。以上表明, La Niña 现象对旱涝急转事件在发生时间上具有一定的先兆作用, 旱涝急转事件强度越高, 其发生在 La Niña 现象后期的可能性越大。

5.3 DWAAI 与前期 SST 异常的相关性分析

为了更清楚地了解旱涝急转事件的强度与事件发生前 Nino 3.4 区域 SST 异常偏冷程度的关系, 本文计算了流域不同分区的旱涝急转事件的 DWAAI 值与事件发生前 Nino 3.4 区域 SST 异常值的相关系数。由表 7 可知, 除了汉江水系的 DWAAI 与前期第 1~6 个月的 SST 异常值存在正相关性外, 流域其他地区均存在负相关关系。从流域整体来看, 流域内所有站点的 DWAAI 与前期第 1~6 个月的 SST 异常值均具有显著的负相关性, 通过了信度水平 0.05 的检验, 其中前期第 3 个月负相关性最大, 且随着前期时间间隔越长, 相关性逐渐减弱。从各分区来看, 鄱阳湖水系站点的 DWAAI 与前期 SST 异常值的负相关性最强, 前期第 2~6 个月相关性甚至通过了信度水平 0.01 的检验, 其中前期第 3 个月负相关性

表 5 旱涝急转事件发生前的 1 年内 Nino 3.4 区域 SST 异常情况

Tab. 5 Abnormal conditions of SST in Nino3.4 region within 1 year before DWAA events		
SST 异常类型	发生次数	所占比例(%)
La Niña 现象	181	41.04
SST 异常值持续 < 0 (未生成 La Niña 现象)	52	11.79
El Niño 现象	62	14.06
SST 异常值持续 > 0 (未生成 El Niño 现象)	36	8.16
其他	110	24.95

表 6 La Niña 现象衰亡期或结束后 8 个月内发生旱涝急转事件统计

Tab. 6 Statistics of DWAA events that occurred during decline stages of La Niña or within the first 8 months after La Niñas ended

事件强度	发生次数	事件发生前 Nino3.4 区域 SST 最冷月份								总次数	所占比例(%)
		前第 1 个月	前第 2 个月	前第 3 个月	前第 4 个月	前第 5 个月	前第 6 个月	前第 7 个月	前第 8 个月及以上		
轻度	330	4	4	1	19	32	20	18	18	116	35.15
中度	74	2	1	0	16	14	2	2	6	43	58.11
重度	37	1	0	0	6	8	3	1	3	22	59.46
全部	441	7	5	1	41	54	25	21	27	181	41.04

表7 长江中下游流域不同分区的DWAAI与事件发生前Nino3.4区域SST异常值的相关系数

Tab. 7 Correlations between DWAAIs and SST anomalies in Nino3.4 region before DWAA events in different sub-basins

二级分区	事件次数	事件发生前的 第1个月	事件发生前的 第2个月	事件发生前的 第3个月	事件发生前的 第4个月	事件发生前的 第5个月	事件发生前的 第6个月
汉江水系	103	0.06	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00
洞庭湖水系	144	-0.06	-0.04	-0.06	-0.05	-0.07	-0.06
鄱阳湖水系	80	-0.23	-0.31	-0.39	-0.38	-0.37	-0.34
中游干流区间	47	-0.44	-0.42	-0.36	-0.23	-0.20	-0.18
下游干流区间	47	-0.21	-0.20	-0.24	-0.26	-0.22	-0.20
三角洲平原区	20	-0.19	-0.20	-0.26	-0.24	-0.22	-0.25
全流域	441	-0.12	-0.12	-0.15	-0.14	-0.14	-0.12

注：下划线加粗的相关系数代表通过95%的显著性检验。

最大，值为-0.39；中游干流区间站点的DWAAI与前期第1~3个月的SST异常值也存在显著的负相关性，其中前期第1个月负相关性最大，值为-0.44；下游干流区间和三角洲平原区的相关性较弱，处于-0.26~-0.19之间，未通过显著性检验；汉江水系和洞庭湖水系相关性最弱，相关系数绝对值均小于0.1。以上说明，流域内旱涝急转事件在强度上，与事件发生前Nino 3.4区域SST异常值存在显著的负相关性，其中前期的第3个月负相关性最大。鄱阳湖水系和中游干流区间站点的负相关性最强，汉江水系和洞庭湖水系相关性最弱。

由于不同分布型El Niño/La Niña事件的SST演变及后期的发展具有较为明显的差异，次年夏季中国降水分布可能会完全不同^[44]，本文还根据《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法》^[43]计算了东部型和中部型El Niño/La Niña指数 (I_{EP} 、 I_{CP})，并分析DWAAI值与事件发生前6个月 I_{EP} 、 I_{CP} 的相关性，结果如表8所示。从流域整体来看，流域内所有站点的DWAAI与前期第1~5个月的中部型指数 I_{CP} 具有显著的负相关性，通过了信度水平0.05的检验，其中前期第2个月负相关性最大；DWAAI与前期东部型指数 I_{EP} 的相关性较弱。从各分区来看，不同分区的DWAAI与 I_{EP} 、 I_{CP} 的相关性和表7所示的相关性大致相同。值得注意的是，由表7可知，下游干流区间和三角洲平原区站点的DWAAI与前期SST异常值的相关性未通过显著性检验，然而下游干流区间站点的DWAAI与前期第3个月的 I_{EP} 、前期第2个月的 I_{CP} 的相关系数分别为-0.39和-0.30，三角洲平原区站点的DWAAI与前期第2个月的 I_{CP} 的相关系数为-0.43，均通过了信度水平0.05的检验。因此可对DWAAI与前期太平洋SST异常的相关性研究起到参考作用。

6 结论

基于长江中下游流域75个雨量站的日降水资料，对原有的旱涝急转指数加以改进，对长江中下游流域夏季旱涝急转事件时空演变特征进行了分析，并讨论了旱涝急转事件与事件发生前太平洋海温的关系。主要结论如下：

(1) 改进的日尺度旱涝急转指数DWAAI既可体现事件前后期旱涝差异程度，又考虑了由旱转为涝的快慢程度，与先前的旱涝急转指数相比，能够更全面地反映长江中下游地区夏季旱涝急转事件的发生情况。

(2) 长江中下游流域夏季旱涝急转事件主要发生在5月和6月，且多发生高强度事件；除了7月份发生旱涝急转事件数量和强度有轻微的减小趋势之外，5月、6月和8月份的旱涝急转事件数量和强度均具有逐年增长趋势。

表 8 长江中下游流域不同分区的 DWAAI 与事件发生前东部、中部型 El Niño/La Niña 指数的相关系数

Tab. 8 Correlations between DWAAIs and I_{EP} , I_{CP} before DWAA events in different sub-basins

二级分区	事件 次数	指数类型	事件发生前 的第 1 个月	事件发生前 的第 2 个月	事件发生前 的第 3 个月	事件发生前 的第 4 个月	事件发生前 的第 5 个月	事件发生前 的第 6 个月
汉江水系	103	东部型	0.13	0.12	0.03	0.04	0.05	0.05
		中部型	0.02	0.02	0.03	-0.02	-0.04	-0.04
洞庭湖水系	144	东部型	0.03	0.10	0.04	0.09	0.02	0.01
		中部型	-0.11	-0.13	-0.08	-0.15	-0.16	-0.14
鄱阳湖水系	80	东部型	-0.05	-0.05	-0.12	-0.26	-0.33	-0.28
		中部型	-0.29	-0.41	-0.39	-0.40	-0.22	-0.20
中游干流区间	47	东部型	-0.19	-0.25	-0.39	-0.26	-0.23	-0.27
		中部型	-0.24	-0.30	-0.25	-0.11	-0.08	-0.00
下游干流区间	47	东部型	-0.01	-0.06	-0.13	-0.32	-0.30	-0.25
		中部型	-0.25	-0.23	-0.19	-0.06	-0.07	-0.06
三角洲平原区	20	东部型	0.23	0.20	-0.03	-0.25	-0.23	-0.29
		中部型	-0.37	-0.43	-0.36	-0.12	-0.14	-0.13
全流域	441	东部型	0.01	0.02	-0.05	-0.07	-0.10	-0.09
		中部型	-0.15	-0.18	-0.14	-0.12	-0.10	-0.09

注: 下划线加粗的相关系数代表通过 95% 的显著性检验。

(3) 长江中下游流域夏季旱涝急转事件发生频率空间分布不均匀, 主要发生在汉江水系、中游干流区间、洞庭湖水系北部和鄱阳湖水系西北部地区。另外, 1960 年以来, 长江中下游流域发生旱涝急转事件的范围越来越广, 发生频率和强度具有增长的趋势。

(4) 长江中下游流域夏季旱涝急转事件与事件发生前 Nino 3.4 区域海温持续异常偏低存在一定关系。在发生时间上, La Niña 现象对旱涝急转事件具有一定的先兆作用, 41.04% 的事件发生在 La Niña 现象衰亡期或结束后 8 个月内, 且集中发生在 Nino 3.4 区域海温最冷月份之后的第 4~6 个月; 在事件强度上, 流域内站点的 DWAAI 与事件发生前的 Nino 3.4 区域 SSTa 存在显著的负相关性, 尤其是在鄱阳湖水系和中游干流区间, 二者的负相关性最强, 汉江水系和洞庭湖水系相关性最弱。影响旱涝急转发生发展的大气环流机制十分复杂, 如何更加准确地对事件发生时间和强度进行预测预报值得更深一步研究。

参考文献(References)

- [1] Dai A G, Trenberth K E, Karl T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical. Research. Letters*, 1998, 25(17): 3367-3370.
- [2] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212.
- [3] May W. Variability and extremes of daily rainfall during the Indian summer monsoon in the period 1901-1989. *Global and Planetary Change*, 2004, 44(1-4): 83-105.
- [4] Djebou D C S, Singh V P, Frauenfeld O W. Analysis of watershed topography effects on summer precipitation variability in the southwestern United States. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 838-849.
- [5] Li C H, Li T, Lin A L. Relationship between summer rainfall anomalies and sub-seasonal oscillations in South China. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1-2): 423-439.
- [6] Wang Sheng, Tian Hong, Ding Xiaojun, et al. Climate characteristics of precipitation and phenomenon of drought-flood abrupt alternation during main flood season in Huaihe River Basin. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 31-34. [王胜, 田红, 丁小俊, 等. 淮河流域主汛期降水气候特征及“旱涝急转”现象. *中国农业气象*, 2009, 30(1): 31-34.]
- [7] Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011. *Chinese Journal of*

- Atmospheric Sciences, 2012, 36(5): 1009-1026. [封国林, 杨涵清, 张世轩, 等. 2011 年春夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探. 大气科学, 2012, 36(5): 1009-1026.]
- [8] He Hui, Lu Hong. Characteristics of the sharp turn from drought to flood over Guangxi in summer of 2013. Tropical Geography, 2014, 34(6): 767-775. [何慧, 陆虹. 广西 2013 年夏季旱涝急转特征. 热带地理, 2014, 34(6): 767-775.]
- [9] He Hui, Liao Xueping, Lu Hong, et al. Features of long-cycle drought-flood abrupt alternation in South China during summer in 1961-2014. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 130-141. [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. 地理学报, 2016, 71(1): 130-141.]
- [10] Turner A G, Annamalai H. Climate change and the South Asian summer monsoon. Nature Climate Change, 2012, 2(8): 587-595.
- [11] Sun Peng, Liu Chunling, Zhang Qiang. Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation during main flood season in East River Basin. Pearl River, 2012, 33(5): 29-34. [孙鹏, 刘春玲, 张强. 东江流域汛期旱涝急转的时空演变特征. 人民珠江, 2012, 33(5): 29-34.]
- [12] Luo Wei, Zhang Xiang, Deng Zhimin, et al. Variation of the total runoff into Poyang Lake and drought- flood abrupt alternation during the past 50 years. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 845-856. [罗蔚, 张翔, 邓志民, 等. 近 50 年鄱阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 845-856.]
- [13] Agnese C, Baiamonte G, Cammalleri C. Modelling the occurrence of rainy days under a typical Mediterranean climate. Advances in Water Resources, 2013, 64: 62-76.
- [14] Gitau W, Ogallo L, Camberlin P, et al. Spatial coherence and potential predictability assessment of intraseasonal statistics of wet and dry spells over Equatorial Eastern Africa. International Journal of Climatology, 2013, 33(12): 2690-2705.
- [15] Langousis A, Kaleris V. Statistical framework to simulate daily rainfall series conditional on upper-air predictor variables. Water Resources Research, 2014, 50(5): 3907-3932.
- [16] Huang Ru. Research on evolution and countermeasures of droughts-floods abrupt alternation events in Huaihe River Basin [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2015. [黄茹. 淮河流域旱涝急转事件演变及应对研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.]
- [17] Wu Z W, Li J P, He J H, et al. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoon in the mid- and lower reaches of the Yangtze River. Geophysical Research Letters, 2006, 33(5): L05813.
- [18] Tang Ming, Shao Dongguo, Yao Chenglin. Causes and countermeasures of sudden changing from drought to waterlogging in Huaibei region. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(1): 26-32. [唐明, 邵东国, 姚成林. 沿淮淮东北地区旱涝急转的成因及应对措施. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(1): 26-32.]
- [19] Wu Zhiwei, Li Jingping, He Jinhai, et al. Climate statistical characteristics of the occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in South China. Progress in Natural Science, 2007, 17(12): 1665-1671. [吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 正常季风年华南夏季“旱涝并存、旱涝急转”之气候统计特征. 自然科学进展, 2007, 17(12): 1665-1671.]
- [20] Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al. Relationship between an abrupt drought-flood transition over mid-low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intra-seasonal oscillation over mid- high latitudes of East Asia. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(2): 129-143.
- [21] Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. Large-scale atmospheric singularities and summer long-cycle droughts-floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(14): 1717-1724. [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. 科学通报, 2006, 51(14): 1717-1724.]
- [22] Zhang Ping, Wang Fuhua, Wu Zhonglian, et al. Analysis of types of droughts-floods abrupt alternation in Huaibei Province. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 29(Suppl.1): 139-140, 151. [张屏, 汪付华, 吴忠连, 等. 淮北市旱涝急转型气候规律分析. 水利水电快报, 2008, 29(Suppl.1): 139-140, 151.]
- [23] Ji Zhonghui, Shan Haiyan. Threshold diagnosis and hazard dangerousness evaluation for the disaster of drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1793-1798. [吉中会, 单海燕. 长江中下游地区旱涝急转的阈值诊断及危险性评估. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10): 1793-1798.]
- [24] Li Ming. The causes of abruptly drought-flooding turn in the mid- lower reaches of Yangtze River during spring to summer in 2011 [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2013. [李明. 2011 年春夏季节长江中下游旱涝急转成因分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2013.]

- [25] Dong Zhulei. Effects of the preceding SST and water vapor transport path on the summer precipitation over the Yangtze River Valley [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. [董祝雷. 影响长江流域夏季降水的海温因子及水汽输送路径[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.]
- [26] Luo Shaohua, Jin Zuhui, Chen Lieting. The analysis of correlation between sea surface temperature in the Indian South-China Sea and precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1985, 9(3): 314-320. [罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析. *大气科学*, 1985, 9(3): 314-320.]
- [27] Sun Shuqing, Ma Shujie. Analysis and numerical experiment on the relationship between the 1998 summer monsoon activities and SSTA in tropical regions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(1): 36-52. [孙淑清, 马淑杰. 海温异常对东亚夏季风及长江流域降水影响的分析及数值试验. *大气科学*, 2003, 27(1): 36-52.]
- [28] Hartmann H, Becker S, King L. Predicting summer rainfall in the Yangtze River basin with neural networks. *International Journal of Climatology*. 2008, 28(7): 925-936.
- [29] Li Y, Wang Y F, Dong M. Simulation of the effects of the preceding SST anomalies over the Tropical Eastern Pacific on precipitation to the south of the Yangtze River in June. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 23(6): 691-700.
- [30] Gong Zhensong, He Min. Relationship between summer rainfall in Yangtze River Valley and SSTA of various seasons. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(1): 56-61. [龚振淞, 何敏. 长江流域夏季降水与全球海温关系的分析. *气象*, 2006, 32(1): 56-61.]
- [31] Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2): 231-241. [刘舸, 张庆云, 孙淑清. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系. *大气科学*, 2008, 32(2): 231-241.]
- [32] Wang Feng, Sun Jilin, Wu Dexing. Characteristics of drought-floods switch in the lower and middle reaches of Yangtze River in late spring and early summer of 2011. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(3): 10-16. [王凤, 孙即霖, 吴德星. 2011 年春夏长江中下游旱涝急转特征及原因分析. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(3): 10-16.]
- [33] Ma Penghui, Yang Yanjun, Liu Tiejun. Cause analysis for the sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 2011. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2014, 37(3): 1-6. [马鹏辉, 杨燕军, 刘铁军. 2011 年长江中下游地区旱涝急转成因分析. *气象与减灾研究*, 2014, 37(3): 1-6.]
- [34] Li Xun, Yuan Dongmin, Yin Zhicong, et al. Preliminary analysis of sudden turn of drought and flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 2011. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(1): 41-50. [李迅, 袁东敏, 尹志聪, 等. 2011 年长江中下游旱涝急转成因初步分析. *气候与环境研究*, 2014, 19(1): 41-50.]
- [35] Shen Baizhu, Zhang Shixuan, Yang Hanwei, et al. Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 109202. [沈柏竹, 张世轩, 杨涵洧, 等. 2011 年春夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析. *物理学报*, 2012, 61(10): 109202.]
- [36] Shan Lijie, Zhang Liping, Chen Xinchu, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12): 2100-2107. [闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(12): 2100-2107.]
- [37] Cheng Zhi, Ding Xiaojun, Xu Min, et al. Climate characters of typical droughts-floods abrupt alternation events in the middle-lower reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(Z2): 115-120. [程智, 丁小俊, 徐敏, 等. 长江中下游地区典型旱涝急转气候特征研究. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(Z2): 115-120.]
- [38] Zhang Shuifeng, Zhang Jinchi, Min Junjie, et al. Drought-flood abrupt alternation based on runoff in the Huaihe River Basin during rainy season. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(5): 679-686. [张水锋, 张金池, 闵俊杰, 等. 基于径流分析的淮河流域汛期旱涝急转研究. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 679-686.]
- [39] Maheras P, Xoplaki E, Kutiel H. Wet and dry monthly anomalies across the Mediterranean Basin and their relationship with circulation, 1860-1990. *Theoretical Applied Climatology*, 1999, 64: 189-199.
- [40] McQuigg J. A simple index of drought conditions. *Weatherwise*, 1954, 7(3): 64-67.
- [41] Lu E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L12707.
- [42] Tan Jun, Zhou Faxiu, Hu Dunxin, et al. The correlation between SST anomaly in the South China Sea and ENSO.

- Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(4): 377-382. [谭军, 周发琇, 胡敦欣, 等. 南海海温异常与 ENSO 的相关性. 海洋与湖沼, 1995, 26(4): 377-382.]
- [43] QX/T 370-2017. Identification Standard for El Niño/La Niña Events. [QX/T 370-2017. 厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法.]
- [44] Yuan Yuan, Yang Hui, Li Chongyin. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following-summer precipitation in China. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 467-478. [袁媛, 杨辉, 李崇银. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响. 气象学报, 2012, 70(3): 467-478.]

Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO

SHAN Lijie¹, ZHANG Liping^{1,2}, ZHANG Yanjun¹, SHE Dunxian¹, XIA Jun¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Tourism Culture and Geographical Science, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, Hubei, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data from 75 rainfall gauging stations covering 1960-2015 in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, we analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of dry-wet abrupt alternation (DWAA) events during the summer (from May to August) and its relationship with ENSO by defining the daily scale dry-wet abrupt alternation index (DWAAI) based on the modification of original index. The results showed that: (1) Modified DWAAI, which was defined by taking into account the differences of dry-wet degree between the earlier and later periods as well as how slowly or quickly the process changes from dry to wet in the abrupt alteration period, could be used to identify DWAA events accurately and effectively. (2) On the whole, areas where DWAA events occurred had expanded gradually since 1960. Meanwhile, the frequencies and intensities of such events had gradually increased over time. DWAA events mainly occurred in May-June, and the Hanjiang River watershed sub-basin, the middle reaches of the Yangtze River, the northern Dongting Lake watershed sub-basin and the northwestern Poyang Lake watershed sub-basin were high-incidence areas of such events. (3) There were some relationships between DWAA events and phenomena of continuously low SST in Nino3.4 region before such events occurred. Specifically, La Niña early-warning reacted to the occurrence of DWAA events. About 41.04% of such events occurred during decline stages of La Niña or within the first 8 months after La Niña ended. In terms of intensity, there were significant negative correlations between DWAAI at all the stations and SST anomalies in Nino 3.4 region within 6 months before DWAA events occurred, especially in the Poyang Lake watershed sub-basin and the middle reaches of the Yangtze River. The conclusions indicated that these methods and results were meaningful for the fighting against drought and flood in the Yangtze River Basin.

Keywords: dry-wet abrupt alternation; the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin; spatial-temporal evolution characteristics; La Niña